

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS -EESC  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

MOISÉS FURTADO FAILACHE

**Proposta de procedimentos para a estimativa da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial baseada em dados geológicos, geotécnicos, de uso e ocupação e eventos de chuva**

**Volume I**

São Carlos

2018



MOISÉS FURTADO FAILACHE

**Proposta de procedimentos para a estimativa da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial baseada em dados geológicos, geotécnicos, de uso e ocupação e eventos de chuva**

**Volume I**

Versão corrigida

Original encontra-se disponível na unidade que aloja o programa

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Titular Lázaro Valentin Zuquette

São Carlos

2018

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

F161p Failache, Moisés Furtado  
Proposta de procedimentos para a estimativa da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial baseada em dados geológicos, geotécnicos, de uso e ocupação e eventos de chuva / Moisés Furtado Failache; orientador Lázaro Valentin Zuquette. São Carlos, 2018.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Geológico-geotécnico. 2. Modelo de Infiltração. 3. Tipo de uso e manejo do solo. 4. Planejamento territorial. 5. São Carlos e Araraquara no estado de São Paulo. 6. Brasil. I. Título.



## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **MOISÉS FURTADO FAILACHE.**

Título da Tese: "Proposta de procedimentos para a estimativa, da infiltração potencial e do escoamento superficial hortoniano potencial baseada em dados geológicos, geotécnicos, de uso e ocupação e eventos de chuva".

Data da defesa: 13/04/2018.

### Comissão Julgadora:

Prof. Titular. **Lázaro Valentin Zuquette**  
**Orientador**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Rogério Pinto Ribeiro**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Alberto Pio Fiori**  
(Universidade Federal do Paraná/UFPR)

Profa. Dra. **Katia Vanessa Bicalho**  
(Universidade Federal do Espírito Santo/UFES)

Prof. Dr. **Edilson Pissato**  
(Instituto de Geociências/IG-USP)

### Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADA

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:  
Prof. Dr. **Edmundo Rogério Esquivel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**



## AGRADECIMENTOS

Aos meu pais e irmão que mesmo longe me motivaram em todos os instantes nessa árdua e longa jornada e entenderam as minhas faltas e momentos de ausência.

Agradeço especialmente a Tatiane por estar sempre ao meu lado, tanto nas horas boas como nas ruins e por todo amor, companheirismo, carinho, apoio, compreensão, incentivo e dedicação. Sem você o caminho trilhado teria sido muito mais difícil.

Aos meus tios Silvia e Maurício (*in memoriam*), e primos Antônio e Mauricio por estarem ao meu lado e terem me acolhido de forma tão amorosa em sua casa em São Carlos.

Ao Prof. Dr. Lázaro Zuquette pela amizade, compreensão, dedicação, conselhos, momentos de descontração e paciência na orientação deste trabalho.

Ao Ademar, Marcão e o Zé pela ajuda nos trabalhos de campo.

Aos técnicos de laboratório Décio, Zé Luís, Ditão e em especial ao Seu Antônio por toda a sua presteza e ajuda na realização dos ensaios laboratoriais.

Ao Oscar por ser mais que um técnico e sim um grande amigo que me ajudou e aconselhou em tantas ocasiões.

Aos professores, demais funcionários e colegas do departamento de Geotecnia que de alguma forma colaboraram com o desenvolvimento desta tese.

A Universidade de São Paulo e ao Departamento de Geotecnia que me proporcionaram a estrutura necessária para realização a elaboração desta tese.

Aos amigos de Mapeamento Monique, Ana Paula, Ana Claudia, Bianca, Lucas, Lili, Claudinha, Camila, Maria Paula, Bruno, Tálita e Liana pela ajuda, discussões científicas ou não, companheirismo, tardes gastronômicas e momentos descontraídos ao longo dessa empreitada.

Aos amigos de longa data Emma, Glórgia, Aninha, Brenda, Renatão, Shai, Bianca, Brennda e Ernesto, que mesmo distantes, sempre estiveram comigo em pensamento, me incentivando a seguir sempre em frente:

Aos bons amigos conquistados em São Carlos pela amizade e pelos bons momentos vividos ao longo desses anos: Vagnão e companhia, Guido, Kate, Sérgio, Juliana, Julieth, Zorany, Ademir, Bia Segadilha, Mayara, Johny, Cintia, Luana, Lica e Marina.

A CAPES e FAPESP pelo apoio financeiro da pesquisa.

Enfim agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso desse doutorado.



*Alguns homens veem as coisas como são, e dizem 'Por quê?' Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo 'Por que não?'*

*George Bernard Shaw*



## RESUMO

FAILACHE, Moisés Furtado. **Proposta de procedimentos para a estimativa da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial baseada em dados geológicos, geotécnicos, de uso e ocupação e eventos de chuva.** 2018. 330 f. Tese (Doutorado) –Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2018.

O objetivo desta tese foi propor um conjunto de procedimentos para a obtenção de dados geológico-geotécnicos e de usos e manejo do solo, afim de estimar e analisar de forma integrada a infiltração potencial e a geração de escoamento superficial Hortoniano potencial de uma região. As regiões estudadas compreenderam as folhas do IBGE de São Carlos e Araraquara, localizadas no centro leste do Estado de São Paulo. O método utilizado englobou: mapeamento geológico-geotécnico dos materiais geológicos; elaboração de modelos geológicos estruturados 3D; seleção dos eventos de chuvas; caracterização físico química das águas subsuperficiais; trabalhos de campo; ensaios laboratoriais e *in situ*; aplicação de funções de pedotransferência. A partir destes procedimentos estabeleceu-se às diversas condições de infiltração e caracterizou-se a variabilidade geológico e geotécnica dos materiais geológicos, que permitiu selecionar os parâmetros mais adequados e integra-los no modelo de infiltração de Chu (1978). Os resultados da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial gerado variaram significativamente em função das características geológico-geotécnicas dos materiais geológicos e dos tipos de eventos de chuva. As 65 unidades de condição de infiltração obtidas foram classificadas com base nas curvas de infiltração e nos valores de infiltração potencial em 5 grupos com características distintas. Ao associar estes grupos a região de estudo, foi possível identificar as principais áreas potenciais de infiltração e geração de escoamento superficial Hortoniano, bem como compreender a sua relação com funções ambientais associadas a dinâmica de água. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que é fundamental caracterizar adequadamente à variabilidade geológico-geotécnica dos materiais geológicos para estimar confiavelmente a infiltração potencial. A caracterização deve considerar os diversos métodos de obtenção de dados, tais como ensaios de laboratório e *in situ*, e aplicação de funções de pedotransferência. Em estudos relacionados à dinâmica de água é essencial realizar a integração de diferentes dados e considerar a sazonalidade dos tipos de uso e manejo e das chuvas. A sistemática proposta permitiu analisar de forma simples, quantitativa e adequada a infiltração e a geração escoamento superficial Hortoniano, a qual constitui-se como uma ferramenta apropriada para o planejamento territorial regional e o gerenciamento de recursos hídricos.

**Palavras chaves:** Geológico-geotécnico; Modelo de Infiltração; Tipo de uso e manejo do solo; Planejamento territorial; São Carlos e Araraquara no estado de São Paulo; Brasil.

## ABSTRACT

FAILACHE, Moisés Furtado. **Proposal of procedures for potential infiltration and Hortonian overland flow estimation based on geological, geotechnical, land uses and rainfall events data.** 2018. 330 f. Thesis (Doctorate) – São Carlos Engineering School, University of São Paulo, 2018.

The objective of this thesis was to propose a set of procedures to obtain geological and geotechnical and land uses data, and integrate them in order to estimate and analyze the potential infiltration and Hortonian overland flow of a region. The study regions included the IBGE sheets from São Carlos and Araraquara, located in the centre east portion of São Paulo State-Brazil. The used methods included engineering geological mapping; elaboration of structured 3D geological models; selection of rainfall events; chemical and physical characterization of groundwater; fieldwork; laboratory and in situ tests and application of pedotransfer functions. From these procedures, the various infiltration conditions were defined and the geological and geotechnical variability of the geological materials was characterized, which permitted to select the most adequate parameters and integrating them into Chu (1978) infiltration model. The potential infiltration and Hortonian overland flow varied significantly, depending on the geological and geotechnical characteristics of the geological materials and rainfall event types. The 65 infiltration condition units obtained were classified based on the infiltration curves and potential infiltration values into 5 groups with different characteristics. By associating these groups with the study regions, it was possible to identify the main potential areas of infiltration and generation of Hortonian overland flow, as well as to understand its relation with environmental functions associated with water dynamics. Based on the results, it is concluded that it is essential to characterize adequately the geological and geotechnical variability of geological materials to estimate reliably the potential infiltration. The characterization should take into account the whole variety of data obtaining methods, such as laboratory and in situ tests, and application of pedotransfer functions. In studies related to water dynamics, it is fundamental to integrate different data and to consider the seasonality of land uses and management practices and rainfall event types. The proposed set of procedures permitted to analyze in a simple, quantitative and appropriate way the potential infiltration and the generation of the Hortonian overland flow, constituting an appropriate tool for regional territorial planning and water management.

**Keywords:** Geological and geotechnical; Infiltration model; Land uses and management practices; territorial planning; São Carlos and Araraquara in state of São Paulo; Brazil.



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rightarrow$ $q$	Densidade de fluxo
A	Área do Anel interno do ensaio de duplo anel
AV	Armazenamento de água na zona vadosa
b	Parâmetro de ajuste da curva de retenção de água de Campbell (1974)
CC	Capacidade de campo
CI	Capacidade de infiltração
$C_p$	Indicador da condição de saturação do 2 estágio do modelo de Chu (1978)
$C_u$	Indicador da condição de saturação do 1 estágio do modelo de Chu (1978)
D	Difusividade
e	Índice de vazios
EP	Escoamento superficial potencial Hortoniano
Evt	Evapotranspiração
$F(t_n)$	Infiltração acumulada no intervalo t
$F_p$	Infiltração acumulada quando o solo está saturado
H	Carga Hidráulica
h	<i>Pressure head</i>
$H_o$	Espessura da zona saturada antes do bombeamento
$H_1$	Profundidade inicial da água no anel
$H_2$	Profundidade da água no anel depois de um tempo
$h_{ce}$	Sucção na frente de molhamento ou capilaridade efetiva
$h_s$	Sucção na superfície
I	Infiltração acumulada
i	intensidade da chuva
IP	Infiltração potencial
K	Condutividade Hidráulica
$K(\theta)$	Condutividade hidráulica não saturada
$K_{fs}$	Condutividade hidráulica saturada de campo
$K_s$	Condutividade hidráulica saturada
m	Parâmetro de ajuste da curva de retenção de água de Van Genuchten (1980)
ME	Umidade equivalente
n	Porosidade

n	Parâmetro de ajuste da curva de retenção de água de Van Genuchten (1980)
P	Chuva
P(t <sub>n</sub> )	Precipitação acumulada
PI	Potencial de Infiltração
PM	Ponto de murchamento
P <sub>tp</sub>	Infiltração acumulada até o momento do ponding
q	Densidade de fluxo
Q	Vazão
Q <sub>p</sub>	Vazão máxima de bombeamento do poço
R	Escoamento superficial
R(t <sub>n</sub> )	Escoamento superficial acumulado no intervalo.
R(t <sub>n-1</sub> )	Escoamento superficial acumulado no intervalo anterior
Ra	Chuva total
RE	Recarga efetiva
S	Diferença entre a capilaridade efetiva antes e depois da saturação
SG	Escoamento de base
SR	Escoamento subsuperficial
T	Ajuste temporal no intervalo t
t	tempo
t <sub>0</sub>	Tempo inicial da chuva
t <sub>f</sub>	Tempo final da chuva
TI	Taxa de infiltração
t <sub>n</sub>	Tempo do intervalo
t <sub>p</sub>	Tempo de <i>ponding</i>
t <sub>s</sub>	Pseudo tempo (ajuste de escala temporal)
V <sub>f</sub>	Volume de água infiltrada no ensaio de duplo anel
X	Subparâmetros da função de pedotransferência de Tomassela <i>et al</i> (2004)
Z	Subparâmetros da função de pedotransferência de Tomassela <i>et al</i> (2004)
Z <sub>w</sub>	Profundidade da frente de molhamento

#### Letras Gregas

ΔS	Variação no armazenamento superficial de água
μ	Potencial Químico
α	Parâmetro de ajuste da curva e Van Genuchten

$\gamma$	Peso específico de campo
$\gamma_d$	Peso específico seco
$\gamma_s$	Peso específico dos sólidos
$\theta$	Conteúdo de água volumétrico.
$\theta_i$	Conteúdo volumétrico de água inicial
$\theta_r$	Conteúdo volumétrico de água residual
$\theta_{rw}$	Conteúdo volumétrico de água residual da curva de retenção de umedecimento
$\theta_s$	Conteúdo volumétrico de água Saturado
$\theta_{sw}$	Conteúdo volumétrico de água Saturado da curva de retenção de umedecimento
$\theta_t$	Conteúdo volumétrico de água da zona de transmissão
$\theta_{pm}$	Conteúdo volumétrico de água no ponto de murchamento
$\theta_{cc}$	Conteúdo volumétrico de água na capacidade de campo
$\theta_w$	Conteúdo volumétrico de água que o solo atinge durante a infiltração
$\rho$	Massa específica de campo
$\rho_d$	Massa específica seca de campo
$\rho_s$	Massa específica dos sólidos
$\phi$	Potencial total;
$\phi_m$	Potencial mátrico;
$\phi_o$	Potencial osmótico
$\phi_p$	Potencial de pressão
$\phi_z$	Potencial gravitacional
$\psi$	Sucção total
$\psi_b$	Sucção na entrada de ar
$\psi_{bm}$	Sucção na entrada de ar da curva de umedecimento
$\psi_f$	Sucção na frente de molhamento
$\psi_m$	Sucção mátrica
$\psi_s$	Sucção na superfície
$\psi_o$	Sucção osmótica



## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	19
CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS .....	21
2.1. Objetivo geral.....	21
2.2. Objetivos específicos.....	21
CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1. Ciclo hidrológico.....	23
3.2. Dinâmica de água no solo .....	24
3.2.1. Potenciais de água .....	24
3.2.2. Curva de retenção de água .....	26
3.2.3. Condutividade hidráulica.....	31
3.3. Relação Chuva x Infiltração x Escoamento .....	33
3.4. Modelos de infiltração-escoamento .....	40
3.4.1. Considerações gerais .....	40
3.4.2. Modelos de infiltração .....	41
3.5. Métodos de caracterização e obtenção dos parâmetros de infiltração.....	49
3.5.1. Determinação da capilaridade efetiva e conteúdo volumétrico de água.....	49
3.5.2. Determinação da condutividade hidráulica saturada.....	57
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS .....	61
4.1. Área de estudo.....	61
4.1.1. Localização e aspectos demográficos .....	61
4.1.2. Clima .....	63
4.1.3. Vegetação.....	64
4.1.4. Águas subterrâneas .....	64
4.1.5. Geomorfologia .....	64
4.1.6. Substrato rochoso.....	65
4.1.7. Materiais inconsolidados .....	71
4.1.8. Uso e ocupação .....	71
4.2. Materiais e métodos .....	72
4.2.1. Levantamento bibliográfico .....	77
4.2.2. Modelo conceitual .....	77
4.2.3. Modelos físico-matemático.....	78
4.2.4. Levantamento e avaliação dos dados preexistentes .....	84
4.2.5. Processamento dos dados .....	85
4.2.6. Documentos cartográficos gerados.....	86

4.2.7. Modelo geológico estruturados 3D .....	96
4.2.8. Caracterização geológico e geotécnica das unidades de condição de infiltração .....	110
4.2.9. Trabalhos de campo .....	111
4.2.10. Trabalhos de laboratório.....	116
4.2.11. Aplicação de função de pedotransferência (FPT).....	124
4.2.12. Seleção e análise dos eventos de chuvas típicos .....	129
4.2.13. Potencial de infiltração e escoamento superficial.....	130
4.2.14. Planilhas elaboradas .....	131
4.2.15. Integração dos dados.....	139
<b>CAPÍTULO 5- RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>143</b>
5.1. Caracterização das chuvas .....	143
5.2. Caracterização dos usos e manejo do solo.....	147
5.2.1. Usos do solo em São Carlos .....	147
5.2.2. Usos do solo em Araraquara.....	148
5.3. Caracterização dos materiais geológicos, das condições de infiltração e das águas subsuperficiais .....	149
5.3.1. Substrato rochoso da região de São Carlos e Araraquara, SP.....	149
5.3.2. Modelo geológico 3D .....	150
5.3.3. Materiais inconsolidados e caracterização das unidades de condição de infiltração .....	183
5.3.4. Análises físico químicas das águas subsuperficiais .....	249
5.4. Infiltração e geração de escoamento superficial Hortoniano.....	266
5.4.1. Parâmetros do solo adotados para a estimativa da infiltração .....	266
5.4.2. Infiltração potencial e escoamento superficial Hortoniano potencial gerado .....	270
5.4.3. Zoneamento da infiltração potencial do escoamento superficial Hortoniano .....	292
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>313</b>
6.1. Modelo geológico 3D .....	313
6.2. Caracterização físico químicas das águas subsuperficiais.....	313
6.3. Variabilidade e caracterização dos materiais geológicos .....	314
6.4. Parametização, modelo de infiltração e estimativa da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano .....	316
6.5. Zoneamento da infiltração e do escoamento superficial Hortoniano .....	317
6.6. Análise integrada dos dados .....	318
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>319</b>

## **APÊNDICES**

APÊNDICE I - Mapa de documentação da Folha de São Carlos

APÊNDICE II-Mapa de documentação da Folha de Araraquara

APÊNDICE III-Mapa de uso do solo da folha de São Carlos

APÊNDICE IV-Mapa de uso do solo da folha de São Araraquara

APÊNDICE V-Mapa de substrato rochoso da folha de São Carlos

APÊNDICE VI-Mapa de substrato rochoso da folha de Araraquara

APÊNDICE VII-Base de dados de poços da folha de São Carlos

APÊNDICE VIII-Base de dados de poços da folha de Araraquara

APÊNDICE IX-Modelo geológico 3D e perfis geológicos da folha de São Carlos

APÊNDICE X-Modelo geológico 3D e perfis geológicos da folha de Araraquara

APÊNDICE XI- Mapa de materiais inconsolidados da folha de São Carlos

APÊNDICE XII-Mapa de materiais inconsolidados da folha de Araraquara

APÊNDICE XIII-Mapa da área de contribuição e localização das fontes e poços amostrados

APÊNDICE XIV-Infiltração acumulada-ponto de murchamento

APÊNDICE XV-Infiltração acumulada-capacidade de campo

APÊNDICE XVI-Mapas de unidades de condição de infiltração da folha de São Carlos

APÊNDICE XVII-Mapas de unidades de condição de infiltração da folha de Araraquara

APÊNDICE XVIII-Cenário 1 do zoneamento da infiltração da folha de São Carlos

APÊNDICE XIX-Cenário 2 do zoneamento da infiltração da folha de São Carlo

APÊNDICE XX-Diferença da infiltração entre as duas umidades iniciais adotadas da folha de São Carlos-cenário 1

APÊNDICE XXI-Diferença da infiltração entre as duas umidades iniciais adotadas da folha de São Carlos-cenário 2

APÊNDICE XXII-Cenário 1 do zoneamento da infiltração da folha de Araraquara

APÊNDICE XXIII-Cenário 2 do zoneamento da infiltração da folha de Araraquara

APÊNDICE XXIV-Diferença da infiltração entre as duas umidades iniciais adotadas da folha de Araraquara-Cenário 1

APÊNDICE XXV-Diferença da infiltração entre as duas umidades iniciais adotadas da folha de Araraquara-cenário 2



## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

A infiltração é um processo chave no ciclo hidrológico que controla e separa a água da chuva infiltrada daquela disponível para o escoamento superficial. O controle e a separação da água infiltrada e da escoada estão em função principalmente da intensidade da chuva e das características da camada superficial dos materiais geológicos, representadas na forma de taxa de infiltração. Se a intensidade da chuva for inferior à taxa de infiltração, toda a água irá infiltrar. Todavia, se a intensidade da chuva for superior a taxa de infiltração, parte estará na superfície disponível para o escoamento superficial e o restante irá infiltrar. Este mecanismo de geração de escoamento superficial é conhecido como escoamento superficial Hortoniano, o qual é definido como parte do escoamento que é originado da chuva que não consegue infiltrar no solo e flui sobre a superfície do terreno podendo ou não alcançar os canais de drenagens.

Nas últimas décadas, as camadas mais superficiais e as propriedades dos materiais geológicos têm sido alteradas consideravelmente pelas atividades antropogênicas. Esta modificação tem impactado diretamente às taxas de infiltração, conseqüentemente resultando no desequilíbrio da razão entre a infiltração e o escoamento superficial Hortoniano. Por conta desse desequilíbrio, tem-se observado um aumento da ocorrência de inundações e processos erosivos acelerados, bem como a redução das taxas de recarga dos mananciais subterrâneos.

Desse modo, para o planejamento territorial e o gerenciamento dos recursos hídricos eficiente é necessário obter informações adequadas sobre as condições ambientais que controlam os processos de infiltração e de geração de escoamento superficial Hortoniano. Essas informações estão associadas à variabilidade dos materiais geológicos e as suas características geológico-geotécnicas, as chuvas e aos tipos de usos e manejos. A avaliação correta desses aspectos é fundamental, pois permite compreender e quantificar de forma adequada a infiltração e o escoamento superficial Hortoniano potencial frente a eventos de chuva.

Entretanto, diversas lacunas foram identificadas em estudos de estimativas de infiltração com enfoque no gerenciamento dos recursos hídricos e, que os resultados possam suprir as demandas de dados para o planejamento territorial, principalmente referentes à: distribuição espacial dos materiais geológicos e a sua caracterização em termos da variabilidade geológico e geotécnica, assim como, a escolha do método mais apropriado para determiná-la; transiência da chuvas e sazonalidade dos manejos; seleção de modelos de infiltração adequados; e integração dos diferentes dados para estimar a infiltração potencial e a geração de escoamento superficial Hortoniano potencial.

As propriedades geológico-geotécnicas podem apresentar uma variabilidade expressiva, principalmente na camada mais superficial, devido às diversas combinações de materiais

geológicos, tipos de uso e manejo, que conferem condições de infiltração distintas daquelas em condições ambientais naturais. A caracterização adequada da variabilidade dos materiais geológicos e de suas propriedades depende diretamente dos métodos utilizados. Entretanto existe uma grande quantidade de métodos, os quais estão associados às diversas condicionantes de aplicação, que dificulta a escolha dos mais apropriados para a estimativa com qualidade da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial.

Em termos dos tipos de uso e manejo e as chuvas, observou-se que os estudos com enfoque no planejamento territorial, consideram apenas o tipo de uso e não levam em consideração a sazonalidade do manejo, a qual pode afetar consideravelmente a infiltração por conta da alteração das características geológico-geotécnica dos materiais geológicos. Além disso, verificou-se que as chuvas normalmente são tratadas de chuvas diárias, mensais e anuais. Contudo, muito dos processos e fenômenos que envolvem ou estão interligados à relação infiltração-escoamento superficial, ocorrem em chuvas de curta duração e condição de transiência variada, como as inundações do tipo *flash* e os processos erosivos acelerados.

Os modelos de infiltração, assim como os métodos de caracterização da variabilidade dos materiais geológicos, apresentam uma vasta quantidade de procedimentos, os quais foram elaborados para diferentes condições e aplicações. Desse modo, para selecionar o mais apropriado é essencial avalia-los frente à facilidade e ao custo de aplicação para escalas regionais, as condições de contorno, bem como os problemas a serem considerados tanto para execução quanto para obtenção dos dados.

A combinação dos dados está associada ao fato que foram encontrados poucos estudos, por exemplo, os propostos por Palma (2004) e Fagundes (2010), os quais contemplem dados de eventos de chuva, de uso e manejo e da variabilidade geológico geotécnicas dos materiais geológicos que visem as estimativas temporalmente e espacialmente da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial.

Baseado no exposto, justificou-se o desenvolvimento de uma pesquisa, no sentido de obter como resultado final, a proposição de procedimentos que envolvem trabalhos de campo e laboratoriais, os quais permitam a combinação de dados de chuva, de usos e manejos, materiais geológicos e suas características geológicas e geotécnicas para estimativa da infiltração potencial em relação à eventos de chuva. Além disso, possibilitem compreender a magnitude em termos espaciais da infiltração potencial de forma assistir o planejamento territorial e auxiliar na implementação de planos e regras necessárias para desenvolver os usos do solo e gerenciar as condições ambientais, principalmente em termos de água de uma região.

## **CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Desenvolver um conjunto de procedimentos para a obtenção e integração de dados geológico-geotécnicos, de usos e manejo, afim de estimar e analisar a infiltração potencial e a geração de escoamento superficial Hortoniano potencial.

### **2.2. Objetivos específicos**

1. Selecionar eventos de chuvas transientes típicos da região;
2. Selecionar um modelo matemático adequado para estimar a infiltração potencial e a geração de escoamento superficial Hortoniano potencial;
3. Elaborar modelos geológicos estruturados 3D;
4. Caracterizar as águas subsuperficiais em termos físico-químicos;
5. Propor e aplicar uma sistemática para zonestar a infiltração potencial e a geração de escoamento superficial Hortoniano potencial de uma região.

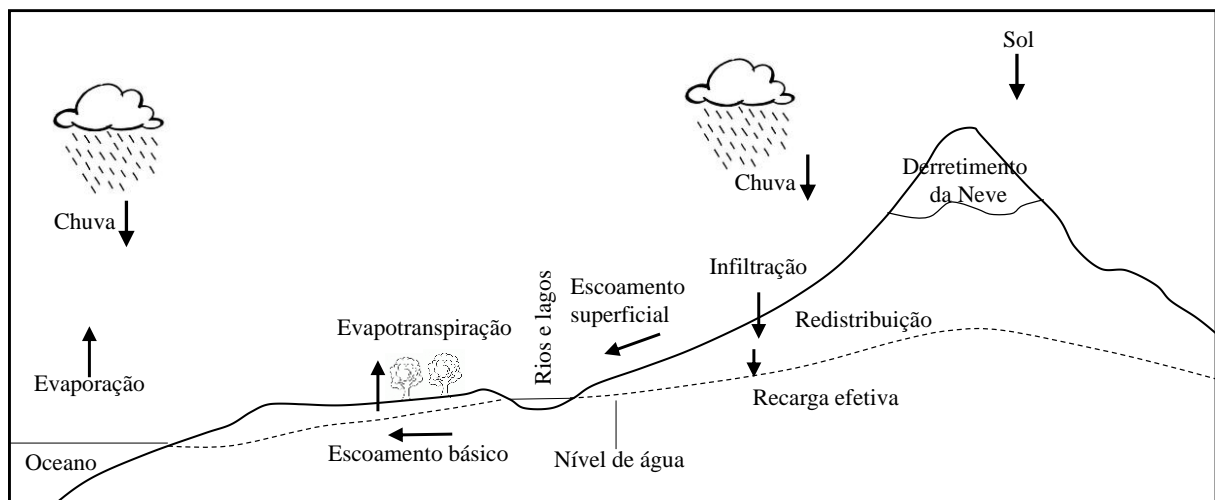


## CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico são apresentados os principais aspectos sobre a infiltração e o escoamento superficial Hortoniano. Dentre estes, ressaltam-se o ciclo hidrológico, a dinâmica de água, a relação chuva, infiltração e escoamento, os modelos de infiltração e os métodos para a determinação para caracterizar a variabilidade geológico-geotécnica dos materiais geológicos.

### 3.1.Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é definido como o processo natural de circulação contínua de água no ambiente, o qual é responsável pela distribuição da mesma no planeta. O início por convenção se dá na precipitação, que tem como sentido a superfície terrestre, onde parte da água pode ser interceptada pela vegetação ou cair diretamente sobre os mananciais superficiais e o solo. Em função das características do solo (condutividade hidráulica, sucção, umidade, compactação, etc.), do tipo do uso do solo e das condições topográficas, parte da água precipitada pode infiltrar e atingir a zona saturada, e a outra parte pode escoar na superfície para rios, mares e lagos. Enquanto isso, a água armazenada nos corpos hídricos, na porção superficial do solo e nas plantas evapora, posteriormente condensa e forma as nuvens de chuva, reiniciando o ciclo. A Figura 1 representa o esquema de funcionamento do ciclo hidrológico.



**Figura 1-** Esquema de funcionamento do ciclo Hidrológico.

**Fonte:** Autor

Portanto, o ciclo hidrológico descreve a dinâmica da água na natureza, a qual consiste em diversas fases, onde são representados os possíveis caminhos que a água pode percorrer (KIRKBY, 1978). Os componentes que integram as diferentes fases do ciclo são: precipitação;

evaporação; transpiração; infiltração; armazenamento superficial; escoamento superficial e subsuperficial; e percolação. O ciclo hidrológico de forma simplificada é representado a partir de uma concepção de entrada, variação no armazenamento e saída de água, a qual é usualmente chamada de balanço hídrico. A expressão matemática que descreve o balanço hídrico é mostrada a seguir, a qual foi baseada na proposta de Healy *et al.* (2007)

$$P - Evt = R \pm \Delta S + SR + SG \quad [1]$$

Onde: P é a precipitação, Evt é a evapotranspiração,  $\Delta S$  é a variação no armazenamento do solo, R é o escoamento superficial, SR é o escoamento subsuperficial e SG é o escoamento de base.

O balanço hídrico pode ser utilizado para vários fins em estudos de dinâmica de água do solo, dentre eles o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos de uma região, conforme observado por Horton (1943); Bochkov e Zavodchikov (1970); Bielmelt *et al.*, (2011); Bradley *et al.*, (2014). Essas publicações verificaram que a utilização desta ferramenta mesmo que apresente limitações na estimativa e determinação de parâmetros e características, é fundamental na compreensão global da dinâmica de água da área estudada.

## **3.2. Dinâmica de água no solo**

Grande parte do ciclo hidrológico ocorre no solo, desse modo é fundamental compreender a dinâmica de água no solo e os principais aspectos envolvidos, os quais estão associados aos potenciais de água, à retenção de água e a condutividade hidráulica.

### **3.2.1. Potenciais de água**

Uma das formas de caracterizar a água no solo é através do estado energético. A água no solo está sujeita à forças de origem, forma e intensidade variada. As duas formas primárias de energia são a cinética e a potencial. A cinética é desprezível por conta que o movimento da água é relativamente lento (OR *et al.*, 2003). Por outro lado, a energia potencial é de grande importância, pois está relacionada ao movimento da água, seja por capilaridade ou gravidade. Pode-se definir os potenciais de água no solo como o trabalho necessário para deslocar uma massa de água para condições de água livre (REICHARDT, 1996).

O potencial total de água no solo é resultante da atuação dos diversos potenciais, os quais são o gravitacional, o de pressão e o osmótico como pode ser observado na Equação 2.

$$\Phi = \phi_p + \phi_o + \phi_z \quad [2]$$

Onde:  $\phi$  é o potencial total;  $\phi_p$  é o potencial de pressão;  $\phi_o$  é o potencial osmótico; e  $\phi_z$  é o potencial gravitacional

Dentre os três potenciais presentes no solo, o de pressão e o gravitacional são os principais responsáveis pelo movimento da água no solo, em vista que o osmótico só ocorre quando existe um diferencial de concentração diferente de soluto separados por uma barreira, como observado por Hillel (1980) entre as raízes e o solo.

O potencial de pressão pode ser dividido em dois componentes, o primeiro é representado pela carga hidráulica presente durante o processo de infiltração na forma de altura de coluna d'água, enquanto que o segundo é a capilaridade ou potencial capilar. A capilaridade está relacionada à atração entre as moléculas na forma de coesão e atração entre a água e as partículas do solo. Estas são representadas pela adesão e a tensão superficial que é o trabalho por unidade de área gasto para a superfície de um determinado líquido se distender. A variação da capilaridade está diretamente ligada ao conteúdo de água presente nos poros, ou seja, quanto mais água estiver presente no solo, menor será seu potencial, e assim vice versa, quanto menor a umidade, maior será o potencial e sua capacidade retenção de água (LIBARDI, 2005).

Salienta-se que analogamente, o termo potencial de água no solo pode ser chamado por outras nomenclaturas, a qual é definida pela unidade de medida (OR *et al*, 2003). Na Tabela 1 são apresentadas as unidades utilizadas para representar os potenciais e as respectivas terminologias. Neste trabalho será utilizado o termo sucção, porém em determinados momentos alguns parâmetros serão representados na forma de “pressure head” (h).

**Tabela 1.** Nomenclatura análogas aos potenciais de água no solo.

Unidade	Símbolo	Nome	Sistema Internacional	Sistema CGS
Energia/Massa	$\mu$	Potencial Químico	J/kg	erg/g
Energia/Volume	$\psi$	Potencial de água no solo, sucção ou tensão	N/m <sup>2</sup> (PA)	Erg/cm <sup>3</sup>
Energia/Peso	h	“pressure head”	m	cm

Fonte: Modificado de OR *et al*. (2003)

Sendo assim, a sucção é definida como a pressão isotrópica de água intersticial, decorrente das características físico químicas do solo, que faz com que o mesmo absorva ou perca água (SCHOFIELD, 1935), ou seja de maneira simples é a avidéz que o solo tem pela água. A sucção total ou pressão negativa, pode ser dividida em duas parcelas, a mátrica e a osmótica (Equação 3).

$$\psi = \psi_p + \psi_o \quad [3]$$

Onde:  $\psi$  é a sucção total;  $\psi_m$  é a sucção mátrica; e  $\psi_o$  é a sucção osmótica.

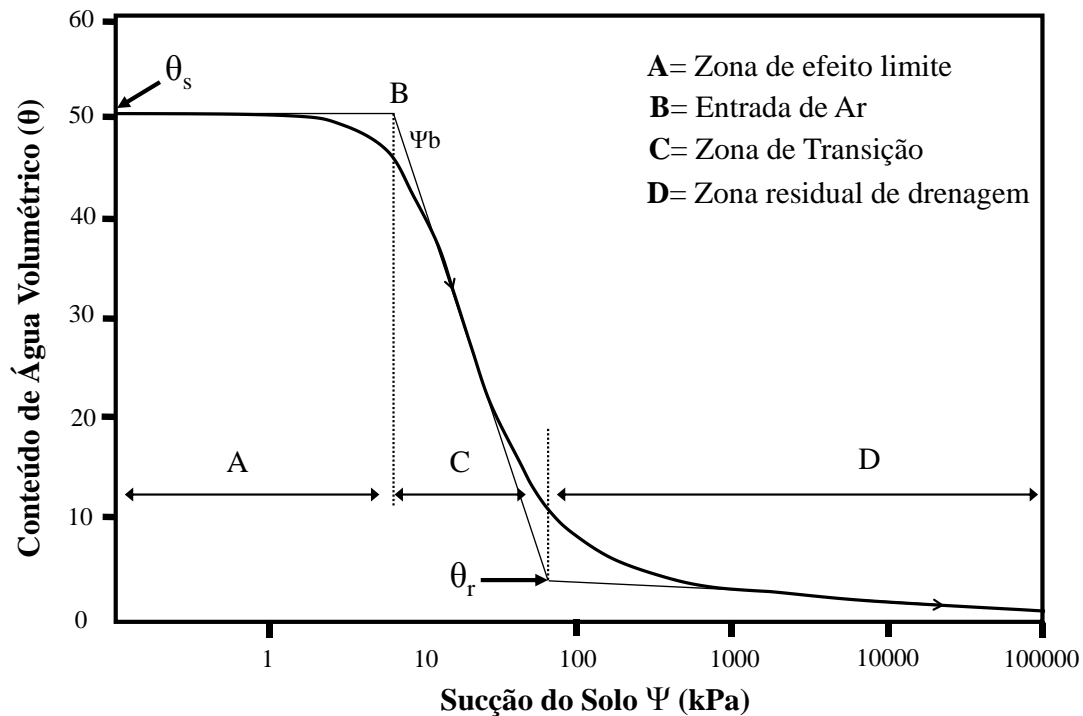
A sucção mátrica representa a diferença entre a pressão do ar e a pressão de água, gerada pelo fenômeno de tensão superficial e as forças de adsorção. Enquanto que os efeitos de sucção osmótica representam a diferença de concentração de solutos, a qual pode ser considerada desprezível (CALLE, 2000). Desse modo, a sucção total está em função apenas da sucção mátrica.

### 3.2.2. Curva de retenção de água

A retenção de água no solo está associada à capacidade do solo em reter água, e é descrita pela curva de retenção. A curva de retenção ou curva característica de água do solo é denominada como a relação entre a sucção matricial atuante e o conteúdo de água no solo ou o grau de saturação. Esta curva segundo Fredlund; Rahardjo (1993), permite determinar a quantidade de água que um solo pode perder ou ganhar em função de uma sucção.

A curva de retenção como observado na Figura 2, pode ser dividida em quatro trechos: A, B, C e D. O trecho A-B é denominado de zona de efeito limite, onde a curva apresenta comportamento linear e ainda que haja um aumento de sucção o conteúdo de água não varia de forma significativa. No ponto B é onde ocorre a entrada de ar nos poros maiores, ou seja, o momento em que a água começará a ser drenada. O trecho B-C ou zona de transição representa o momento o qual com aumento da sucção matricial o conteúdo de água reduz acentuadamente. O último trecho (C-D ou zona residual de drenagem), o conteúdo de água decresce até o ponto de alcançar o conteúdo de água residual ( $\theta_r$ ), ou seja, aquela umidade a qual está presente na estrutura do solo como meniscos isolados e adsorvida fortemente as partículas, onde independentemente da sucção atuante, esta não pode ser removida (VANAPALLI *et al*, 1996).

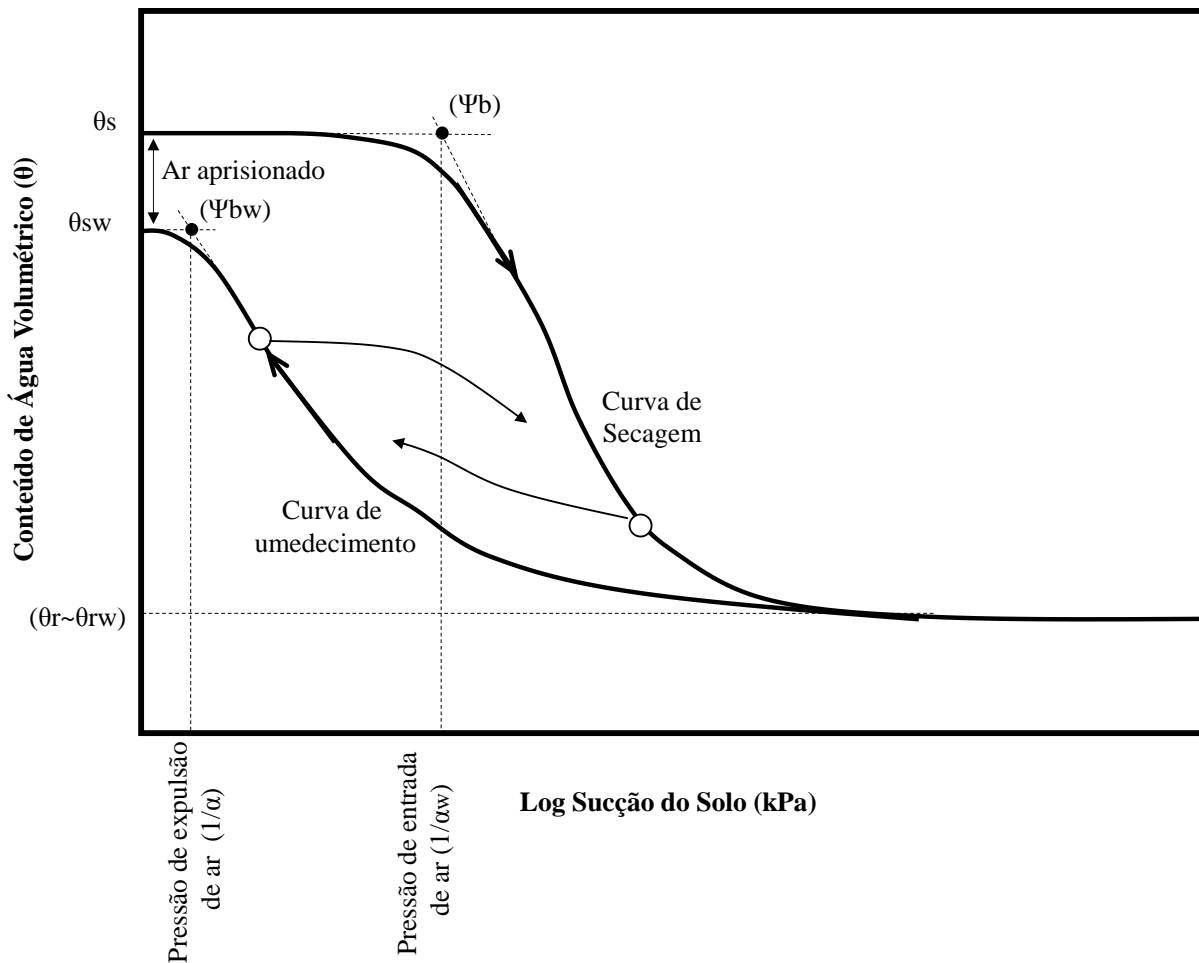




**Figura 2.** Representação esquemática de uma curva de retenção, a qual mostra os estágios de drenagem.

**Fonte:** Modificado de Fredlund *et al.*(1994)

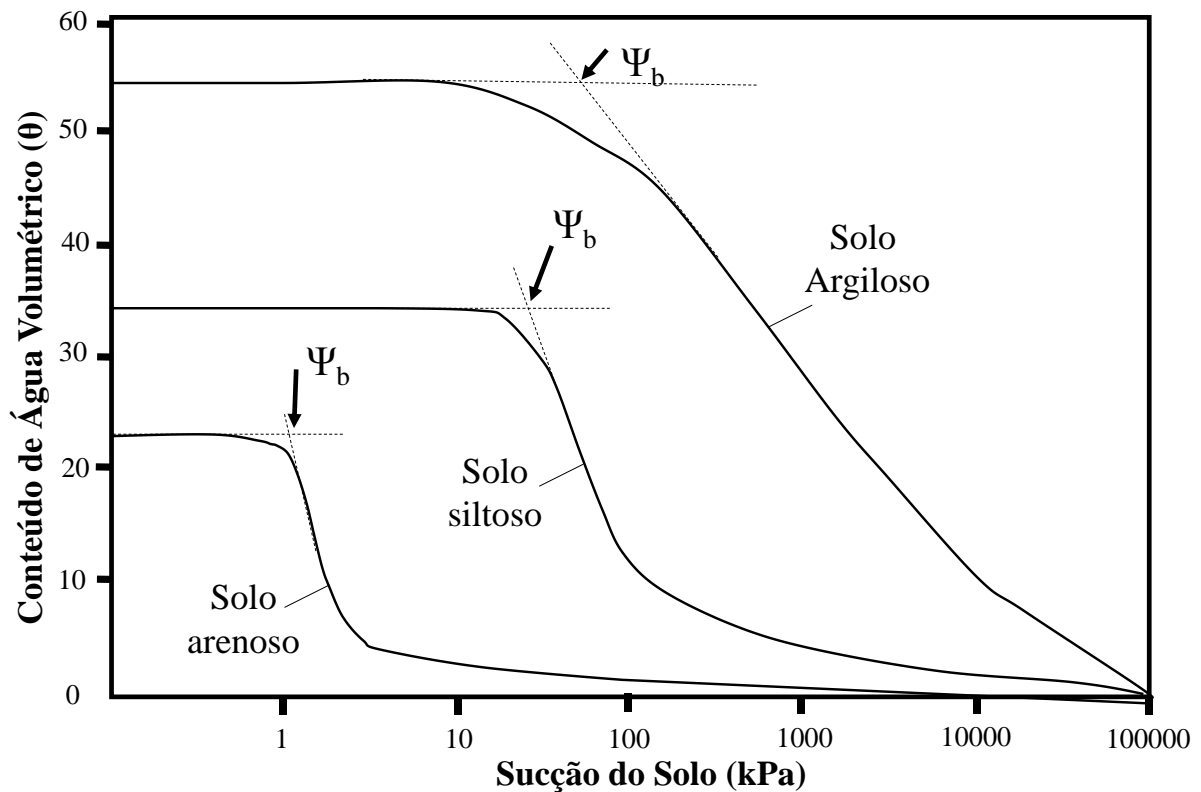
Um outro aspecto importante no comportamento da curva de retenção está relacionado ao fenômeno de histerese, que dependendo do sentido da trajetória (drenagem ou umedecimento), para um mesmo solo e mesma sucção o conteúdo de água pode variar. A razão de ocorrência da histerese está associada a diversas causas, como a não uniformidade geométrica, mudança da estrutura por conta da drenagem e umedecimento, e o ar aprisionado nos poros (JUNIOR, 2013). O aprisionamento do ar nos poros é explicado segundo Gerscovich (2001), que diz que por meio das diferentes velocidades na frente de molhamento, criam-se zonas com diferentes graus de saturação e altos valores de sucção, as quais impedem o avanço da frente de molhamento. A Figura 3 representa o fenômeno de histerese, na qual observa-se que o conteúdo volumétrico de água em diversas sucções na curva de secagem é superior do que a de umedecimento.



**Figura 3.** Efeito da histerese em uma curva de retenção. O prefixo w é utilizado para simbolizar a curva de umedecimento.

**Fonte:** Modificado de Masrouri *et al.* (2008) e Likos *et al.* (2014).

Além do fenômeno de histerese, segundo Hillel (2004) a relação entre o conteúdo de água e a sucção é influenciada por diversos fatores, os quais podem ser enumerados: tipo de solo; arranjo estrutural e porosidade. Dependendo do tipo de solo, a curva poderá ser totalmente distinta em virtude do tamanho dos poros como observada na Figura 4, (FREN DLUND E RAHARDJO, 1993; CERATTI *et al.* 1996). Desconsiderando à macroporosidade atribuída pelas raízes e outros fatores, os solos arenosos apresentam poros maiores que os argilosos, que resulta em uma menor superfície de contato e retenção de água.



**Figura 4.** Curvas de retenção típicas de diferentes tipos de solo.

**Fonte:** Baseado em Fredlund e Xing (1994).

Quanto a porosidade e o arranjo estrutural do solo, estes são afetados diretamente pelo manejo e tipo de uso do solo. O manejo e o tipo de uso do solo interferem na compactação, que consequentemente alteram o arranjo dos grãos e a porosidade. Este fato foi observado por Oliveira (2007), que verificou que a compactação aumenta a sucção matricial devido à redução da macroporosidade e aumento da microporosidade.

Em termos de uso da curva de retenção em relação aos teores de umidade, tem-se dois conceitos que são fundamentais para aplicação de projetos agrônômicos, hidráulicos, ambientais e hidrogeológicos, os quais estão relacionados ao ponto de murchamento (PM) e capacidade de campo (CC). O ponto de murchamento é definido como o teor de água mínimo disponível no solo para o desenvolvimento da planta (BRIGGS E SHANTZ, 1912), ou seja, representa uma condição mais seca do solo, o qual é associado a uma sucção de a 1500 kPa (ROMANO E SANTINI, 2002). Conforme Arruda *et al.* (1987), este teor de umidade está

diretamente relacionado as frações argila e silte devido a maior superfície de contato da água com as partículas em baixos potenciais.

A capacidade de campo (CC) representa uma condição mais úmida do solo em comparação ao PM. A CC é definida como a quantidade de água retida no solo após o excesso ter sido drenado, a taxa de movimento descendente ter decrescido acentuadamente e a capilaridade a atuar predominantemente no movimento da água (VEIHMEYER E HENDRICKSON, 1949). Segundo Nachabe (1998), para solos arenosos a diminuição do movimento é mais rápida, em comparação aos argilosos ou siltosos. Este teor de água geralmente é associado a uma sucção de 33kPa para solos temperados e argilosos, porém não são adequados para materiais granulares e solos arenosos tropicais, os quais devem ser considerados sucções de 6 a 10 kPa (OLIVEIRA E MELO, 1971; REICHARDT, 1988.)

Quanto a representação da curva de retenção, vários modelos foram desenvolvidos, onde na Tabela 2 são apresentados os principais modelos que a descrevem e são utilizados para determinar os possíveis valores de conteúdo de água de um solo.

**Tabela 2.** Listagem dos modelos desenvolvidos para descrever a curva de retenção de água no solo.

<b>Autor</b>	<b>Equação</b>	<b>Parâmetros</b>
Gardner (1958)	$\theta = \frac{1}{1 + q\psi^n}$	q é um parâmetro de ajuste referente a sucção na entrada de ar;  $\psi$ é a sucção;  n é um parâmetro de ajuste relacionado ao ponto de inflexão da curva
Brooks e Corey (1964)	$\theta = \left(\frac{\psi b}{\psi}\right)^\lambda$	$\psi$ é a sucção; $\psi_b$ é a sucção na entrada de ar; $\lambda$ é índice de distribuição dos poros.
Van Genuchten (1980)	$\theta = \theta_s \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m}$	$\theta_s$ é o conteúdo volumétrico de água saturado; $\theta_r$ é o conteúdo volumétrico de água residual; $\psi$ é a sucção;  m e n são parâmetros de ajuste da curva.

**Fonte** Baseado em Fredlund e Xing (1994).

### 3.2.3. Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica ( $K$ ) é uma das principais e mais importantes características hidráulicas do solo, utilizadas em diversos modelos de infiltração-escoamento para descrever o movimento da água no solo. De maneira geral, a condutividade hidráulica é definida como a propriedade que expressa a facilidade com que a água se movimenta através dos poros interconectados do solo (STIBINGER, 2014). Hillel (2004), por sua vez, define a condutividade hidráulica não somente como uma propriedade, mas como uma combinação entre as características do fluido e do solo que determinam o comportamento do fluxo.

A primeira equação (Equação 4) desenvolvida para quantificar o movimento da água no solo, foi elaborada por Darcy (1856), o qual utilizou colunas de areia saturadas e estabeleceu que a taxa volumétrica de água  $Q$  através de uma coluna é proporcional ao gradiente de potencial total da água nesse meio, e inversamente proporcional à altura da coluna de água. A constante  $K_s$  utilizada nesta equação é denominada de condutividade hidráulica saturada, a qual é definida em termos de volume por área por tempo ( $m^3/m^2/s$ ), que ao simplificá-la, fica expressa em unidade de velocidade ( $m/s$ ) (FETTER, 2001).

$$Q = -K_s \times A \times \frac{h}{L} \quad [4]$$

Onde  $Q$  é a vazão ( $cm^3/min$ ),  $K_s$  é a condutividade hidráulica ( $cm/s$ ),  $A$  é a área da coluna,  $h$  é a carga hidráulica e  $L$  é comprimento da amostra.

Como pode-se observar, o termo condutividade hidráulica apresentado por Darcy está relacionado à condutividade hidráulica saturada, o qual representa um valor único, determinado no máximo conteúdo de água (saturado) e de sucção positiva. Por outro lado, quando o solo apresenta sucção negativa e conteúdo de água abaixo da saturação, denomina-se de condutividade hidráulica não saturada, a qual está em função da umidade e da sucção.

O primeiro estudo que quantificou o movimento da água nos solos não saturados foi o realizado por Buckingham (1907), o qual observou que a equação de Darcy não descrevia de forma adequada o fluxo em um solo não saturado. Sendo assim, este autor modificou esta equação e estabeleceu a seguinte expressão (Equação Darcy Buckingham) para descrever o movimento de água nos solos não saturados:

$$\vec{q} = -K(\theta) \nabla \Phi_m(\theta) \quad [5]$$

Onde:  $\vec{q}$  é a densidade de fluxo da solução;  $K(\theta)$  é a condutividade hidráulica não saturada;  $\Phi_m(\theta)$  é a função do potencial mátrico;  $(\theta)$  é o conteúdo de água volumétrico.

Ao analisar esta equação, observou-se que a condutividade hidráulica não é mais uma variável constante, mas sim dependente do conteúdo ou da energia da água presente no solo.

Os fatores que afetam a condutividade hidráulica podem ser diversos. Para a condutividade hidráulica não saturada os principais são o conteúdo de água e vazios do solo. Nesse sentido, segundo Hillel (2004) à medida que um solo é drenado, o ar substitui a água nos poros, conseqüentemente diminui  $K(\theta)$ , por dois motivos. O primeiro está relacionado à diminuição da porção dos poros com condutância e o segundo pelo aumento da retenção de água por conta do aumento de sucção.

Enquanto que para a condutividade hidráulica saturada, a variabilidade está em função da textura, estrutura, massa específica seca, porosidade, macroporosidade, temperatura da água, vegetação, o tipo de uso e o manejo do solo (GOVINDARAJU *et al.* 1995; WEST *et al.* 2008; PAPANICOLAOU *et al.* 2008; SORACCO *et al.*, 2012; JARVIS *et al.*,2013). Para Craig (1995),  $K_s$  depende principalmente do tamanho médio dos poros, que está diretamente relacionado à textura e estrutura do solo. Isto é, quanto menor o tamanho dos grãos, menores serão os poros, conseqüentemente reduz os valores de condutividade hidráulica saturada como pode ser observada na Tabela 3, que apresenta valores de  $K_s$  para os diversos tipos de solo. Porém isso não é necessariamente uma verdade, pois conforme Ritzema (1994) a condutividade hidráulica saturada é mais dependente da estrutura do que do tamanho médios dos poros, especialmente em termos de presença de macroporos. Silva e Kato (1997) corroboram com este trabalho, os quais verificaram que com a alteração do manejo, ocorreram mudanças na macroporosidade, a qual influenciou nos valores da condutividade hidráulica saturada em pelo menos uma ordem de magnitude.

**Tabela 3.** Valores de condutividade hidráulica saturada para diferentes tipos de solo.

<b>Textura</b>	<b>Condutividade hidráulica saturada (m/dia)</b>
Cascalho	10-50
Areia média	1-5
Areia fina	1-3
Areia com mistura de outras frações (bem estruturado)	0,5-2
Areia muito fina	0,2-0,5
Argila com mistura de outras frações (mal estruturado)	0,002-0,2
Argila adensada (sem fissuras)	<0,002

Fonte: Modificado de Ritzema (1994)

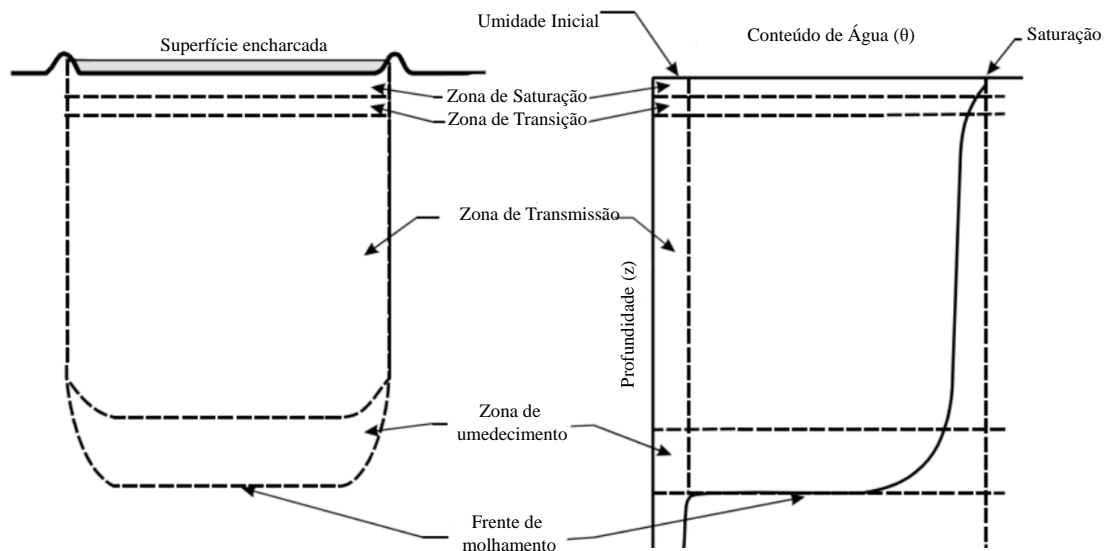
### **3.3. Relação Chuva x Infiltração x Escoamento**

Compreender a relação chuva x infiltração x escoamento superficial é essencial, pois através destes componentes é possível determinar a magnitude de uma série de problemas como erosão, inundação e a recarga das águas subterrâneas. Todavia, tem-se verificado que a interferência antrópica no solo, tem alterado profundamente a razão entre volume infiltrado com o escoado que resulta intensificação dos problemas mencionados (SCHIFF E DREIBELBIS, 1949; KINCAID, *et al.*, 1966; DEMISSIE E KHAN 1993; CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2012; DING E LI, 2016). Sendo assim, o entendimento e a quantificação da infiltração da água no solo e do escoamento, bem como os parâmetros que controlam este processo se tornam fundamentais no planejamento territorial de uma região.

A infiltração da água no solo é um processo de grande importância no ciclo hidrológico, e é definida como um processo onde a água atravessa a superfície do solo, produzindo um fluxo com sentido descendente, que altera o conteúdo volumétrico e a pressão da água. Entretanto, dependendo da intensidade da chuva e das características do solo, parte da água pode infiltrar e outra ficar disponível para o escoamento superficial. Isto é, a infiltração é o processo chave que controla e separa a água infiltrada com a aquela disponível para a geração do escoamento superficial (LIBARDI, 2005).

A representação esquemática do processo de infiltração se dá sob a forma de uma frente de molhamento (EPA, 1998). O perfil de umedecimento do solo, em virtude do dinamismo da distribuição de água durante o processo de infiltração pode ser classificada em quatro zonas

(Figura 5) as quais são: Zona de saturação, Zona de transição, Zona de transmissão, Zona de umedecimento e a Frente de molhamento.



**Figura 5-** Perfil de umedecimento do solo ao longo do processo de infiltração.

**Fonte:** Modificado de EPA (1998)

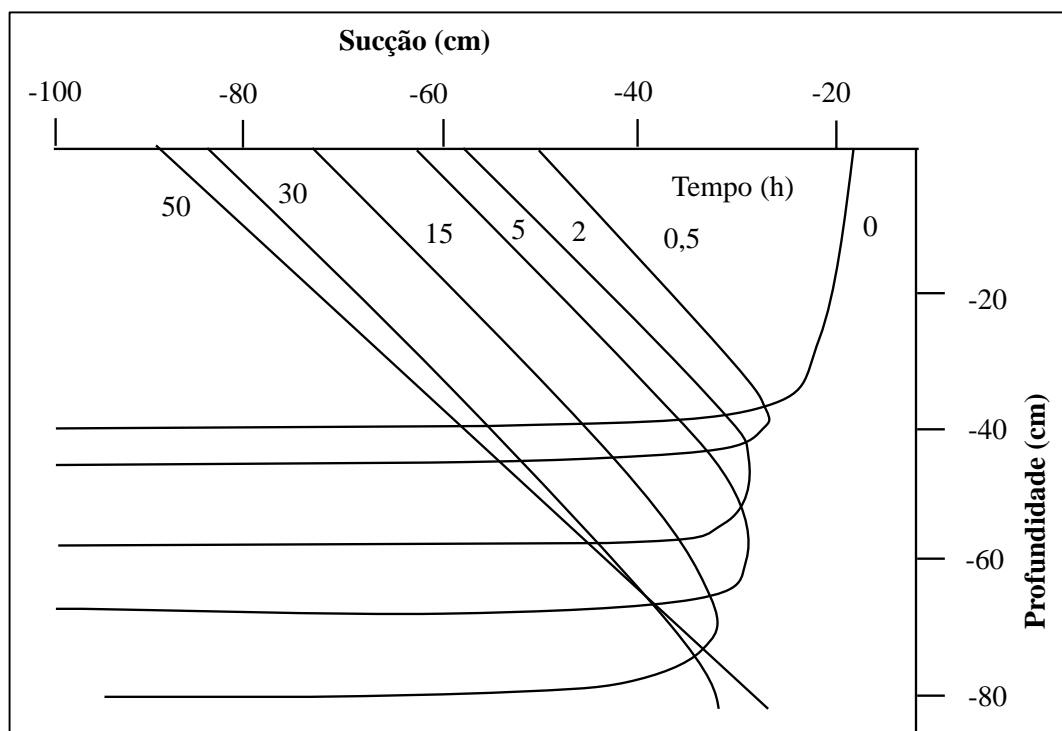
Cada zona mencionada representa uma etapa da evolução no tempo da infiltração ao longo de um evento chuvoso. A zona saturada no topo, compreende uma camada pouca espessa e corresponde ao primeiro estágio da infiltração. A próxima zona é a de transição, que se caracteriza por uma queda rápida no teor de umidade do solo ao longo da profundidade. Ressalta-se que nestas duas primeiras zonas o mecanismo predominante que controla a infiltração é a gravidade. A terceira fase da infiltração está relacionada a zona de transmissão, a qual apresenta uma espessura superior as anteriores, a variação de umidade é quase nula e os mecanismos de controle do movimento da água no solo são a gravidade e a capilaridade. A quarta zona (zona de umedecimento) é caracterizada pelo decréscimo brusco do teor de umidade. E por último, a frente de molhamento, que é o limite entre a porção seca e úmida do perfil. Nesta região o fluxo de água é controlado prioritariamente pelas forças capilares (HILLEL, 1980).

Todavia, Mcdougall e Pyrah (1998) concluíram que o padrão do perfil de umedecimento não é tão bem definido como o exposto acima, o qual está diretamente relacionado à intensidade da chuva e a condutividade hidráulica saturada. Santos e Villar (2004) definiram que chuvas com intensidade superior a condutividade hidráulica saturada, ocorre a saturação da superfície



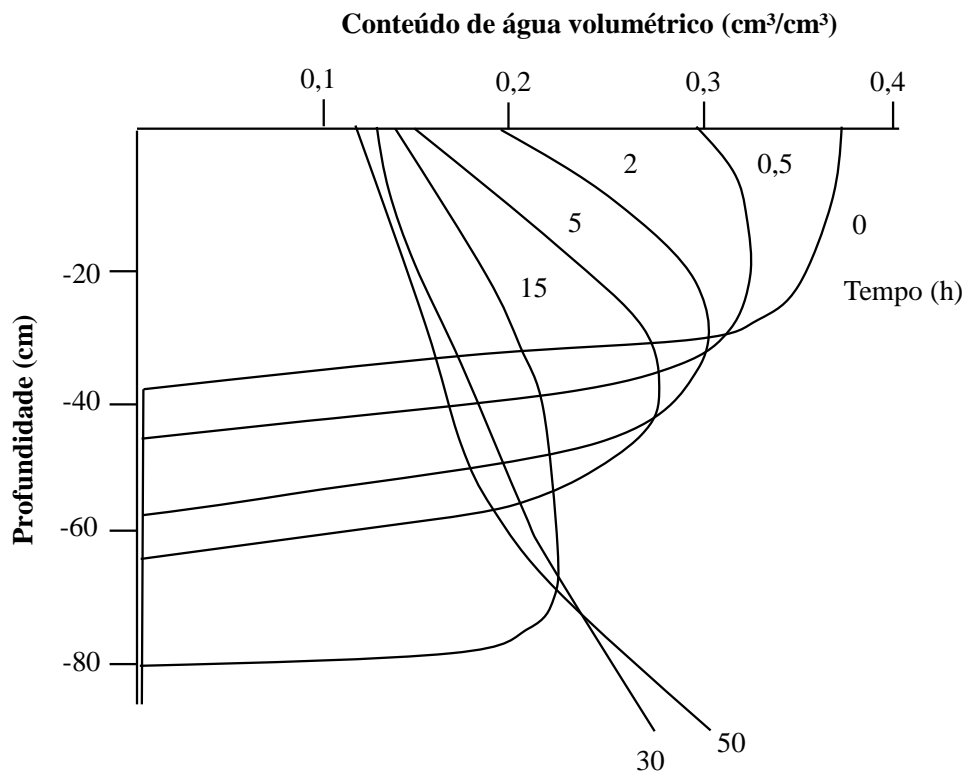
e a frente de molhamento é bem definida, enquanto que para intensidades inferiores, não ocorre a saturação da superfície e a frente de umedecimento pode ser uniforme ou não.

Quanto ao final do processo de infiltração, ou seja, quando o aporte de água oriundo da chuva é cessado, a água continuará a se movimentar com direção de fluxo para a zona saturada Silveira *et al.* (1993). Segundo Miyazaki (1993) este fenômeno é denominado de redistribuição de água ou estágio de drenagem, e tem como característica a diminuição da umidade nas camadas mais superficiais e um aumento nas camadas mais profundas ao longo do tempo (Figura 6). Esta mudança de umidade em profundidade afeta diretamente a sucção (Figura 7) como observado por Vachaud e Thony (1971). Verifica-se que a porção mais abaixo da frente de molhamento a sucção é alta, porém logo decresce. Entretanto a porção que está acima a sucção é baixa e tende a aumentar gradualmente. A partir disso, observa-se que o movimento da água ocorre tanto pela influência do potencial mátrico (abaixo da frente de molhamento) como do potencial gravitacional (acima da frente de molhamento), onde a condutividade hidráulica diminuirá ao longo do tempo devido à retenção da água. Ao final deste processo o perfil de umidade apresentará uma homogeneidade em profundidade e o  $K(\theta)$  apresentará valores muito baixo (REICHARDT, 1996)



**Figura 6.** Mudança gradual do perfil de sucção durante o processo de redistribuição da água.

**Fonte:** Modificado de Vachaud e Thony (1971)



**Figura 7.** Mudança no perfil umidade ao longo do perfil de distribuição.

**Fonte:** Modificado de Vachaud e Thony (1971)

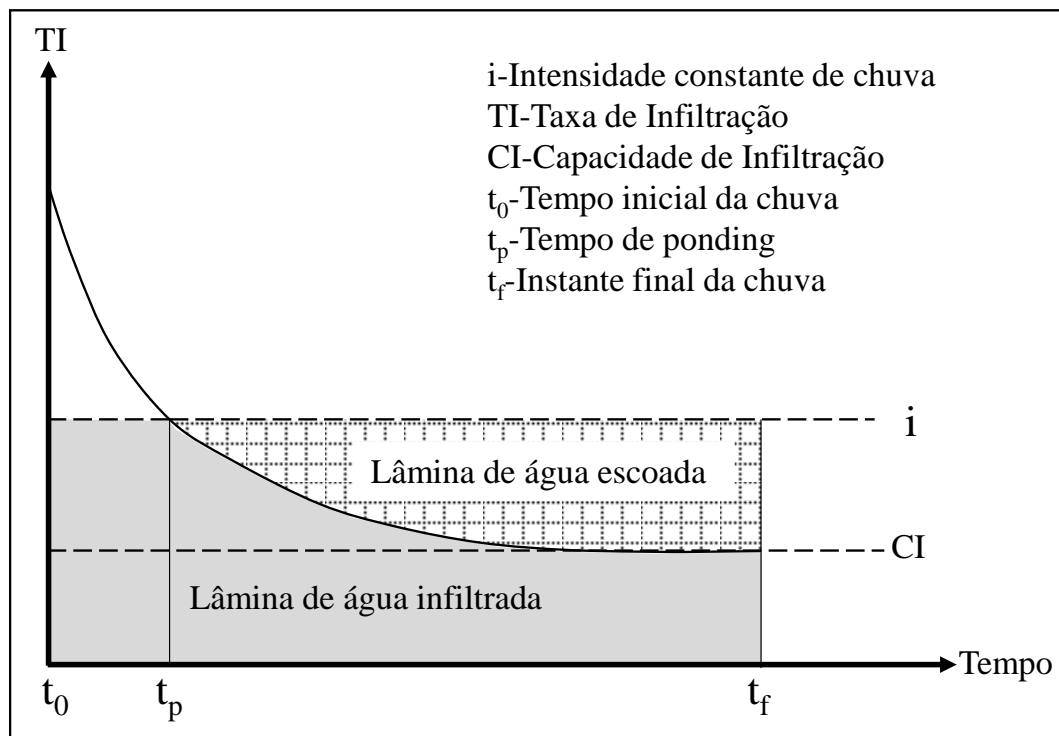
No que diz respeito a velocidade em que a água atravessa a superfície do solo, esta é representada pela taxa de infiltração. A taxa de infiltração compreende a lâmina de água (volume de água por unidade área) que penetra a superfície do solo por unidade de tempo (KIRKBY, 1978). Esta taxa inicialmente é alta e decresce ao longo do tempo, até se tornar constante, onde o valor constante é chamado de capacidade de infiltração potencial. Por definição, a capacidade de infiltração potencial refere-se a propriedade do solo que representa a taxa máxima que um solo em uma determinada condição e em um tempo, pode absorver a água da chuva; Ressalta-se que este valor pode ser associado também à condutividade hidráulica saturada (HORTON, 1940)

Após verificar os principais aspectos do processo de infiltração é necessário compreender a sua relação com a chuva e o escoamento superficial, em vista que estes estão diretamente interligados. Esta relação foi observada primeiramente por Horton (1933), o qual estabeleceu que as chuvas com intensidades menores que a capacidade de infiltração, toda a água infiltraria e não haveria a geração de escoamento. Em contrapartida, quando a intensidade de chuva é maior ou igual a capacidade de infiltração ocorreria um excesso de água. Este

mecanismo de geração de escoamento superficial é denominado de escoamento superficial Hortoniano.

Entretanto, o processo de infiltração não é simples como previsto por Horton (1933). Este pode ser complexo, mesmo em condições de homogeneidade do solo e uniformidade da umidade inicial. No estágio inicial a taxa de infiltração é alta por conta do alto gradiente matricial entre as porções secas e úmidas. Entretanto ao longo do tempo haverá um aumento da umidade no solo provocado pelo avanço da frente de molhamento e a diminuição do gradiente, consequentemente a taxa de infiltração decrescerá até o momento em que se torna menor que a intensidade da chuva. Quando ocorre este fato, se iniciará o empoçamento da água na superfície (*tempo de ponding*) e dará início a geração do escoamento superficial Hortoniano (MEIN; LARSON, 1973). Chu (1978) menciona que o tempo de *ponding* é influenciado diretamente pelas características das camadas superficiais. Chu e Mariño (2005) observaram que este tempo e o volume infiltrado podem variar ainda em solos heterogêneos e em chuvas transientes.

Baseado no exposto acima, a Figura 8 mostra um esquema que contempla um evento de chuva com intensidade constante e com o respectivo comportamento do escoamento superficial Hortoniano e da infiltração. O eixo vertical do diagrama representa a taxa de infiltração, enquanto que no eixo horizontal, encontra-se representado o tempo transcorrido desde o início da chuva. A região sombreada na parte inferior da curva assinala a porção da lâmina de água infiltrada, na porção superior sombreada indica a lâmina de água escoada, e ao somar as duas áreas é determinado a chuva total.



**Figura 8.** Relação da chuva considerando um evento de intensidade constante e uma determinada duração, com uma determinada curva de infiltração de um solo, e a respectiva lâmina de água infiltrada e escoada.

**Fonte:** Modificado de (RUBIN, 1966)

Diversos fatores podem interferir no volume de água infiltrada e de água escoada, os quais estão reunidos na Tabela 4 conjuntamente com os autores que reportaram estas evidências. Sharma (1986) apontou que estes fatores podem apresentar significativa variabilidade espacial e temporal por conta das variações climáticas, uso e manejo e heterogeneidade intrínseca do solo.

**Tabela 4.** Lista dos principais fatores que alteram e influenciam a infiltração de água no solo

<b>Fator</b>	<b>Aspectos</b>	<b>Autores</b>
Textura e o grau de agregação do solo	A textura do solo representa a proporção relativa do tamanho das partículas que o compõem. Esta é uma característica pouco variável no tempo e pouco afetada pelo manejo da terra. Solos com textura mais argilosa tendem apresentar menores valores de volume de água infiltrado, enquanto que os arenosos tendem a infiltrar mais. Todavia em solos com partículas bem agregadas, apresentam poros maiores e velocidade de infiltração tende a ser mais alta.	Smith (1967); Mamedov <i>et al.</i> (2001)
Porosidade	A porosidade é a fração volumétrica do solo que é ocupada tanto pelo ar quanto pela água. É neste espaço em que ocorrem os processos de circulação de ar e água, desse modo, ou seja é uma característica fundamental na determinação da taxa de infiltração. De acordo com Richards (1965) apud Klein; Libardi (2002), os poros são divididos em microporos (<0,5mm) e macroporos (>0,5mm). Segundo Dunn e Phillips (1991), solos com maior macroporosidade apresentam maior taxa de infiltração de água, pois durante o processo de infiltração, a taxa é controlada pelos maiores, onde a água não tem influência das forças capilares. O tamanho dos poros é determinado por vários fatores: forma e imbricamento dos grãos, à presença de materiais cimentantes (óxidos, carbonatos) que preenchem total ou parcialmente os poros do solo e a distribuição granulométrica.	Mein e Larson, (1973); Lipiec <i>et al.</i> (2006)
Compactação e massa específica seca	A compactação está associada diretamente com a porosidade do solo e ao manejo do mesmo. Tipos de usos que promovem a compactação do solo diminuem a porosidade, logo reduzem a taxa e a capacidade de infiltração.	Kayombo, B; Lal <i>et al.</i> (1986); Björklund <i>et al.</i> (2016)
Encrostamento	O processo de encrostamento é resultante de processos complexos entre a gota de chuva e o solo, nos quais as partículas do solo são rearranjadas e consolidadas em uma estrutura superficial coesa e com permeabilidade diferente da camada logo abaixo, variando entre 0,1 mm até espessuras maiores que 50 mm (Valentin; Bresson, 1992).	Levien <i>et al.</i> , (2000); Bu (2014)
Umidade inicial	A umidade inicial está associada ao conteúdo de água que preenchem os poros de um determinado solo antes de se iniciar uma chuva. Esta interfere principalmente no início do processo de infiltração, pois quanto maior a umidade inicial menor será a taxa de infiltração inicial, consequentemente alcançará mais rapidamente a capacidade de infiltração. No entanto, quando a umidade é menor, maior será o tempo, assim como a quantidade de água necessária para preencher os poros e estabilizar a taxa de infiltração.	Schiff; Dreibelbis, 1949; Lin <i>et al.</i> , (1998)
Declividade	Este fator em si não está relacionado à taxa de infiltração, mas sim com a quantidade de água disponível no terreno. Em terrenos mais íngremes a água tendem a escoar mais rápido e diminuir o seu tempo de permanência. Por outro lado, terrenos mais planos propiciam condições de permanência maior da água escoada para infiltrar (AHRENDT, 2005).	Lal (1983); Morbidelli <i>et al.</i> (2015)
Intensidade e duração da chuva	As características das chuvas são fatores primordiais que alteram a infiltração, pois são elas que determinam a quantidade de água que estará disponível para infiltrar. As duas características mais importantes a serem consideradas são a intensidade e a duração. Quanto maior a intensidade da chuva, mais rápido o solo atinge a capacidade de infiltração, consequentemente tem-se um maior volume de água escoada. Enquanto que para a duração, quanto mais longa a chuva, maior é a probabilidade de atingir a capacidade de infiltração. Ressalta-se que a combinação de uma chuva com intensidade alta e com longa duração, propicia a geração de grandes volumes de água escoada.	Rubim (1966); Chu (1978); Wang <i>et al.</i> (2015)

**Fonte:** Baseado nas publicações contidas na tabela

Além dos aspectos mencionados na Tabela 4, o comportamento da infiltração e da geração de escoamento superficial Hortoniano pode ser afetado pela escala de análise como observado por Chen *et al.* (2015). Os autores consideraram a heterogeneidade estacionária das propriedades do solo e verificaram uma diminuição da lâmina de água escoada à medida que a escala espacial aumenta. Outro aspecto identificado está relacionado à linearidade da relação chuva/escoamento, por exemplo, tomando em conta vertentes, o escoamento não é linear, entretanto à medida que se aumenta o tamanho da área, essa relação tende a se tornar linear (Wood *et al.*, (1986) devido à menor variabilidade espacial dos componentes relacionados à infiltração (DELGADO *et al.*, 2010; NIU E SIVAKUMAR, 2013).

Desse modo, observa-se que é fundamental classificar a variabilidade desses componentes, pois esta interfere nas previsões de infiltração e nas relações entre as diferentes escalas (MOREL-SEYTOUX, 1988). Além disso, esta classificação permite selecionar os métodos mais adequados de caracterização das propriedades físicas e hidráulicas do solo e de determinação de infiltração, em vista que os métodos são altamente dependentes da escala de medição (ROSE, 2004).

### **3.4. Modelos de infiltração-escoamento**

#### **3.4.1. Considerações gerais**

Representar, descrever e obter informações a respeito do processo de infiltração e de geração de escoamento Hortoniano, são tarefas essenciais para avaliar a dinâmica de água de uma região. Diversos estudos para compreender esta dinâmica foram desenvolvidos, os quais são baseados em três abordagens. A primeira é baseada em parâmetros relacionados ao balanço hídrico (GIAMBELLUCA *et al.* 1996 ARAÚJO; GONZÁLEZ-PIEDRA, 2009; LI *et al.*, 2015). A segunda em parâmetros físicos e hidráulicos do solo (ABU-TALEB, 1999; CHU E MARINO, 2005; GUBER *et al.*, 2014). E a terceira é uma combinação dos dois primeiros que envolve procedimentos de campo e laboratório (SULLIVAN *et al.*, 1996; LUBCZYNSKI EGURWIN, 2005; TOUHAMINI *et al.*, 2015). Ressalta-se que o último é o mais vantajoso pois permite avaliar a variabilidade dos eventos de chuva e dos materiais geológicos e considerar os diversos usos do solo e prática de manejo. Nesse contexto, diversos modelos de infiltração-escoamento se encaixam no terceiro grupo, que é enfoque desta pesquisa.

### 3.4.2. Modelos de infiltração

Os modelos de infiltração-escoamento podem ser divididos em diversas categorias, as quais dependem do objetivo do estudo, das condições de contorno e da natureza do sistema.

A EPA (1998) por exemplo, considera 6 grupos como os mais importantes para descrever a infiltração, onde a escolha está em função do objetivo do trabalho, da relativa simplicidade de uso e aplicação, possibilidade de aplicação em diversas condições de chuva e em perfis (homogêneos ou heterogêneos). A Tabela 5 apresenta estes grupos e alguns modelos desenvolvidos em cada uma das classes propostas.

**Tabela 5.** Classificação dos modelos de infiltração-escoamento de água no solo.

Classe	Características	Modelos
Semi-Empírico	Desenvolvido a partir de dados coletados em campo ou laboratório, com pouco ou sem embasamento físico. Estes modelos consistem em encontrar a função matemática que descreve a infiltração, onde os dados obtidos no campo ou em laboratórios são ajustados a ela.	Kostiakov (1932); Horton (1939); Holtan (1961)
Homogêneo	Grande parte dos modelos foram desenvolvidos nestas condições. São derivados de soluções matemáticas, as quais são baseadas em aspectos teóricos do processo de infiltração	Green e Ampt (1911); Richards (1931); Philip (1957).
Não Homogêneo	A concepção destes modelos se fundamentou na heterogeneidade dos materiais geológicos, os quais podem variar tanto no conteúdo volumétrico, quanto nas suas características intrínsecas, que consequentemente pode alterar os valores de infiltração, quando comparados a solo homogêneos. Estes modelos assumem que é conveniente que o solo deva ser dividido em diversas camadas para poder estimar a infiltração.	Bouwer (1969); Flerchinger <i>et al.</i> ; 1988; Chu; Marino (2005); Corradini <i>et al.</i> (2011).
<i>Ponding</i>	Estes modelos estão baseados na premissa de que quando um evento chuvoso apresenta intensidade superior à taxa de infiltração do solo, há a geração de escoamento Hortoniano. Dependendo das características da superfície do terreno, a água poderá escoar superficialmente ou acumular durante um tempo para depois infiltrar.	Swartzenruber (1974); Morel Seytoux e Khanji (1974); Chu (1978); Parlange (1985); Wang <i>et al.</i> (2017)
<i>Non-Ponding</i>	Quando a intensidade de uma chuva é inferior à taxa de infiltração, toda a água irá infiltrar e não há a geração de escoamento superficial. Os modelos desenvolvidos sob essa premissa dependem da intensidade da chuva, do conteúdo inicial de água e a condutividade hidráulica saturada.	Philip (1957); Hillel; Gardner (1970).
Umedecimento-Secagem	Alternar a infiltração e exfiltração da água na superfície do solo, provoca uma condição de desequilíbrio na difusão da água. Estes modelos que seguem essa premissa, estão relacionados principalmente à presença de vegetação, que por meio das suas raízes promovem a evapotranspiração.	Eagleson (1978); Corradini <i>et al.</i> (1994).

**Fonte:** Baseado em EPA (1998)

Outra forma de se agrupar os modelos, é classificá-los em empíricos e em teóricos conforme mostrado e descritos a seguir

#### A - Modelos Empíricos

Os de base empírica são obtidos a partir de dados experimentais, os quais resultam em equações com formas simples, onde podem estimar a infiltração acumulada e a taxa de infiltração. Estes têm como limitações que não são capazes de fornecer informações a respeito da distribuição de água ao longo do perfil, não podem ser utilizados para outros tipos de condições, a não ser onde os dados foram obtidos, além de não apresentarem significado físico. Enquanto que as vantagens estão relacionadas a facilidade de uso devido à simplicidade de aplicação e os parâmetros necessários para o uso desses modelos são facilmente encontrados na literatura (SONAJE, 2013). Na Tabela 6 são levantadas as principais equações empíricas e as respectivas observações a respeito de cada uma.



**Tabela 6.** Listagem das principais equações empíricas para descrever e estimar a infiltração de água no solo.

Autor	Equações	Parâmetros	Observações
Kostiakov (1932)	$I(t) = \alpha t^{-\beta}$	I corresponde a taxa de infiltração em um tempo t; $\alpha$ e $\beta$ são constantes empíricas relacionadas as características do solo.	Esta equação descreve relativamente bem a infiltração para um tempo pequeno, porém para chuvas longas, a infiltração pode ser superestimada (PARLANGE E HAVERKAMP, 1989).
Horton (1940)	$I(t) = if + (i_0 - i_f)e^{-\gamma t}$	$I_0$ , $I_f$ são as taxas de infiltração inicial e final respectivamente, t é o tempo quando se iniciou a chuva, e $\gamma$ é uma constante empírica.	O grande problema dessa equação é a insuficiência em representar a diminuição rápida da infiltração de valores muito altos de t (SONAJE, 2013)
Soil Conservation Service (1957)	$I = P - R$ $R = \frac{(P - 0,2F_w)^2}{P + 0,8F_w}$	P é a chuva diária; R é o escoamento; $F_w$ é um parâmetro derivado estatisticamente, o qual está relacionado ao déficit de conteúdo volumétrico.	A limitação dessa equação é a possibilidade de superestimar ou subestimar o valor de infiltração por conta do parâmetro $F_w$ (CHUNALE <i>et al.</i> , 2001).
Holtan (1961)	$I(t) = F + ab(\omega - F)^{1,4}$	a é uma constante que varia entre 0,25 e 0,8; b é um fator de escala, F é a infiltração acumulada e $\omega$ é o déficit entre a umidade inicial e a saturada.	Para obter o $\omega$ é necessário ter a profundidade da camada superficial, onde Turner (2006) menciona a dificuldade em determinar este parâmetro.

**Fonte:** Baseado em King (1992) e Sonaje (2013)

## B - Modelos Teóricos

Os modelos com base física ou comumente chamados de teóricos, são divididos em dois grupos, aqueles que foram desenvolvidos a partir da equação não linear de Richards (1931) ou aqueles desenvolvidos a partir das formulações de Green e Ampt (1911).

### *1-Modelos baseados na equação proposta por Richards (1931)*

Os modelos desenvolvidos a partir da equação diferencial parcial parabólica não linear de Richards são mais sofisticados e necessitam de muitas informações a respeito dos parâmetros hidráulicos. As soluções analíticas no geral são poucas e difíceis de obter, as quais geralmente

são derivadas de linearizações que consideram a dependência da condutividade hidráulica com o conteúdo de água no solo (BASHA, 2000). Em virtude desta não linearidade dos parâmetros hidráulicos do solo, somado ao fato que estes descrevem a infiltração apenas para as condições de ponding em um solo semi-infinito e homogêneo, com uma umidade antecedente uniforme, a sua aplicação é restritiva (EPA, 1998).

Na Tabela 7 baseada nas listas levantadas por EPA (1998), Turner (2006) e Sonaje (2013) são apresentados alguns dos principais modelos desenvolvidos a partir de simplificações da equação de Richards.

**Tabela 7.** Listagem dos modelos de infiltração-escoamento desenvolvidos a partir da equação de Richards.

Autor	Equação	Parâmetros
Philip (1969)	$Y = \frac{1}{4} \left[ 2T^{1/2} \exp(-T\pi) + (2T + \pi) \operatorname{erf} \left[ \frac{T}{\pi} \right]^{1/2} \right] + 2T$	$\lambda$ é uma constante entre 0 e 1
Knight (1973)	$Y = \frac{\pi}{4} \ln \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{4T}{\pi} \right)^{1/2} \right] + T$	$\operatorname{erf}$ é uma função de erro que descreve a difusão, que é usada para calcular a integral de uma distribuição normal
Parlange (1975)	$2Y - [1 - \exp(-2T^{1/2})] = 2T$	
Brutsaert (1977)	$Y = T + \left[ \frac{T^{1/2}}{1 + \alpha T^{1/2}} \right]$	$\alpha$ é uma constante que varia entre 2/3 e 1
Collis-George (1977)	$Y = T + \frac{1}{N} [\tanh(N^2 T)]^{1/2}$	$N$ é uma constante adimensional que varia entre 1 e 4.
Schwartzendruber e Claguer (1989)	$Y = T + \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - \exp \left( -\alpha T^{1/2} \right) \right]$	$\alpha$ é uma constante relacionada aos parâmetros hidráulicos do solo.

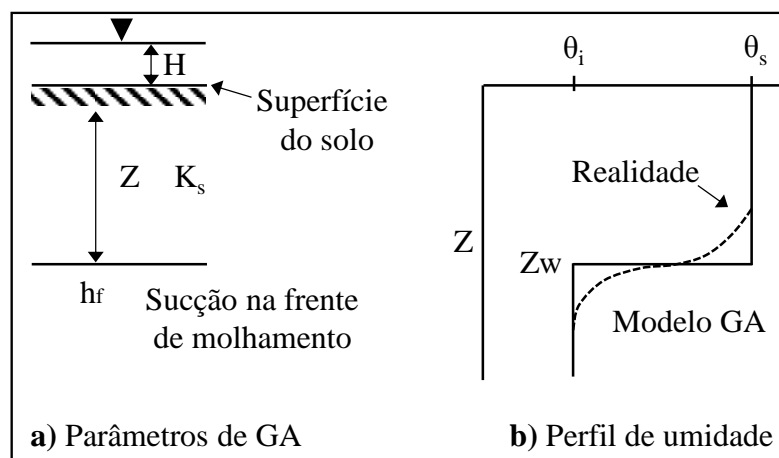
**Obs:** Y= infiltração acumulada adimensional e T= Tempo adimensional. As equações para obter T e Y estão expostas a seguir;  $T = K_s^2 t / S^2$ ;  $Y = K_s^2 I / S^2$ , onde  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada; t é o tempo; I é a intensidade e S é a sorptividade definida em Philip (1957)

**Fonte:** Baseado em EPA (1998), Turner (2006) e Sonaje (2013)

## 2 - Modelos Baseados na equação proposta por Green e Ampt (1911)

O segundo conjunto de modelos teóricos são aqueles que tem como base a proposta de Green e Ampt (1911). Estes autores foram os primeiros que derivaram uma equação com base física descrevendo a infiltração de água no solo. Este modelo e os desenvolvidos a partir do mesmo tem como vantagens a simplicidade das condições de contorno, adaptabilidade a cenários, facilidade de obtenção dos parâmetros e o embasamento físico bem definido (PRUSKI *et al.*, 1997; SONAJE, 2013). As desvantagens encontradas na literatura estão associadas ao fato do modelo não conseguir integrar o efeito da histerese e apresenta limitações físicas devido à sua simplicidade (NIELSEN E PERROCHET, 2000; SONAJE, 2013)

O modelo proposto por Green e Ampt (1911) foi desenvolvido a partir da equação elaborada por Darcy, e tem as seguintes condições de contorno: perfil de solo homogêneo; profundidade infinita; umidade inicial ( $\theta_i$ ) uniforme; carga hidráulica constante na superfície durante o processo de infiltração. Este modelo assume que o movimento da água ao longo do perfil de solo é tipo pistão, onde a frente de molhamento é bem definida. O perfil tipo pistão assume que a umidade da zona de transmissão ( $\theta_t$ ) satura ( $\theta_s$ ), conseqüentemente a condutividade hidráulica dessa zona equivale a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ). Enquanto para sucção na frente de molhamento ( $h_f$ ) assume-se que esta seja negativa, e para a sucção na superfície ( $h_s$ ) é igual a carga hidráulica ( $H$ ). Na Figura 9 é mostrado o esquema de funcionamento do modelo, onde é possível observar a presença de duas regiões bem definidas, a primeira a qual está saturada e a segunda que apresenta o conteúdo volumétrico no início do processo.



**Figura 9.** Representação de funcionamento e dos principais elementos do modelo de Green e Ampt (1911).

**Fonte:** Modificado de (Hillel, 2004).

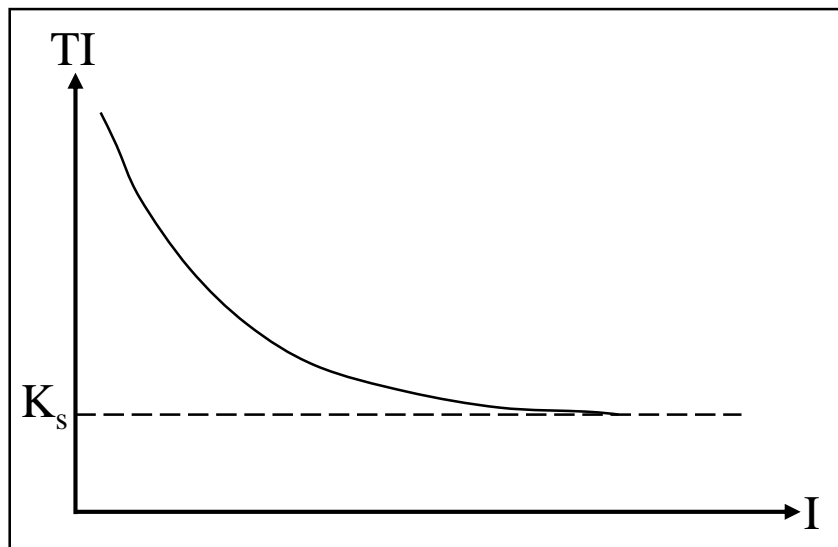
A partir do pressuposto enunciado acima, a infiltração em um tempo  $t$  estará na profundidade  $Z$ . Desse modo, pode-se estabelecer com a lei de Darcy:

$$q = \frac{dI}{dt} = -K_s \left( \frac{h_f - (h_s + Zw)}{Zw} \right) \quad [6]$$

Onde:  $K_s$  é condutividade hidráulica saturada (cm/min);  $I$  é a infiltração acumulada em um determinado tempo (cm);  $h_f$  é a sucção na frente de molhamento (cm);  $h_s$  é a sucção na superfície (cm); e  $Z_w$  é a profundidade da frente de molhamento (cm).

Para eliminar o  $Z$  da equação, utilizou-se da relação que  $I$  em um tempo  $t$  é igual a  $Z$  ( $\theta_s - \theta_i$ ). Desse modo, realizando a integração tem-se a equação do modelo de Green e Ampt (1911) a seguir, onde na Figura 10 é mostrada a representação gráfica da curva de infiltração em função da infiltração acumulada:

$$I = K_s t - (h_f - h_s)(\theta_s - \theta_i) \log_e \left[ 1 - \frac{I}{(h_f - h_s)(\theta_s - \theta_i)} \right] \quad [7]$$



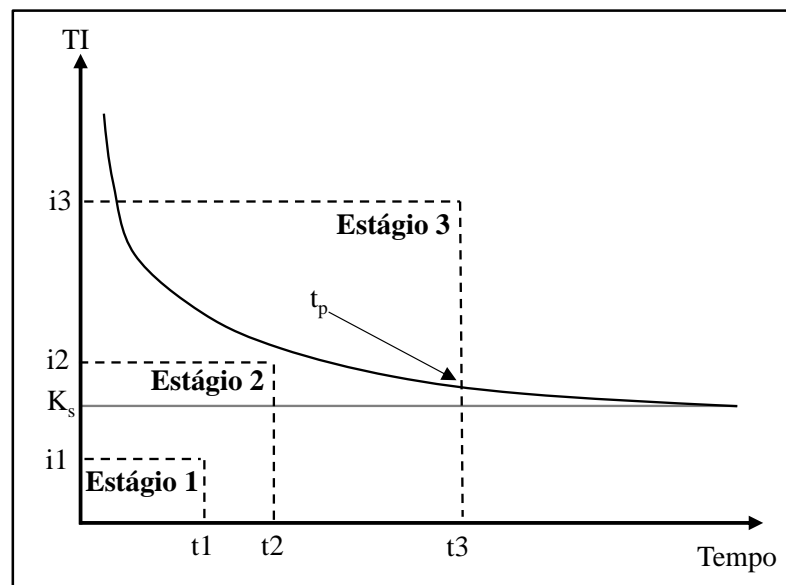
**Figura 10.** Representação gráfica da curva de infiltração em função da infiltração acumulada obtida a partir do modelo de Green e Ampt (1911).

**Fonte:** Baseado em Green;Ampt (1911).

Por conta da simplicidade e flexibilidade mencionada anteriormente, diversos estudos foram conduzidos a partir da proposta de Green e Ampt (1911), os quais modificaram o mesmo para outras condições. Dentre essas condições são citadas a estimativa de escoamento superficial Hortoniano, chuvas transientes, solos com selamento, erosão, solos heterogêneos, presença de nível d'água, transporte de solutos e recarga de águas subterrânea (YU, 1999; WANG *et al.*, 1999; GOVINDARAJU *et al.*, 2001; CHU E MARINO, 2005; NARULA E GOSAIN, 2013; VIJI *et al.*, 2015). Para uma descrição mais detalhada sobre os modelos desenvolvidos a partir de Green e Ampt (1911), consultar Kale e Sahoo (2011).

Dentre as alterações mais importantes realizadas no modelo de Green e Ampt (1911), cita-se a realizada por Mein e Larson (1973), que posteriormente seria adaptada por Chu (1978) para chuvas transientes. O último é utilizado nesta pesquisa para estimar a infiltração potencial e a geração de escoamento superficial Hortoniano, e está descrito de maneira detalhada no Item 4.2.3.

No modelo de Mein e Larson (GAML), os autores integraram a equação de Green e Ampt (1911) em função da duração da chuva, afim de determinar o tempo de *ponding* e o volume infiltrado em relação a intensidade e a duração de um evento chuvoso. Estes para uma chuva de intensidade  $i$ , em um solo com condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) e taxa de infiltração (TI), consideram que a infiltração apresenta três estágios distintos os quais serão descritos a seguir e podem ser observados esquematicamente na Figura 11:



**Figura 11.** Representação esquemática dos três estágios de infiltração de acordo com o modelo de Mein e Larson (1973)

Fonte: Baseado em Mein e Larson (1973)

Estágio 1: A intensidade  $i$  é menor que  $K_s$ , logo não há a geração de escoamento, pois toda a precipitação infiltrará;

Estágio 2: A intensidade da chuva é menor que a TI e maior que  $K_s$ , conseqüentemente toda a água infiltra no solo e aumentará o teor de umidade;

Estágio 3: A intensidade da chuva é maior que a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica, desse modo há a geração do escoamento superficial. Quando se atinge o terceiro estágio do modelo, haverá um tempo que o solo irá saturar, ou seja, alcançará o tempo de *ponding*, que é determinado pela Equação 8.

$$t_p = \frac{P_{tp}}{i} \quad [8]$$

Onde:  $t_p$  é o tempo de *ponding* (h); e  $P_{tp}$  é a infiltração acumulada até o momento do *ponding* (m)

Para determinar a infiltração acumulada até o início do *ponding*, utiliza-se a Equação 9, enquanto a Equação 10 é usada para obter a taxa de infiltração após o *ponding*.

$$P(tp) = \frac{h_f}{\frac{i}{K_s} - 1} (\theta_s - \theta_i) \quad [9]$$

$$TI = K_s \left( 1 + \frac{h_f (\theta_s - \theta_i)}{P(tp)} \right) \quad [10]$$

Apesar do uso bastante intenso desse modelo, este apresenta algumas desvantagens, principalmente no que diz respeito a determinação dos parâmetros necessários ( $K_s$ ,  $\Psi_f$ ,  $\theta_s$  e  $\theta_i$ ) para sua aplicação. Conforme Cecílio *et al.* (2003) os parâmetros não representam efetivamente as condições de campo durante o processo de infiltração, bem como as incertezas na obtenção destes através de ensaios de laboratório, de campo e de funções de pedotransferência, que serão discutidas mais profundamente nos Itens 3.5 e 4.2.11.

Referente aos problemas considerados no modelo para simular a infiltração, Slack (1980) constatou que devido ao fenômeno de aprisionamento do ar nos poros, o conteúdo de água na zona de transmissão não atinge o conteúdo volumétrico saturado. Este mesmo autor, assim como Cecílio *et al.* (2007), indicam que deva ser utilizado o máximo conteúdo

volumétrico  $\theta_w$ , que representa o teor de água que um solo atinge durante a infiltração. Nesse sentido, Cecílio *et al.* (2003) em experimentos realizadas em uma coluna de solo para um Latossolo Vermelho Amarelo, ao aplicar no modelo de GA obteve melhor resultados com  $\theta_w$ , quando comparados aos valores de  $\theta_s$ .

Enquanto que para a condutividade hidráulica, por conta de não ocorrer a saturação completa ao longo do processo de infiltração em virtude do ar aprisionado nos poros (BOUWER, 1966; HAMMECKER *et al.*, 2003), alguns autores sugerem a utilização de outros valores. Bouwer (1966) por exemplo, recomenda que seja utilizado  $0.5K_s$ , por outro lado, Cecílio *et al.* (2003) indica que o valor adotado seja o da capacidade de infiltração, valor esse corroborado por Silva; Kato (1999). Ressalta-se que o último autor considerou a capacidade infiltração, e identificou para valores de infiltração acumulada erros da ordem de 3,2% para o modelo GA, porém para o GAML já não apresentou o mesmo desempenho (8,2%).

Dos três parâmetros necessários para aplicação do modelo, a sucção na frente de molhamento ( $\Psi_f$ ) é o mais difícil de se determinar. Em vista que esse parâmetro está relacionado à uma pressão negativa, utilizou-se neste trabalho o termo capilaridade efetiva ( $H_{ce}$ ) cujo o valor é a análogo e inverso à sucção na frente de molhamento, ou seja é sucção é positiva (Morel Seytoux *et al.*, 1996). Mein e Larson (1973) indicam que o cálculo desse parâmetro deve ser feito a partir da curva de retenção de água. Bouwer (1969) recomenda que o valor adotado para a capilaridade efetiva deve ser a metade do valor da sucção na entrada de ar. Nesse sentido, Nachabe (1996), Morel Seytoux (1996) e Saxton e Rawls (2006) propõem que capilaridade efetiva seja calculada a partir dos parâmetros da curva de retenção de Van Genuchten (1980) ou de Brooks; Corey (1964), através de funções de pedotransferência.

### **3.5. Métodos de caracterização e obtenção dos parâmetros de infiltração**

#### ***3.5.1. Determinação da capilaridade efetiva e conteúdo volumétrico de água***

Através da curva de retenção é possível estimar dois dos parâmetros necessários para aplicação do modelo de infiltração-escoamento utilizado, os quais são a capilaridade efetiva e a faixa dos possíveis valores de conteúdo volumétrico de água inicial. Existem diversos tipos de métodos para obtenção da curva de retenção de água, os quais podem ser divididos em técnicas de campo (*in situ*), laboratório ou indiretos (funções de pedotransferência). Segundo Bitelli (2010) a escolha do método mais adequado depende de: qual é o tipo de aplicação; tipo

de solo; condições meteorológicas; localização; custo; resolução espacial; faixa de potencial; reprodutibilidade; e conhecimento técnico de operação. Na Tabela 8 a qual foi baseada em Villar (2009); Soto (2004); Gomes (2007); e Wösten *et al.* (2001) são levantados os principais métodos de medidas de sucção x conteúdo de água no solo (curva de retenção), onde são considerados apenas os que medem a sucção matricial. Para uma revisão mais aprofundada dos métodos de obtenção da curva de retenção de água consultar Bitelli (2010).



**Tabela 8.** Principais métodos utilizados para a determinação da curva de retenção.

Método	Tipo	Sucção	Faixa de Medida (Kpa)	Observações
Funil de pedra porosa	Laboratorial	Matricial	0 a 70	-Baixas sucções, onde a precisão das panelas é limitada; -Sucção aplicada diretamente na amostra; -Exequibilidade simples por dispensar uso de compressores e câmaras herméticas.
Câmara de Pressão de Richards	Laboratorial	Matricial	0 a 1500	-Utiliza a técnica de translação de eixos; -A capacidade depende da pedra porosa; -Continuidade da fase de ar; -Flexibilidade de uso e pode ser acoplada a outros equipamentos como câmaras triaxiais, cisalhamento direto, dentre outros.
Membrana de pressão	Laboratorial	Matricial/Total	Até 10000	-Utiliza a técnica de translação de eixos; -Utiliza membrana de celulose;
Tensiômetro	Laboratorial/In situ	Matricial	0 a 70	-Tempo de resposta em função da condutância da pedra; -Tensiômetros de alta capacidade (medem pressões abaixo de -1atm); -Permite a medição direta da sucção mátrica; -Ocorre a evaporação na superfície de contato tensiômetro solo durante a medição em amostras muito porosas.
Papel Filtro	Laboratorial	Matricial/Total	Todos os valores	-É um método simples -Necessita muita precisão na pesagem; -A qualidade da determinação da sucção depende do contato com o solo; -Problemas com a Calibração e fungos. -Permite a obtenção da sucção osmótica pela diferença da sucção total e a sucção mátrica.
Blocos Porosos	Laboratorial/In situ	Matricial	10 a 1000	-Condutividade elétrica de materiais porosos; -Histerese pronunciada a qual é mais sensível as altas sucções; -Longo tempo de resposta; -Fácil deterioração do material.
Sensores de condutividade térmica	Laboratorial	Matricial	0 a 400	-Capsula de cerâmica contendo sensor de temperatura e mini-aquecedor; -Condutividade térmica do bloco varia com a sua umidade; -Equilíbrio solo-capsula>sucção mátrica medida a partir da condutividade.
Funções de Pedotransferência (FPT)	Indireto	Matricial/Total	Todos os valores	-Depende de características básicas obtidas em campo como granulometria, porosidade, massa específica, matéria orgânica; -Presença de muitas incertezas -Útil para grandes áreas por conta do baixo custo; -Diversas funções desenvolvidas

Fonte: Modificada de Vilar (2009)

A partir de uma análise dos métodos levantados, observou-se que descrever e obter parâmetros relacionados à curva de retenção de água e a capilaridade efetiva ao longo do espaço e do tempo é um grande desafio. Esta dificuldade está associada aos altos custos de obtenção destas informações para grandes áreas e a heterogeneidade espaço-temporal das propriedades dos materiais geológicos encontradas no campo (SIMUNEK *et al.*, 1998).

Nesse contexto, as funções de pedotransferência (FPT) são consideradas excelentes alternativas, como observado por Worsten *et al.* (2001); Baker (2008); Obi, *et al.* (2014), que verificaram que estas são capazes de estimar a curva de retenção e capilaridade efetiva com um grau de precisão satisfatório, de forma rápida e barata para grandes áreas. Essas funções são definidas como funções que estimam propriedades de difícil obtenção a partir de dados de mais fácil aquisição (PACHEPSKY E RAWLS, 2004; VEREECKEN *et al.*, 2010; PACHEPSKY E VAN GENUCHTEN, 2011; BOTULA *et al.*, 2014).

Os trabalhos pioneiros no desenvolvimento de FPT's foram realizados por Briggs e Shantz (1912) onde foram estimados a partir de frações granulométricas a umidade equivalente (capacidade de campo) e a ponto de murchamento. Em 1987, Bouma e Lanen introduziram o termo função de transferência que foi chamada posteriormente de Função de Pedotransferência (BOUMA, 1989 apud BOTULA, 2014). Estes termos originalmente estavam somente relacionados à FPT's desenvolvidas a partir de equações de regressão que expressam a relação entre variáveis dos solos, todavia posteriormente foram criadas funções, equações e algoritmos as quais não se baseiam somente em regressões.

O desenvolvimento das FPT's com enfoque em propriedades hidráulicas do solo atualmente pode ser feito através de diversas técnicas e métodos, dentre os quais são citadas as regressões lineares e polinomiais múltiplas, modelos de generalização linear, modelos aditivos gerais, método do grupo de manejo de dados, redes neurais, árvores de classificação e reclassificação, vizinhos mais próximos, algoritmos genéticos e máquina de suporte de vetores. Na Tabela 9 é mostrado um quadro resumo modificado de Minasny e Hartemink (2011) a respeito de cada um dos métodos.

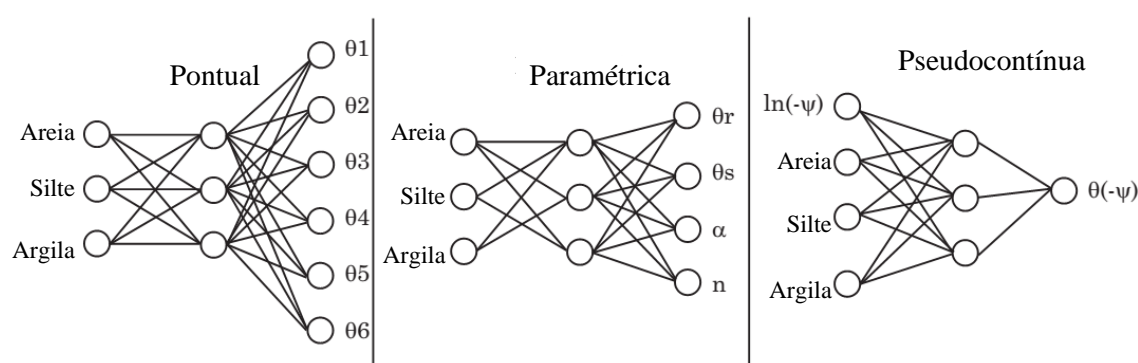
**Tabela 9.** Métodos para obtenção de funções de pedotransferência.

Método	Descrição	Exemplo
Regressão Linear Múltipla	O propósito das regressões lineares é analisar o grau de relação entre diversas variáveis independentes (estimadores) com as variáveis dependentes (estimadas). O funcionamento da regressão linear é através de um ajuste de uma linha reta ou um plano em um espaço dimensional, onde $n$ é o número de variáveis independentes, com os dados obtidos a partir de ensaios.	Obi <i>et al.</i> (2014); Nguyen <i>et al.</i> (2017)
Modelos de Generalização linear,	Esta classe de modelos parte do princípio de uma generalização de modelos ordinários lineares, ou seja são considerados uma extensão dos modelos de regressão linear, e tem com o objetivo de adequar variáveis dependentes que não apresentam uma distribuição normal. Os valores da variável dependente transformada são estimados a partir de combinações lineares de variáveis de predição, a transformação é referida como uma função de ligação, além disso, diferentes distribuições podem ser assumidas.	Mills <i>et al.</i> (2006)
Modelos Aditivos Gerais	Estes são modelos que utilizam técnicas de suavização para identificar e representar possíveis relações não lineares entre as variáveis estimadores e as estimadas. Os Modelos Aditivos Gerais são uma generalização dos Modelos de Generalização Linear, onde a função linear do estimador é substituída por uma função não especificada (não paramétrica), obtida através da aplicação de um gráfico de dispersão suave, para um de dispersão dos resíduos parciais (para os valores da variável transformada dependente).	Mills <i>et al.</i> (2006)
Redes Neurais Artificiais	As redes neurais são técnicas computacionais que representam um modelo matemático baseado na estrutura do sistema nervoso. A característica essencial desta técnica é uma rede de elementos de processamento simples a qual suas unidades são conectadas por canais de comunicação que estão associados a pesos.	Agyare <i>et al.</i> (2007);
Mínimos Quadrados Parciais	Esta técnica é uma alternativa em relação a regressão linear múltipla para lidar com mais variáveis independentes do que pontos de observação ou quando as variáveis são colineares. Nos mínimos quadrados parciais é construído um novo conjunto de componentes como variáveis regressoras as quais são a combinação linear das variáveis de origem. Os seus componentes são determinados tanto pelas variáveis de resposta e pelas variáveis estimadoras.	Awiti <i>et al.</i> (2008);
Árvores de Classificação e Reclassificação	Essa é uma alternativa também para regressão múltipla, onde o ajustamento em vez de ser para os dados, é elaborada uma estrutura em árvore gerada através da divisão da amostra de forma recursiva em um número de grupos. A divisão é determinada de modo a maximizar as diferenças medidas na variável estimada resultante de dois grupos. A estrutura resultante permite uma interpretação mais simples e rápida das variáveis mais importantes.	Tittonell <i>et al.</i> (2008);
Vizinhos Mais Próximos - K	A técnica dos K-Vizinhos mais Próximos refere-se a um algoritmo de aprendizagem “preguiçoso” utilizada para classificação de conjuntos de casos baseados no treinamento de casos mais próximos em um espaço de características multidimensionais. Chama-se este algoritmo de preguiçoso, pois uma vez que armazena passivamente os dados até o momento da aplicação. Os cálculos são feitos em tempo real, ou seja, somente quando as estimativas forem realizadas.	Miháliková <i>et al.</i> (2014); Nguyen <i>et al.</i> (2017)
Análise de Florestas Aleatórias	Este é um modelo de regressão ou classificação que consiste em diversas árvore de decisão ou regressão, onde cada uma dependente dos valores de um vetor aleatório amostrado de forma independente e com a mesma distribuição para todas as árvores. O resultado deste modelo é a média de todas as regressões ou das árvores de decisão.	Grimm <i>et al.</i> (2008);
Algoritmos Genéticos	Esta é uma técnica que envolve programação computacional automática para resolver problemas complexos. Seu funcionamento é baseado na construção de populações de modelos, os quais utilizam métodos estocásticos de busca, por exemplo, algoritmos evolucionários. Ressalta-se que neste, as variáveis e as constantes candidatas a variáveis estimadoras são otimizadas, deste modo não é necessário escolher a estrutura do modelo a priori, como em outras técnicas de regressão.	Parasuraman <i>et al.</i> (2007); Nguyen <i>et al.</i> (2017)
Máquina de Suporte de Vetores.	A Máquina de Suporte de Vetores é um conjunto de métodos e algoritmos de aprendizagem supervisionados utilizados para a classificação e regressão. A classificação é executada através da construção de um hiperplano não linear e adimensional, que separa otimamente os dados em duas categorias por meio de um limite linear em um espaço transformado do espaço das características.	Sá <i>et al.</i> (2009)

**Fonte:** Modificado de Minasny e Hatermink (2011)

Independentemente de qual método é utilizado de FPT's para estimar propriedades hidráulicas do solo, estes podem ser classificados de diversas formas. Neste estudo, foram classificadas em pontual, paramétrica e pseudocontínua (WÖSTEN *et al.*, 2001; SHARMA *et al.*, 2006). A pontual corresponde as FPT's que estimam os valores de conteúdo volumétrico

em potenciais matriciais predefinidos. As paramétricas por outro lado, são equações que tem a capacidade estimar os parâmetros de expressões analíticas da curva de retenção de água como a de Brooks e Corey (1964) e Van Genuchten (1980), ou seja, possibilitam estimar o conteúdo volumétrico em qualquer potencial matricial (BORGESSEN E SCHAAP, 2005). A pseudocontinua é uma variação das FPT's pontuais (HAGHVERDI *et al.* (2012), onde o logaritmo do potencial matricial é usado como parâmetro de entrada, portanto, permitindo estimar um único conteúdo volumétrico baseado na sucção adotada. Na Figura 12 é possível observar um esquema dos três tipos de FPT's.



**Figura 12.** Esquemas de funcionamento dos tipos de funções de pedotransferência.

**Fonte:** Modificado de Botula (2014)

A respeito dos parâmetros de entrada, estes podem ser os mais variáveis possíveis. De maneira geral as frações granulométricas são os mais usuais, todavia podem ser utilizados ainda a massa específica seca de campo, conteúdo de matéria orgânica, pH, CTC, superfície específica, dentre outros. Na Tabela 10 tem-se o resultado de um levantamento realizado por Botula *et al.* (2014) a respeito dos três tipos de funções e principais parâmetros de entrada e de saída utilizados nas FPT's em solos tropicais.

**Tabela 10.** Principais parâmetros de entrada e saída utilizados durante o desenvolvimento de funções de Pedotransferência para estimar propriedades hidráulicas do solo.

Método	Parâmetros de Entrada									Parâmetros de Saída								
	Granulometria	pd	MO/CO	pH	CTC	UE	DCB-Fe	DCB-Al	SE	$\theta_{10}$	$\theta_{33}$	$\theta_{1500}$	CAD <sub>10-150</sub>	CAD <sub>33-1500</sub>	$\geq 4$ PM	VG Parâmetros	BC Parâmetros	
<b>Funções de Pedotransferência Pontuais</b>																		
Pidgeon (1972)	x		x							x	x	x		x				
MacLean e Yager (1972)	x		x										x					
FAO (1974)	x											x						
Soil Survey Staff (1975, 1990)	x											x						
Lal (1978, 1981)	x										x	x	x				?	
Aina e Periaswamy (1985)	x	x									x	x					x	
Bhavanarayama <i>et al.</i> (1986)	x																	
Arruda <i>et al.</i> (1987)	x										x	x						
Dijkerman (1988)	x										x	x						
Rao <i>et al.</i> (1988)	x										?	x						
Soil Survey Staff (1992)	x		x									x						
Bell e Van Keulen (1995)	x		x	x	x							x						
Van den Berg (1996)	x	x					x	x		x		x						
Van den Berg <i>et al.</i> (1997)	x	x	x		x		x	x	x	x	x	x					x	
Tomassella e Hodnett (1998)	x		x									x						
Singh (2000)	x										x	x						
Mdemu e Mulengera (2002)	x	x	x							x	x	x					x	
Igwe <i>et al.</i> (2002)	x	?	?							x	x	x					x	
Tomassella <i>et al.</i> (2003)	x	x	x							x	x	x					x	
Saikia e Singh (2003)	x	?	?							?	?	x	?	?				
Adhikary <i>et al.</i> (2008)	x									x	x	x					x	
Patil <i>et al.</i> (2009)	x	x	x															
Reichert <i>et al.</i> (2009)	x	x	x							x	x	x					x	
Minasny e Hartemink (2011)	x	x	x							x	x	x						
Chakraborty <i>et al.</i> (2011)	x	x	x														x	
Obalum e Obi (2012)	x	x	x							x	x	x					x	
Santos <i>et al.</i> (2003)	x		x									x	x					
<b>Funções de Pedotransferência Paramétricas</b>																		
Van den Berg <i>et al.</i> (1997)	x		x		x		x	x										x
Tomassella <i>et al.</i> (1997)	x	x	x						x									x
Hodnett e Tomassella (2002)	x	x	x	x	x													x
Tomassella <i>et al.</i> (2003)	x	x		x				x										x
Santra e Das (2008)	x		x															x
<b>Funções de Pedotransferência Pseudocontínuas</b>																		
Adhikary <i>et al.</i> (2008)	x																	x
Vaz <i>et al.</i> (2005)	x																	x
Millán e González- Posada (2005)	x																	x
Andrade <i>et al.</i> (2008)	x																	x

**Legenda:**

pd=Massa específica seca de campo; MO/CO=Matéria Orgânica e/ou Carbono Orgânico; pH=Potencial de Hidrogênio CTC=Capacidade de Troca Catiônica; EU= Umidade equivalente; DCB-Fe= Dithionite-citrate-bicarbonato extractable iron; DCB-Al= Dithionite-citrate-bicarbonato extractable aluminum; SE=Superfície Específica;  $\theta$ =Conteúdo volumétrico; CAD=Conteúdo de água disponível(CC-PM); CC=Capacidade de Campo; PM=Ponto de Murchamento; VG=Van Genuchten; BC= Brooks e Corey



### 3.5.2. Determinação da condutividade hidráulica saturada

Conforme observado na literatura, vários são os métodos para a determinação da condutividade hidráulica. Estes podem ser classificados de diversas formas. A classificação adotada nesta pesquisa compartimenta os métodos em: *in situ*, laboratório e indiretos. Na Tabela 11 são listados alguns dos principais métodos para obter a condutividade hidráulica (LILY *et al.*, 2008; SOTO *et al.*, 2009; SONAJE, 2013; STIBINGER, 2014).

**Tabela 11.** Principais métodos utilizados para a determinação da condutividade hidráulica.

Método	Tipo	Observações
Funções de Pedotransferência	Indireto	Aplicado a grandes áreas; possibilidade de estimar $K_s$ de camadas mais profundas; muitas incertezas envolvidas durante as estimativas; deve ser usado apenas quando não se tem condições de fazer medidas de campo.
Permeâmetro de Carga Variável	Laboratório	Aplicados a solos com baixa condutividade hidráulica; pode não capturar a heterogeneidade do solo por conta de ser uma amostra pequena.
Permeâmetro de Carga Constante	Laboratório	É adequado para solos com condutividade hidráulica intermediária a alta; pode não capturar a heterogeneidade do solo por conta de ser uma amostra pequena; Apresentada muitos erros em condutividades hidráulicas extremas.
Infiltrômetro de Duplo Anel	<i>In situ</i>	Serve para medir a taxa de infiltração e infiltração acumulada; resultados dependem do conteúdo de água; os valores de $K_s$ estão relacionadas as camadas superficiais; incertezas envolvidas por conta da execução do ensaio; permite capturar o efeito da macroporosidade; pode se obter a sorptividade; pode sem ser associados outros ensaios como tensiômetros, tdr, sonda de nêutrons e perfil instantâneo.
Permeâmetro Guelph	<i>In situ</i>	Rapidez e facilidade de operação; pode-se aplicar tanto em solos arenosos e argilosos, todavia podem apresentar valores negativos de $K_s$ em solos argilosos e siltosos muito porosos e com elevada presença de macroporosidade; possui a mais aceita fundamentação teórica para inclusão dos efeitos matriciais na determinação de $K_s$ .
Simulador de Chuva	<i>In situ</i>	Simulam condições típicas de chuva naturais (velocidade impacto, distribuição e ângulo de impacto das gotas, intensidade); são capazes de reproduzir chuvas intensas; são complexos e envolvem um número grande de pressuposições (maior erro amostral); necessita de um maior apoio logístico.
Permeâmetro de Disco	<i>In situ</i>	Podem operar em solos com macroporos; não provocam perturbações no solo; são simples de usar; a área infiltrada é superficial.

**Fonte:** Baseado em Lily *et al.* (2008); Soto *et al.* (2009); Sonaje (2013); e Stibinger (2014).

Dentre os métodos listados acima um dos mais utilizado é o infiltrômetro de duplo anel o qual é regido pela norma ASTM D3385. Este tem como as seguintes premissas: solo homogêneo; isotrópico; temperatura da água do anel interno constante; fluxo unidimensional. O ensaio consiste em dois cilindros de metal concêntricos, onde o externo tem um diâmetro 60 cm e o interno 30 cm. Estes dois cilindros são cravados na superfície do solo em torno de 5 cm, em seguida são preenchidos com água, onde a lâmina deve variar entre 5 a 15 cm aproximadamente. Para diminuir a perturbação (BOUWER, 1986) ressalta que a cravação seja feita por percussão e com muito cuidado, para evitar a deformação e a compactação do solo, de modo a não interferir nas taxas de infiltração.

A determinação da infiltração é baseada na variação da altura de água do cilindro interno por unidade de tempo. O cilindro externo, por sua vez, tem como função eliminar o efeito da infiltração horizontal, e garantir que a infiltração seja unidimensional. Entretanto, de acordo com Zuquette; Palma (2006) principalmente em condições de solos muito secos, o infiltrômetro de duplo anel ainda apresenta influência da infiltração horizontal, por conta do gradiente hidráulico de pressão formado entre o solo úmido na porção superficial do solo e o solo seco ao seu redor.

Para realizar as leituras ao longo do ensaio, podem ser utilizados três métodos: 1) através do uso de um vaso de Mariotte conectado ao cilindro que mantém o nível de água constante, onde o cilindro externo é abastecido manualmente; 2) uso de uma bolsa de água conectada ao cilindro interno, que permanece abaixo do nível de água. Periodicamente esta bolsa é retirada e a partir do peso é determinado o volume infiltrado; 3) utilizar um sistema de leituras composto por uma boia que sustenta uma régua, na qual é feita a leitura da variação do volume infiltrado (MARTINELLO, 2006).

Para calcular a taxa de infiltração utiliza-se a equação a seguir

$$TI = \frac{Q}{\Delta t A} \quad [11]$$

Onde: TI é a taxa de infiltração (mm/min); Q é o volume de água infiltrado; t é o tempo; A é a área do anel interno.



A condutividade hidráulica pode ser calculada tanto para carga constante (Equação 12) como para carga variável (Equação 13).

$$Kfs = \frac{Vf}{\left(\frac{H+Zw}{Zw}\right)A t} \quad [12]$$

$$Kfs = \frac{Zw \ln\left(\frac{H2}{H1}\right)}{t} \quad [13]$$

Onde:  $K_{fs}$  é a condutividade hidráulica saturada de campo;  $Vf$  é o volume de água infiltrado no solo;  $H$  é a profundidade lâmina de água em regime constante (carga hidráulica);  $Zw$  é a profundidade na frente de molhamento;  $A$  é a área transversal do anel;  $H_1$  é a profundidade inicial da água no anel; e  $H_2$  é a profundidade da água no anel depois de um tempo.

Ao término do ensaio, para determinar a profundidade da frente de molhamento e a distribuição de água no solo, são obtidas medidas de umidade em diferentes profundidades. Estas medidas podem ser feitas a partir de amostragem direta, tensiômetros ou sonda de nêutrons. Associado a estes procedimentos, o uso em especial da sonda de nêutrons e dos tensiômetros que medem o potencial mátrico e o conteúdo de água no solo, é possível obter por meio indireto a condutividade hidráulica não saturada em profundidade (TEIXEIRA *et al.* 2005). Na Tabela 12, baseado no levantamento feito por Dias (2012), são apresentados alguns modelos que estimam a condutividade hidráulica não saturada.

**Tabela 12.** Principais modelos utilizados para determinar a condutividade hidráulica não saturada.

<b>Autores</b>	<b>Equação</b>	<b>Parâmetros</b>
Richards (1931)	$K(\psi) = a\psi + b$	a e b são parâmetros de ajuste
Gardner (1958)	$K(\psi) = K_s e^{-a\psi}$	a é um parâmetro de ajuste relacionado ao inverso do valor de entrada de ar
Brooks e Corey (1964)	$K(\psi) = K_s$ , para $\psi \leq \psi_b$ $K(\psi) = K_s \left(\frac{\psi}{\psi_b}\right)^b$ , para $\psi \geq \psi_b$	$\psi_b$ é o valor de entrada de ar; b é um parâmetro de ajuste
Campbell (1974)	$K(\psi) = k_s \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^{2+2/b}$	$\psi_b$ é o valor de entrada de ar; b é um parâmetro de ajuste
Van Genuchten (1980) (baseado em Mualem, 1976)	$K(\psi) = \frac{\{1 - (\alpha\psi)^{n-1}[1 + (\alpha\psi)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha\psi)^n]^{m/2}}$	$\alpha$ , m, e n são parâmetros de ajuste

**Fonte:** Modificado de Dias (2012)

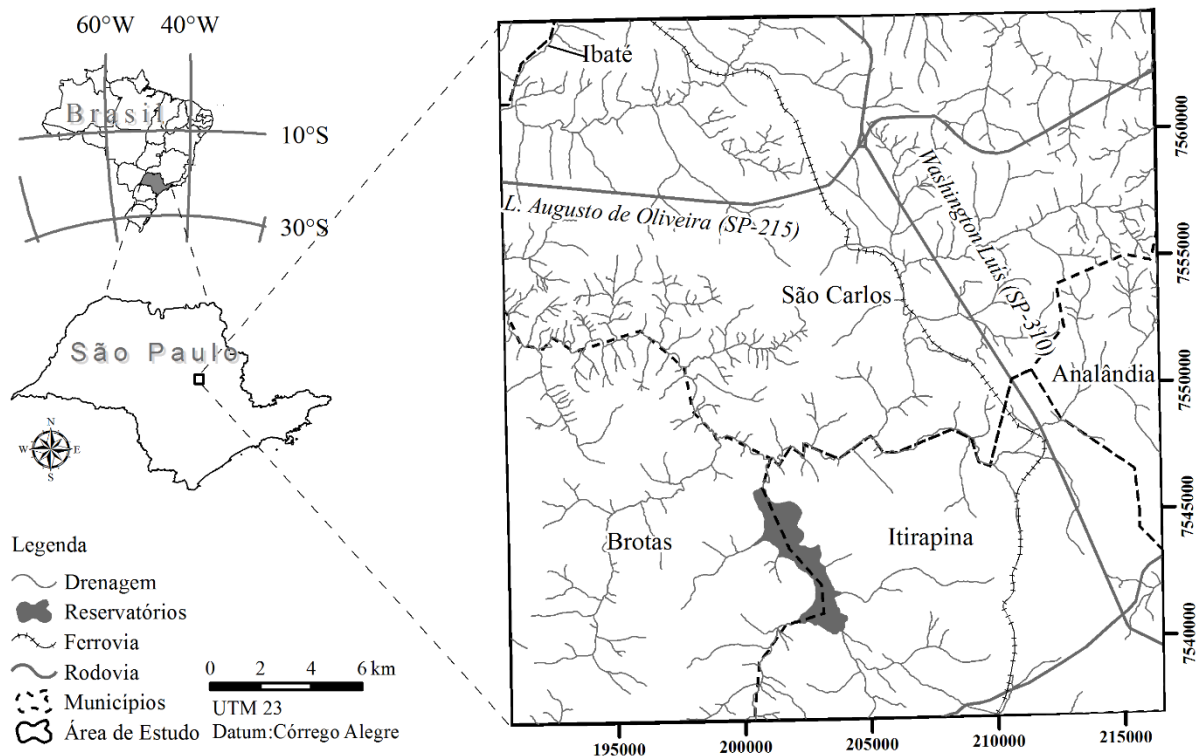
## CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Área de estudo

A área de estudo é composta das folhas topográficas de São Carlos e Araraquara elaboradas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na escala 1:50.000. A escolha de duas regiões foi para avaliar a aplicabilidade da sistemática proposta neste estudo, em áreas com características diferentes em termos de materiais geológicos e usos do solo e as respectivas distribuições espaciais.

#### 4.1.1. Localização e aspectos demográficos

A Região de São Carlos (RSC) está localizada na região centro-leste do Estado de São Paulo, entre os paralelos  $48^{\circ}00'$ - $47^{\circ}45'$  W e  $22^{\circ}00'$  - $22^{\circ}15'$  S (Figura 13). As vias de acesso são a rodovia Washington Luiz (SP-310) que atravessa a RSC no sentido noroeste-sudeste, a rodovia Luís Augusto de Oliveira (SP-215) no sentido Leste-Oeste e a estrada de ferro da Ferrovia Paulista SA (FEPASA) que corre paralelamente com a Washington Luiz.

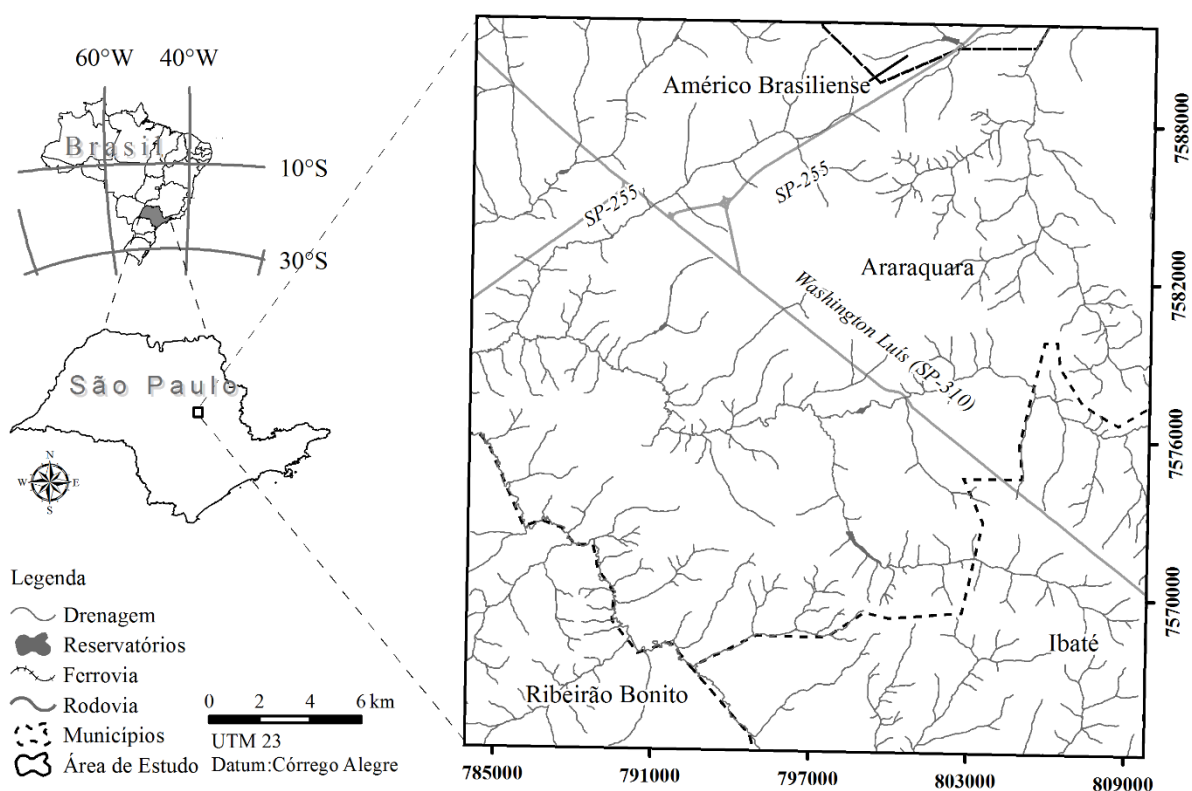


**Figura 13.** Localização da folha do IBGE de São Carlos.

**Fonte:** Baseado em IBGE (1971).

A RSC apresenta uma área de 715,27 km<sup>2</sup> que engloba parte dos municípios de São Carlos (51,55 % da área total - 369,12 km<sup>2</sup>) (população estimada de 246.088 habitantes), Itirapina (22,72% da área total - 162,25 km<sup>2</sup>) (população estimada de 17.589 habitantes), Brotas (20,55 % da área total - 146,69 km<sup>2</sup>) (população estimada de 23.858 habitantes), Analândia (4,63 % da área total- 33,25 km<sup>2</sup>) (população estimada de 4.845 habitantes) e Ibaté (0,55% da área total - 3,96 km<sup>2</sup>) (população estimada de 34.226 habitantes) (IBGE, 2017).

A Região de Araraquara (RSA) está localizada na região centro-leste do Estado de São Paulo, entre os paralelos 48°15'-48°00' W e 21°45' -22°00' S (Figura 14). Os principais acessos da área de estudo são as rodovias Washington Luiz (SP-310) que a atravessa na sua totalidade no sentido noroeste-sudeste, a rodovia Antônio Machado Sant'Anna/ João Ribeiro de Barros (SP 255) que cruza a RSA a norte no sentido nordeste-sudoeste e a estrada de ferro da FEPASA.



**Figura 14.** Localização da folha do IBGE de Araraquara.

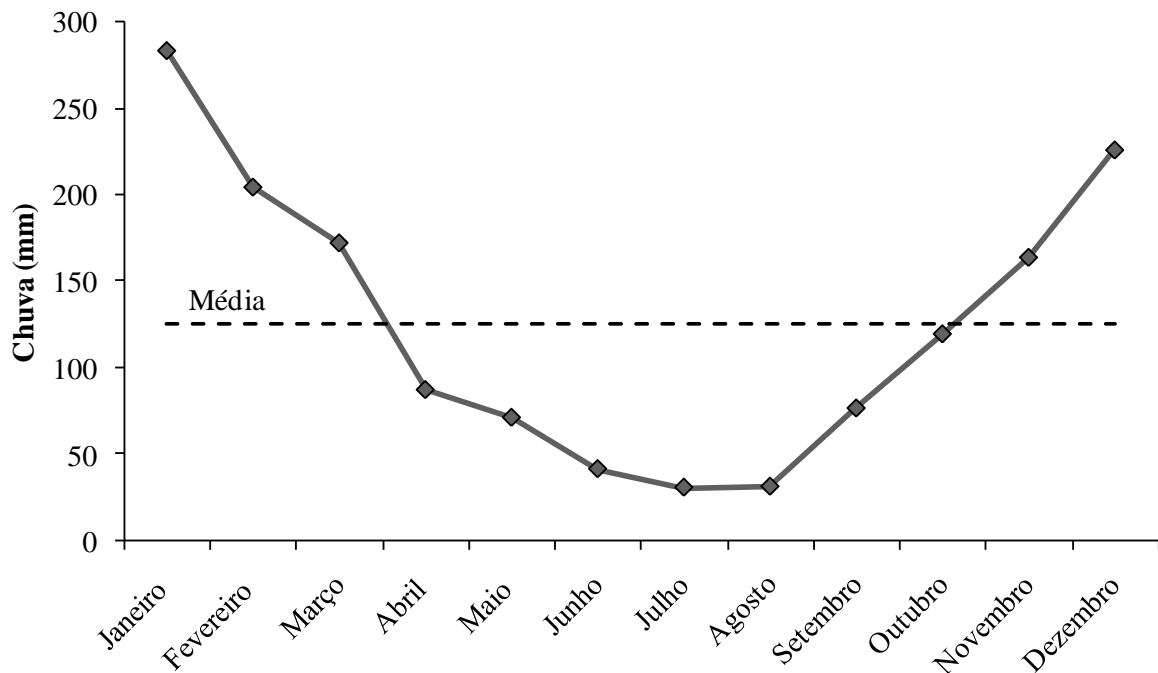
**Fonte:** Baseado em IBGE (1971).

A RSA apresenta uma área de 716,41 km<sup>2</sup> que engloba parte dos municípios de: Araraquara (71,37 % da área total - 511,33 km<sup>2</sup>) (população de 230.770 habitantes), Ibaté (18,11% da área total – 129,71 km<sup>2</sup>) (população de 34.226 habitantes), Ribeirão Bonito (9,11 %

da área total – 65,26 km<sup>2</sup>) (população de 13.060 habitantes) e Américo Brasiliense (1,41% da área total – 10,12 km<sup>2</sup>) (população de 39.189 habitantes) (IBGE, 2017).

#### 4.1.2. Clima

O clima da ambas as folhas topográficas segundo a classificação de Köppen é do tipo Cwa, que caracterizado por ser um clima tropical de altitude com chuvas no verão e secas no inverno (PEEL *et al.*, 2007). A temperatura média anual segundo CEPAGRI (2015) é de 21,2°C, a máxima média mensal é registrada nos meses de janeiro e fevereiro com 23°C e a mínima média mensal no mês de julho com 18°C. A umidade média é 75%. Em relação as chuvas, estas apresentam média de 1500 mm ao ano, o período chuvoso ocorre entre os meses de novembro a março e o período de seca nos meses de junho a agosto. Na Figura 15 pode ser observada a média de chuva mensal anual, obtida a partir de dados das estações pluviométricas monitoradas na área de estudo pela ANA (2015) durante o período de 1979 a 2014.



**Figura 15.** Padrão das chuvas mensais identificadas nas regiões de São Carlos e Araraquara.

**Fonte:** Baseado em ANA (2015).

#### **4.1.3. Vegetação**

A vegetação predominante das regiões de São Carlos e Araraquara é composta por cerrados, cerradões, com ocorrência de florestas semidecídua e matas de galerias. Todavia, atualmente os cerrados foram retirados para o estabelecimento de pastagens e culturas como a cana de açúcar. Por outro lado, as florestas semidecíduas ainda se mantêm relativamente preservada, pois estão em zonas de difícil acesso e manejo como as escarpas, ou seja, não são interessantes para o uso agrícola.

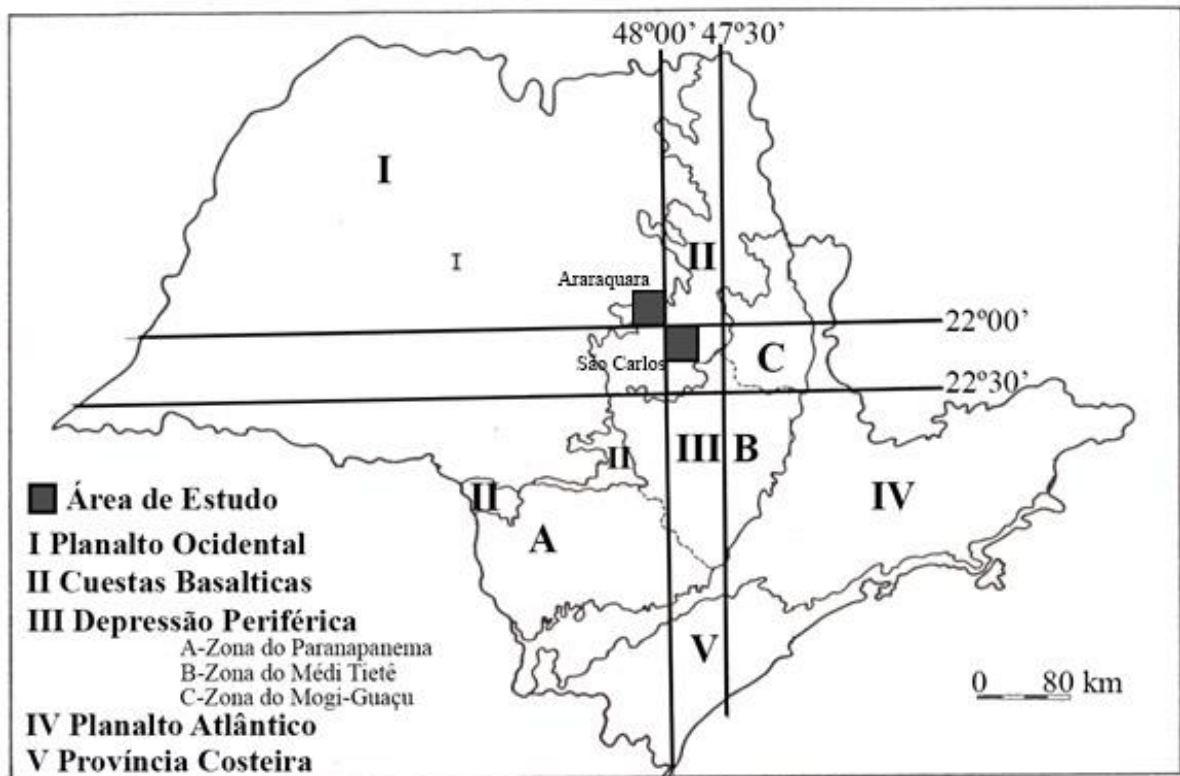
#### **4.1.4. Águas subterrâneas**

As regiões de São Carlos e Araraquara estão assentadas sobre mananciais rasos e profundos das Formações Serra Geral, Itaqueri, Adamantina e Botucatu/Pirambóia. Dentre os 4 mananciais subterrâneos identificados o que apresenta a maior importância ambiental é o Botucatu/Pirambóia. Este apresenta excelente qualidade e quantidade para abastecer a população brasileira em pelo menos 2.500 anos (EMBRAPA, 2013), e grande parte da área de estudo está situada sobre a área de recarga potencial deste manancial (ZUQUETTE, 1981; NISHIYAMA, 1991). A recarga deste manancial está relacionada especialmente as áreas de afloramento das formações Botucatu e Pirambóia e por infiltração através das fissuras dos basaltos em determinados altos estruturais. Salienta-se que a recarga no aquífero tem direção de fluxo para oeste, todavia grande parte do escoamento básico é drenado para os rios ainda na área de recarga (CETESB, 2004).

#### **4.1.5. Geomorfologia**

Conforme a divisão geomorfológica do Estado de São Paulo (Figura 16) proposta por IPT (1981), verifica-se que a região de São Carlos está inserida na província geomorfológica denominada de *Cuestas* Basálticas fazendo fronteira com o Planalto Ocidental. A altitude varia de 600 metros até mais de 1000 metros. A declividade da RSC no geral é bastante plana variando em média de 2 a 20% na maior parte da área e acima de 20% nas regiões de encostas sulcadas e com cânions locais.

Enquanto isso, parte da região de Araraquara está inserida na província das *Cuestas* Basálticas e no Planalto Ocidental. A altitude varia de 485 metros até aproximadamente 820 metros. O relevo da RSA no geral é bastante plano onde 65,97% da sua área (472,59 km<sup>2</sup>) apresenta declividade inferior 4%, 32,21% (230,78 km<sup>2</sup>) está entre 4 e 15%, e apenas 1,82% (13,04 km<sup>2</sup>) está acima de 15%.



**Figura 16.** Divisão geomorfológica do Estado de São Paulo.

**Fonte:** Modificado de (IPT, 1981).

#### 4.1.6. *Substrato rochoso*

A área de estudo está inserida dentro do contexto das litologias da Bacia Sedimentar do Paraná. Os grupos geológicos que compõem a área de estudo de maneira geral são pertencentes ao Grupo Bauru (Formação Itaqueri e Adamantina), ao Grupo São Bento representado pelas formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia e ao grupo Passa Dois representado pela Formação Corumbataí.

##### 4.1.6.1. Formação Itaqueri

A Formação Itaqueri pertence ao Grupo Bauru e está sobreposta as Formações Serra Geral e Botucatu, no reverso das *Cuestas*, geralmente aflora próximo de drenagens (Figura 17). Esta formação é caracterizada por arenitos, siltitos e argilitos de coloração marrom-avermelhada, de granulação média a conglomerática (de origem variada), com grãos angulosos, de matriz variável, por vezes argilosa, seleção pobre, e raramente apresenta estratificação cruzada (IPT, 1981). Quanto à espessura, atinge no máximo cerca de 30m. Esta formação geológica teve como ambiente deposicional leques aluviais, fluviais e lacustres.



**Figura 17.** Exemplo de afloramento de arenitos e argilitos da Formação Itaqueri que ocorrem próximo a uma drenagem na região de São Carlos.

**Fonte:** Autor

#### 4.1.6.2. Formação Adamantina

A Formação Adamantina segundo Soares; Landim (1973) corresponde a uma sedimentação fluvial do ciclo Bauru que recobre os basaltos da Formação Serra Geral. Esta é caracterizada por arenitos imaturos textural e mineralogicamente, de granulação fina de coloração rósea a creme, com estratificação cruzada ocasional e cimentação carbonática localizada, com intercalações de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos de cores avermelhadas a cinza esverdeadas (SOARES *et al.*, 1973). Conforme dados de poços profundos a espessura dessa Formação pode chegar até aproximadamente 100 metros. Geralmente esta unidade está recoberta por sedimentos Cenozoicos, apresentam poucos afloramentos que geralmente estão em condições alteradas, o que dificulta o seu mapeamento em campo.

#### 4.1.6.3. Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral é formada por rochas vulcânicas afaníticas de coloração cinza a preta, representada principalmente por derrames de basalto (Figura 18) e intrusões de diabásio. Os basaltos recobrem os arenitos silicificados da Formação Botucatu (Figura 19) e são recobertos em discordância angular erosiva pelo Grupo Bauru e por sedimentos Cenozóicos. Enquanto que os diabásios ocorrem como *sills* nos arenitos friáveis da Formação Botucatu e nos arenitos da Formação Pirambóia. Geralmente independente de qual das litologias mencionadas, estas encontram-se em encostas e vales, apresentam-se fraturadas, com espessura de no máximo 100 metros (IPT, 1981).





**Figura 18.** Exemplo de afloramentos dos basaltos da Formação Serra geral, localizados na região de São Carlos.

**Fonte:** Autor



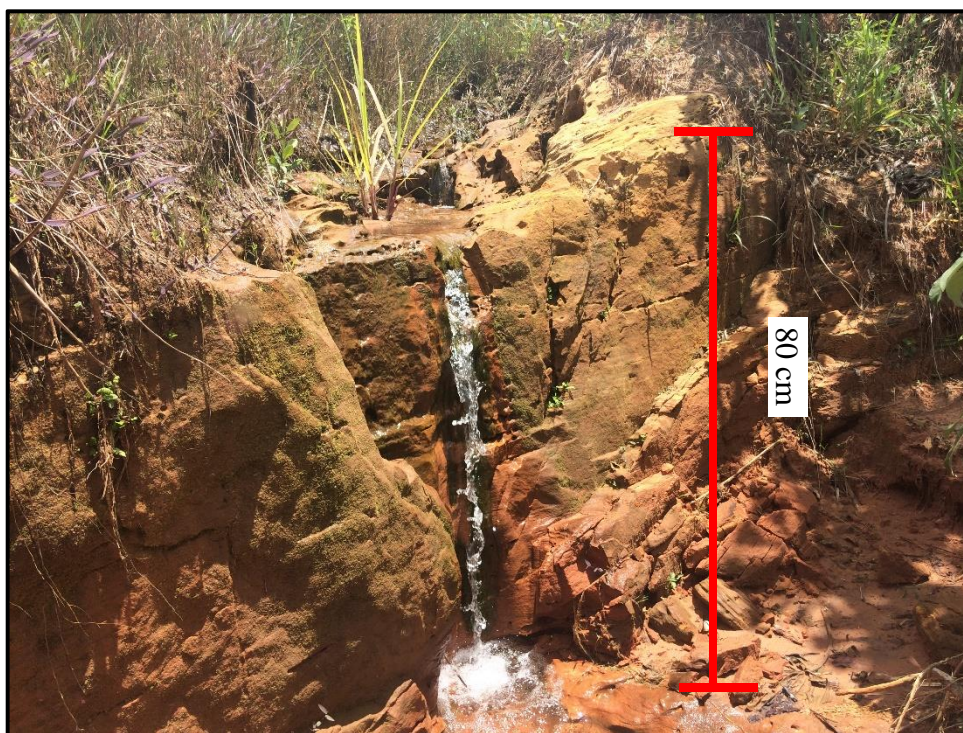
**Figura 19.** Exemplo de afloramento e limite entre os basaltos da Formação Serra Geral com os arenitos silicificados da Formação Botucatu.

**Fonte:** Autor

#### 4.1.6.4. Formação Botucatu

A Formação Botucatu constitui uma unidade genética de ambiente desértico, composta de arenitos róseos, avermelhados e esbranquiçados de granulação fina a média, com grãos bem

arredondados, superfície fosca, bem selecionados, e com teor de argila variável (SOARES 1973). Apresentam estratificações cruzadas de médio a grande porte. Esses arenitos podem ser de dois tipos: os muito friáveis, os quais ocupam as zonas mais planas e algumas vezes apoiam canais de drenagem (Figura 20), e fazem parte da zona de recarga direta do aquífero Botucatu; e os silicificados (Figura 21) por processo de precipitação da sílica, os quais tem corpos conglomeráticos na base, bem como fácies lacustre localizados nas escarpas (Figura 22). A espessura varia de 50 e 70 metros em média, e pode alcançar até 150 metros. Representa uma importante unidade do ponto de vista das águas subterrâneas, pois é a principal formadora do Aquífero Botucatu “Aquífero Guarani” (PARAGUASSU, 1972).



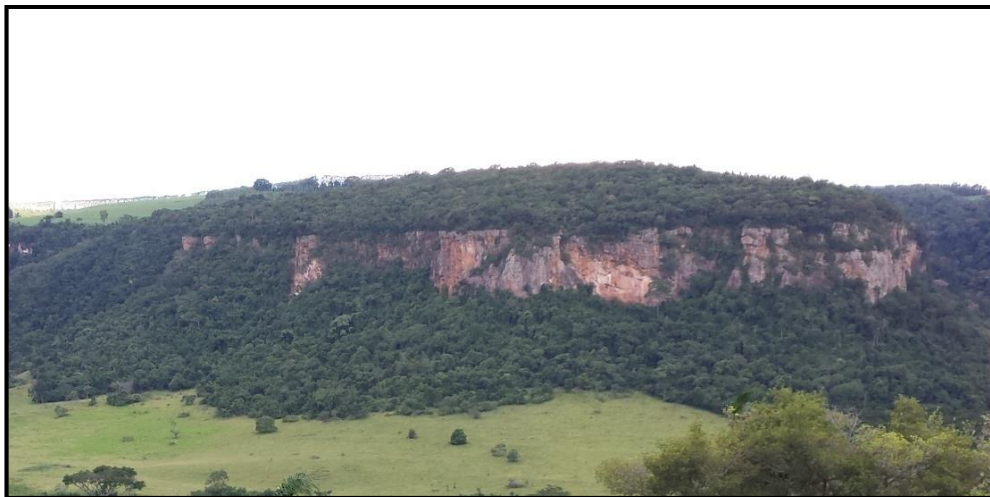
**Figura 20.** Exemplo de afloramento do arenito friável do Botucatu apoiando um canal de drenagem localizado na região de Araraquara.





**Figura 21.** Exemplo de afloramento dos arenitos silicificados da Formação Botucatu

**Fonte:** Autor



**Figura 22.** Arenitos silicificados da Formação Botucatu que se situam nas escapas da Serra da Bocaina, localizada na região de São Carlos.

**Fonte:** Autor

#### 4.1.6.5. Formação Pirambóia

A base do Grupo São Bento é representada pela Formação Pirambóia, resultante da deposição em ambiente fluvial (SOARES 1973), caracterizada por camadas de arenitos finos a médios, com porcentagem relativamente elevadas de finos, moderadamente selecionados, avermelhados, amarelados e esbranquiçados, com intercalação de siltitos, folhelhos e argilitos, de granulação fina a média. A estrutura predominante é a estratificação plano-paralela (Figura 23) e cruzada de pequeno a médio porte e tangencial na base. A Formação Pirambóia faz

contato com a Formação Botucatu o qual é difícil a visualização em campo, e pode ocorrer de modo gradual ou mesmo por contato erosivo. Um fato interessante desta formação está associado à presença de níveis mais argilosos nos arenitos, pois podem condicionar a formação de uma superfície de difração hídrica (Figura 24) que é muito mais perceptiva durante o período de chuvas (NISHIYAMA, 1993).



**Figura 23.** Exemplo de afloramento da Formação Pirambóia, o qual apresenta estratificação plano paralela localizada na região de Ribeirão Bonito.

**Fonte:** Autor



**Figura 24.** Exemplo da Formação Pirambóia aflorando em um corte de estrada, onde ocorre por conta da presença de níveis mais argilosos nos arenitos uma superfície de difração hídrica.

**Fonte:** Autor

#### 4.1.6.6. Formação Corumbataí

A Formação Corumbataí é a unidade superior do Grupo Passa Dois e está associada a um ambiente deposicional de planícies de maré, interpondo-se, esporadicamente, depósitos de "offshore" e condições mais continentais no topo (GAMA JR., 1979). Esta Formação está sotoposta a Formação Pirambóia e é caracterizada por argilitos, silitos e folhelhos com coloração arroxeadas a marrom avermelhada e pode apresentar uma cimentação calcária. Apresentam estratificação plano-paralela, cruzada de baixo ângulo, estruturas flaser, estratificação rítmica, marcas onduladas, fraturas de ressecamento e brechas intraformacionais (SÃO PAULO-IPT, 1981)

#### **4.1.7. Materiais inconsolidados**

Os materiais inconsolidados encontrados variaram de residuais oriundos das formações geológicas mencionadas no item 4.1.6 a retrabalhados Cenozóicos, arenosos, areno argilosos, aluvionares, colúvios arenosos, areno argilosos e argilosos. A descrição mais detalhada dos materiais inconsolidados está contida no Item 5.3.3.3.

#### **4.1.8. Uso e ocupação**

O uso do solo em ambas as folhas é predominantemente rural, com áreas de pastagem (criação semi-intensiva e extensiva de gado bovino), agricultura com diversos tipos de cultura, (cana-de açúcar e laranja e outras espécies frutíferas) e reflorestamento (*Pinus sp* e *Eucalyptus sp*). Além disso, em ambas as folhas foram identificados núcleos urbanos os quais pertencem aos municípios de Araraquara, São Carlos e Ibaté.



## 4.2. Materiais e métodos

Os procedimentos metodológicos utilizados nesta pesquisa, tratam de um conjunto de métodos para a determinação e análise da infiltração e escoamento superficial Hortoniano potencial de uma região na escala 1:50.000. Em vista que os diversos processos estudados ocorrem de forma interligada na natureza, os procedimentos propostos nesta tese apresentam um caráter integrador. Portanto, para alcançar a integração dos dados, aspectos e processos esta pesquisa se balizou nos fundamentos e etapas da Análise Ambiental Integrada (AAI) expostos a seguir.

Os fundamentos e etapas são propostos por Breiling (1998) os quais são:

- Preparar o modelo conceitual do problema central e determinar quais componentes influenciam na análise;
- Coletar os dados de acordo com o modelo estabelecido previamente, os quais podem ser tanto qualitativos como quantitativos;
- Transferir as ideias básicas dos subproblemas (infiltração e geração de escoamento superficial Hortoniano) envolvidos para modelos matemáticos. A escolha de modelagem deve ser feita de forma criteriosa de maneira que permita a integração posteriormente dos submodelos;
- Integrar os vários submodelos no modelo central definido;
- Relacionar os resultados do modelo central a problemas ambientais, de modo a permitir análises dos possíveis impactos ambientais.

Ressalta-se que alguns pontos devem ser abordados ainda sobre os fundamentos da análise ambiental integrada:

- O modelo integrado deve apresentar referências espaciais e temporais;
- O modelo deve explicar as relações espaciais e de processos com um conjunto de dados mínimos;
- Para uma análise mais consistente da infiltração e do escoamento superficial, o modelo deve considerar o uso de diferentes escalas de trabalho;
- A chave da análise integrada ambiental é como combinar os resultados do modelo integrado com métodos de geoprocessamento e de banco de dados, associado à escolha dos componentes pertinentes de análise para aumentar a confiabilidade do modelo.

Além dos princípios já definidos por Breiling (1998), Laniak *et al* (2013) e EPA (2008) ressaltam que os atributos devem ser cientificamente consistentes no que diz respeito à sua complexidade, o requisito de cada submodelo e as suas incertezas. Portanto, permite-se os aspectos mencionados e as interrelações dos problemas do mundo real sejam representadas de maneira confiável, e os sistemas ambientais sejam compreendidos de maneira holística.

Baseado no exposto acima, na Figura 25 tem-se fluxograma que contém as principais etapas de trabalho. As etapas estão detalhadas a seguir, organizadas de forma sequencial da obtenção e tratamento das informações.





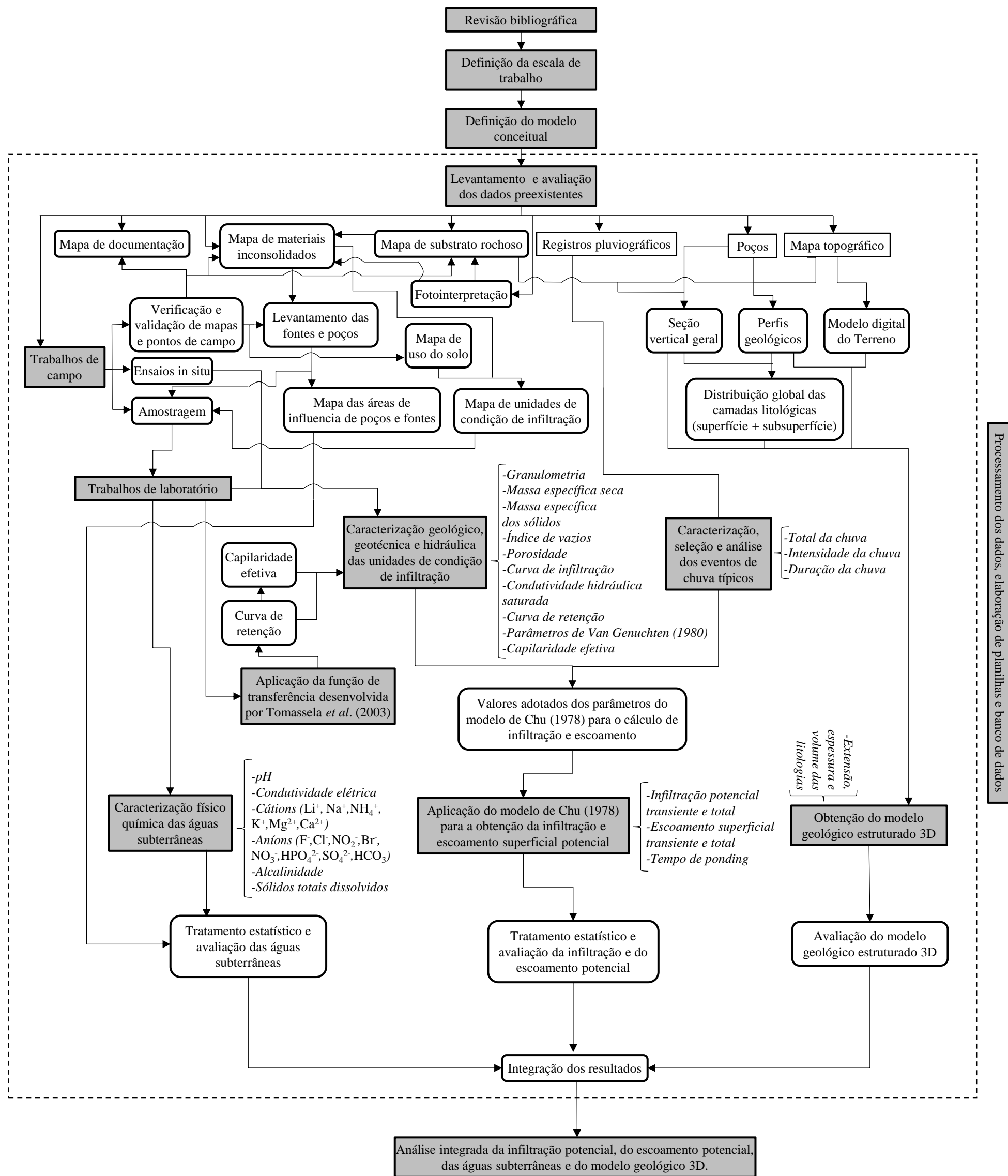


Figura 25. Fluxograma que contém as etapas necessárias para avaliação da infiltração e do escoamento superficial Hortoniano potencial.

Fonte: Autor

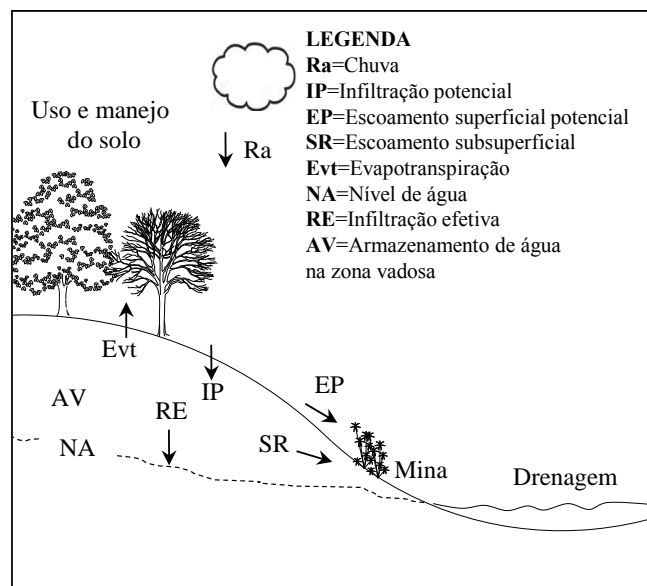


#### 4.2.1. Levantamento bibliográfico

Esta etapa teve como finalidade fornecer subsídios teóricos a respeito dos aspectos, propriedades e mecanismos relacionados ao processo de infiltração e geração de escoamento superficial Hortoniano, bem como a elaboração do estado da arte das técnicas e métodos utilizados para sua determinação.

#### 4.2.2. Modelo conceitual

Esta etapa consistiu na elaboração de um modelo conceitual o qual representasse de maneira ampla a dinâmica de água, o qual contém os principais mecanismos de controle dos processos de infiltração, de geração de escoamento Hortoniano e de recarga potencial das águas subterrâneas. Para o desenvolvimento deste modelo adotou-se a abordagem de Dykes e Thornes (2000), o qual considerar a influência de três fatores principais no processo de infiltração, escoamento e recarga os quais são: as características dos materiais geológicos; os eventos de chuvas; e a respectiva resposta da interação do meio físico com as chuvas. A partir dessa abordagem, o modelo conceitual básico adotado está representado na Figura 26 com os principais componentes considerados neste trabalho. A Equação 14 demonstra o funcionamento do modelo conceitual.



**Figura 26.** Modelo conceitual do processo considerado neste estudo.

**Fonte:** Autor

$$RE = IP - (EVT + SR + AV) \quad [14]$$

Onde: RE é a recarga efetiva, IP é a infiltração potencial, Evt é a Evapotranspiração, SR é o escoamento subsuperficial e AV é o armazenamento de água na zona vadosa.

Rescrevendo a equação 14 em função de uma chuva e do potencial de escoamento superficial Hortoniano se tem:

$$RE = Ra - (EP + Evt + AV + SR) \quad [15]$$

Onde: Ra é a chuva total e EP é o escoamento superficial potencial Hortoniano.

#### 4.2.3. Modelos físico-matemático

Baseado no modelo conceitual desenvolvido na etapa anterior foi selecionado o modelo físico matemático proposto por Chu (1978) para descrever a infiltração e a geração do escoamento superficial Hortoniano, o qual permite determinar a altura de água infiltrada e a escoada em chuvas transientes (diferentes intervalos), bem como considerar a distribuição da água no solo. Ressalta-se que este modelo é uma adaptação do modelo desenvolvido por Morel-Seytoux e Khanji (1974), que modificaram de Mein e Larson (1973), os quais se embasaram no modelo proposto Green e Ampt (1911).

Os parâmetros utilizados por este modelo são divididos em dois grupos, aqueles referentes a aspectos hidráulicos do material inconsolidado e aos climáticos referentes as chuvas. O primeiro grupo tem como parâmetros: a condutividade hidráulica saturada (K); a diferença da capilaridade efetiva ( $h_{ce}$ ) ou sucção matricial na frente de molhamento (S) antes e depois da saturação do solo ( $h_s$ ); e a diferença entre o conteúdo volumétrico saturado ( $\theta_s$ ) e o conteúdo volumétrico inicial ( $\theta_i$ ), a qual é simbolizada pela letra M. Enquanto que o segundo grupo é representado pela intensidade (I), a altura de chuva precipitada (P) e a duração (t) do intervalo de um evento de chuva.

O modelo é baseado em 2 condições, uma sem geração (1º condição) e outra com geração de escoamento (2º condição), onde na Figura 27 é possível observar o esquema de funcionamento geral. A primeira ocorre quando no intervalo analisado a intensidade da chuva é menor que capacidade de infiltração ou quando o indicador de saturação do solo for negativo (este só é aplicado quando a intensidade da chuva for maior que K). O indicador de saturação é calculado conforme a Equação 16. A determinação da infiltração acumulada é dada pela

Equação 17. Ressalta-se que caso o intervalo analisado esteja nesta condição, o escoamento superficial é 0 todavia a título de cálculo, o escoamento acumulado é considerado igual ao intervalo anterior analisado conforme mostra a Equação 18.



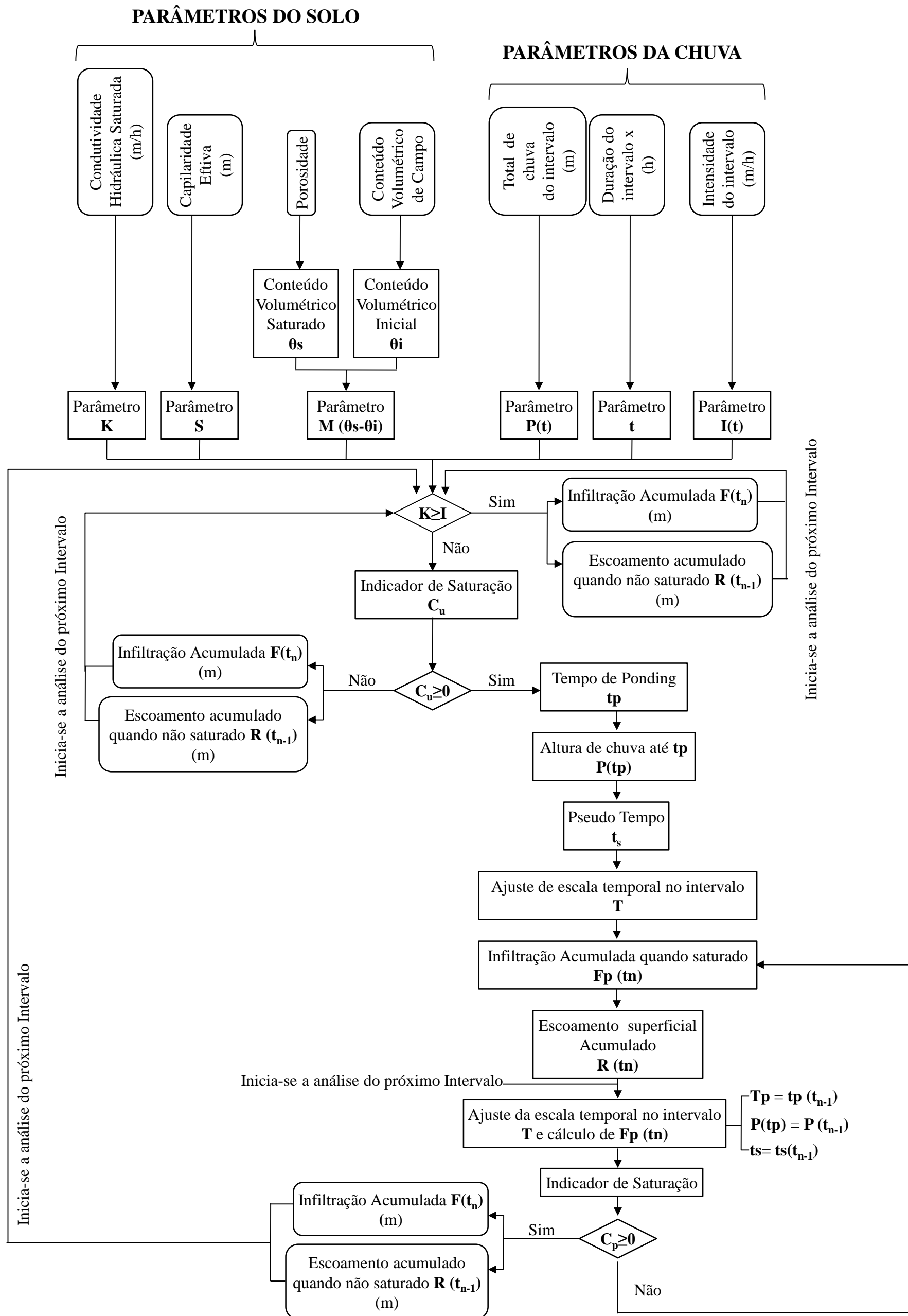


Figura 27. Esquema de funcionamento do modelo de infiltração/escoamento adotado neste estudo.





$$C_u = P(t_n) - R(t_{n-1}) - \frac{KSM}{I-K} \quad [16]$$

$$F(t_n) = P(t_n) - R(t_{n-1}) \quad [17]$$

$$R(t_n) = R(t_{n-1}) \quad [18]$$

Onde:

$C_u$  é o indicador de saturação,  $P(t_n)$  é a precipitação acumulada (m) no intervalo t,  $R(t_{n-1})$  é o escoamento superficial acumulado no intervalo anterior (m),  $K$  é a condutividade hidráulica saturada ou capacidade de infiltração (m/h),  $S$  é capilaridade efetiva (m),  $M$  é a diferença da umidade do solo antes e depois da saturação ( $m^3/m^3$ ),  $I$  é a intensidade de chuva (m/h),  $F(t_n)$  é a infiltração acumulada no intervalo t e  $R(t_n)$  é o escoamento superficial Hortoniano acumulado no intervalo t.

A segunda condição ocorre quando no intervalo analisado o indicador de saturação ( $C_u$ ) é positivo, isto é há a geração de escoamento superficial. Nesta condição é necessário calcular o tempo em que a superfície do solo irá saturar (tempo de *ponding*- $t_p$ ) (Equação 19 conforme considerado no trabalho original Chu (1978)), a altura de chuva acumulada que infiltrou até o momento do *ponding* ( $P_{tp}$ ) (Equação 20), o pseudo tempo ( $t_s$ ) (Equação 21) e o ajuste da escala temporal no intervalo (T) (Equação 22). O pseudo tempo pode ser interpretado como mudança de escala de tempo devido ao efeito da infiltração acumulada no momento *ponding*, enquanto T é o ajuste de escala em relação ao intervalo de tempo t. A infiltração acumulada neste intervalo é determinada sob a condição saturada, logo  $F(t_n)=F_p(t_n)$ , a qual é obtida partir da Equação 23. O cálculo de escoamento superficial acumulado é feito através da Equação 24.

$$t_p = \left( \frac{[K \times S \times M / (I - K)] - P(t_{n-1}) + R(t_{n-1})}{I} \right) + t_{n-1} \quad [19]$$

$$P_{(tp)} = P(t_{n-1}) + (t_p - t_{n-1}) \times I \quad [20]$$

$$\frac{K \times t_s}{S \times M} = \frac{P_{(tp)} - R(t_{n-1})}{S \times M} - \ln \left( 1 + \frac{P_{(tp)} - R(t_{n-1})}{S \times M} \right) \quad [21]$$

$$T = t_n - t_p + t_s \quad [22]$$

$$\frac{F_p(t_n)}{S \times M} - \ln \left( 1 + \frac{F_p(t_n)}{S \times M} \right) = K \left( \frac{t - t_p + t_s}{S \times M} \right) \quad [23]$$

$$R(t_n) = P(t_n) - F_p(t_n) \quad [24]$$

Onde:

$t_p$  é tempo de *ponding* (h),  $P(t_p)$  é a quantidade de chuva acumulada que infiltrou até o momento do *ponding*,  $t_s$  é o Pseudo tempo (h),  $T$  é o ajuste temporal no intervalo,  $t_n$  é o tempo do intervalo (h),  $F_p$  é a Infiltração acumulada quando o solo está saturado (m).

Após o cálculo de  $F_p(t_n)$  e  $R(t_n)$ , inicia-se a análise do próximo intervalo, todavia em vista que anteriormente ocorreu a geração de escoamento, o solo inicia o intervalo saturado, conseqüentemente não há a necessidade de calcular novamente  $t_p$ ,  $t_s$  e  $P_{tp}$ . Desse modo, os cálculos começam a partir de  $T$  em seguida  $F_p$ , lembrando que para obter  $T$  são utilizados os valores de  $t_p$  e  $t_s$  do período em que o solo ficou saturado. Por fim, para determinar em qual estágio o intervalo analisado se encontrará é utilizado um indicador da condição da superfície quando o solo no início do intervalo está saturado ( $C_p$ ) (Equação 25). Se este for positivo, indica que continua havendo a geração de escoamento superficial, o qual é calculado através da equação 24. No caso do indicador apresentar valores negativos, o cálculo de escoamento e infiltração é feito conforme a condição 1, entretanto é necessário realizar um ajuste para a infiltração acumulada do intervalo  $t_n$  através da Equação 26, a qual é a mesma da Equação 17.

$$C_{(p)} = P(t_n) - F_p(t_n) - R(t_{n-1}) \quad [25]$$

$$F(t_n) = P(t_n) - R(t_{n-1}) \quad [26]$$

Onde  $C_p$  é o indicador da condição da superfície quando o solo no início do intervalo está saturado.

#### 4.2.4. Levantamento e avaliação dos dados preexistentes

Após se conhecer as variáveis envolvidas no processo de infiltração e geração escoamento superficial foram levantados os dados necessários para determiná-los e avaliá-los. Estes dados referiram-se a: mapas topográficos, imagens de satélite, poços, mapas de substrato

rochoso e material inconsolidado, caracterização geotécnica básica dos materiais inconsolidados, ensaios de infiltração e registros pluviográficos.

Os materiais levantados foram:

1. Mapa Topográfico na escala 1:50.000 – folha:SF-23-Y-A-I-1 (São Carlos) e SF-22-X-D-VI-4 (Araraquara) elaborado por IBGE (1971);
2. Imagens de satélite do Google Earth de 2015;
3. Dados de poços do banco de dados do SIAGAS elaborado por CPRM (2017);
4. Mapa de Substrato Rochoso na escala 1: 50.000 elaborado por Nishiyama (1991) e Marques (2002);
5. Mapa de Materiais Inconsolidados na escala 1:50.000 elaborado por Nishiyama (1991) e Marques (2002);
6. Caracterização geotécnica básica dos materiais inconsolidados obtidos de Zuquette (1981); Nishiyama (1991), Marques (2002), Palma (2004), Fagundes (2010) e Lemos (2010);
7. Curvas de infiltração dos materiais inconsolidados em diferentes condições de uso do solo obtidas de Palma (2004), Fagundes (2010) e Lemos (2010);
8. Registro pluviográfico extraídos de Fagundes (2010);

A avaliação dos dados preexistentes teve como critérios a representatividade de cada aspecto nos processos analisados, os quais estão associados à heterogeneidade, à variabilidade espacial, à presença de erros sistemáticos e se a quantidade de dados obtidos era suficiente para representar a área de estudo. Entende-se como quantidade suficiente de dados, quando a variabilidade das características do meio físico são todas representadas, principalmente associadas as condições de infiltração.

#### ***4.2.5.Processamento dos dados***

Esta fase teve como objetivo preparar e processar os dados preexistentes levantados bem como os gerados ao longo da pesquisa. O processamento dos dados correspondeu a tabulação dos dados, georeferenciamento e vetorização dos documentos cartográficos, imagens de satélite e fotos aéreas. A tabulação e armazenamento dos dados da caracterização geotécnica básica, das curvas de infiltração, dos poços e dos registros pluviográficos foi realizada através do software Microsoft Excel 2007. Enquanto que o georeferenciamento e vetorização dos dados

foram feitas através do AutoCAD Map 3D 2014, e os resultados foram exportados para o ArcGIS 9.3.

Os procedimentos adotados para o georeferenciamento e vetorização dos documentos cartográficos e imagens de satélite foram:

1. Inserção de cada documento cartográfico e imagens de satélite no formato raster;
2. Adequação do sistema de coordenada e o *datum* dos documentos preexistentes para o sistema Universal Transverse de Mercator (UTM). Os *datums* horizontal e vertical considerados foram respectivamente o Córrego Alegre Zona 23S e 22S e marégrafo de Imbituba – SC;
3. Seleção de 5 pontos de controle, os quais 4 estão localizados nos extremos de cada imagem e um no centro. Ressalta-se que para as imagens de satélite foram utilizados 12 pontos distribuídos de forma mais homogênea possível e localizados preferencialmente em cruzamentos de ruas e estradas;
4. Atribuição das coordenadas UTM de cada ponto;
5. Ajuste dos *rasters* através do comando *Align* para georeferenciar a imagem;
6. Vetorização dos elementos necessários de cada documento cartográfico;
7. Transformação de todos os arquivos vetorizados em arquivos Shapefiles, em vista que nas etapas posteriores foi utilizado o software ArcGIS 9.3 para realizar outros processamentos, bem como a elaboração do *layout* dos mapas finais.

#### **4.2.6.Documentos cartográficos gerados**

Para estimar a infiltração e a geração de escoamento superficial foi necessário elaborar uma série de documentos cartográficos que espacializassem as características do meio físico e antrópico que interferem diretamente nestes processos. Os documentos elaborados foram o Mapa de Documentação, Mapa de Substrato Rochoso, Mapa de Materiais Inconsolidados, Mapa de Uso do Solo, Mapa de Localização de Fontes e Poços Amostrados e a Carta de Unidades de Condição de Infiltração.

##### **4.2.6.1.Mapa de documentação**

O Mapa de Documentação se baseou nas cartas topográficas folhas SF-23-Y-A-I-1 (São Carlos) (Apêndice I) e SF-22-X-D-VI-4 (Araraquara) (Apêndice II) elaborada por IBGE (1971) na escala 1:50.000. Este mapa consistiu no registro pontual das informações obtidas previamente (topografia, rede de canais de drenagem, e poços profundos, as produzidas durante o trabalho de campo (pontos visitados, ensaiados e amostrados).

#### 4.2.6.2. Mapa de substrato rochoso

O Mapa de Substrato Rochoso compreende a disposição espacial das litologias que compõem a região de estudo. Os procedimentos adotados para o mapeamento dos litotipos na área de estudo basearam-se nos critérios propostos por Matula (1981), BSE 5930 (1981) e Zuquette e Gandolfi (2004). Os atributos considerados na elaboração do mapa de substrato rochoso e a forma de obtenção dos mesmos são apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13.** Atributos considerados na elaboração no substrato rochoso.

Atributos	Caracterização	Formas de Obtenção	Propriedades
Tipo rochoso /Grupo litológico	- IAEG (1981)	Fotointerpretação Trabalhos de campo	Gênese
Litologia	- IAEG (1981)	Trabalhos de campo	Cor, textura Tamanho relativo dos grãos (uniformidade), Forma do grão, Porosidade, Cimentação
Distribuição	-Zonas (unidades)	Fotointerpretação Trabalho de campo	Área
Estruturas (descontinuidades)	- Caracterização	Fotointerpretação Trabalhos de campo	Tipo
-Profundidades	-Classes de valores	*Fotointerpretação *Trabalho de campo	Espessuras
-Condutividade hidráulica	-Classes de valores	Analogia Relativa	Fluxo de água

**Fonte:** Adaptado de Zuquette e Gandolfi (2004)

A partir dos critérios mostrados acima, o mapa substrato rochoso foi elaborado. Inicialmente examinou-se os documentos cartográficos preexistentes elaborados por Nishiyama (1991) (São Carlos) e Marques (2002) (Araraquara). Entretanto verificou-se a necessidade de aprimorar os limites das unidades das litologias dos mapas preexistentes através de trabalhos de campo (Item 4.2.9), fotointerpretação e uso de modelos geológicos 3D (Item 4.2.7). O georeferenciamento e a vetorização do substrato rochoso seguiram o procedimento exposto no Item 4.2.5.

#### 4.2.6.3. Mapa de materiais inconsolidados

Os materiais inconsolidados representam os materiais geológicos naturais que resultaram do intemperismo e permaneceram *in situ* e aqueles que foram removidos do seu local

de origem e depositados em outra área. O mapa e a descrição dos materiais inconsolidados são essenciais pois é no material inconsolidado onde ocorre todos os processos avaliados nesta pesquisa, seja de infiltração, escoamento superficial e recarga das águas subterrâneas. Além disso, são nestes onde os usos e as ocupações interagem em diferentes graus, e que as variações tipológicas e espaciais controlam a eficiência dos usos e a intensidade dos problemas ambientais e possibilidades de manejos distintos.

Os materiais inconsolidados foram mapeados com base na classificação básica proposta por Fookes (1994). Esta proposta foi combinada na sistemática apresentada por Zuquette e Gandolfi (2004). De maneira geral estas classificações consideram o perfil de estatigráfico o qual neste estudo considerou os seguintes níveis genéticos: retrabalhado, residual, saprolito, rocha alterada e rocha sã.

Baseado nas classificações mencionadas anteriormente, o mapa de materiais inconsolidados foi elaborado conforme as recomendações Zuquette e Gandolfi (2004). Na Tabela 14 são apresentados os critérios utilizados para classificar e caracterizar os materiais inconsolidados, enquanto na Tabela 15 encontra-se a divisão utilizada dos materiais inconsolidados que considera o perfil de alteração e as respectivas características diagnósticas para definição das unidades. Ressalta-se que esta divisão foi baseada na proposta de Dearman (1991), Anon (1990 e 1995), Wesley; Irfan (1997).

**Tabela 14.** Critérios utilizados para classificação dos materiais inconsolidados.

Material (Constituinte)		Massa	
Cor		Composição	- Materiais - Arranjo - Porcentagens em volume
Fabrica (Arranjo)	- Origem - Vazios - Distribuição	Estruturas	- Origem (Genéticas, Reliquiaries)
Textura	- Partículas (Tamanho, Forma) - Gradação (Areias, Areias com finos e Finos)	Concreções	- Tipos
Mineralogia	- Principal	Comportamento	- Fluxo de água

Fonte: Adaptado de Zuquette e Gandolfi (2004)

Tabela 15. Divisão dos materiais inconsolidados considerando o perfil de alteração

Níveis de evolução genética	Grau de intemperismo de acordo com a IAEG (1981).	Unidades de materiais inconsolidados residuais propostas	Características de diagnóstico primárias	Subtipos	Características de Diagnóstico	Observações	
Fase Residual Madura	Grau 6	RS /RT	Presença de feições antrópicas e/ou uso e ocupação. Podem ocorrer níveis de compactação e feições decorrentes do uso.	RS /RT - A	Feições que denotam destruição de estruturas naturais	Reflete as alterações devido aos usos e a atividades antrópicas	
				RS /RT - B	Alternância de camadas compactadas em diferentes profundidades		
		RS 6 – sem estrutura e textura da rocha mãe	Decomposição e desintegração, com variação de volume e sem registro da textura e estruturas da rocha mãe.	RS 6 - A	Presença de concreções e lateritas		Podem ocorrer crostas endurecidas (lateritas, concreções).
				RS 6 - B	Sem presença de concreções e lateritas		
Saprolito	Grau 5	RS 5	Decomposição e desintegração superior a 90%.  Manutenção da textura e estrutura da rocha mãe.	RS 5 - A	Manutenção de textura e estrutura	Pode ocorrer uma acentuação ou homogeneização dos aspectos de textura e estrutura	
				RS 5 - B	Manutenção da textura		
				RS 5 - C	Manutenção da estrutura		
	Grau 4	RS 4	Decomposição e desintegração maior que 50%.				



**Tabela 15 (continuação).** Divisão dos materiais inconsolidados considerando o perfil de alteração

Rocha Alterada		RA 3	Decomposição e desintegração menor que 50%.  Rocha sã presente e com pouca expressão de continuidade.	RA 3 - A	Blocos de grandes dimensões	Predomínio de massas rochosas em relação a fase alterada
				RA 3 - B	Blocos de pequenas dimensões	
	Grau 3	RA 2	Decomposição e desintegração menor que 50%.  Rocha sã presente e com certa continuidade.	RA 2 - A	Limites difusos entre os materiais	Massas bem definidas, porém com limites irregulares
				RA 2 - B	Limites bem definidos entre os materiais	
	Grau 2	RA 1	Rocha com intensa descoloração.	RA 1 - A	De camadas de minerais específicos	
				RA 1 - B	Da massa no geral	
Rocha Sã	Grau 1	R 1	Descoloração em alguns pontos, em minerais específicos e emparedes das descontinuidades.			

**Fonte:** Zuquette e Gandolfi (2004)

Com a definição dos critérios de caracterização e classificação, o Mapa de Materiais Inconsolidados foi elaborado a partir dos documentos preexistentes desenvolvidos por Nishiyama (1991) e Marques (2002). Ao longo do processo de elaboração deste documento, foi necessário realizar detalhamentos dos limites, bem como a criação de novas unidades não mapeadas nos mapas preexistentes por meio de fotointerpretação, trabalhos de campo, ensaios *in situ* e ensaios laboratoriais. O georeferenciamento do mapa e a vetorização dos limites dos materiais inconsolidados foi feita de acordo com a Etapa 4.2.5.

#### 4.2.6.4. Mapa de tipo de Uso do Solo

O Mapa de Tipo de Uso do Solo representa os usos atuais da área de estudo. Este documento cartográfico é fundamental pois reflete diretamente as condições de infiltração da camada superficial dos materiais inconsolidados. Com base nos usos típicos da área de estudo e em trabalhos de campo as classes de uso e ocupação foram definidas:

- Cana-de-açúcar: Representada pela cultura de cana-de-açúcar em qualquer estágio de plantio;
- Laranja e espécies frutíferas: representadas pelas plantações de laranja, banana, mamão, milho, café, horticulturas, etc.;
- Mata: representada pelas áreas com presença de floresta densa, fragmentos florestais, cerrados, cerradões, campo cerrado e áreas de capoeira;
- Pastagem: representada pelos campos de pastagem e áreas onde foram desmatadas e não apresentam nenhum uso efetivo;
- Reflorestamento: representada pelas áreas de plantação de eucalipto, pinus e seringais;
- Área urbana: representada pelas áreas urbanas densas, onde não foram incluídos chacreamentos ou zonas construídas de baixa densidade, os quais foram classificados como pastagem em virtude de ainda apresentarem áreas potenciais de infiltração.
- Reservatórios: composto por reservatórios e lagos naturais.

A identificação dos tipos foi feita a partir da interpretação de imagens de satélite, a qual considerou as seguintes características de cada classe definida:

- Padrão espacial;
- Continuidade;
- Textura;
- Densidade;
- Rugosidade;
- Cor.

Esta etapa culminou com a identificação das classes de uso e vetorizados segundo a Etapa 4.2.5.

#### 4.2.6.5. Carta de unidades de condição de Infiltração

A infiltração de água no solo é função de diversos fatores (textura, porosidade, compactação do solo, conteúdo de água inicial, condutividade hidráulica, perfil de alteração e espessura das camadas) que interferem no volume infiltrado. A combinação entre os diferentes aspectos que controlam a infiltração é denominada de condição de infiltração. Neste trabalho, considerou esta condição a combinação entre os materiais inconsolidados e o tipo de uso e manejo do solo, pois o tipo de uso e o manejo do solo podem alterar de forma significativa as diversas propriedades que controlam o processo infiltração. Um exemplo clássico dessa alteração são os tipos de usos do solo agrícolas, onde em uma mesma área com o mesmo material inconsolidado e tipo de uso, a infiltração pode ser distinta em função do manejo considerado. Por exemplo, uma região com cana de açúcar durante a fase jovem ou de sulcamento (1ºano) apresenta um condutividade hidráulica e porosidade maior do que na fase madura do cultivo (após o 3ºano).

Desse modo, a carta de condição de infiltração resultou da combinação entre o mapa de materiais inconsolidados e o de tipo de uso, com a finalidade de representar e espacializar a variabilidade das diversas condições. De maneira prática, a elaboração da carta foi através do processo de sobreposição dos referidos mapas. Todavia ao realizar o procedimento de sobreposição observou-se dois aspectos importantes relacionados aos tamanhos dos fragmentos. O primeiro aspecto compreendeu a questão da área mínima mapeável, a qual para a escala adotada somente é possível mapear fragmentos com área superiores a 0,1km<sup>2</sup> (IBGE, 2007). O segundo aspecto tratou do somatório da extensão dos fragmentos o qual caso fosse inferior a 0,5km<sup>2</sup> seriam tratados de forma semelhante ao do primeiro aspecto. Esse critério foi utilizado, pois geralmente nesta condição as áreas estão bastante fragmentadas e com pouca

conexão e não caracterizam-se como regiões representativas para os processos de infiltração e escoamento em relação a extensão total.

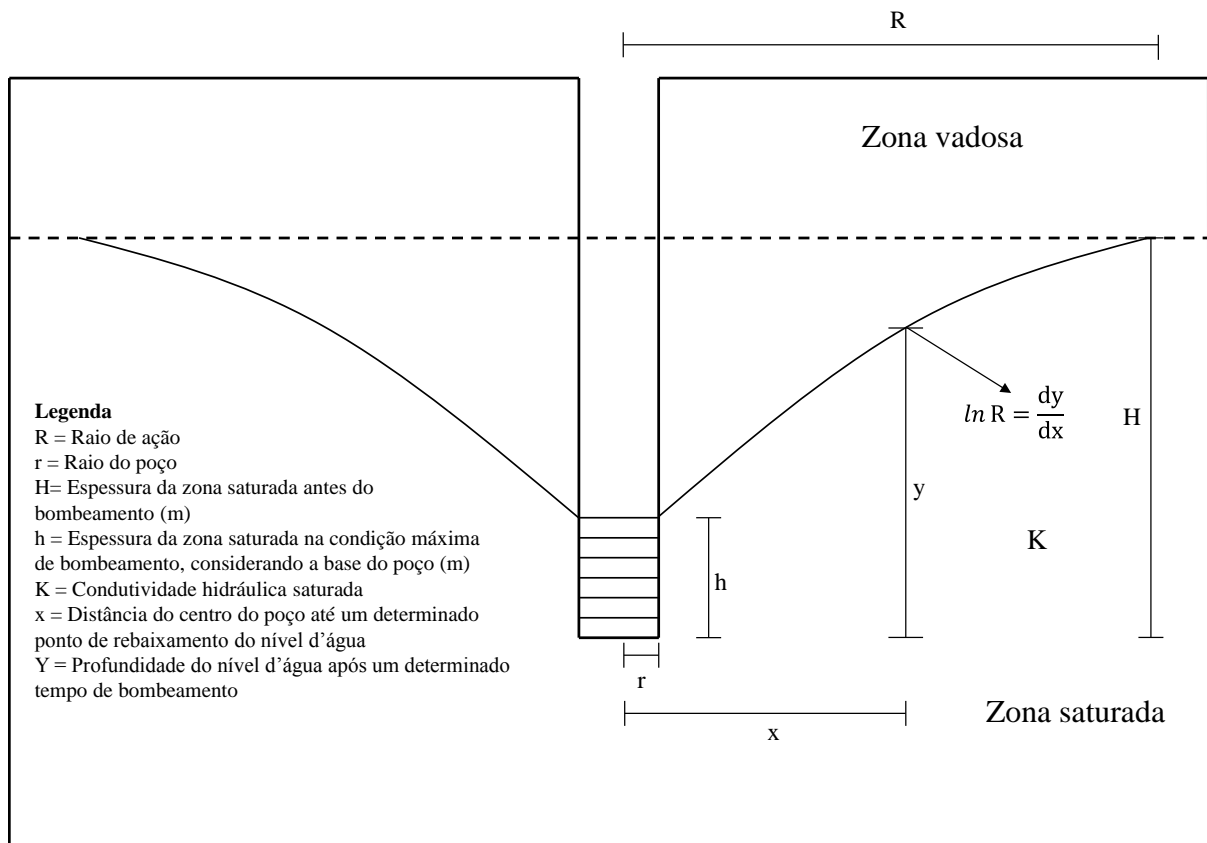
Para solucionar o problema da área mínima mapeável, os fragmentos foram unidos com outros de maior área, a partir da análise das características das condições de infiltração e da proximidade espacial. Inicialmente, foram classificados os fragmentos com área acima e abaixo de 0,5km<sup>2</sup>. Posteriormente, para as unidades de condição de infiltração com área menor que 0,5km<sup>2</sup>, verificou-se qual combinação associada ao mesmo material inconsolidado e com área superior a 0,5km<sup>2</sup> apresentava um comportamento semelhante frente à infiltração. A que apresentasse características similares, o fragmento de menor área foi unido com o de maior extensão.

#### 4.2.6.6. Mapa da área de influência das fontes e dos poços

A obtenção deste mapa foi fundamental, pois é na área de influência onde ocorre a interação de diversos aspectos do meio físico que podem afetar o resultado da caracterização físico química das águas subterrâneas (Item 4.2.10.3). Dentre os principais aspectos que influenciam esta dinâmica são o tipo de uso do solo, o tipo de material inconsolidado, profundidade do nível de água e a quantidade de água infiltrada.

A determinação das áreas de influência foi feita de duas formas. A primeira referente as fontes naturais (nascentes) e a segunda aos poços. Os procedimentos adotados para determinar a área de influência das fontes, que neste trabalho também é chamado de área de contribuição, se basearam no conceito de bacia hidrográfica. A fonte foi considerada como a foz e a área a montante até o divisor de água foi considerado como a área de contribuição. A partir dessas considerações, a delimitação foi feita através das curvas de nível onde se traçaram os limites.

A área de influência dos poços, por sua vez, foi baseada no raio de ação do cone de depressão que é função da taxa máxima de exploração. A obtenção desta informação é feita por meio do teste de bombeamento, que consiste na extração progressiva de água de um poço até alcançar a taxa máxima de exploração e rebaixar o nível de água até atingir um equilíbrio. Neste momento é formado um cone de depressão (Figura 28), que é definido como o espaço de água drenada que ocorre por meio do processo de bombeamento.



**Figura 28.** Esquema ilustrativo do raio de ação máximo e do cone de depressão do nível de água formado após o bombeamento de um poço, considerando à taxa máxima de exploração.

Fonte: Autor

O raio de ação pode ser estimado por meio da equação de Dupuit (1863):

$$\ln R = \frac{Q_p}{\pi \times K \times (H_0^2 - H_F^2)} + \ln r \quad [27]$$

Onde, R é o raio de ação (m),  $H_0$  é a espessura da zona saturada antes do bombeamento (m),  $H_F$  é a espessura da zona saturada na condição de máximo bombeamento (m), K é a condutividade hidráulica saturada (m/s),  $Q_p$  é a vazão de bombeamento do poço ( $m^3/s$ ) e r é o raio do poço (m)

Como a aplicação da equação de Dupuit demanda uma certa complexidade quanto aos dados e medidas, um conjunto de expressões empíricas foram desenvolvidas. Dentre estas, a equação de Sichardt e Kyrieieis (1930), que tem gerado resultados adequados, pode ser observada a seguir:

$$R = 3000 \times (H_0 - H_F) \times \sqrt{K} \quad [28]$$

No sentido de obter o R para cada poço foram consideradas as características dos poços e dos materiais geológicos.

Baseado nessas considerações as variações da posição da zona saturada estão relacionadas a taxa de bombeamento, condutividade hidráulica, raio de ação por meio da expressão:

$$H_0^2 - H_F^2 = \frac{\pi \times Qp}{\pi \times K} (\ln R - \ln r) \quad [29]$$

O tempo de bombeamento necessário para atingir o cone de depressão relativo ao raio de influência estão relacionados pela expressão empírica de Cooper-Jacob (1946):

$$R = \left( \frac{2,25 \times K \times H_F \times t}{AV} \right)^{0.5} \quad [30]$$

Onde t é o tempo de bombeamento e AV é o armazenamento (varia entre 0,01 e 0,3).

#### 4.2.7. Modelo geológico estruturados 3D

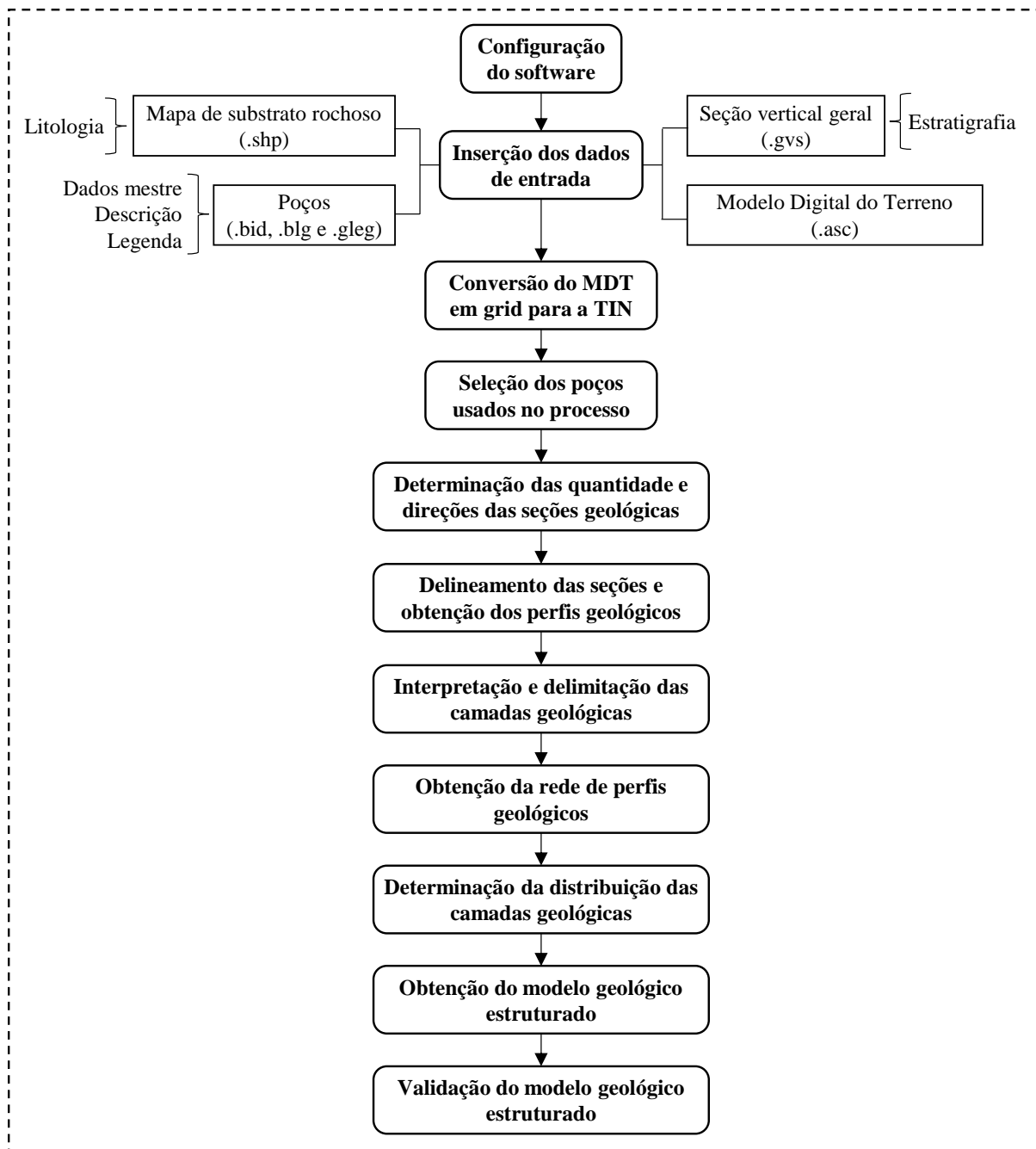
Este capítulo teve como objetivo apresentar os métodos para elaboração de um modelo geológico 3D estruturado afim de compreender e visualizar as litologias em termos de distribuição, extensão, profundidade e volume. Além disso, foi utilizado paralelamente para melhorar os contatos do mapa de substrato rochoso (4.2.6.2).

Para elaborar o modelo geológico foi utilizado o software *Subsurface View MX* desenvolvido pela INSIGHT, o qual é baseado em um software anterior chamado GSI3D desenvolvido pelo *British Geological Survey* (BGS). Este software permite criar modelos estruturados, os quais descrevem a dimensão espacial das camadas através das superfícies de base e do topo das mesmas, que são representadas por Redes Triangulares Irregulares (TIN).

O software se embasa em um método que relaciona diversos perfis geológicos, os quais são obtidos a partir da interpretação de dados de poços e mapas. O cálculo do modelo é baseado na triangulação de Delaunay, o qual utiliza os pontos definidos nos perfis geológicos e a distribuição das camadas geológicas para determinar as superfícies do topo e da base das camadas litológicas. Durante esse processo, as cotas estabelecidas são preservadas, assim como

a triangulação é automaticamente limitada pela extensão lateral das respectivas camadas e do modelo de terreno digital. É importante salientar que o cálculo das superfícies é feito do topo para base, onde é usado o limite superior das camadas para estabelecer os valores de elevação ao longo do limite lateral. Por exemplo, se uma camada aflorar na superfície do solo, o valor daquele ponto será o mesmo do MDT, entretanto, caso não aflore é adotado o valor determinado no perfil.

Para melhor entender o funcionamento da metodologia de obtenção do modelo geológico, a seção de procedimentos foi dividida em 3 tópicos: 1 - dados de entrada; 2 – preparação do modelo; e 3- cálculo, checagem e validação. Na Figura 29 tem-se o esquema geral de obtenção do modelo 3D das litologias a qual se baseou em INSIGHT (2014).



**Figura 29-** Esquema usado para a elaboração do modelo geológico da área de estudo.

Fonte: Autor

#### 4.2.7.1. Dados de entrada

Os dados de entrada necessários são categorizados em 4 tipos: modelo digital do terreno; estratigrafia geral; mapa de substrato rochoso; e poços.

O Modelo Digital do Terreno (MDT) correspondeu a representação matemática contínua da distribuição espacial das variações de altitude da área de estudo. É importante ressaltar que este pode ser inserido tanto em grid, quanto em TIN, todavia para o cálculo do



modelo deve-se obrigatoriamente está em formato TIN. As extensões de arquivos que o programa aceita são \*.asc (grid) ou \*.GOCAD para TIN. No presente estudo optou-se por utilizar \*.asc (grid) devido à maior compatibilidade com outros programas.

A obtenção do MDT foi feita por meio de uma grade regular (resolução 30m) através do interpolador *topo to raster* do módulo *spatial analyst* do ArcGIS 9.3. Os dados de entradas foram curvas de nível com espaçamento de 20 em 20m, pontos cotados e canais de drenagem. Ressalta-se que as drenagens foram digitalizadas da nascente até a foz de modo a garantir que o modelo esteja hidrologicamente consistente. Afim de refinar o modelo, foram utilizados dois filtros, os quais foram o *Fill* para preencher pequenas depressões e o *Low Filter* para suavizar a matriz em termos de número de células anômalas. O procedimento adotado para a validação do MDT foi através da comparação entre contornos e os valores das curvas de nível e pontos cotados originais com os obtidos através de interpolação. A extração das curvas de nível e pontos cotados do modelo criado foi através do comando *contour* do módulo *Spatial Analyst*. De posse do modelo gerado, o mesmo foi convertido para .asc.

A estratigrafia geral descreve a sequência vertical das camadas, ou seja, é esta que estabelece a sequência estatigráfica da área estudada. A extensão que suporta este tipo de arquivo é \*.gvs. A elaboração deste tipo de arquivo pode ser feita em qualquer editor de texto, onde inicialmente se salva no formato .txt, e depois se altera manualmente a extensão do arquivo por meio da renomeação do mesmo para .gvs no diretório onde está contido. As informações contidas na seção vertical geral correspondem a: o nome da camada, o número identificador único e inteiro, e pelo menos uma característica da camada geológica (litologia). A sua obtenção foi feita a partir da interpretação dos poços, do mapa de substrato rochoso e da sequência estratigráfica regional.

O mapa de substrato rochoso representou a distribuição das camadas geológicas com os tipos litológicos ao longo da área de estudo. Os procedimentos de elaboração deste mapa seguiram o Item 4.2.6.2, ressaltando que os nomes das litologias devem ser iguais aos adotados na seção vertical geral. O tipo de arquivo utilizado pelo software para representar este mapa é o shapefile (.shp).

Os dados dos poços compreendem 3 arquivos básicos: dados mestres, de descrição e os de legenda. No primeiro são colocadas informações do nome, da localização (longitude e latitude) e da cota do poço. Ressalta-se que a localização tem que está em um sistema métrico e a extensão é .bid. O arquivo de descrição (.blg), por sua vez, contém informações a respeito do perfil do poço. Este arquivo deve ter no mínimo 3 informações por linha: nome do poço; profundidade da camada; e litologia. Ressalta-se que o nome usado para definir a litologia deve

ser igual ao do arquivo. gvs. No arquivo de legenda (.gleg) são estabelecidas as cores e as texturas que representam as camadas e os dados dos poços. A estrutura deste arquivo consiste em 6 colunas as quais devem conter informações sobre os nomes das camadas (coluna 1), uma descrição básica das litologias (coluna 2) e as cores no sistema RGBA (colunas 3,4,5 e 6). É importante salientar que a elaboração dos arquivos descritos, deve ser feita igual à da estratigrafia geral.

#### 4.2.7.2.Preparação do modelo

##### *Procedimentos gerais*

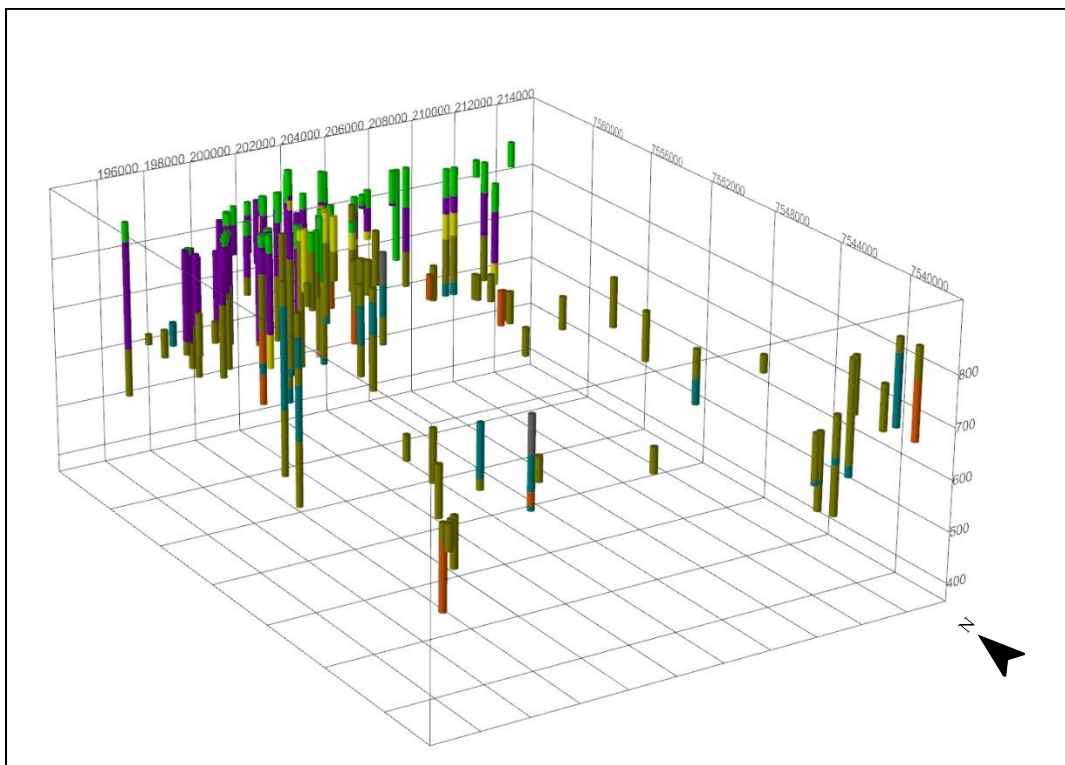
Refere-se a preparação dos dados básicos necessários para obtenção do modelo geológico a qual seguiu as orientações de Insight (2014). Inicialmente o programa foi configurado, onde estabeleceu-se a qualidade de exibição em 3D e em 2D das informações (perfis, mapas, MDT) e selecionou-se a pasta onde as informações foram armazenadas.

Com a configuração realizada, os dados de entradas foram inseridos na seguinte ordem:

- 1- O MDT no formato grid com 30 metros de resolução, o qual foi convertido para TIN posteriormente;
- 2- Os dados dos poços (.bid, .blg e .gleg) referente a localização, cota da boca e profundidade das camadas litológicas;
- 3- O mapa de substrato rochoso que contém a distribuição superficial das litologias da área de estudo.

##### *Definição dos alinhamentos*

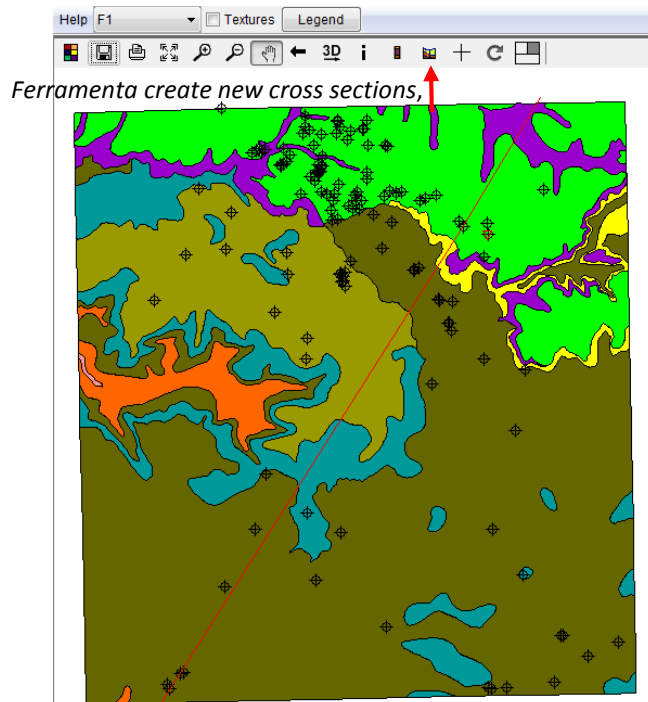
O primeiro passo desta etapa foi determinar a quantidade e as direções dos alinhamentos. Os critérios adotados para defini-los se basearam em uma distribuição espacial homogênea, de modo a cobrir toda a área e as litologias da região estudada, bem como a seleção dos poços que apresentassem informações mais plausíveis do contexto geológico da região. A escolha dos alinhamentos baseou-se na análise em 3D (Figura 30) dos perfis dos poços (Figura 29), e verificou-se aqueles que eram mais compatíveis com a distribuição preliminar obtida do mapa de substrato rochoso.



**Figura 30.** Distribuição dos poços em visão 3D para identificar quais seriam usados para a elaboração dos perfis geológicos.

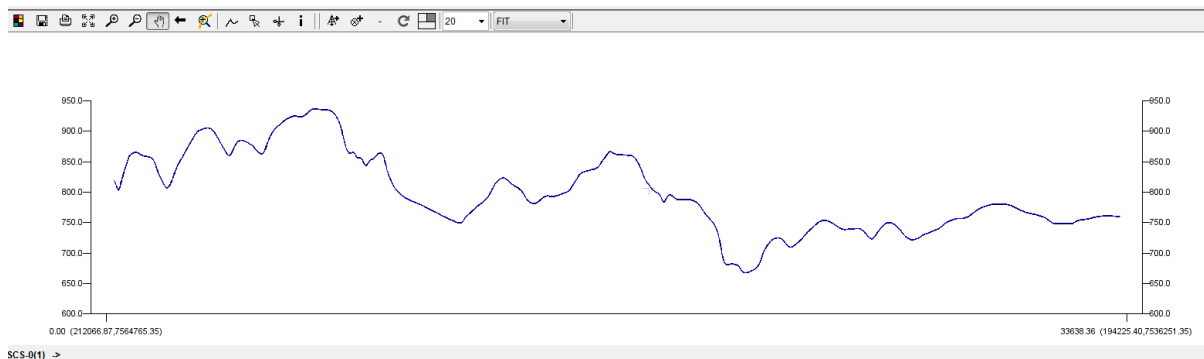
**Fonte:** Autor

Em seguida, as seções verticais foram traçadas a partir da ferramenta *create new cross sections* contida na janela onde ficam armazenadas as informações em planta (i.e. mapas, MDT) conforme observada na Figura 31. Ressalta-se que os alinhamentos quando possível foram delineados exatamente nos poços. Todavia, quando não foi necessário se adotar uma distância mínima (100 metros) para que o mesmo pudesse ser considerado na interpretação das camadas litológicas. O resultado final desta etapa foi a geração automática na janela 2D do programa o perfil topográfico que serviu de base para a interpretação dos dados dos poços e do mapa de substrato rochoso para a elaboração dos perfis geológicos (Figura 32).



**Figura 31.** Exemplo de uma seção traçada em planta para a elaboração do modelo geológico estruturado 3D.

Fonte: Autor



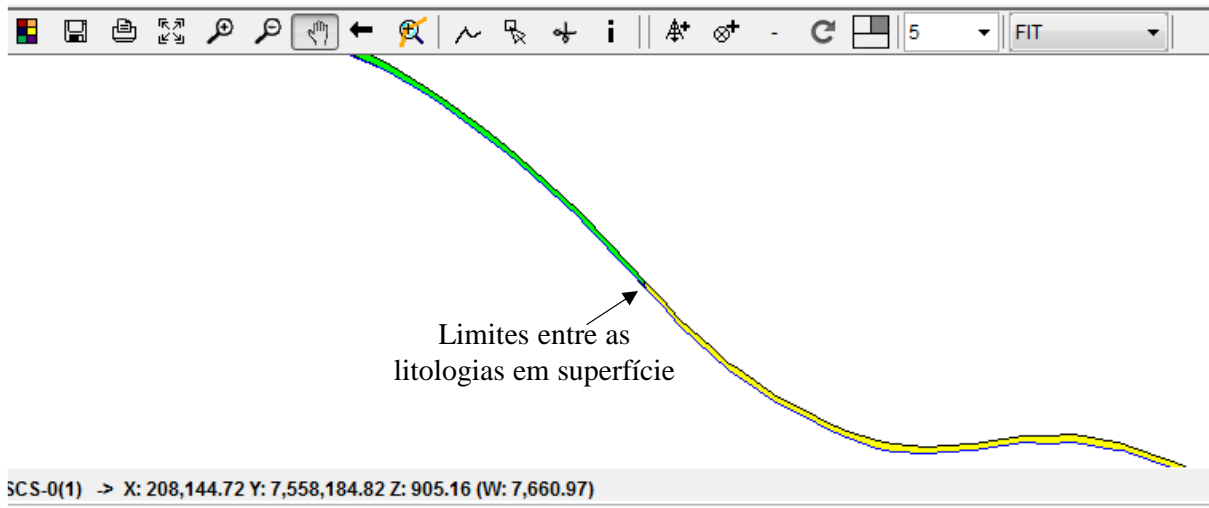
**Figura 32.** Exemplo de perfil topográfico gerado automaticamente na janela 2D do *Subsurface View MX*.

Fonte: Autor

### *Elaboração dos perfis geológicos*

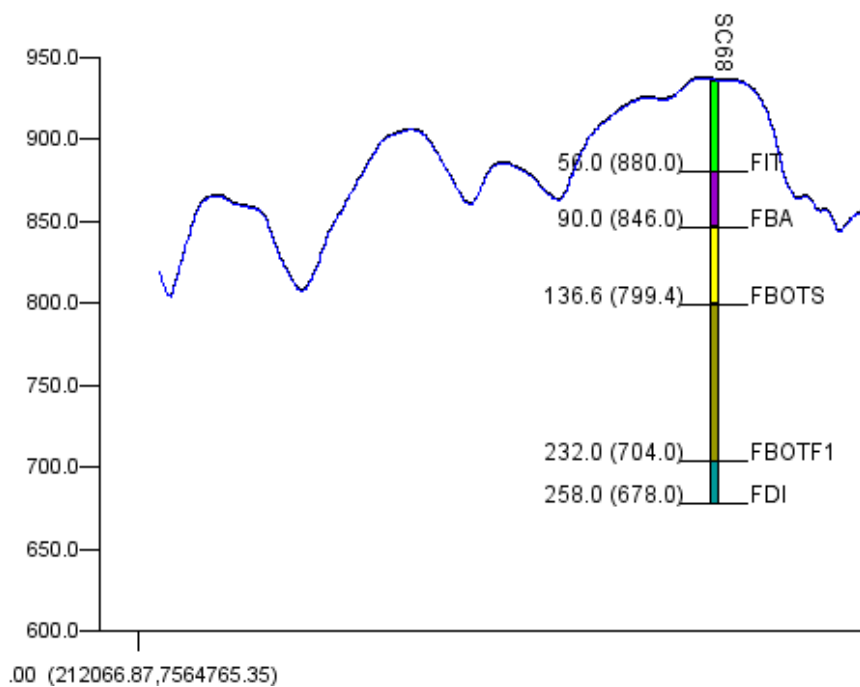
O próximo passo correspondeu a elaboração dos perfis geológicos os quais foram obtidos a partir da interpretação dos dados de poços e do mapa de substrato rochoso. O mapa de substrato rochoso foi utilizado para determinar o limite das litologias em superfície, o qual foi elaborado a partir de trabalhos de campo intensivos. Os poços, por sua vez, serviram para delimitar a espessura das camadas litológicas e auxiliar na determinação da extensão em subsuperfície

A habilitação destas informações no programa funcionou de duas formas distintas. Os limites das litologias em superfície quando o perfil topográfico é gerado, aparecem automaticamente (Figura 33). Enquanto que para os dados de poços foi necessário estabelecer o buffer de 100 metros da seção em relação ao poço, onde na Figura 34 é mostrado um exemplo de um poço plotado em um perfil topográfico.



**Figura 33.** Exemplo de um limite de litologia em superfície que está baseado no mapa de substrato rochoso

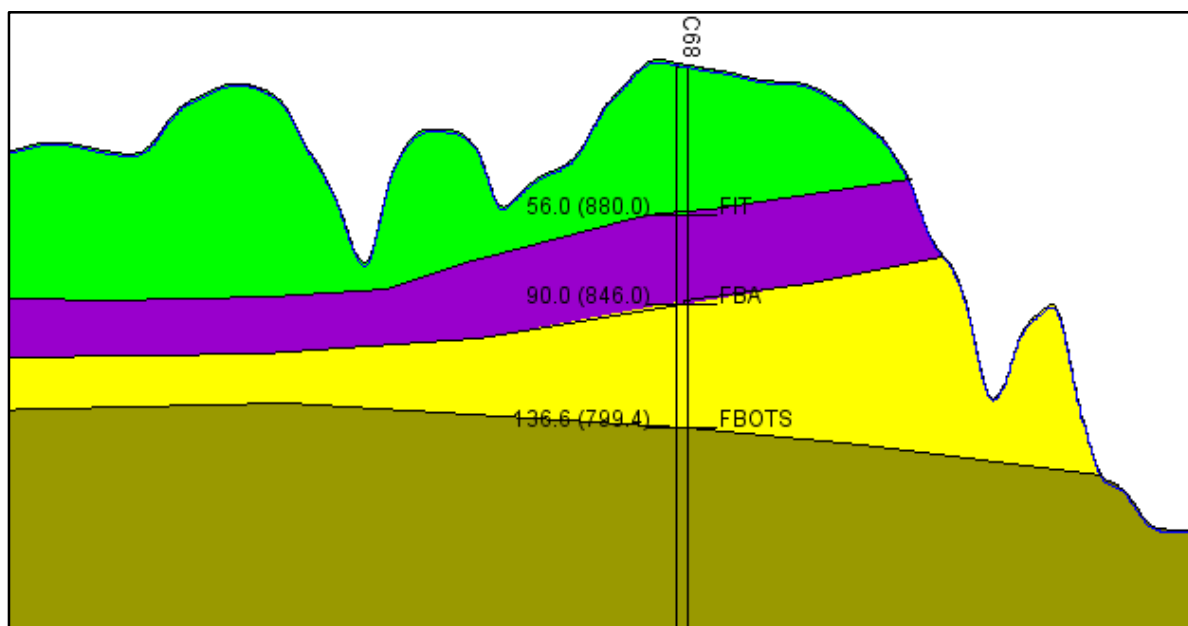
Fonte: Autor



**Figura 34.** Exemplo de um poço plotado em perfil topográfico gerado no software *Subsurface View MX*.

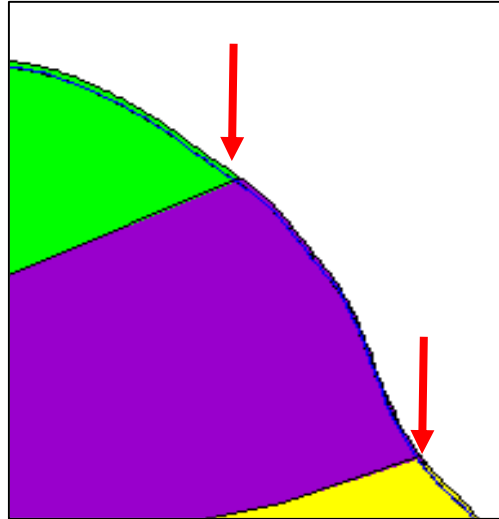
Fonte: Autor

Após os dados de poços e dos limites das litologias em superfície no perfil topográfico prosseguiu-se para a interpretação e delimitação das camadas. Para este procedimento foi inicialmente selecionada a litologia a ser interpretada. Em seguida foi delineado o limite da base e depois confirmada a sua interpretação (Figura 35). Salienta-se que para as camadas que afloram na superfície do terreno, o limite deve ser exatamente ao do mapa de substrato rochoso (Figura 36).



**Figura 35.** Exemplo da definição dos limites das camadas litológicas baseada nos dados de perfis de poços.

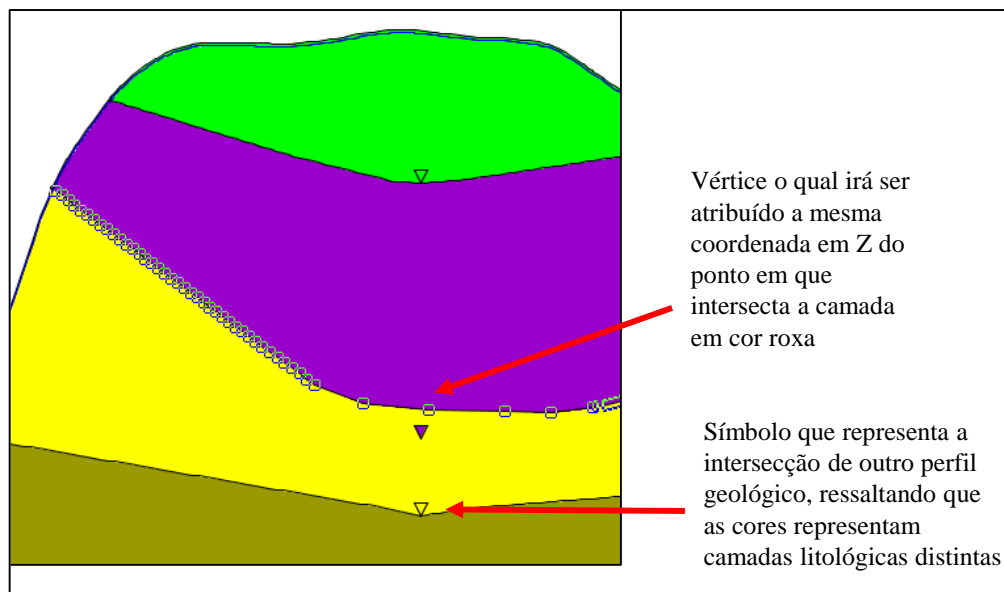
Fonte: Autor



**Figura 36.** Exemplo da delimitação das camadas exatamente no contato em superfície das litologias, onde a seta vermelha ressalta estes limites.

**Fonte:** Autor

Ao serem gerados os diversos perfis geológicos, houveram pontos em que ele se intersectaram. Quando isto ocorreu foi utilizado o comando de precisão chamado *snapping* o qual atribui aos pontos intersectados a mesma coordenada espacial em Z como exemplificado na Figura 37. A utilização desse processo garante que o modelo apresente consistência em termos de extensão lateral e de profundidade.



**Figura 37.** Exemplo demonstrando o procedimento de atribuição da mesma coordenada em Z dos pontos intersectados das camadas litológica entre dois perfis geológicos.

**Fonte:** Autor

Ao final da geração de todos os perfis foi obtida uma malha de perfis geológicos, a qual correspondeu ao modelo geológico preliminar e parte das informações necessárias para o cálculo do modelo estão condensada. Em seguida a malha foi transferida para a janela 3D para checagem e verificação da plausibilidade da mesma com o contexto geológico (Figura 38).



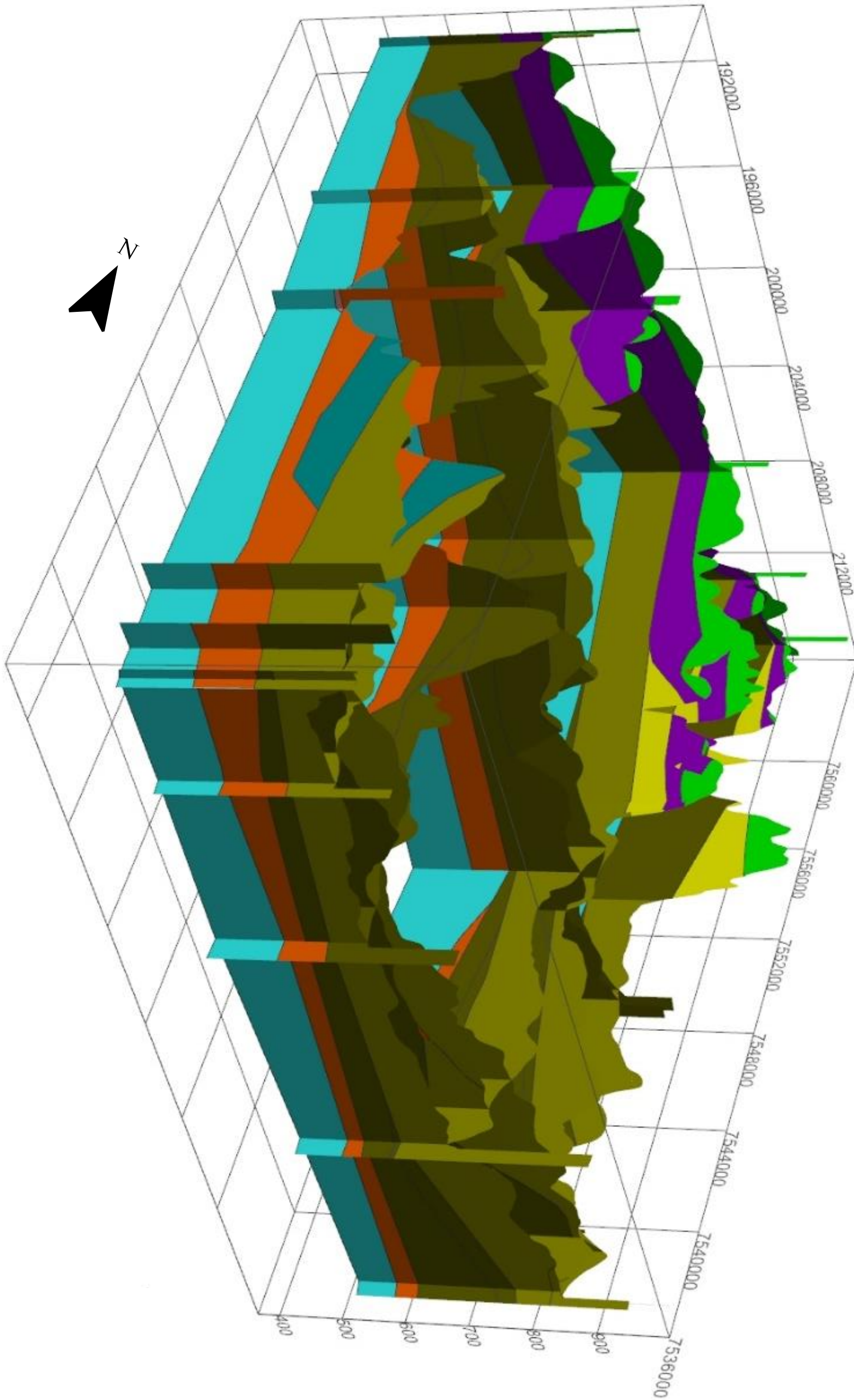


Figura 38. Visão geral do conjunto dos perfis geológicos elaborados.

Fonte: Autor

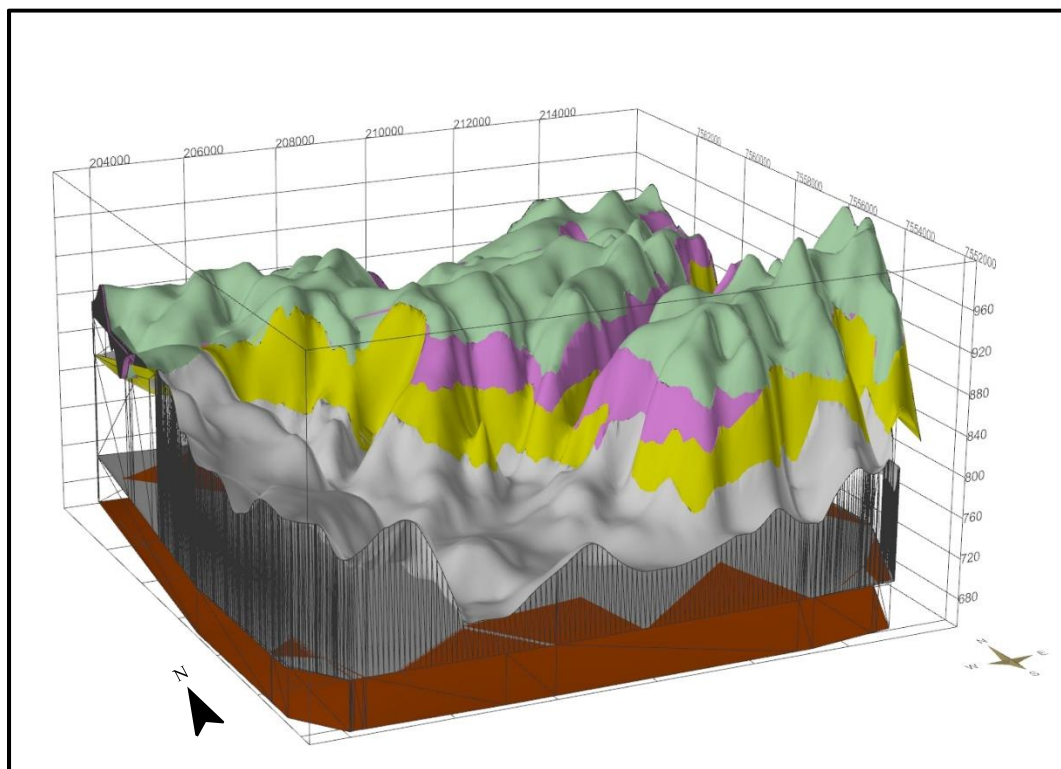


### *Determinação da distribuição das camadas em planta*

A última etapa da preparação do modelo correspondeu a determinação da distribuição global (superfície+subsuperfície) das camadas litológicas em planta, a qual considerou os limites do mapa de substrato rochoso e a rede de perfis geológicos obtida anteriormente. Inicialmente, por meio do comando *add layer* foi adicionada a camada litológica a qual ia ser delimitada. Em seguida utilizou-se a ferramenta *editor*, para desenhar manualmente a extensão da camada. Ressalta-se que os limites onde ocorrem os afloramentos devem coincidir com os do mapa de substrato rochoso, enquanto que os de subsuperfície com os traçados nos perfis geológicos.

#### 4.2.7.3. Elaboração do modelo geológico estruturado 3D

De posse da rede de perfis geológicos e a extensão das camadas, o modelo geológico estruturado 3D mediante o uso do comando *calculate all layers*, onde na Figura 39 é possível observar um exemplo do modelo gerado.

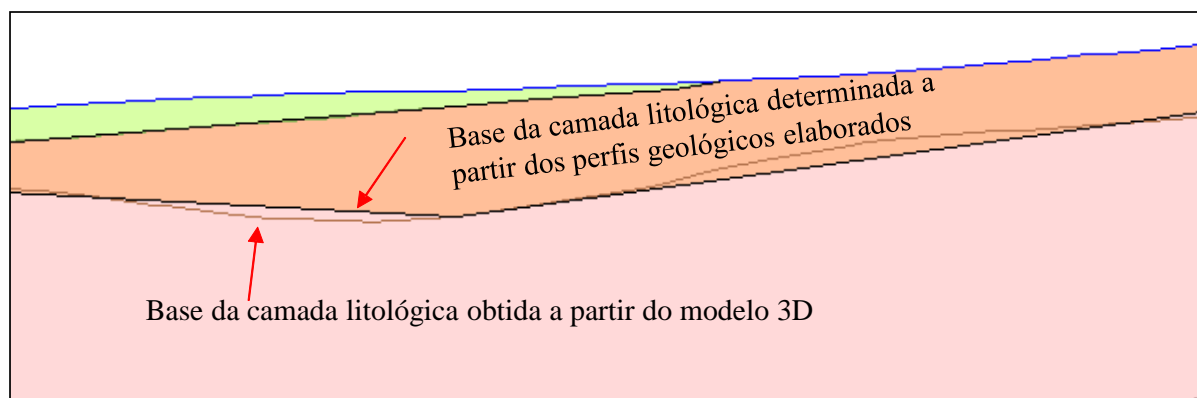


**Figura 39.** Exemplo de uma vista geral do modelo geológico estruturado 3D, com direção de vista SW-NE.

**Fonte:** Autor

#### 4.2.7.4. Validação do modelo

A validação do o modelo geológico foi feito por meio da comparação entre os limites da base das camadas litológicas delimitados anteriormente nos perfis geológicos e os obtidos a partir do modelo geológico gerado. A Figura 40 mostra um exemplo do procedimento de validação do modelo geológico estruturado 3D.



**Figura 40.** Exemplo do processo de validação do modelo geológico estruturado 3D, o qual é baseada na comparação da base da camada litológica determinada a partir dos perfis geológicos elaborados com as obtidas a partir do modelo geológico 3D.

Fonte: Autor

#### 4.2.8. Caracterização geológica e geotécnica das unidades de condição de infiltração

A combinação entre os materiais inconsolidados e os tipos de uso manejo do solo são chamados de condições de infiltração. A sua caracterização é fundamental pois permite identificar e analisar a variabilidade das propriedades e características geológico e geotécnicas, bem como selecionar os parâmetros do modelo de infiltração físico matemático que refletem de forma mais adequada as diferentes unidades de condições de infiltração.

A obtenção das diferentes combinações de unidades de condição de infiltração foi realizada conforme o Item 4.2.6.5 enquanto a sua caracterização foi feita a partir de ensaios laboratoriais (Item 4.2.10) e *in situ* (Item 4.2.9.2) e aplicação de funções de pedotransferência (Item 4.2.11).

Alguns aspectos são importantes mencionar de determinados procedimentos da caracterização das unidades de condições de infiltração. Os ensaios de granulometria para os principais materiais inconsolidados foram realizados com e sem defloculante, visando avaliar o grau de agregação das partículas, o qual pode interferir na porosidade, no índice de vazios e nas propriedades hidráulicas do solo, assim como na infiltração.

Os parâmetros de entrada (umidade equivalente) e os resultados (capilaridade efetiva e curva de retenção) das funções pedotransferência são dependentes das frações granulométricas obtidas das curvas. Desse modo, após a análise de todas as curvas granulométricas, optou-se utilizar as frações obtidas daquela a qual não houve o uso de defloculante, pois estas representavam de maneira mais adequada as condições de campo. Ressalta-se ainda que as curvas sem defloculante dos diferentes materiais inconsolidados selecionadas para aplicação da função de pedotransferência representavam as amostras obtidas da porção mais superficial do terreno (até 20 cm). Para a aplicação da função de pedotransferência para cada material inconsolidado o valor das frações granulométricas adotados foram iguais para todos para todos os tipos de uso.

A umidade equivalente representa o conteúdo gravimétrico de um solo a uma centrifugação de 2400 rpm. Este conteúdo pode ser associado à capacidade de campo (33kPa) somente para solos, porém não são adequados para materiais granulares conforme constatado por Oliveira e Melo (1971). Como na área de estudo não foram identificados solos granulares, para a determinação da umidade equivalente considerou-se a sucção de 33kPa e utilizou-se modelo de Campbell (1974). Este modelo apresenta dois parâmetros de entradas que são o coeficiente exponencial empírico e o coeficiente de sucção de saturação. A obtenção destes parâmetros foi feita a partir dos dados de Clapp e Hornberger (1978), que determinaram valores médios para diferentes classes texturais, as quais estão associadas ao triângulo textural proposto pela USDA (2017).

A determinação da condutividade hidráulica saturada foi realizada através de ensaios de infiltrômetros tipo duplo anel e ensaios de coluna com carga constante. A utilização desses dois métodos objetivou avaliar a variabilidade que pode ocorrer entre ensaios de campo e laboratório. Auxiliou também, a adoção do valor mais representativo de condutividade hidráulica para cada condição de infiltração que será usado na simulação do modelo físico matemático para determinação da infiltração e geração de escoamento superficial.

#### ***4.2.9. Trabalhos de campo***

##### *4.2.9.1. Amostragem*

###### *4.2.9.1.1. Amostragem dos materiais inconsolidados*

A etapa de amostragem dos materiais inconsolidados compreendeu a extração de amostras para posterior ensaios em laboratório. Foram retiradas amostras deformadas e indeformadas em 3 profundidades (20cm, 60cm a 100cm). As amostras deformadas serviram



para os ensaios de granulometria conjunta, massa específica dos sólidos e teor de umidade. Enquanto que as amostras indeformadas foram usadas para obter informações dos índices físicos (massa específica seca, índice de vazios e porosidade) e condutividade hidráulica saturada.

Para retirar as amostras indeformadas foram utilizados anéis feitos de PVC, com bordas biseladas. Estes apresentam dimensões distintas, onde o tamanho está dependente do ensaio a ser executado. Para obtenção dos índices físicos foi utilizado um anel com dimensões de 7,5 cm de diâmetro e 5 cm de altura (Figura 41-A), enquanto que para a condutividade hidráulica saturada as dimensões do anel utilizado foram 9 cm de largura e 15 cm (Figura 41-B).



**Figura 41.** Colunas de PVC para amostragem: A) anel utilizado para retiradas de amostras indeformadas e obtenção dos índices físicos, B) anel utilizado para retiradas de amostras indeformadas e determinação da condutividade hidráulica saturada.

**Fonte:** Autor

#### 4.2.9.1.2. Amostragem das águas subsuperficiais

Afim de se conhecer as características físico-químicas das águas subsuperficiais da área de estudo, foram coletadas amostras em fontes naturais e poços. A determinação da quantidade de locais e localização foram baseadas nos tipos de materiais geológicos e usos presentes na área de contribuição e de influência, na facilidade de acesso e na distribuição espacial uniforme quando possível dos locais na área de estudo.

As coletas foram feitas durante o final de outubro e início de novembro, que corresponderam aos meses que antecedem ao período mais chuvoso da região estudada. Buscou-se representar uma condição mais seca afim de obter respostas a longo prazo do transporte dos elementos químicos que advém do processo de adubação e calagem.

As amostras foram armazenadas em frascos de polipropileno de 500 ml e acondicionadas em uma caixa de isopor com gelo. A obtenção das mesmas se deu de várias formas. Para a coleta das amostras em poços foi utilizado um equipamento constituído de um fio, uma roldana, uma manivela, uma base e um amostrador (Figura 42). A sequência de obtenção da amostra foi:

1. Posicionou-se o equipamento em uma base estável;
2. Acoplou-se o amostrador na corda através do rosqueamento do mesmo com um adaptador conectado no final da corda;
3. Desceu-se o amostrador, o qual apresenta um peso na sua base para afundar e um furo no topo com a função de permitir a entrada de água;
4. Ergueu-se o amostrador recorrendo a uma manivela, em seguida o mesmo foi desconectado para posteriormente o frasco de polipropileno ser preenchido com a água coletada.



**Figura 42.** Amostrador utilizado para retirar amostras de água de poço.

**Fonte:** Autor

A amostragem em nascentes foi realizada de duas formas. A primeira obteve-se as amostras diretamente na mina, na qual esta opção foi buscada na maioria dos casos. Para coletar a amostra de água foi utilizada uma seringa de polipropileno que contém 100 ml de volume (Figura 43). Durante esse procedimento tomou-se o cuidado para sugar o mínimo possível de sedimentos para diminuir o tempo de filtragem (4.2.7.3). A segunda forma, por sua vez, compreendeu coletar a água por meio de encanamentos previamente instalados pelos

proprietários para o bombeamento da água direto da nascente (Figura 44), a qual geralmente apresentava uma caixa que a represava (Figura 45).



**Figura 43.** Coleta de água de fontes realizada a partir do uso de uma seringa de polipropileno

Fonte: Autor



**Figura 44.** Coleta de água de fontes, na qual foi utilizado um encanamento previamente instalado.

Fonte: Autor





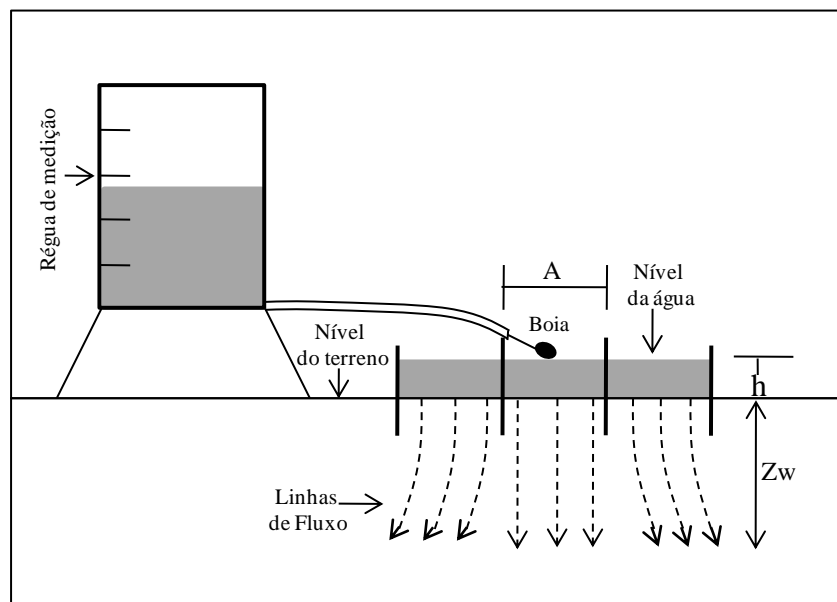
**Figura 45.** Caixa utilizada para represar as águas de fontes.

Fonte: Autor

#### 4.2.9.2. Ensaios de infiltração *in situ*

Correspondeu a realização de ensaios de infiltração *in situ* para a obtenção de propriedades hidráulicas (taxa de infiltração, capacidade de infiltração, condutividade hidráulica) dos materiais geológicos.

O ensaio *in situ* de infiltração adotado foi o infiltrômetro de duplo anel, o qual é regido pela norma ASTM 8338. Na Figura 46 encontra-se o esquema geral do equipamento utilizado neste ensaio.



**Figura 46.** Esquema geral do ensaio de duplo anel.

Fonte: Adaptado de Palma (2004)

A obtenção da taxa de infiltração e da capacidade de infiltração é feita a através da curva de infiltração a qual é elaborada a partir da determinação da altura de água infiltrada ao longo de um intervalo de tempo. Após a infiltração se estabilizar a condutividade hidráulica é considerada saturada, a qual é determinada por meio da Equação 31, a qual é fundamentada na equação de Darcy para carga constante:

$$K_{fs} = \frac{V_f}{\left(\frac{h+Z_w}{Z_w}\right) \times A \times t} \quad [31]$$

Onde:  $k_{fs}$  é a condutividade hidráulica saturada de campo (cm/min),  $Z_w$  é a profundidade da frente de saturação (cm),  $A$  é a Área da seção do anel (cm<sup>2</sup>),  $t$  é tempo entre duas leituras (H),  $V_f$  é o volume de água infiltrada (cm<sup>3</sup>),  $H$  é a profundidade da água do anel, quando é ensaiada a regime constante (cm).

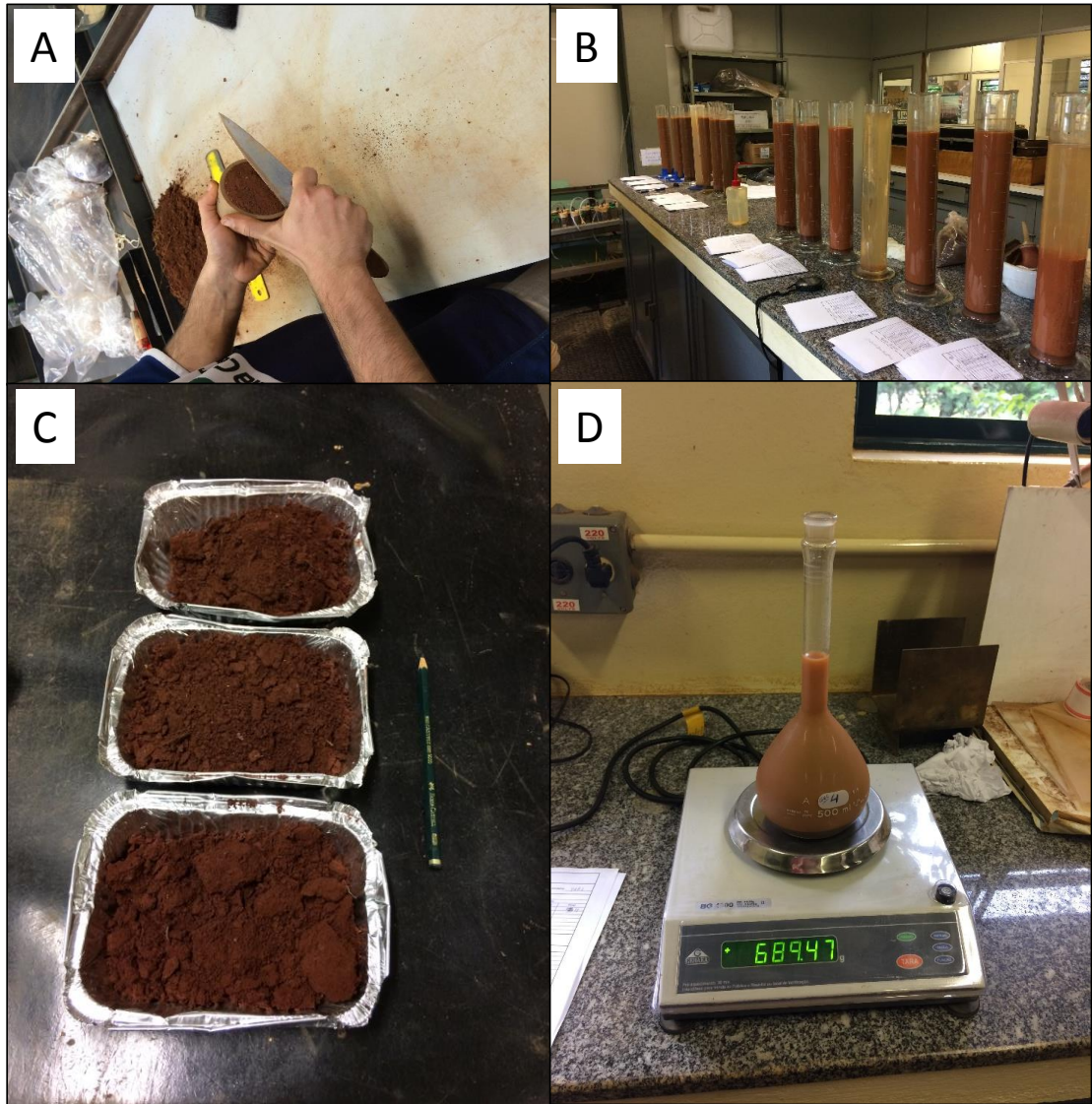
#### 4.2.9.3. Verificação e validação dos mapas de uso do solo, substrato rochoso e materiais inconsolidados

Nesta etapa buscou-se verificar e validar em campo os mapas de uso do solo, substrato rochoso e de materiais inconsolidados. Os critérios de validação do tipo de uso do solo adotados foram a presença e espaçamento entre de talhões, tipologia e densidade de folhagem, e presença de frutos ou não. Os critérios utilizados para validar o mapa de substrato rochoso foi a litologia, estrutura, textura e posição topográfica. Enquanto que para os materiais inconsolidados foram analisadas as diferenças de textura, cor, espessura, posição topográfica e continuidade do material.

### 4.2.10. Trabalhos de laboratório

#### 4.2.10.1. Caracterização geotécnica básica dos materiais inconsolidados

Os ensaios laboratoriais de caracterização geotécnica básica dos materiais inconsolidados, seguiram as normas da NBR 7181 (1995) para a análise granulométrica conjunta, NBR 6508 (1984) para a massa específica dos sólidos, enquanto que para a massa específica seca e a de campo, e índices físicos utilizou-se o método do anel proposto por Zuquette (1987). Na Figura 47 (A, B, C e D) são mostrados alguns dos procedimentos executados ao longo da caracterização geotécnica básica dos materiais inconsolidados.



**Figura 47.** A) Preparação da amostra para a determinação da massa específica seca e de campo, B) Ensaio de sedimentação, o qual faz parte dos procedimentos da granulometria conjunta, C) Amostra indeformada retirada do anel de PVC preparada para a secagem, D) Pesagem do picnômetro realizada para a determinação da massa específica dos sólidos.

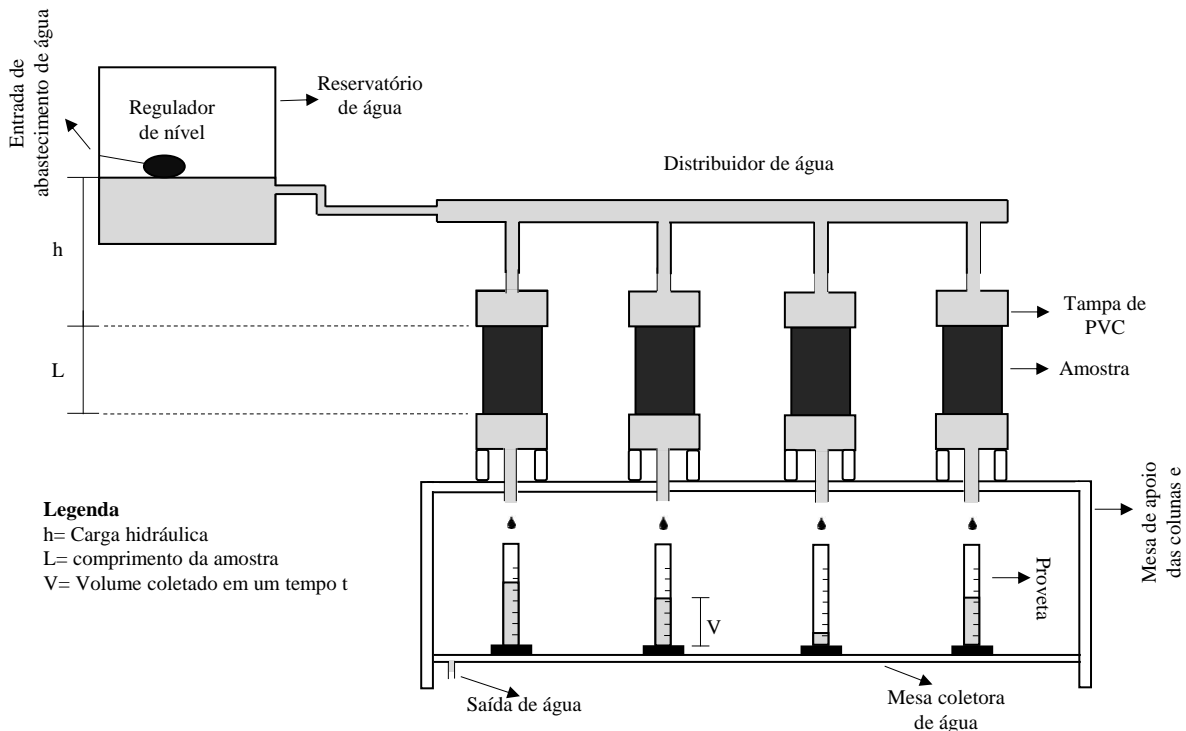
Fonte: Autor

#### 4.2.10.2. Condutividade hidráulica

O ensaio adotado para determinar a condutividade hidráulica saturada dos materiais inconsolidados das diferentes unidades de condição de infiltração foi o permeâmetro com carga constante ou também conhecido como ensaio de coluna. A seguir os equipamentos utilizados, os procedimentos de montagem do ensaio, de saturação das colunas e determinação da condutividade hidráulica.

Os equipamentos necessários para a execução deste ensaio são: coluna de PVC extraída conforme o Item 4.2.9.1.1, a qual é considerada o próprio permeâmetro; tampa de PVC que é

conectada na base e no topo da amostra, a qual contém um filtro de fundo; base de metal de suporte das colunas; distribuidor de água; reservatório de água com regulador de nível; mesa que sustenta as colunas e o coletor de água; e mangueiras de conexões. Na Figura 48 observa-se um esquema geral de funcionamento do ensaio com aparato laboratorial necessário.



**Figura 48.** Esquema geral de funcionamento do Permeômetro de carga constante.

**Fonte:** Autor

As etapas de montagem do ensaio de carga constante são descritas a seguir:

1. Retificação das amostras indeformadas;
2. Acoplagem das tampas de PVC na base e no topo da amostra, em seguida esta é colocada na base de metal de suporte das colunas (Figura 49).
3. Na porção superior da amostra as tampas foram fixadas com o uso de roscas e uma placa de metal;
4. As colunas foram posicionadas na mesa de sustentação;
5. As mangueiras do reservatório foram conectadas ao distribuidor de água;
6. O reservatório e o distribuidor foram preenchidos com água, no último garantiu-se que todo o ar fosse evacuado do sistema.
7. As mangueiras foram conectadas tanto no topo como na base da coluna.



**Figura 49.** Tampas de PVC acopladas na base e no topo da amostra, estando apoiadas na base de metal de suporte das colunas.

**Fonte:** Autor

O primeiro passo é a saturação das colunas. Inicialmente abriu-se no topo da amostra para saída de ar. Em seguida as mangueiras da base da coluna foram conectadas com o distribuidor de água. É importante salientar que a saturação foi realizada por meio de fluxo ascendente, pois dessa forma tem-se uma expulsão de ar mais eficiente de dentro da amostra. O tempo de saturação foi diferente para os distintos tipos de condições de infiltração, os quais variaram desde minutos até horas. Nesse sentido, o tempo adotado para o conjunto de colunas foi de um dia, pois verificou-se que este era suficiente para saturar as amostras, independentemente da condição de infiltração.

Com as amostras saturadas, a conexão das mangueiras foi trocada para as do topo, pois a determinação da condutividade hidráulica foi feita por meio de fluxo descendente. Posteriormente foi ajustada a carga hidráulica, de modo a obter o menor gradiente possível, para melhor representar as condições de campo e evitar que a amostra sofresse alterações. Afim de estabilizar a vazão no reservatório por meio do regularizador de nível, esperou-se um dia e mediu-se carga hidráulica novamente, desse modo garantiu-se que a carga estivesse constante. Após essa etapa o ensaio está na sua configuração final em termos de montagem conforme pode ser observado na Figura 50.





**Figura 50.** Foto do arranjo do ensaio de colunas.

**Fonte:** Autor

Para a determinação da condutividade hidráulica foi utilizada a Equação 32 que é baseada na lei de Darcy.

$$K_s = \frac{V+L}{(L+h) \times t \times A} \quad [32]$$

Onde:  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada,  $V$  é o volume coletado,  $L$  é a altura da amostra,  $h$  é carga hidráulica,  $t$  é o tempo e  $A$  é a área de amostra.

O próximo passo foi analisar a estabilização das amostras, para isso foram feitas diversas leituras ao longo do dia, até o momento em que as medidas pouco variaram. Ao considerar que a vazão se encontrava estável, para cada coluna foram obtidas 3 leituras de volume de água usando provetas, em tempo, dias e horários diferentes. Ao final das três leituras obteve-se uma média. A última etapa deste ensaio consistiu em desmontar as colunas e abri-las

logo em sequência (Figura 51). Esse procedimento teve o objetivo de identificar a presença de macroporosidade da amostra para avaliar os resultados da condutividade hidráulica saturada.



**Figura 51.** Procedimento de abertura da amostra após o término do ensaio de coluna, visando identificar a presença de macroporosidade.

**Fonte:** Autor

#### 4.2.10.3. Caracterização físico-química das águas subterrâneas

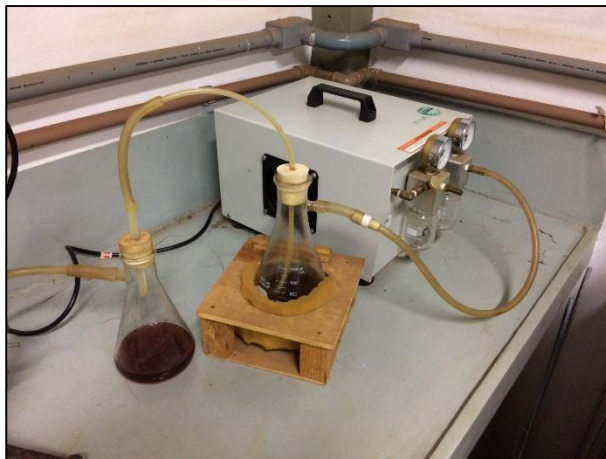
##### *Preparação inicial das amostras*

Esta etapa correspondeu a preparação inicial das amostras para os ensaios de laboratório. Para a sua realização seguiu-se as recomendações de CETESB (1988), as quais as etapas estão descritas a seguir: 1- as amostras foram filtradas a vácuo em um conjunto de recipientes (Figura 52) e utilizou-se um filtro de papel de celulose de 45µm de porosidade, notando que na Figura 53 é possível observar o conjunto da bomba a vácuo; 2-as amostras foram divididas e devidamente etiquetadas em 5 frascos (Figura 54) de 100 ml, nos quais um foi acidulado com 3 gotas de HNO<sub>3</sub> a 50% e os outros 4 não. Ressalta-se que um frasco foi utilizado para obtenção dos cátions (acidulado), 1 para os ânions (não acidulado), 1 para alcalinidade (não acidulado), 1 para pH e condutividade elétrica (não acidulado), e 1 como reserva; 3 – acondicionamento dos frascos em geladeira com temperatura inferior a 15°C.



**Figura 52.** Conjunto de recipientes utilizados para filtração a vácuo das amostras de água subterráneas.

Fonte: Autor



**Figura 53.** Bomba a vácuo utilizada durante o processo de filtração.

Fonte: Autor



**Figura 54.** Frascos devidamente etiquetados após o processo de filtração.

Fonte: Autor



### *Caracterização físico química*

Durante a etapa de caracterização físico-química foram determinados os seguintes íons:  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , assim como a alcalinidade, a condutividade elétrica e o pH. Exceto pela condutividade elétrica e o pH todas as características foram determinadas pelo Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS), localizado no Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.

O método para a obtenção dos íons foi a cromatografia iônica, no qual foi utilizado o Equipamento Dionex ICS 90. O pH foi obtido por meio de um pHmetro da marca Digimed modelo DM21 (Figura 55) e a condutividade elétrica (C.E.) foi determinada através de um condutímetro da marca Analyser modelo 650 (Figura 56). Para ambos os ensaios foi necessário fazer a calibração antes das leituras. No primeiro se utilizou duas soluções tampões, uma com pH neutro (7) e outra com pH ácido (4), no qual obteve-se precisão de 97% (Figura 55). O segundo utilizou KCl 0,01M a uma temperatura de 22 C° e teve como valor de ajuste 1299  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figura 56). Para as leituras de ambos os parâmetros os eletrodos foram mergulhados três vezes e deixados em repouso até estabilizar.



**Figura 55.** Foto do pHmetro da marca Digimed modelo DM21 usado para determinar a acidez das águas subsuperficiais.



**Figura 56.** Foto do Condutímetro da marca Analyser modelo 650 utilizado para determinar a condutividade elétrica das amostras das águas subsuperficiais.

Com base nos resultados dos íons determinados, as águas foram classificadas com base no diagrama de Piper (PIPER, 1944), o qual permite comparar distintos grupos quanto aos íons dominantes e permite observar as proporções relativas de cada íon. O funcionamento do diagrama é baseado na plotagem das proporções dos cátions principais ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) e dos ânions principais ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ) em dois diagramas triangulares, um para os cátions e outro para os ânions. Em seguida os dois triângulos são combinados em um losango situado entre os mesmos, o qual contém a classificação dos grupos de água. A elaboração deste gráfico foi feita através do software livre Qualigraf (MOBUS, 2002), desenvolvido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme).

#### 4.2.11. Aplicação de função de pedotransferência (FPT)

##### 4.2.11.1. Curva de Retenção de água

A determinação da curva de retenção de água foi obtida por meio de funções de pedotransferência. As funções de pedotransferência adotadas se basearam no modelo de Van Genuchten (1980), a qual pode ser observado a seguir:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \times \psi)^n]^m} \quad [33]$$

Onde  $\theta$  é o conteúdo volumétrico em um determinado potencial de sucção matricial,  $\theta_s$  é conteúdo volumétrico quando saturado,  $\theta_r$  é o conteúdo volumétrico residual,  $\psi$  é o potencial de sucção do solo,  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  são parâmetros de ajuste da curva de retenção.

Para obter a curva de retenção de água foi utilizada duas funções integradas de pedotransferência desenvolvida por Tomasella *et al.* (2003). A primeira função é chamada de paramétrica, pois estima os parâmetros do modelo de Van Genuchten (1980). Nesta os conteúdos volumétricos podem ser determinados em qualquer potencial de sucção matricial. A segunda função é chamada de pontual pois apenas determina o conteúdo volumétrico em potenciais de sucção predefinidos.

Os parâmetros de entrada utilizados nas duas funções de pedotransferência são os mesmos os quais são: porcentagem da fração areia grossa (2 a 0,2 mm), areia fina (2 a 0,06mm), silte (0,06 a 0,002mm) e argila (<0,002mm), massa específica seca de campo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) e a umidade equivalente ( $\text{g}/\text{g}$ ). A obtenção de cada parâmetro seguiu distintos procedimentos. Para as frações granulométricas utilizou-se a curva granulométrica característica de cada material geológico, na qual foi extraída a porcentagem referente a cada fração. Nos valores de massa específica seca de campo utilizou-se o pd da camada mais superficial nos diferentes tipos de

usos e manejos do solo em vista que é esta que controla predominantemente o processo de infiltração. A umidade equivalente (ME) é definida como a porcentagem de água que um solo pode reter quando submetida a uma força centrífuga 1000 vezes maior que a gravidade, a qual pode estar associada à capacidade campo (Briggs e Shantz, 1912). Esta foi obtida a partir da equação proposta por Campbell (1974):

$$\mathbf{ME} = n \times \left( \frac{\Psi_s (\log)}{336,5} \right)^{1/b} \quad [34]$$

Onde ME é a umidade equivalente,  $n$  é a porosidade total do solo,  $b$  é um coeficiente empírico  $\Psi_s (\log)$  (cm) é o coeficiente de saturação transformado em log. Os parâmetros  $b$  e  $\Psi_s (\log)$  foram adotados de Clapp e Hornberger (1978), os quais determinaram valores médios para cada um destes a partir de diferentes classes texturais, as quais foram determinadas pelo ensaio de granulometria conjunta (Item 4.2.10.1). A classificação textural adotada por esses autores foi a proposta por USDA (1975).

O esquema de funcionamento das FPT's para obtenção da curva de retenção de água é balizado em algoritmos os quais geram diversos subparâmetros. Na Figura 57 é possível observar o esquema de funcionamento e a relação dos parâmetros de entradas, subparâmetros e os parâmetros de saída das FPT's. Ressalta-se que os subparâmetros foram classificados em diretos (X), os quais foram calculados diretamente a partir do parâmetro de entrada, e os indiretos (Z) os quais foram obtidos por meio dos subparâmetros X. As equações utilizadas para a obtenção de X, Z, dos parâmetros de Van Genuchten e dos conteúdos volumétricos de água com potencial de sucção mátrico definidos foram divididas em 3 grupos de modo a facilitar a sua visualização e a ordem de cálculo: obtenção dos subparâmetros X (1º etapa de cálculo); obtenção dos subparâmetros Z (2º etapa de cálculo); e determinação dos parâmetros de saída (3º etapa de cálculo). Na Tabela 16 são apresentadas as equações para a obtenção dos subparâmetros X e Z, dos conteúdos volumétricos de água com potencial de sucção mátrico definidos e os parâmetros do modelo de Van Genuchten (1980).



Sequência de Obtenção

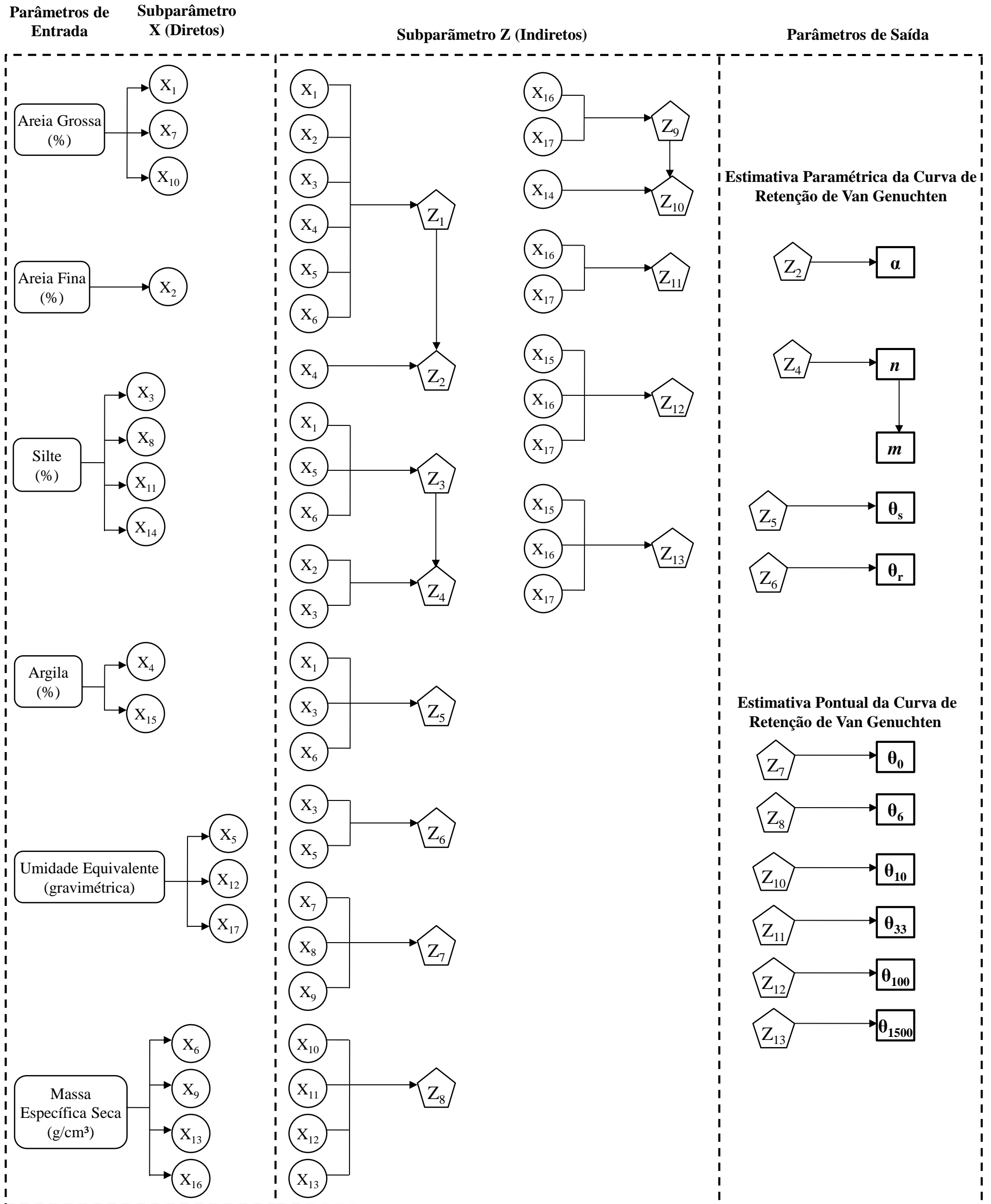


Figura 57. Esquema de obtenção dos parâmetros da curva de retenção de Van Genuchten, bem como os conteúdos volumétrico de água em potenciais de sucção pré determinados a partir da metodologia de Tomassela *et al.* (2003).

Fonte: Baseado em Tomassela *et al.* (2003).

**Tabela 16.** Equações utilizadas para a obtenção dos subparâmetros X e Z, dos conteúdos volumétricos de água com potencial de sucção mátrico definidos e os parâmetros do modelo de Van Genuchten.

Equações para a obtenção dos subparâmetro X (1º etapa de cálculo)	Equações para a obtenção dos subparâmetro Z (2º etapa de cálculo)	Equações para a obtenção dos parâmetros de saída (3º etapa de cálculo)
$X_1 = -1,0679 + 0,0536107 \times AG$ [35] $X_2 = -1,17468 + 0,0808098 \times AF$ [36] $X_3 = -1,05976 + 0,0650437 \times S$ [37] $X_4 = -2,10641 + 0,0427715 \times Arg$ [38] $X_5 = -2,21391 + 8,92268 \times Ue$ [39] $X_6 = -6,03516 + 4,81197 \times pd$ [40] $X_7 = -1,0553 + 0,0533922 \times AG$ [41] $X_8 = -1,07131 + 0,0649731 \times S$ [42] $X_9 = -6,18145 + 4,95385 \times pd$ [43] $X_{10} = -1,17152 + 0,0500892 \times AG$ [44] $X_{11} = -0,867548 + 0,0519417 \times S$ [45] $X_{12} = -1,97975 + 8,3484 \times Ue$ [46] $X_{13} = -5,72537 + 4,53135 \times pd$ [47] $X_{14} = -1,05501 + 0,0650857 \times S$ [48] $X_{15} = -2,07588 + 0,0423954 \times Arg$ [49] $X_{16} = -6,03402 + 4,80572 \times pd$ [50] $X_{17} = -2,18409 + 8,84963 \times Ue$ [51]	$Z_1 = 4,25417 \times X_1 + 2,72322 \times X_2 + 3,07242 \times X_3 + 5,00093 \times X_4 - 0,195062 \times X_5 - 0,377081 \times X_6$ [52] $Z_2 = 0,110144 + 0,640373 \times Z_1 - 1,16884 \times (Z_1)^2 - 0,155394 \times X_4 - 0,358591 \times Z_1 \times X_4 - 1,00996 \times (Z_1)^2 \times X_4 + 0,126617 \times (X_4)^3$ [53] $Z_3 = 0,37398 \times X_1 - 0,0940338 \times (X_1)^3 + 0,838535 \times X_1 \times X_5 - 0,590525 \times (X_1)^2 \times X_5 + 0,76113 \times (X_5)^2 - 0,789465 \times X_1 \times (X_5)^2 - 0,273647 \times (X_5)^3 - 0,512764 \times X_6 + 0,455363 \times X_1 \times X_6 - 0,38428 \times (X_1)^2 \times X_6 + 0,731809 \times X_5 \times X_6 - 1,00484 \times X_1 \times X_5 \times X_6 - 0,172341 \times (X_5)^2 \times X_6 + 0,219746 \times (X_6)^2 - 0,367679 \times X_1 \times (X_6)^2 + 0,131251 \times (X_6)^3$ [54] $Z_4 = -0,360294 + 0,76878 \times Z_3 + 0,00770122 \times (Z_3)^3 - 0,193142 \times X_2 - 0,121583 \times Z_3 \times X_2 + 0,0889415 \times (Z_3)^3 \times X_2 + 0,284168 \times (X_2)^2 - 0,0674767 \times (X_2)^3 - 0,202897 \times X_3 - 0,341951 \times Z_3 \times X_3 - 0,270616 \times X_2 \times X_3 + 0,0880845 \times (X_2)^2 \times X_3 + 0,24982 \times (X_3)^2 + 0,102658 \times X_2 \times (X_3)^2 - 0,0801841 \times (X_6)^3$ [55] $Z_5 = 0,164417 + 0,126139 \times (X_1)^2 + 0,281797 \times X_3 + 0,484823 \times X_1 \times X_3 - 0,293866 \times (X_3)^2 - 0,354924 \times X_1 \times (X_3)^2 - 0,705803 \times X_6 - 0,189153 \times X_3 \times X_6 - 0,267997 \times X_1 \times X_3 \times X_6 - 0,023954 \times (X_3)^2 \times X_6 - 0,0918816 \times X_1 \times (X_6)^2 + 0,0323997 \times (X_6)^3$ [56] $Z_6 = 0,12867 - 0,492412 \times X_3 + 0,787425 \times X_5 - 0,235254 \times X_3 \times X_5$ [57] $Z_7 = 0,159379 + 0,137397 \times (X_7)^2 + 0,265398 \times X_8 + 0,519965 \times X_7 \times X_8 - 0,276027 \times (X_8)^2 - 0,362393 \times X_7 \times (X_8)^2 - 0,702969 \times X_9 - 0,222252 \times X_8 \times X_9 - 0,244634 \times X_7 \times X_8 \times X_9 - 0,092267 \times X_7 \times (X_9)^2 + 0,033269 \times (X_9)^3$ [58] $Z_8 = -0,259878 \times X_{10} + 0,0867921 \times X_{11} + 0,806806 \times X_{12} + 0,196837 \times X_{13}$ [59] $Z_9 = 0,175202 + 1,18513 \times X_{17} - 0,0996042 \times (X_{17})^2 + 0,327915 \times X_{16} - 0,0758657 \times (X_{16})^2$ [60] $Z_{10} = 0,929344 \times Z_9 + 0,132519 \times X_{14}$ [61] $Z_{11} = 0,191452 + 1,25652 \times X_{17} - 0,079092 \times (X_{17})^2 + 0,393814 \times X_{16} + 0,152095 \times X_{17} \times X_{16}$ [62] $Z_{12} = 0,231205 - 0,0968656 \times (X_{15})^2 + 0,0799528 \times (X_{15})^3 + 1,28868 \times X_{17} + 0,13082 \times X_{15} \times X_{17} - 0,143115 \times (X_{17})^2 - 0,126294 \times X_{15} \times (X_{17})^2 + 0,429792 \times X_{16} + 0,133537 \times X_{17} \times X_{16} - 0,0661431 \times X_{15} \times X_{16} \times X_{17}$ [63] $Z_{13} = 0,235084 + 0,33033 \times X_{15} - 0,191838 \times (X_{15})^2 + 0,0543679 \times (X_{15})^3 + 0,977685 \times X_{17} + 0,304174 \times X_{15} \times X_{17} - 0,218857 \times (X_{17})^2 - 0,164373 \times X_{15} \times (X_{17})^2 + 0,0415057 \times (X_{17})^3 + 0,373361 \times X_{16} + 0,0811861 \times X_{17} \times X_{16} - 0,0768087 \times X_{15} \times X_{17} \times X_{16}$ [64]	<p><i>Parâmetros da curva de retenção de água de Van Genuchten</i></p> $\alpha = 10^{0,0736768 + 0,789068 \times Z_2}$ [65] $n = 10^{0,140543 + 0,0797516 \times Z_2}$ [66] $\theta_s = 0,515224 + 0,100899 \times Z_5$ [67] $\theta_r = 0,161487 + 0,101111 \times Z_6$ [68] <p><i>Estimativa pontual da curva de retenção de água de Van Genuchten</i></p> $\theta_0 = 0,517589 + 0,0994301 \times Z_7$ [69] $\theta_6 = 0,34505 + 0,117162 \times Z_8$ [70] $\theta_{10} = 0,339255 + 0,112526 \times Z_{10}$ [71] $\theta_{33} = 0,28951 + 0,103815 \times Z_{11}$ [72] $\theta_{100} = 0,257093 + 0,0952908 \times Z_{12}$ [73] $\theta_{1500} = 0,214008 + 0,0862945 \times Z_{13}$ [74]
<p><b>Legenda</b>  AG=fração areia grossa (%)  AF=fração areia fina (%)  S=fração silte (%)  Arg=fração argila (%)  Ue=umidade equivalente (g/g)  pd=massa específica seca de campo (g/cm<sup>3</sup>)</p>	$\theta_s$ =conteúdo volumétrico de água saturado $\theta_r$ =conteúdo volumétrico de água residual $\alpha$ =parâmetros de ajuste da curva de retenção de água de Van Genuchten n=parâmetros de ajuste da curva de retenção de água Van Genuchten.	$\theta_6$ =Conteúdo volumétrico de água a uma sucção de 6kPa $\theta_{10}$ =Conteúdo volumétrico de água a uma sucção de 10kPa $\theta_{33}$ =Conteúdo volumétrico de água a uma sucção de 33kPa $\theta_{100}$ =Conteúdo volumétrico de água a uma sucção de 100kPa $\theta_{1500}$ =Conteúdo volumétrico de água a uma sucção de 1500kPa

Fonte: Baseado em Tomassela *et al.* (2003).

#### 4.2.11.2. Capilaridade efetiva

A capilaridade efetiva ou comprimento capilar macroscópico está associada de forma equivalente a sucção na frente de molhamento ou de forma inversa ao número de sorção, o qual é uma função exponencial da condutividade hidráulica, e usado para linearizar ou resolver a equação multidimensional e transiente de Richards (NACHABE, 1996). De maneira geral a capilaridade efetiva está relacionada diretamente a condutividade hidráulica e a difusividade (WHITE E SULLY, 1987) como pode ser observado na Equação 75.

$$h_{ce} = \frac{1}{\Delta K} \int_{\psi_n}^{\psi_s} K(\psi) d\psi = \frac{1}{\Delta K} \int_{\theta_n}^{\theta_s} D(\theta) d\theta \quad [75]$$

Onde:  $h_{ce}$  é a capilaridade efetiva,  $K$  é a condutividade hidráulica,  $\psi$  é a sucção mátrica,  $\theta_s$  é o conteúdo volumétrico do solo quando saturado,  $\theta_n$  é o conteúdo volumétrico em uma determinada condição de sucção e  $D$  é a difusividade.

A sua obtenção foi feita por meio da Equação (76) proposta por Bowuer (1969), que relaciona a  $H_{ce}$  com a pressão de entrada de ar ( $h_b$ ) e o parâmetro  $\alpha$  de Van Genuchten (1980). Ressalta-se que o inverso de  $\alpha$  equivale a  $h_b$ .

$$h_{ce} = \frac{\left(\frac{1}{\alpha}\right)}{2} \quad [76]$$

onde:  $h_{ce}$  é a capilaridade efetiva,  $\alpha$  é um parâmetro da curva de retenção de Van Genuchten, o qual o seu inverso é a pressão da entrada de ar.

#### 4.2.12. Seleção e análise dos eventos de chuvas típicos

Para caracterizar a dinâmica de água de uma região é essencial compreender as características dos eventos típicos de chuvas. As características mais importantes estão associadas a intensidade, duração, variabilidade e o total precipitado. A obtenção destas informações foi feita a partir dos trabalhos de Fagundes (2010) que monitorou as chuvas através de um pluviógrafo eletrônico.

Para selecionar os eventos de chuvas foram considerados diversos aspectos. Primeiramente as chuvas foram divididas em intervalos de 5 minutos, onde estavam contidos o somatório da quantidade precipitada e a respectiva intensidade do período. Em seguida foi feito

um tratamento estatístico através de um histograma de frequência para analisar a distribuição dos valores de intensidade de modo a identificar os mais representativos. Entende-se intensidades representativas aquelas que apresentam potencial para gerar escoamento superficial Hortoniano e aquelas mais frequentes. Todavia somente esta análise não é suficiente para selecionar um evento de chuva, é necessário verificar a continuidade temporal das chuvas. Desse modo, os intervalos de 5 em 5 minutos foram ordenados em sequência cronológica. Por fim, para definir os eventos finais foi necessário estabelecer critérios os quais eram mais representativos para a área de estudo. Os critérios adotados foram: duração das chuvas: longa ( $\geq 50$  minutos), curta ( $\leq 20$  minutos) e moderada ( $20 > \text{duração} < 50$  minutos); intensidade: alta ( $> 1 \text{ mm/min}$ ) e baixa ( $\leq 1 \text{ mm/min}$ ); transiência: constante ou variada. Ressalta-se que na variada analisou-se os picos de alta intensidade considerando à ordem (crescente e decrescente) e o período o qual eles ocorrem (início, meio ou final do evento).

#### ***4.2.13. Potencial de infiltração e escoamento superficial***

##### **4.2.13.1. Estimativa da infiltração e escoamento superficial Hortoniano**

A estimativa da infiltração e escoamento superficial Hortoniano potencial foi realizada a partir da aplicação do modelo físico matemático descrito na Etapa 4.2.3. Os parâmetros para aplicação do modelo como já mencionados são divididos em dois grupos. O primeiro referente as condições de infiltração os quais são a condutividade hidráulica saturada ( $K$ ), a diferença entre a sucção na frente de molhamento e na superfície ( $S$ ), a diferença entre o conteúdo volumétrico saturado ( $\theta_s$ ) e o conteúdo volumétrico inicial ( $\theta_i$ ) a qual é representada pelo parâmetro  $M$ . O segundo grupo é relacionado às chuvas, o qual é composto pela intensidade da chuva ( $I$ ), a altura de chuva precipitada ( $P$ ) e a duração ( $t$ ) do intervalo de um evento de chuva.

A condutividade hidráulica foi determinada a partir dos ensaios de duplo anel ou de carga constante nas diferentes condições de material inconsolidado, tipo de uso e manejo do solo. O parâmetro  $S$  determinou-se a partir da aplicação das funções de pedotransferência a qual é representada pela capilaridade efetiva. Para o conteúdo volumétrico saturado ( $\theta_s$ ) foi adotado o valor de porosidade obtido a partir da caracterização geotécnica básica, enquanto que o conteúdo volumétrico inicial ( $\theta_i$ ) estabeleceu-se através da curva de retenção obtida a partir da aplicação das funções de pedotransferência. Ressalta-se que neste estudo é apresentado à simulação de duas condições de umidade inicial, as quais estão associadas ao ponto de murchamento e capacidade de campo, afim de representar o solo em uma condição mais seca e



outra mais úmida. Os parâmetros de chuva (P, t e i) foram determinados a partir dos registros pluviográficos os quais foram subdivididos em intervalos de 5 em 5 minutos (Item 4.2.12)

Para realizar os cálculos previsto no modelo físico matemático foi utilizada uma planilha de cálculo. A descrição da montagem e desenvolvimento da planilha estão descritos no Item 4.2.14.

#### 4.2.13.2. Sistematização e análise do potencial de infiltração e escoamento superficial Hortoniano

A sistematização e análise do potencial de infiltração e da geração de escoamento superficial Hortoniano foi realizada conforme os seguintes procedimentos:

1. Analisou-se os dados de caracterização geotécnica básica, de curvas infiltração, das curvas de retenção e a de capilaridade efetiva dos materiais inconsolidados para os diferentes usos de modo a verificar o comportamento hidráulico e as características físicas das distintas combinações;
2. Hierarquizou-se os resultados obtidos no Item 4.2.13.1 baseado nos eventos de chuva e nas unidades de condição de infiltração.
3. Analisou-se os resultados a partir de duas umidades iniciais adotadas, afim de observar a sua influência na infiltração potencial, classificar e verificar as diferenças encontradas entre as diversas unidades de condição de infiltração;
4. Baseado na análise dos resultados de infiltração potencial, as chuvas e unidades de condição de infiltração com potencial de infiltração foram agrupadas conforme o seu potencial de infiltração e geração de escoamento Hortoniano
5. Com o intuito de analisar espacialmente os diversos aspectos referentes a infiltração e a geração de escoamento superficial Hortoniano foram elaborados 3 mapas que contém informações a respeito: da distribuição espacial das unidades de condição de infiltração; da análise das diferenças da infiltração com base em duas umidades iniciais adotadas (Item 5.4.2.1); e da análise dos grupos de unidades de condição de infiltração que representam os distintos potenciais de infiltração e geração de escoamento superficial Hortoniano (5.4.2.3).

#### **4.2.14. Planilhas elaboradas**

O uso de planilhas foi fundamental, pois estas permitiram armazenar os dados obtidos ao longo da pesquisa, assim como realizar cálculos necessários para a estimativa da infiltração

potencial e escoamento superficial Hortoniano potencial. As planilhas foram divididas em simples e de cálculo, as quais são descritas a seguir.

#### 4.2.14.1. Planilhas simples

As planilhas simples compreenderam aquelas que estão associadas ao armazenamento dos dados de chuva, poços, da caracterização das unidades de condição de infiltração e das águas subsuperficiais, dos parâmetros adotados para aplicação do modelo e da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial. Além de armazenamento, nestas planilhas foram realizadas ainda: cálculos simples; análises estatísticas, quantitativa e qualitativa dos dados; e a elaboração de gráficos. No total foram elaboradas 7 planilhas simples:

- **Caracterização geotécnica básica:** Foram inseridos nessa planilha dados referentes a caracterização geotécnica básica das diferentes combinações entre os materiais inconsolidados, usos e manejo do solo.
- **Chuvas (Pluviógrafo):** Esta planilha teve como objetivo armazenar os dados brutos dos registros pluviográficos em intervalos de 5 em 5 minutos, análise estatística, quantitativa e qualitativa dos intervalos, elaboração de gráficos e a seleção dos eventos de chuva obtidos das análises mencionadas.
- **Ensaio de infiltração:** Teve como finalidade armazenar as informações dos ensaios de infiltração nas diferentes condições de infiltração e elaborar os gráficos de curvas de infiltração
- **Condutividade hidráulica saturada:** Calculou e armazenou os resultados do ensaio de permeabilidade com carga constante.
- **Poços:** Esta planilha armazenou dados referentes aos poços, os quais estão associados a localização, cota da boca, litologia e profundidade, as quais são necessárias para a elaboração do modelo geológico 3D.
- **Águas subsuperficiais:** Armazenou dados da caracterização físico química das águas subsuperficiais.
- **Parâmetros do modelo de infiltração:** Nesta estão armazenadas apenas as informações referentes aos parâmetros adotados para a aplicação do modelo de infiltração.
- **Resultados de infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial:** Devido à grande quantidade de dados que são gerados a partir da planilha de cálculo de infiltração e da geração de escoamento foi necessária uma

planilha que armazenasse estas informações. Associada a esta planilha foi criado uma subplanilha a qual tinha como finalidade a elaboração de gráficos da evolução tanto da infiltração como do escoamento ao longo do tempo.

#### 4.2.14.2. Planilhas de cálculo

As planilhas de cálculo, por sua vez, apresentaram um grau de complexidade na sua elaboração maior do que as planilhas simples, desse modo, verificou-se a necessidade de se fazer um detalhamento. Foram elaboradas no total duas planilhas de cálculo, a primeira referente a obtenção da capilaridade efetiva, dos parâmetros de Van Genuchten e da curva de retenção, enquanto a segunda compreendeu a determinação da infiltração e o escoamento superficial nos diversos eventos de chuva com as combinações de material inconsolidado e uso e manejo do solo.

##### *Planilha de obtenção da capilaridade efetiva, dos parâmetros de Van Genuchten e da curva de retenção*

O desenvolvimento dessa planilha foi dividido em duas etapas. A primeira compreendeu a inserção dos dados de entrada e equações propostas por Tomassela *et al.* (2003) (Item 4.2.11.1) para o cálculo dos parâmetros da curva de retenção de água de Van Genuchten e da capilaridade efetiva. A segunda relacionada a elaboração dos gráficos da curva de retenção, na qual foi necessário estabelecer funções que realizassem o processamento de forma automatizada, para reduzir o tempo de obtenção dos resultados.

##### a) Etapa 1

Inicialmente foram inseridos os dados de entrada das diferentes unidades de condição de infiltração, os quais consistiram nas frações granulométricas, na massa específica seca de campo, na porosidade, nos coeficientes de Campbell (1974) e na umidade equivalente. Na Tabela 17 é mostrado um exemplo da disposição dos dados de entrada utilizados para a estimativa da curva de retenção e da capilaridade efetiva. Em seguida foram inseridas as equações contidas na Tabela 16 utilizadas para o cálculo dos subparâmetros X e Z (exemplo na Tabela 18) e da curva de retenção de água de Van Genuchten (1980), bem como a capilaridade (exemplo na Tabela 19).

**Tabela 17.** Exemplo de parte da planilha elaborada e utilizada para estimar a curva de retenção de água e a capilaridade efetiva considerando os dados de entrada.

Material	Uso	Dados Diretos							Dados Estimados	
		Argila	Silte	Areia Fina	Areia Grossa	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	$n$	$b$	$\Psi_s$ (cm) log	Umidade Equivalente
Botucatu	Cana de Açúcar (S)	8	2	74	16	1,488	0,45	4,05	3,50	0,098
	Cana de Açúcar (M)	8	2	74	16	1,573	0,43	4,05	3,50	0,088
	Laranja e Frutíferas	8	2	74	16	1,620	0,43	4,05	3,50	0,086
	Mata	8	2	74	16	1,420	0,46	4,05	3,50	0,105
	Pastagem	8	2	74	16	1,540	0,42	4,05	3,50	0,088
	Reflorestamento	8	2	74	16	1,580	0,44	4,05	3,50	0,090

Fonte: Autor

**Tabela 18.** Exemplo de parte dos resultados referente ao cálculo dos subparâmetros X e Z necessários para a determinação da curva de retenção de água e capilaridade efetiva.

x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15	x16	x17	z1	z2	z3	z4	z5	z6	z7	z8	z9	z10	z11	z12	z13
-0,210	4,805	-0,930	-1,764	-1,330	0,894	-0,201	-0,941	0,952	-0,370	-0,764	-1,153	0,800	-0,925	-1,737	0,886	-1,308	0,435	1,448	0,853	0,296	-0,812	-0,752	-0,547	-0,935	-1,314	-1,343	-1,414	-1,644	-1,686
-0,210	4,805	-0,930	-1,764	-1,330	1,534	-0,201	-0,941	1,611	-0,370	-0,764	-1,153	1,402	-0,925	-1,737	1,525	-1,308	0,194	1,048	0,297	-0,132	-1,074	-0,752	-0,700	-0,817	-1,221	-1,257	-1,289	-1,577	-1,627
-0,210	4,805	-0,930	-1,764	-1,330	1,760	-0,201	-0,941	1,844	-0,370	-0,764	-1,153	1,615	-0,925	-1,737	1,751	-1,308	0,108	0,924	0,266	-0,156	-1,136	-0,752	-0,720	-0,775	-1,203	-1,241	-1,245	-1,553	-1,606
-0,210	4,805	-0,930	-1,764	-1,330	0,605	-0,201	-0,941	0,655	-0,370	-0,764	-1,153	0,528	-0,925	-1,737	0,598	-1,308	0,544	1,652	1,291	0,632	-0,662	-0,752	-0,442	-0,989	-1,376	-1,401	-1,470	-1,675	-1,713
-0,210	4,805	-0,930	-1,764	-1,330	1,375	-0,201	-0,941	1,447	-0,370	-0,764	-1,153	1,253	-0,925	-1,737	1,367	-1,308	0,254	1,140	0,374	-0,073	-1,020	-0,752	-0,674	-0,846	-1,238	-1,273	-1,320	-1,594	-1,642
-0,210	4,805	-0,930	-1,764	-1,330	1,568	-0,201	-0,941	1,646	-0,370	-0,764	-1,153	1,434	-0,925	-1,737	1,559	-1,308	0,181	1,029	0,286	-0,140	-1,084	-0,752	-0,704	-0,810	-1,218	-1,254	-1,283	-1,574	-1,624

Fonte: Autor

**Tabela 19.** Exemplo de parte dos resultados, que mostram o cálculo dos parâmetros da curva de retenção de água de Van Genuchten e da capilaridade efetiva.

Material	Tipo de uso e manejo do solo	Parâmetros (Van Genuchten)					Capilaridade efetiva (cm)
		$\theta_s$	$\theta_r$	$m$	$n$	$\alpha$ (1/kpa)	
Botucatu	Cana de açúcar (Sulcada)	0,43	0,08	0,138	1,160	0,188	2,66
	Cana de açúcar (Madura)	0,41	0,08	0,131	1,151	0,124	4,03
	Laranja e outras espécies frutíferas	0,40	0,07	0,133	1,153	0,099	5,03
	Mata	0,45	0,09	0,164	1,196	0,271	1,84
	Pastagem	0,41	0,08	0,140	1,163	0,148	3,38
	Reflorestamento	0,41	0,08	0,127	1,145	0,119	4,21

Fonte: Autor

## b) Etapa 2

A segunda etapa teve como objetivo otimizar a elaboração dos gráficos da curva de retenção de água baseado no modelo de Van Genuchten devido à grande quantidade de dados. Para isso,

considerando cada unidade de condição de infiltração, a Equação 30 foi inserida para diversas sucções (Tabela 20). Em seguida esses dados foram transferidos para uma subplanilha, na qual as unidades de condição de infiltração foram associadas a cada tipo de material inconsolidado. Salienta-se que o layout dos gráficos da curva de retenção de água foi padronizado para todos os materiais inconsolidados.

**Tabela 20.** Exemplo de parte da planilha que contém os dados utilizados para a elaboração da curva de retenção de água.

Material	Tipo de uso e manejo do solo	Sucção ( $\Psi$ (kpa))								
		0	1	6	10	33	100	200	1500	10000
	Cana de açúcar (Sulcada)	0,45	0,397	0,33	0,311	0,272	0,242	0,225	0,186	0,159
	Cana de açúcar (Madura)	0,43	0,393	0,33	0,316	0,277	0,246	0,229	0,189	0,161
Botucatu	Laranja e outras espécies frutíferas	0,43	0,398	0,34	0,321	0,281	0,249	0,231	0,190	0,160
	Mata	0,46	0,381	0,30	0,283	0,243	0,213	0,198	0,163	0,140
	Pastagem	0,42	0,377	0,31	0,296	0,258	0,228	0,211	0,173	0,147
	Reflorestamento	0,44	0,405	0,35	0,328	0,289	0,258	0,241	0,199	0,170

Fonte: Autor

#### *Planilha de obtenção da infiltração e do escoamento gerado*

Dentre as planilhas, esta foi a que apresentou o maior grau de complexidade, por conta de diversas condições que o modelo de infiltração adotado nesta pesquisa apresenta, bem como pela presença de uma equação implícita que requereu soluções matemáticas mais robustas. A elaboração desta planilha foi dividida em diversas etapas conforme mostrado a seguir.

##### a) Etapa de inserção dos dados básicos

Nesta etapa foram estabelecidas as células onde os parâmetros das unidades de condição de infiltração (K, S e M) e dos eventos de chuva (T, I e P) iriam estar contidos. Os parâmetros dos eventos chuva foram inseridos na vertical de forma sequencial e fixa conforme mostra o exemplo na Tabela 21. Enquanto os parâmetros das unidades de condição de infiltração foram alterados para simulação realizada.

**Tabela 21.** Exemplo do estabelecimento dos parâmetros dos eventos de chuva, os quais foram inseridos na vertical na planilha de cálculo.

Eventos de chuvas	P (m)	T (h)	I (m/h)
	0	0	0
	0,00773	0,0833	0,09280
1	0,00873	0,1667	0,10470
	0,00456	0,2500	0,05473
	0,00436	0,3333	0,05235
	0,00516	0,4167	0,06187
	0	0	0
2	0,00773	0,00773	0,09280
	0,00873	0,00873	0,10470

Fonte: Autor

#### b) Análise dos estágios de infiltração do modelo Chu (1978)

Ao analisar o fluxograma (Figura 18), verificou-se que o modelo de Chu (1978) apresenta 4 estágios de infiltração:

1.  $I < K$  ou  $I > K$  e  $C_u < 0$  (Estágio 1): neste estágio, o intervalo analisado não ocorre *ponding*, portanto todo o volume da chuva infiltra.
2.  $I > K$  e  $C_u > 0$  (Estágio 2): o intervalo inicia em condições não saturadas e termina saturado, ou seja, ocorre o *ponding*, desse modo é necessário calcular  $P_{tp}$ ,  $t_p$ , e  $t_s$ , e a infiltração é calculada em condição de *ponding* ( $F_p$ ).
3.  $C_p > 0$  (Estágio 3): neste estágio o solo permanecerá saturado ao longo de toda a duração. Os parâmetros  $P_{tp}$  e  $t_p$  devem apresentar valores iguais ao do Estágio 2, pois estão relacionados ao momento em que ocorre o *ponding*, desse modo foi necessário apenas calcular  $t_s$ . A infiltração continua a ser calculada a partir de condições de *ponding* ( $F_p$ ).
4.  $C_p < 0$  (Estágio 4): o solo neste estágio inicia-se saturado, porém em algum momento do intervalo este se torna insaturado. Nesta condição, os parâmetros  $P_{tp}$ ,  $t_p$ , e  $t_s$  devem ser calculados igual ao Estágio 3, pois estes são necessários para obter  $C_p$ . Entretanto o cálculo de escoamento e infiltração é semelhante a Condição 1.

#### c) Inserção das equações

O próximo passo está relacionado à inserção das equações necessárias para estimar a infiltração e o escoamento superficial Hortoniano previstas no Item 4.2.3. Em vista da grande

quantidade de eventos e intervalo de chuvas, de combinações de material inconsolidado e uso e manejo do solo, bem como, de condições para aplicação do modelo de Chu (1978), a análise e o cálculo de intervalo por intervalo demandariam muito tempo. Desse modo, foi necessário utilizar a função SE do Excel para determinar em qual o estágio do modelo o intervalo se encontraria, conseqüentemente agilizou-se o cálculo da infiltração e do escoamento superficial Hortoniano.

Inicialmente, criou-se quatro colunas para aplicação da função SE. Na Tabela 22 são mostradas as equações das funções SE utilizadas para determinar em qual estágio o intervalo analisado se encontra. Na coluna F é utilizado a função SEERRO, pois ao realizar diversos testes de sensibilidade, verificou-se que na Condição 4 podem ocorrer erros no cálculo de  $F_p$  por conta de valores negativos, que inviabilizava o cálculo das funções condicionais posteriores.

**Tabela 22.** Funções condicionantes utilizadas para determinar em qual estágio o intervalo analisado se encontra.

	Colun a A	Colun a B	Coluna C	Coluna D	Coluna E	Coluna F	Colun a G	Coluna H
Linha1	T	I	Cond.1	Cond.2	Cond.3	Cond.Final	$C_u$ (m)	$C_p$
Linha2	0	0	1	1	1	1	0	0
Linha3	-	-	=SE(F2=3;3;SE(F2=2;3;SE(G3<=0;1;SE(G3>0;2;2)))	=SE(C3=1;1;SE(C3=2;2;SE(C3=5;H3)))	=SE(D3=1;1;SE(D2=2;2;SE(D2>0;3;SE(D2<0;4))))	=SEERRO(SE(E3=1;1;SE(E3=2;2;SE(E3=3;3;SE(E3=4;4)))));4)	-	-

Fonte: Autor

d) Cálculo da infiltração em condições saturadas

A última etapa de desenvolvimento desta planilha está relacionada ao parâmetro  $F_p$ , o qual é a infiltração em condições saturadas. Todavia, a equação utilizada para determinar  $F_p$  (Equação 25) é implícita, desse modo, para poder resolve-la é necessário rearranjar a equação em função de  $F_p$  como na Equação 77.

$$0 = \frac{F_p}{S \times M} - \ln \left( 1 + \frac{F_p}{S \times M} \right) - \left( \frac{K \times (t - t_p + t_s)}{S \times M} \right) \quad [77]$$

Ao analisar a Equação 77 verifica-se que para resolvê-la, há a necessidade de estimar  $F_p$  até igualar a equação. Entretanto realizar esse processo de forma manual exigiria muito tempo. Nesse sentido utilizou-se método não linear GRG (*Generalized Reduced Gradient*) proposto

por Lasdon *et al.* (1978), o qual trata da solução de problemas de otimização não lineares. O uso deste método foi apropriado, pois  $F_p$  apresenta um comportamento não linear. Além disso, o Excel apresenta um algoritmo (comando “*solver*”) que contempla este método, que facilitou a sua aplicação.

Apesar das vantagens atribuídas ao uso do GRG, este apresenta uma desvantagem quando aplicado ao “*solver*”, somente é possível calcular uma linha por vez e de forma manual, ou seja, para cada linha calculada é necessário mudar no referido comando as células da equação alvo e da célula variável. Para solucionar este problema foi necessário programar a planilha para que ela calculasse  $F_p$  para várias linhas e de forma automática através do comando Macro. No comando macro foi elaborado um código em *Visual Basic* (VBa) (linguagem de programação da macro), o qual pode ser observado na Tabela 23.

**Tabela 23.** Exemplo do código elaborado em VBa no Excel 2013 para automatizar o cálculo de  $F_p$ .

```

Sub Chu_Solver ()

Dim r As Long
  Dim c As Range
For r = 10 To 179
  SolverOk SetCell:="$AQ$" & r, MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", ByChange:="$AJ$" & r
  SolverAdd CellRef:="$AJ$" & r, Relation:=3, FormulaText:="0"
  SolverSolve UserFinish:=True
  SolverDelete CellRef:="$AJ$" & r, Relation:=3, FormulaText:="0"
  Range("AJ10:AJ179").Copy Destination:=Range("AI10")

Next r

End Sub

```

Fonte: Autor

Antes de comentar a respeito do código em si é necessário compreender alguns aspectos fundamentais de funcionamento do “*solver*” que fazem parte do código: para executá-lo é necessário definir a equação alvo e qual o objetivo da otimização (maximização, minimização ou valor de); qual é a célula variável que será alterada; se a otimização apresenta restrições; e qual método de otimização que será utilizado. Baseado no exposto acima, na Tabela 24 são mostrados os parâmetros utilizados para o funcionamento do *solver*.



**Tabela 24.** Parâmetros adotados para o funcionamento do “solver”.

<b>Aspecto</b>	<b>Parâmetro adotado</b>
Equação Alvo	Equação 77
Objetivo da otimização	Valor de zero
Célula variável	Célula que contém $F_p$
Restrições	$F_p > 0$
Método utilizado	GRG não linear

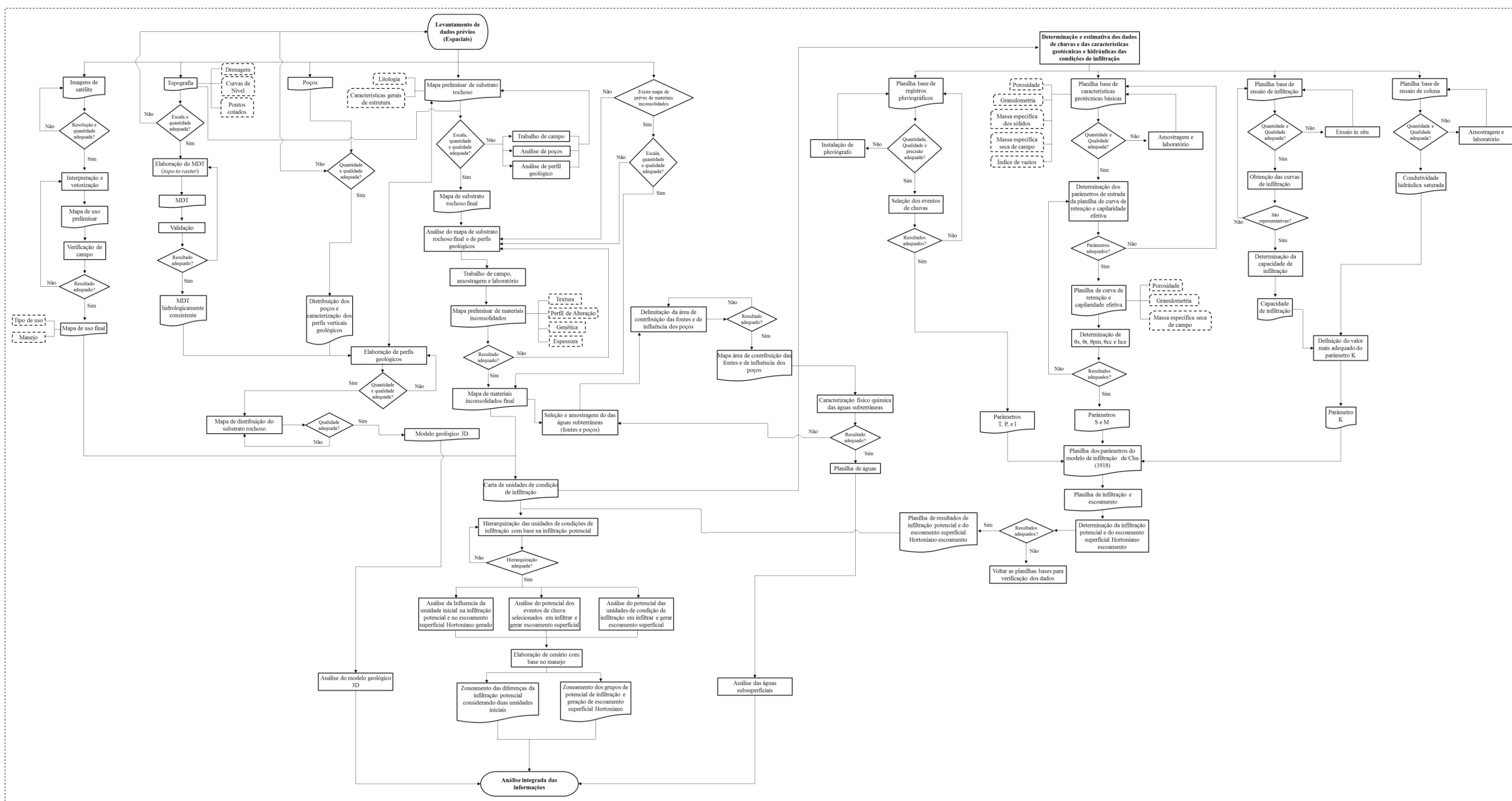
Fonte: Autor

Após definir os parâmetros do “solver” outros elementos do código merecem destaque, tais como as funções *Solversolve Userfinish*, *Next R* e *SolverDelete*. A função *Solversolve UserFinish* foi aplicada para dá início ao cálculo do parâmetro  $F_p$ , na qual a resposta utilizada foi verdadeira (*True*) para que apenas os resultados retornassem, sem que aparecesse no display o relatório da otimização. A função *Next R* foi utilizada para que ao término do cálculo de uma linha, o cálculo da próxima linha começasse, ou seja, contornando o problema citado do “solver”, o qual só é capaz de calcular uma linha por vez de forma manual. Ao longo do desenvolvimento do código identificou-se um outro problema que está associado à memória interna do Excel. A medida que se calculava as diversas linhas o programa armazenava as informações das células de restrições, que resultou no travamento e fechamento da planilha. Para transpor este problema foi aplicada a função *SolverDelete*, para que ao final do cálculo de cada linha, a restrição daquela linha fosse deletada da memória.

#### **4.2.15. Integração dos dados**

A integração dos dados é um aspecto fundamental para estimativa da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial, pois orienta tanto de forma sistemática como holística o entendimento dos atributos considerados e sua obtenção, bem como as etapas chaves da pesquisa. Na Figura 58 é apresentado o esquema de integração dos dados.





**Figura 58.** Esquema de integração dos dados geológico geotécnicos, dos modelos geológicos 3D, da caracterização físico química das águas subsuperficiais, de cenários de chuva e de tipos de uso e manejo do solo para determinação e análise da infiltração potencial e escoamento Hortoniano potencial.

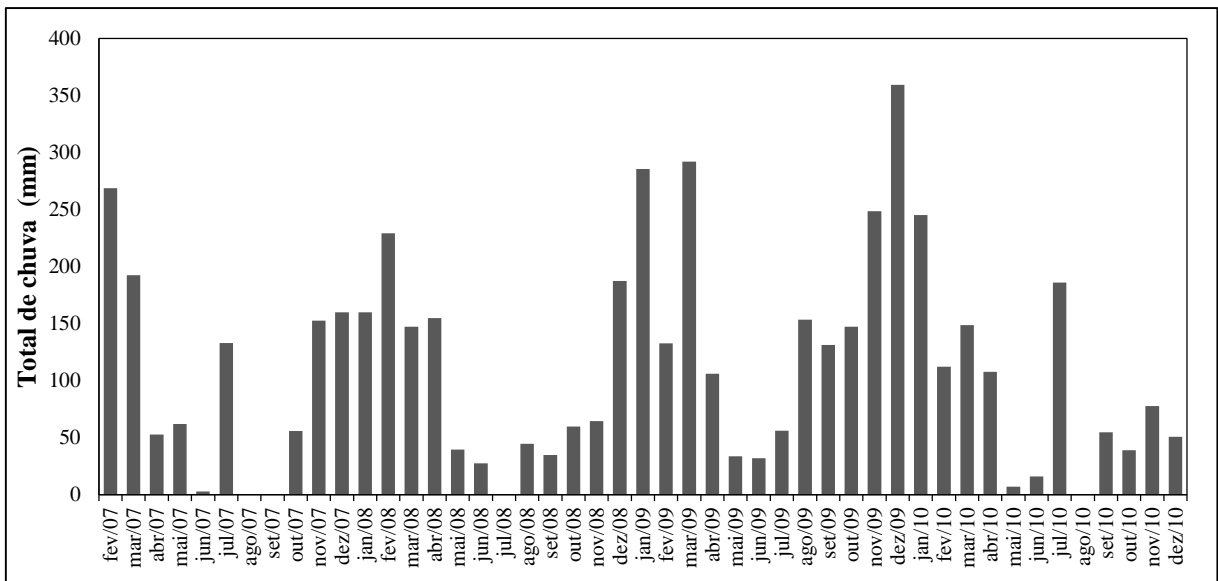
Fonte: Autor



## CAPÍTULO 5- RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1.Caracterização das chuvas

A caracterização das chuvas foi feita a partir de um pluviógrafo instalado a norte da cidade de São Carlos para selecionar eventos típicos que ocorrem nas áreas das Folhas do IBGE de São Carlos e Araraquara na escala 1:50.000. No total, o pluviógrafo registrou as chuvas dos anos de 2007 a 2010, as quais podem ser observadas na Figura 59 que apresenta o registro do total de chuva mensal.

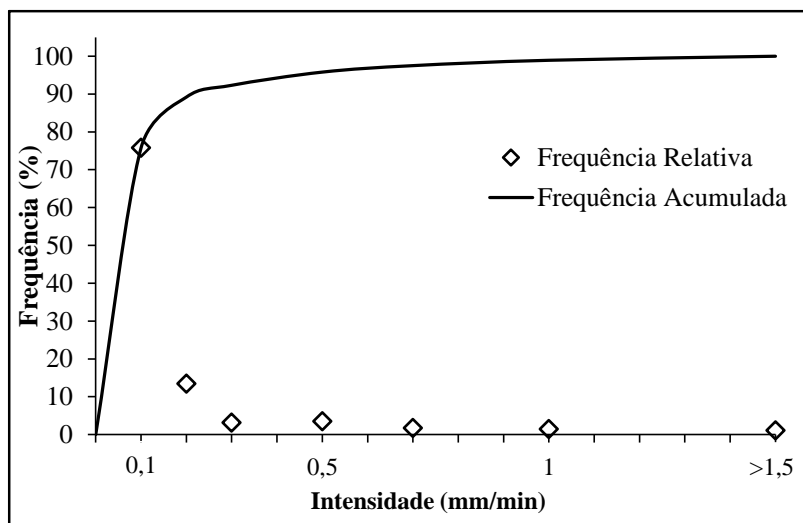


**Figura 59.** Chuva total mensal registrada durante o período de 2007 a 2010.

**Fonte:** Baseado em Fagundes (2010)

Para selecionar os eventos, primeiramente foi analisada a frequência de intensidade das chuvas registradas ao longo de 3 anos. O intervalo escolhido para determinar a intensidade foi de 5 minutos. A opção por este intervalo se resume que em intervalos curtos, podem ser captadas diversos padrões nos eventos. Por exemplo, em uma chuva de 6 mm com duração de 10 minutos e particionada em dois intervalos de 5 minutos, verificou-se que do total da chuva, 5mm ocorreu nos 5 minutos iniciais, que resulta em uma de 1mm/min no primeiro e 0,2 mm/min no segundo intervalo. Por outro lado, caso a mesma chuva seja analisada em um período de 10 minutos, a intensidade será de 0,6 mm/min. Desse modo, a intensidade chuva no início do intervalo não é detectada e afeta diretamente o tempo de *ponding* e os valores de infiltração e escoamento superficial.

Com base no exposto acima, tem-se na Figura 60 um gráfico de frequência acumulada e relativa, onde é possível verificar que aproximadamente 88% dos intervalos de 5 minutos apresentam intensidade inferior ou igual 0,2 mm/min. Este valor de intensidade quando comparado a capacidade de infiltração das diversas condições de materiais inconsolidados e uso do solo (Item 5.3.3.3), não são capazes de gerar escoamento em grande parte das combinações. Desse modo, nenhum dos eventos escolhidos continham intervalos que apresentassem intensidades inferiores a 0,2 mm/min.



**Figura 60.** Gráfico de frequência relativa da intensidade de chuva em períodos de 5 min durante os anos de 2007 a 2010.

**Fonte:** Baseado em Fagundes (2010)

Após a avaliação das intensidades das chuvas em intervalo de 5 em 5 min, foi analisada a continuidade temporal dos diversos intervalos de 5 minutos. Ao final desse procedimento, obteve-se diversos eventos de chuva, entretanto muitos apresentavam padrões semelhantes entre si. Desse modo, para escolher os mais representativos foi considerado os critérios de seleção (intensidade, duração e transiência) estabelecidos no Item 4.2.12. A partir dessa análise foram selecionados 21 eventos típicos de chuvas (Tabela 25), os quais foram usados na aplicação do modelo físico matemático de infiltração-escoamento.

**Tabela 25.** Eventos de chuva de típicos da área de estudo.

Evento	Data	mm / 5min												Total (mm)	Tempo (min)	Intensidade Constante (mm/min)
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60			
1	2/2/07 18:00	7,73	8,73	4,56	4,36	5,16								30,54	25	1,22
2	19/2/07 20:00	10,31												10,31	5	2,06
3	25/3/07 17:00	8,13	3,37	1,39	5,35	7,34	5,16	5,95	4,56	2,58	3,97	3,77	3,17	54,73	60	0,91
4	8/11/07 18:00	2,38	4,36	3,77	5,16	5,55	6,35	2,97	3,17					33,71	40	0,84
5	14/2/08 19:00	3,17	7,93	12,29	3,97	2,97	3,37	2,58						36,29	35	1,04
6	14/2/08 19:00	7,93	12,29											20,23	10	2,02
7	26/3/08 17:00	2,18	5,95	9,32	6,54	5,55	3,77							33,31	30	1,11
8	26/3/08 17:00	5,95	9,32	6,54	5,55									27,37	20	1,37
9	14/4/08 12:00	3,77	6,94	10,11	2,97	7,34	7,73	2,18						41,05	35	1,17
10	14/4/08 12:00	7,34	7,73											15,07	10	1,51
11	11/3/09 8:00	6,35	9,52	7,54										23,40	15	1,56
12	7/10/09 15:00	4,56	8,13	9,52	10,11	5,35	3,17	1,98						42,83	35	1,22
13	7/10/09 15:00	8,13	9,52	10,11	5,35									33,12	20	1,66
14	7/10/09 15:00	8,13	9,52	10,11										27,76	15	1,85
15	23/11/09 20:00	2,58	3,77	4,36	3,57	2,78	2,38							19,43	30	0,65
16	27/11/09 14:00	2,18	3,57	6,15	3,17									15,07	20	0,75
17	13/3/09 0:00	4,76	8,92	8,33	6,35	12,69	8,53	3,97	3,57	2,58	1,78			61,47	50	1,23
18	13/3/09 0:00	8,92	8,33	6,35	12,69	8,53								44,82	25	1,79
19	13/3/09 0:00	12,69	8,53											21,22	10	2,12
20	27/2/07 19:00	5,16	5,75											10,91	10	1,09
21	20/12/08 14:00	1,78	3,57	2,78	1,39	1,98	2,58	2,78	1,98					18,84	40	0,47

Fonte: Baseado em Fagundes (2010)

A partir da Tabela 25 a qual contém os eventos típicos, observou-se que a área de estudo apresenta diversos padrões de chuvas os quais são descritos a seguir:

- Curta duração e com alta intensidade (Evento 2);
- Curta duração, com alta intensidade e constante (Eventos 10 e 20)
- Curta duração, com alta intensidade e crescente (Evento 6 e 14);
- Curta duração, com alta intensidade e decrescente (Evento 19);
- Curta duração, alta intensidade e pico no meio do intervalo (Evento 11);
- Curta duração, baixa intensidade, com um pico no meio do intervalo (Evento 16);
- Curta duração, alta intensidade, com um pico no meio do intervalo (Evento 8 e 13);
- Duração moderada, intensidade variada, com pico no início do evento (Evento 1);
- Duração moderada, com alta intensidade, com pico no meio do intervalo (Evento 12 e 18);
- Duração moderada, com intensidade variada, com pico no meio do intervalo (Evento 4, 5 e 7);
- Duração moderada, com baixa intensidade, com pico no meio do intervalo (Evento 15);
- Duração moderada, com intensidade variada, com dois picos no meio do intervalo (Evento 9);
- Duração moderada, com baixa intensidade e constante (Evento 21);
- Longa, com baixa intensidade e constante (Evento 17);
- Longa, com intensidade variada, com presença de um pico no meio do intervalo (Evento 3)

Ressalta-se que os padrões de chuva listados anteriormente que apresentaram mais de um evento, é justificado por variarem na intensidade, na duração do pico ou da duração da chuva. Por exemplo, os eventos 10 e 20 apresentam variações de 0,5 mm/min entre eles. O evento 13 apresenta duração de pico superior ao 8. Enquanto isso o Evento 4 (40 minutos de duração) apresenta 10 minutos a mais de chuva que o Evento 7 (30 minutos de duração).

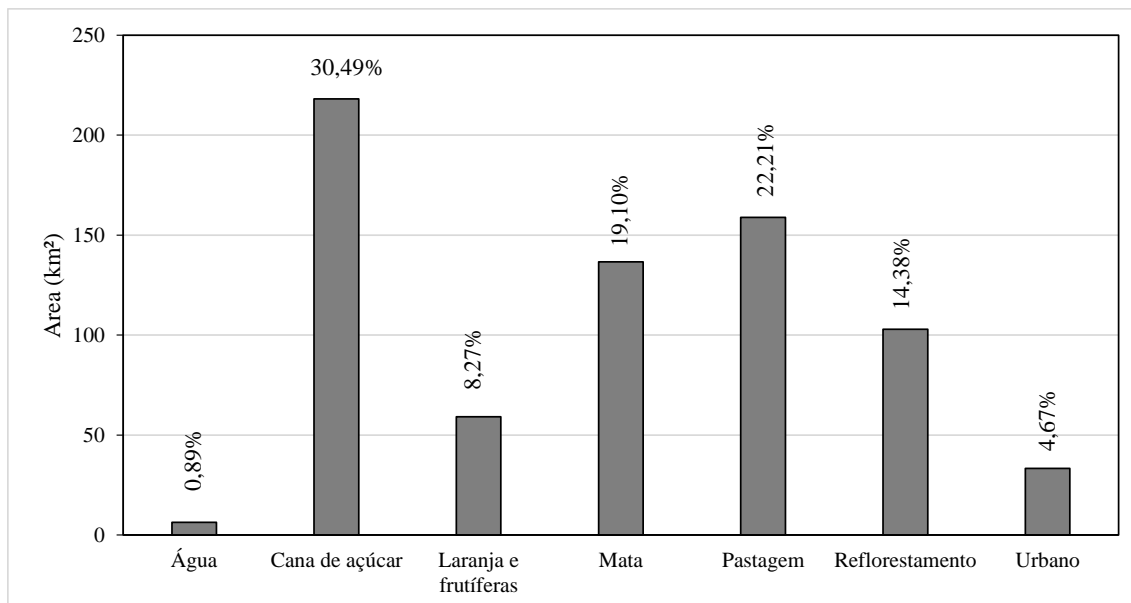


## **5.2. Caracterização dos usos e manejo do solo**

A caracterização dos usos e manejo do solo seguiram os procedimentos descritos no Item 4.2.6.4. No total foram identificados 7 diferentes tipos de uso os quais foram: cana de açúcar, laranja e outras espécies frutíferas, mata, pastagem, reflorestamento, área urbana e reservatórios. A área urbana e a água foram contabilizadas no mapa de usos devido à sua extensão significativa. Ressalta-se que alguns dos usos apresentavam manejos diferenciados. Por exemplo, a cana de açúcar apresentava diversos estágios, dentre eles a fase de sulcamento que tem como característica a realização de sucros para diminuir a compactação e melhorar a aeração e penetração da água no solo. Em seguida, tem-se a fase jovem a qual representa ainda uma condição menos compactada do solo e refere-se ao primeiro ano de colheita. Os próximos estágios estão relacionados ao aumento da compactação, nos quais o último é chamado de fase madura. Este estágio reflete uma condição mais compactada do solo devido ao tráfego de máquinas e o uso de produtos químicos. Assim como a cana de açúcar, a pastagem também apresentou dois tipos de manejos, um referente a pastagens abandonadas ou em uso e outra que correspondeu aquelas que estavam ao redor de linhas de alta tensão.

### **5.2.1. Usos do solo em São Carlos**

Na Figura 61 é possível observar a distribuição dos tipos de usos do solo e no Apêndice III o Mapa de Uso do Solo da região de São Carlos. Observou-se que a cana de açúcar atualmente ocupa a maior parcela da área da RSC e totaliza 218,1 km<sup>2</sup> (30,5%) de extensão, localizada principalmente a noroeste, nordeste e a sudeste, e recobrem preferencialmente materiais inconsolidados com textura arenosa. As pastagens apresentam uma área de 158,9 km<sup>2</sup> (22,2%), encontram-se a leste, geralmente em zonas com altas declividades as quais não apresentam condições propícias para o desenvolvimento de agricultura. As matas ocupam uma área 136,59 km<sup>2</sup> (19,14%), situadas principalmente em zonas de alta declividade e sobre solos arenosos bem drenados, além disso correspondem ao uso que apresenta a maior fragmentação da região Os reflorestamentos estão distribuídos principalmente a sul e a leste, os quais totalizam uma área de 102,9 km<sup>2</sup> (14,4%), enquanto que a laranja e outras espécies frutíferas (59,1km<sup>2</sup>) restringem-se à algumas zonas a sudoeste e a leste da área de estudo. Para as áreas urbanas, verificou-se que estas correspondem a 33,4 km<sup>2</sup> (4,7%), limitadas a norte da região de São Carlos. Por fim, em virtude de representar uma área considerável, a represa do Broa foi considerada como um tipo de uso, a qual totalizou 6,3 km<sup>2</sup> (0,9%).

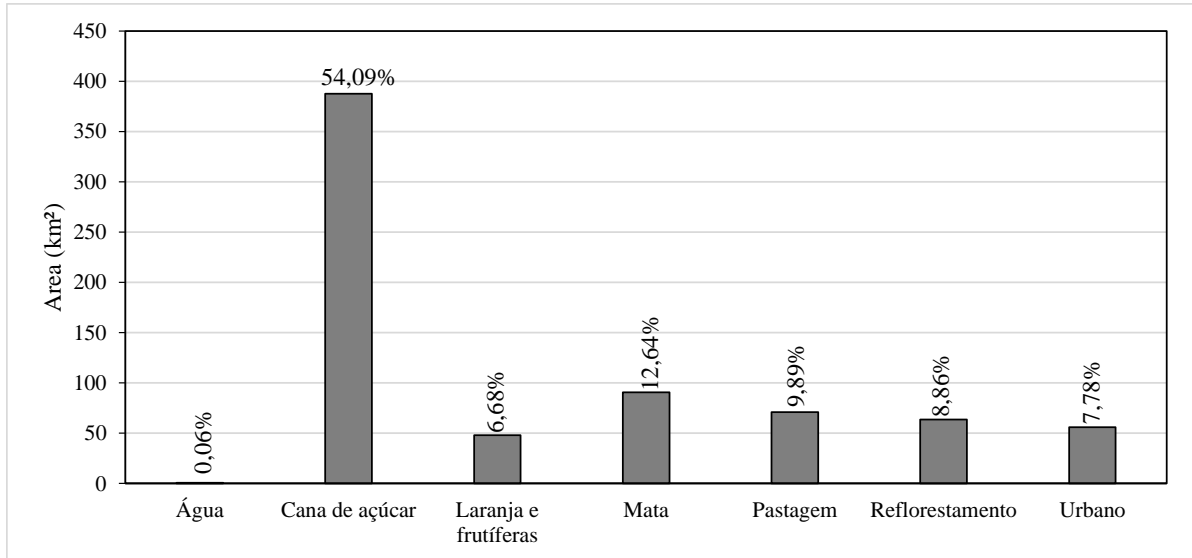


**Figura 61.** Distribuição dos principais tipos de usos do solo na região de São Carlos (SP).

Fonte: Autor

### 5.2.2. Usos do solo em Araraquara

Os tipos de usos do solo presentes na área na região de Araraquara podem ser observados no Apêndice IV, assim como a sua distribuição na Figura 62. A região de Araraquara é ocupada por usos agrosilvipastoris, os quais totalizam 79,5% (569,7 km<sup>2</sup>) e são compostos predominantemente por cana de açúcar (54%). O restante dos usos correspondeu as matas (90,57 km<sup>2</sup> - 12,64) e área urbana (55,71 km<sup>2</sup> - 7,78 %). Em termos de distribuição espacial, a cana de açúcar ocorre ao longo de toda a região, as plantações de laranja e outras espécies frutíferas a sudoeste, as matas os reflorestamentos predominantemente a sudoeste e nordeste, as pastagens a leste e nordeste e área urbana a nordeste.



**Figura 62.** Distribuição espacial em km<sup>2</sup> e porcentagem dos principais tipos de usos do solo presentes atualmente na região de Araraquara (SP).

Fonte: Autor

### 5.3. Caracterização dos materiais geológicos, das condições de infiltração e das águas subsuperficiais

#### 5.3.1. Substrato rochoso da região de São Carlos e Araraquara, SP

Baseado nos procedimentos descritos no item 4.2.6.2, identificou-se 6 formações Geológicas, as quais são descritas de forma resumida na Tabela 26. Nos Apêndices V e VI estão contidos os mapas de substrato rochoso da região de São Carlos e Araraquara. A análise espacial destes documentos cartográficos é apresentada no Item 5.3.2.

**Tabela 26.** Resumo do substrato rochoso encontrado da região de São Carlos e Araraquara, SP e as suas principais características.

Era	Período	Grupo	Formação	Ambiente deposicional	Litologias	Características	Tipo de aquíferos
Cenozóico	Paleogeno	Bauru	Itaqueri	Leques aluviais, fluviais e lacustres	- Arenitos com grau médio de cimentação - Siltitos/argilitos - Conglomerados	Estas litologias encontram-se intercaladas com camadas de diferentes espessuras	Os arenitos são bons armazenadores, porém as pequenas espessuras não permitem a boa produção
Mesozóico	Cretáceo		Adamantina	Fluviais e lacustres	Arenitos com diferentes graus de cimentação	O pacote apresenta espessura de até 100m	Poroso mas os arenitos com diferentes graus de cimentação garantem uma produção variada com diferentes magnitudes
		Serra Geral	Magmatismo fissural	Basaltos	Derrames fraturados variando desde vesicular/amigdaloidal até compacta	Aquíferos fraturado com fluxo predominantemente horizontal pelas faixas interderrame	
	Diabásios			Sills com diferentes espessuras, fraturados e com extensões variadas, caracterizados de corpos isolados.	Aquífero fraturado com qualidade interior ao do basalto		
	Jurássico	São Bento	Botucatu	Desértico (eólico)	Arenitos silicificados	Estão localizados geralmente em escarpas, muito fraturados e com espessuras menores que 100 metros	Maciço rochoso fraturado (fraturas verticais a sub verticais), responsáveis pelo fluxo existente dos materiais inconsolidados e os rochosos
					Arenitos com baixo grau de cimentação (friáveis)	Ocorrem em grandes extensões e com espessuras que podem ultrapassar 100 metros	Aquífero poroso/alta transmissividade
	Triássico	Pirambóia	Desértico (fluvial e lacustre)	Arenitos com cimento constituído por finos	Pacotes com espessuras variadas e com características de porosidade variadas em função da intensidade da cimentação	Aquífero poroso de capacidade inferior aos arenitos não silicificados da Formação Botucatu	
Paleozóico	Permiano	Passa Dois	Corumbataí	Planícies de maré, interpondo-se, esporadicamente, depósitos de "offshore	Folhelhos, argilitos e siltitos, podendo apresentar uma cimentação calcária	Litologias intercaladas com predominância de argilitos e siltitos	Aquífero muito pouco produtivo, associado principalmente às zonas de fraturas

Fonte: Autor

### 5.3.2. Modelo geológico 3D

Neste capítulo são apresentados os modelos geológicos estruturados 3D das regiões de São Carlos e Araraquara que foram elaborados segundo os procedimentos descritos no Item 4.2.7. A elaboração destes modelos teve como objetivo conhecer espacialmente, seja em

extensão como em profundidade as litologias da área de estudo, bem como auxiliar no mapeamento dos materiais geológicos.

#### 5.3.2.1. Modelo geológico 3D da região de São Carlos

Para elaborar o modelo geológico estruturado 3D da região de São Carlos foi necessário inicialmente identificar quais Formações geológicas e litologias estão presentes na área de estudo e compreender a estratigrafia vertical, ou seja, quantas camadas eram necessárias para compor o modelo. No total foram identificadas 5 Formações geológicas, as quais são Itaqueri, Serra Geral, Botucatu, Pirambóia e Corumbataí. A descrição mais detalhada das Formações geológicas está contida no Item 4.1.6. Como nem todas as litologias contidas em cada Formação geológica era possível de mapear por conta da escala de trabalho, logo algumas tiveram de ser agrupadas. Desse modo as unidades litológicas consideradas no modelo geológico estruturado 3D de São Carlos são:

- Arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados da Formação Itaqueri;
- Basaltos da Formação Serra Geral;
- Arenitos silicificados da Formação Botucatu;
- Arenitos friáveis da Formação Botucatu;
- Sills de diabásio da Formação Serra Geral;
- Arenitos da Formação Pirambóia;
- Folhelhos, siltitos e argilitos da Formação Corumbataí.

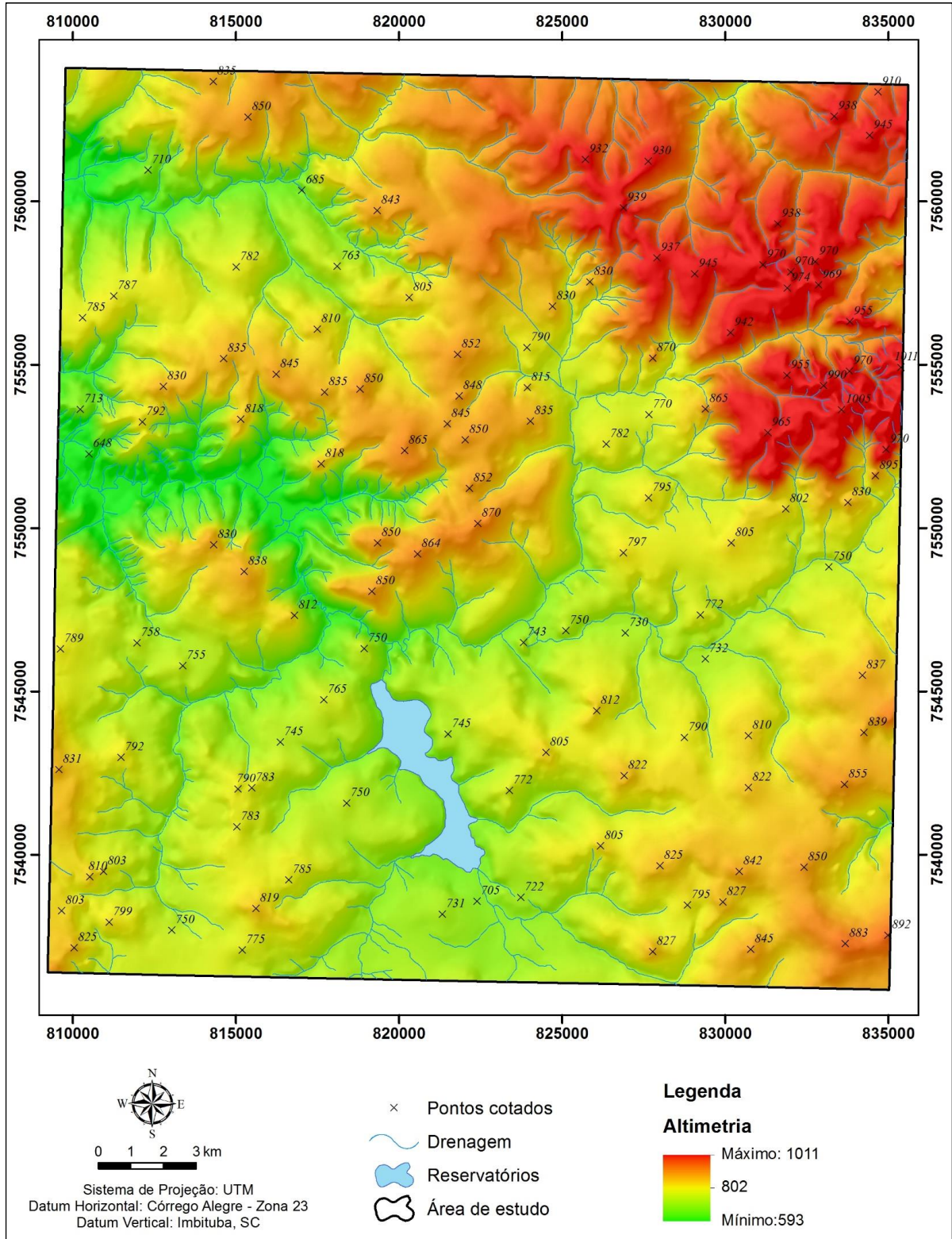
Após a identificação das litologias presentes na área de estudo foi avaliado baseado no mapa de substrato rochoso e na análise dos perfis dos poços (Apêndice XII) a estratigrafia vertical e o número de camadas necessárias para compor o modelo. Observou-se que para os arenitos friáveis da Formação Botucatu e os *sills* de diabásio da Formação Serra Geral foi necessário mais de uma camada, por conta dos processos de intrusões magmáticas que ocorreram em diversos pulsos, as quais geraram intercalações de camadas. Desse modo, no total foram identificadas 12 camadas, as quais uma destas representa um *sill* de diabásio que ocorre entre os arenitos friáveis da Formação Botucatu e dos arenitos da Formação Pirambóia e outra chamada de base do modelo que tem como função estética, deixando a base do bloco diagrama mais retangular. Na Figura 63 é apresentada o esquema da seção vertical geral da região de São Carlos.

(Camada 1)	Arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados da Formação Itaqueri	
(Camada 2)	Basaltos da Formação Serra Geral	
(Camada 3)	Arenitos silicificados da Formação Botucatu	
(Camada 4)	Arenitos friáveis da Formação Botucatu	
(Camada 5)	Sills de diabásio da Formação Serra Geral	
(Camada 6)	Arenitos friáveis da Formação Botucatu	
(Camada 7)	Sills de diabásios da Formação Serra Geral	
(Camada 8)	Arenitos friáveis da Formação Botucatu	} Sills de diabásios da Formação Serra Geral (Camada 12)
(Camada 9)	Arenitos da Formação Pirambóia	
(Camada 10)	Folhelhos, siltitos e argilitos da Formação Corumbataí	
(Camada 11)	Base do modelo	

**Figura 63.** Camadas e respectivas litologias.

**Fonte:** Autor

Dentre os dados básicos necessários para a elaboração do modelo geológico estruturado 3D, têm-se o modelo digital do terreno. O MDT da região de São Carlos é mostrado na Figura 64, na qual nota-se que a área de estudo varia de 592 a 1011 metros, onde as porções que se encontram os altos topográficos estão a nordeste e os baixos a oeste.

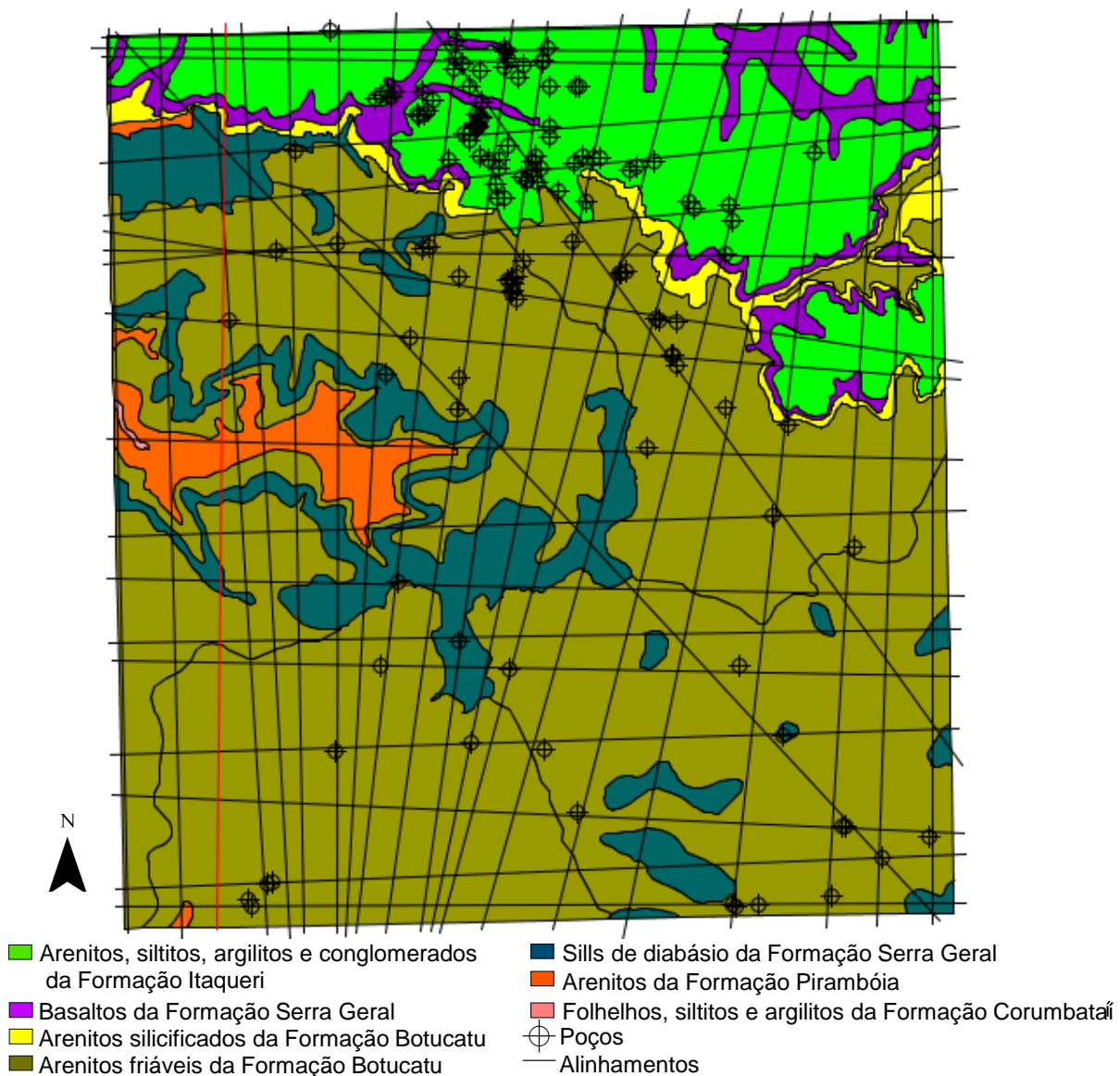


**Figura 64.** Modelo digital do terreno da folha do IBGE de São Carlos (Escala 1:50.000).

**Fonte:** Autor

Com base no MDT, seção vertical geral, mapa de substrato rochoso (Apêndice V) e poços foram traçados diversos alinhamentos (Figura 65) com o objetivo de representar todas as

litologias, assim como considerar os poços presentes na área de estudo. É importante ressaltar que a qualidade do modelo está diretamente associada a análise da densidade e a profundidade dos poços. Em São Carlos a densidade de poços foi de 0,19 poços/km<sup>2</sup>, onde a região com maior número de poços localiza-se a norte e a menor a oeste, ou seja, a região com maior densidade apresenta um grau de incerteza inferior, e assim vice-versa. Em termos de profundidade, nas camadas como as dos arenitos da Formação Pirambóia não foi possível identificar a sua base nos perfis dos poços, que resultou em um aumento da incerteza do modelo relacionado à esta litologia.

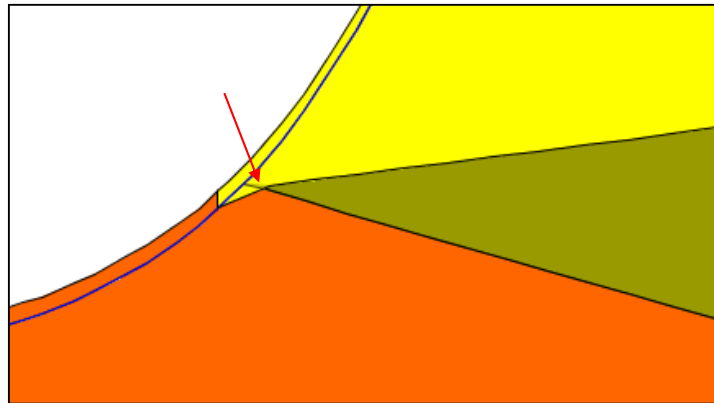


**Figura 65.** Malha dos alinhamentos considerados na elaboração do modelo geológico estruturado 3D da folha do IBGE de São Carlos (Escala 1:50.000).

Fonte: Autor



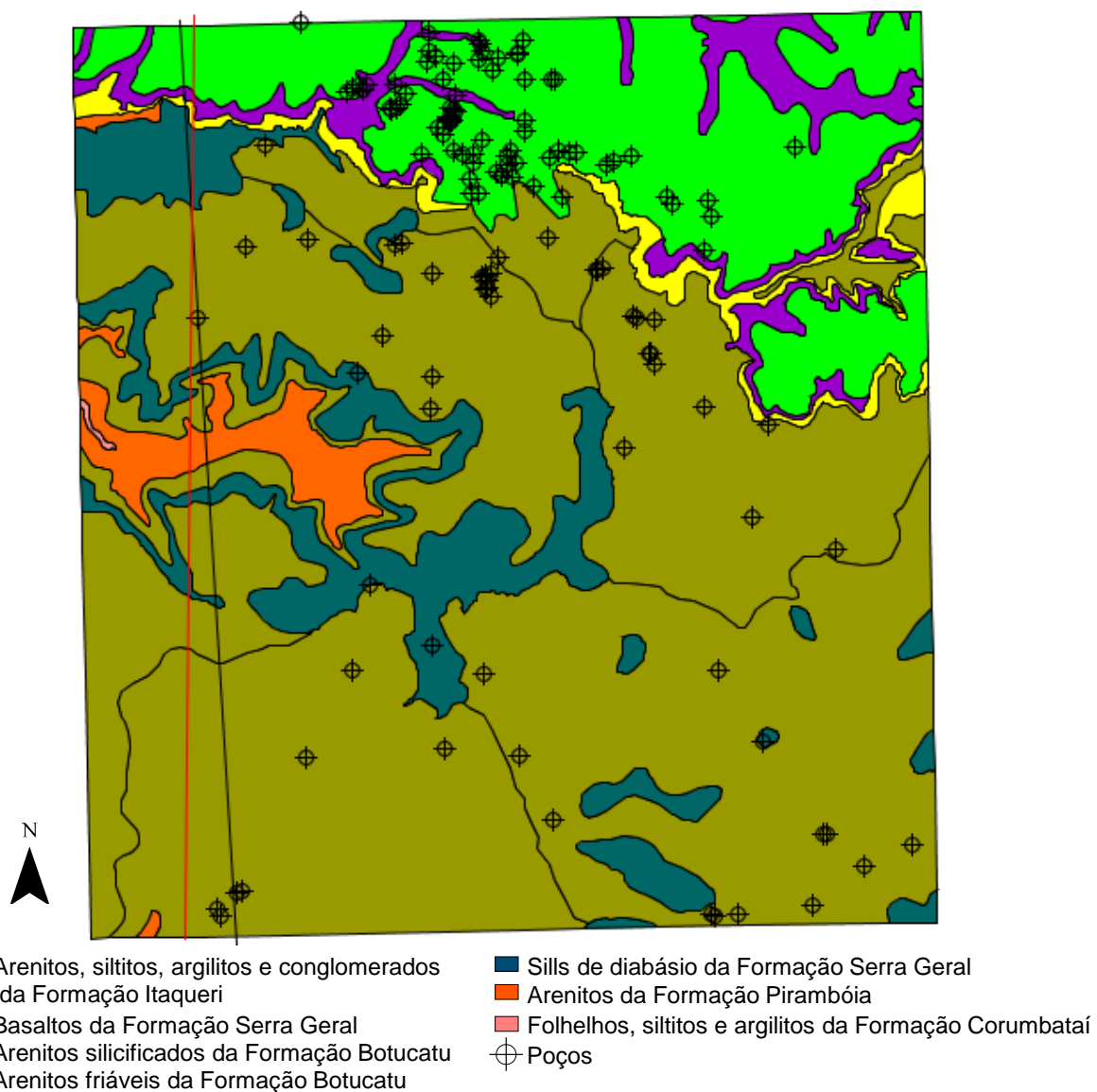
Após a interpretação dos perfis geológicos obteve-se a malha de perfis geológicos, a qual já é considerada como um modelo preliminar da área de estudo. Observou-se que a malha foi considerada adequada, pois verificou-se que esta representou as litologias da área de estudo, bem como a variabilidade da espessura das camadas identificadas nos poços. Em seguida procedeu-se o cálculo do modelo 3D. Com o modelo calculado foi feita a validação do mesmo a partir da verificação dos contatos das camadas previamente delimitadas nos perfis geológicos, em seguida foram comparados com os que foram gerados. Observou-se que quase na sua totalidade o cálculo foi adequado, todavia em alguns contatos surgiram algumas pequenas variações na geometria da base da camada como exemplificado na Figura 66.



**Figura 66.** Exemplo de problema observado durante a validação do modelo geológico estruturado 3D de São Carlos, salientando a seta em vermelho que mostra uma pequena variação não esperada da geometria de uma das camadas.

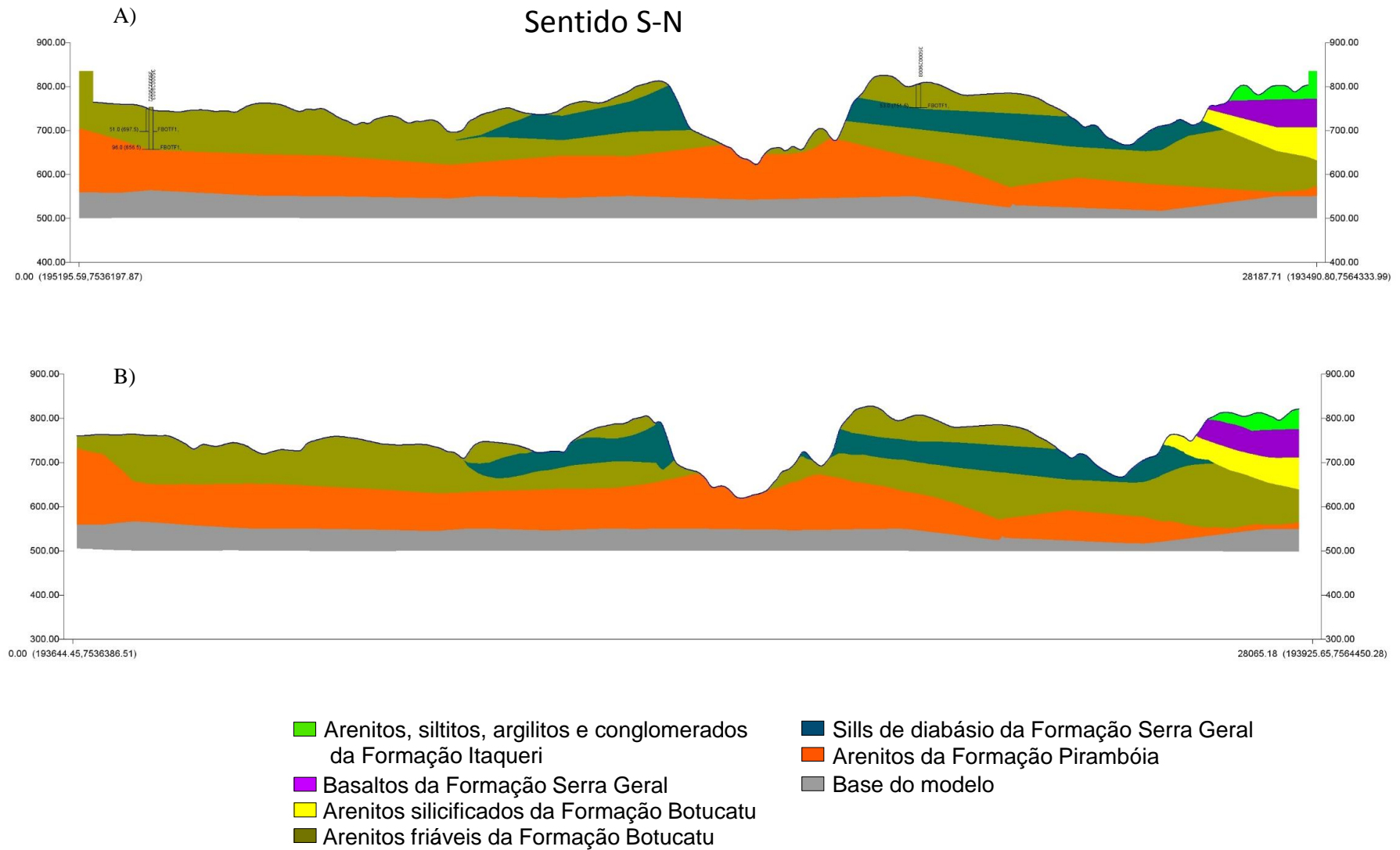
**Fonte:** Autor

Com o objetivo ainda de checar a qualidade da interpolação realizada entre os perfis geológicos do modelo gerado, traçaram-se seções próximas aquelas previamente interpretadas (Figura 67). Observou-se que os perfis geológicos gerados a partir do modelo 3D apresentaram geometria e espessura bastante semelhante ao interpretado previamente (Figura 68).



**Figura 67.** Processo de validação da interpolação do modelo geológico estruturado 3D da região de São Carlos, onde se obteve uma seção vertical (em vermelho) próxima a umas das seções (em preto) utilizadas para o cálculo afim de comparar os resultados

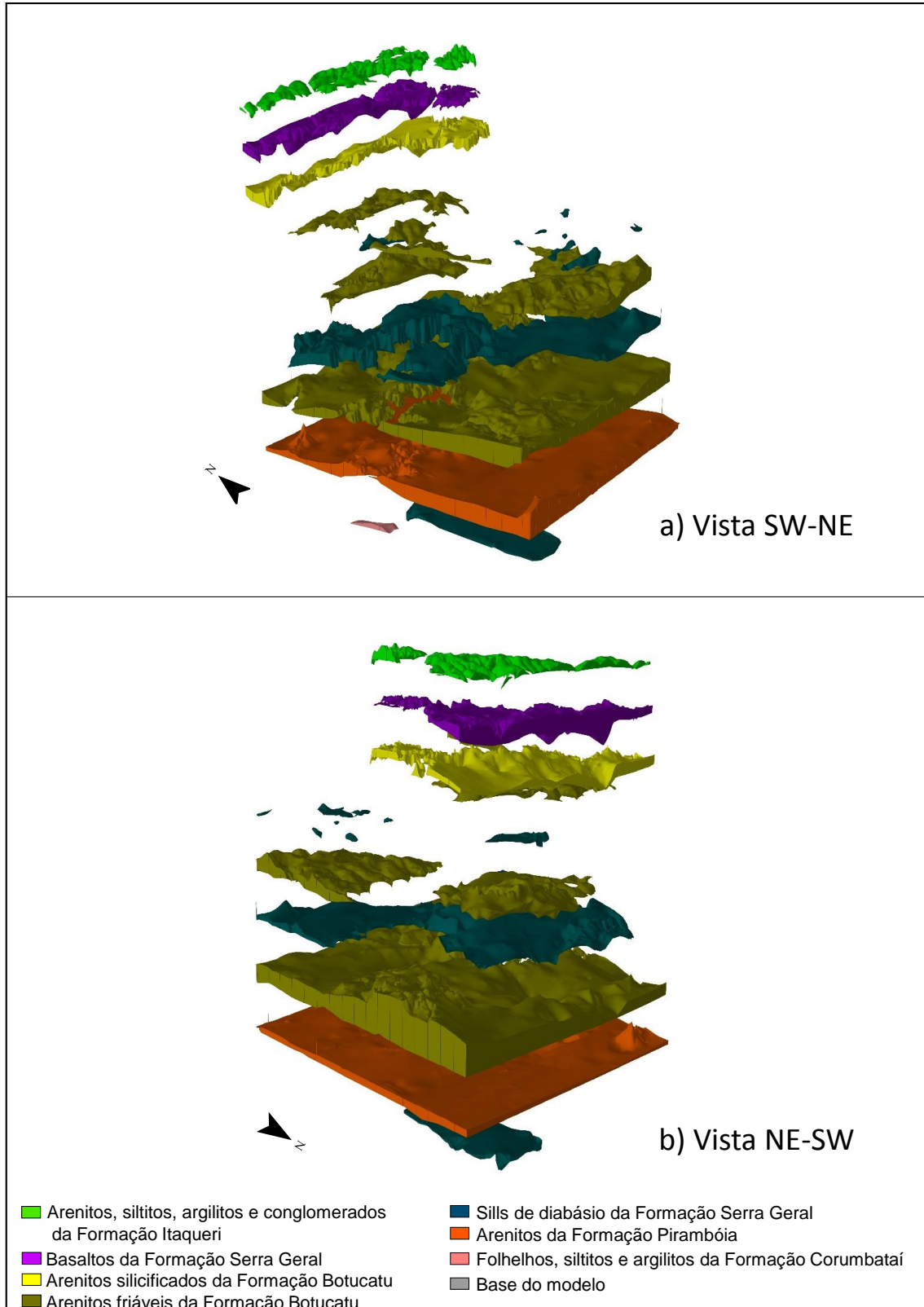
**Fonte:** Autor



**Figura 68.** Comparação entre o perfil geológico obtido a partir do modelo geológico estruturado 3D (B) com o interpretado e utilizado (A) na eloração do modelo da folha do IBGE de São Carlos (Escala 1:50.000).

Fonte: Autor

Baseado na análise da estratigrafia regional, na sequência vertical das camadas da região, no mapa de substrato rochoso, nos perfis descritivos de poços profundos, no modelo digital do terreno e nos perfis geológicos interpretados e validados, o modelo geológico 3D foi elaborado. No Apêndice IX tem-se em duas vistas do modelo geológico 3D em bloco diagrama, bem como perfis geológicos obtidos a partir do modelo em duas direções. Enquanto na Tabela 27 é mostrada a área e o volume das diferentes litologias e na Figura 69 as camadas separadas, onde é possível observar a extensão e posição estratigráfica das diferentes litologias.



**Figura 69.** Modelo geológico estruturado 3D da região de São Carlos com as camadas separadas e a distribuição e relação espacial entre as litologias.

Fonte: Autor

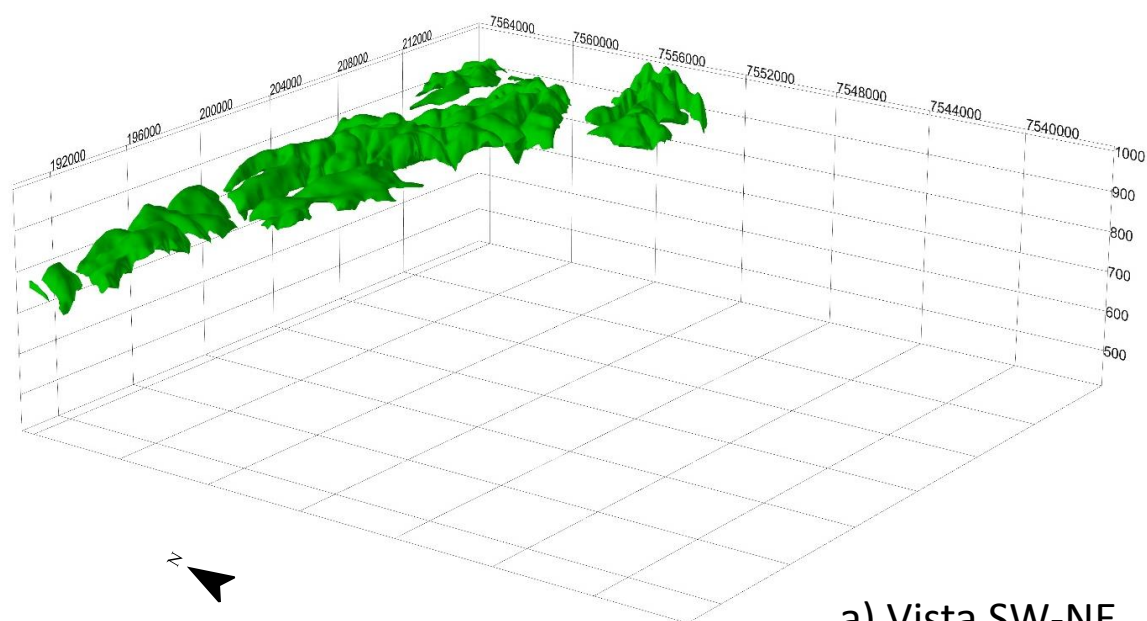
**Tabela 27.** Distribuição e volume das diferentes litologias presentes na região de São Carlos.

Litologia e a respectiva Formação geológica	Distribuição (km <sup>2</sup> )	Volume (km <sup>3</sup> )	Distribuição do afloramento (km <sup>2</sup> )
Arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados da Formação Itaqueri	116,40	3,662	116,40
Basaltos da Formação Serra Geral	137,83	9,197	29.03
<i>Sills</i> de diabásio da Formação Serra Geral	429,07	17,412	77.36
Arenitos silicificados da Formação Botucatu	159,04	5.560	16.33
Arenitos friáveis da Formação Botucatu	693,37	93,928	455.67
Arenitos da Formação Pirambóia	713,29	44,742	19,77
Folhelhos, siltitos e argilitos da Formação Corumbataí	4,197	0,100	0.35

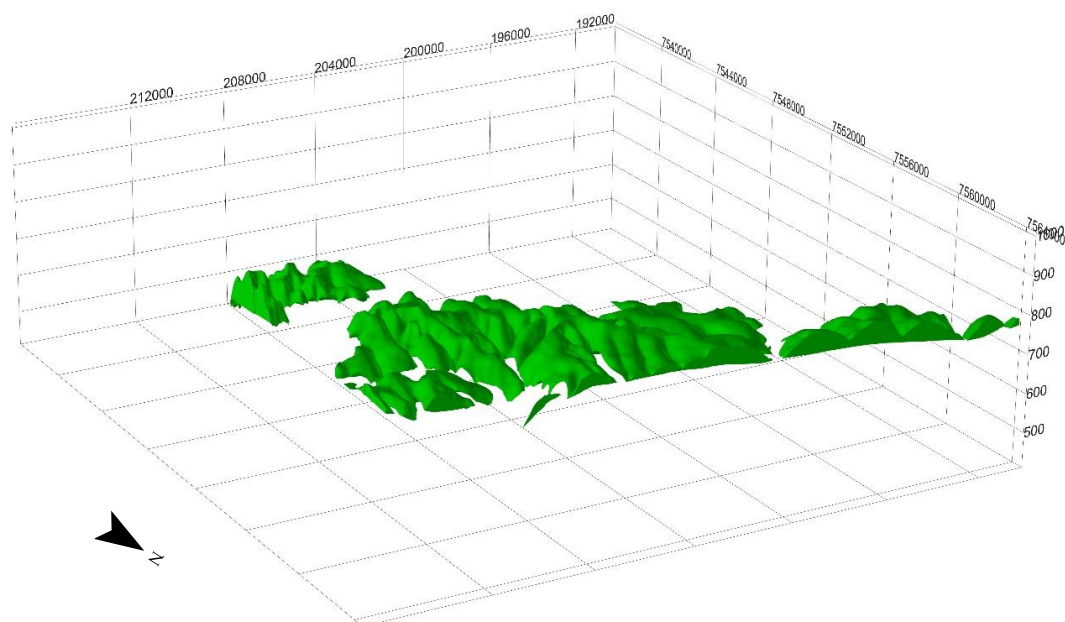
**Fonte:** Autor

Para facilitar a descrição da estratigrafia, da distribuição, espessura e volume das litologias e presentes na área de São Carlos, estas foram consideradas de forma separadas.

Os arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados da Formação Itaqueri (Figura 70) sobrepõem os basaltos da Formação Serra Geral e estão distribuídos (116,4km<sup>2</sup>) e afloram predominantemente a norte da área de estudo a partir de 850 metros de altitude. São litologias que apresentam espessuras de no máximo 30 metros quando localizados nos divisores de água, e diminuem a medida que se aproxima dos canais de drenagem. O volume total destas litologias é de 3,662 km<sup>3</sup>.



a) Vista SW-NE



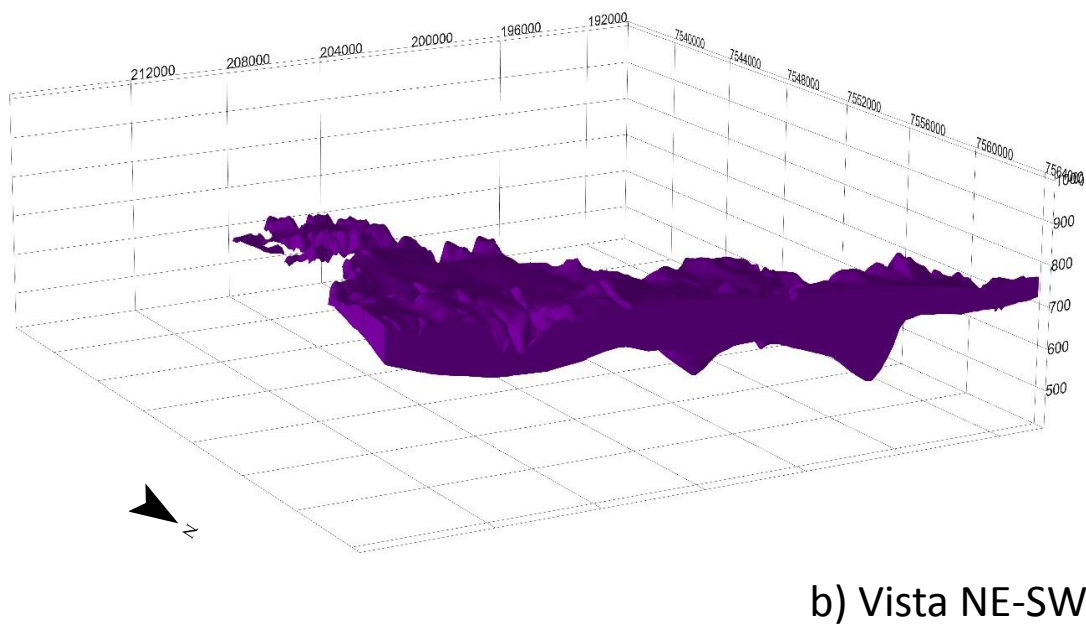
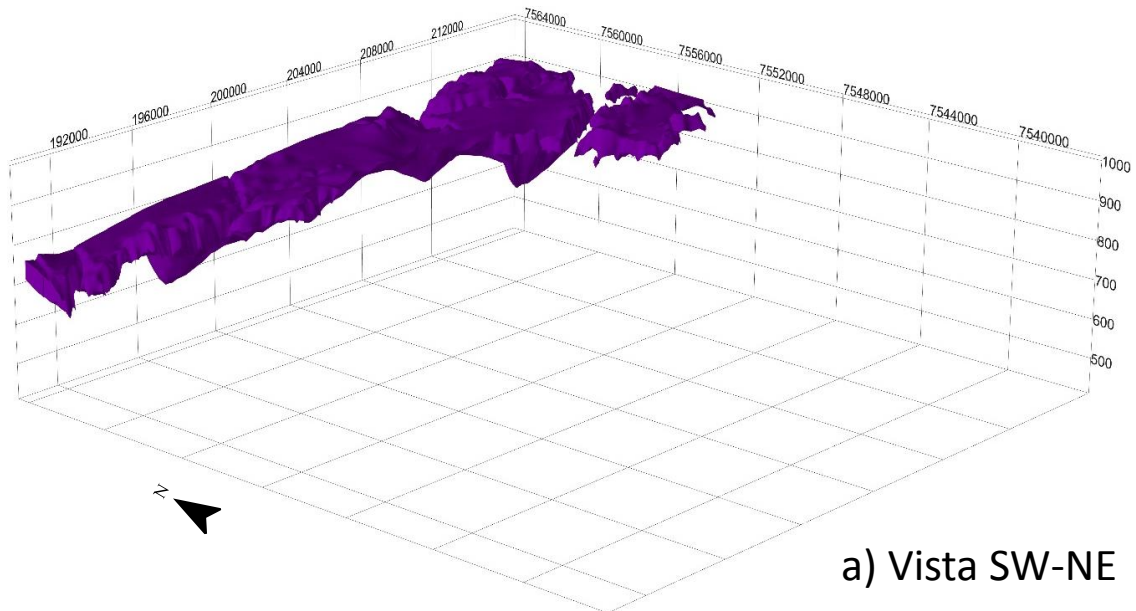
b) Vista NE-SW

**Figura 70.** Bloco diagrama dos arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados da Formação Itaqueri.

**Fonte:** Autor

Os basaltos da Formação Serra Geral (Figura 71) estão distribuídos (137,83 km<sup>2</sup>) a norte da região de São Carlos e afloram (29,03 km<sup>2</sup>) no topo das escarpas e na base das drenagens. As cotas que esta litologia pode aflorar variar geralmente entre 700 até quase 900 metros. De todas as litologias esta é a que apresenta a maior variabilidade em termos de espessura, a qual

variou desde 20 a mais de 200 metros. Em termos de volume, a soma total dos pacotes totaliza 9,197 km<sup>3</sup>.



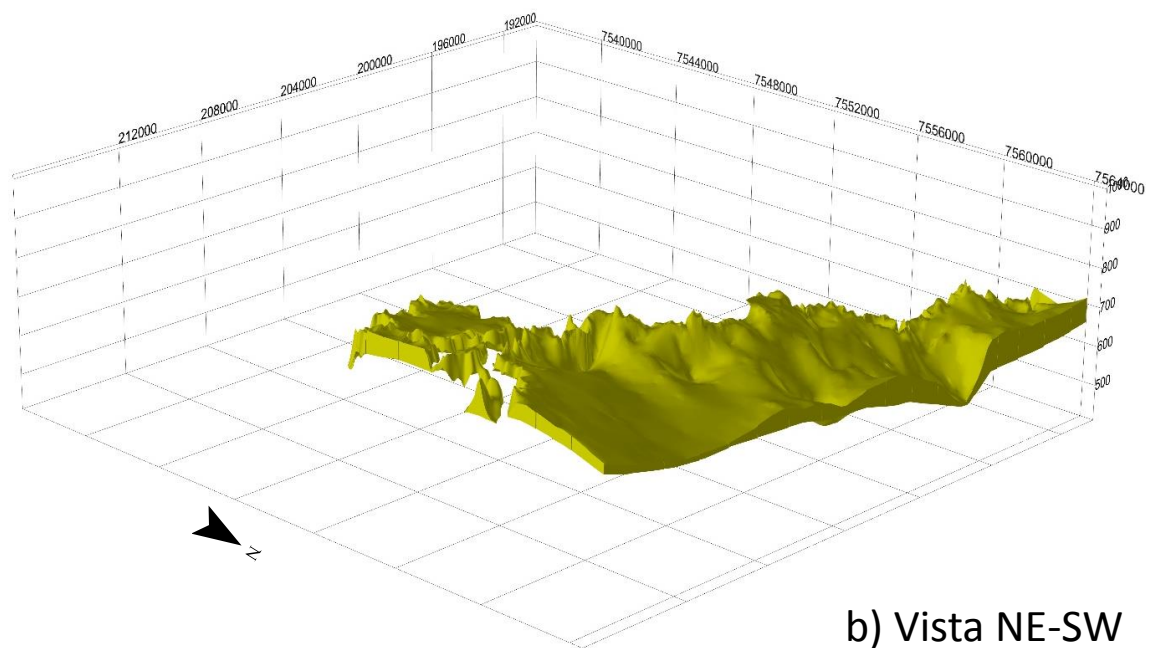
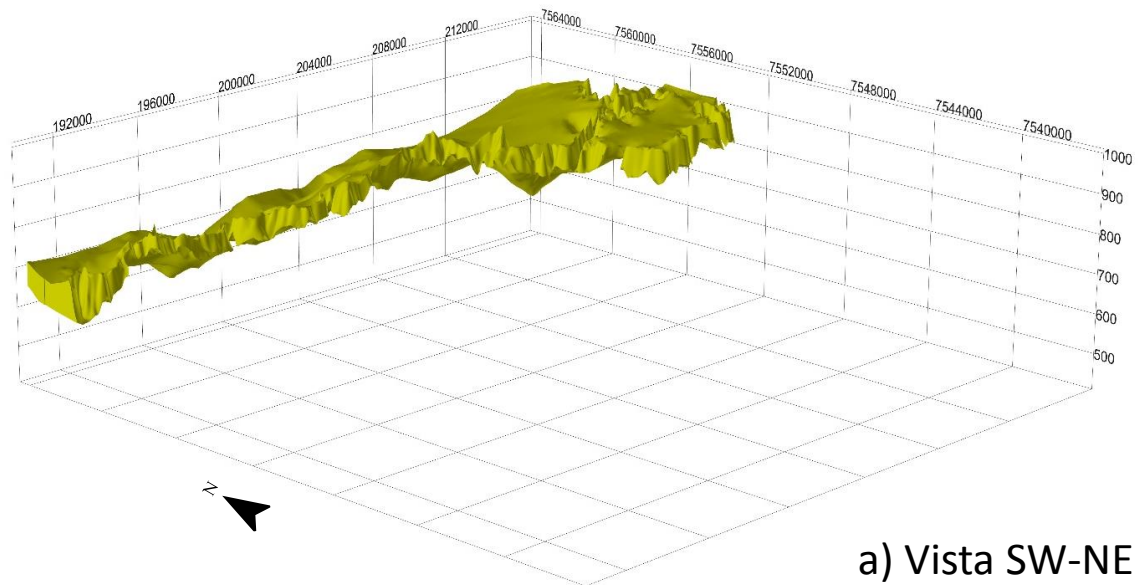
**Figura 71.** Bloco diagrama com a distribuição dos basaltos da Formação Serra Geral.

**Fonte:** Autor

Os arenitos silicificados da Formação Botucatu (Figura 72) estão sotopostos aos basaltos e sobrepostos aos arenitos friáveis da Formação Botucatu, com extensão de 159,04 km<sup>2</sup> e afloram em 16,33 km<sup>2</sup> próximo as escarpas. Ressalta-se que esta litologia aflora em duas amplitudes de altitude, uma de 600 a 700 metros a noroeste e de 830 a 900 metros nordeste. A



espessura dessa litologia tende a diminuir até 20 metros para norte e aumentar a nordeste e noroeste, podendo atingir valores de aproximadamente 150 metros. Mesmo que apresente uma extensão maior que os basaltos, o volume do pacote de arenito silicificado é menor e não ultrapassa 5,560 km<sup>3</sup>.

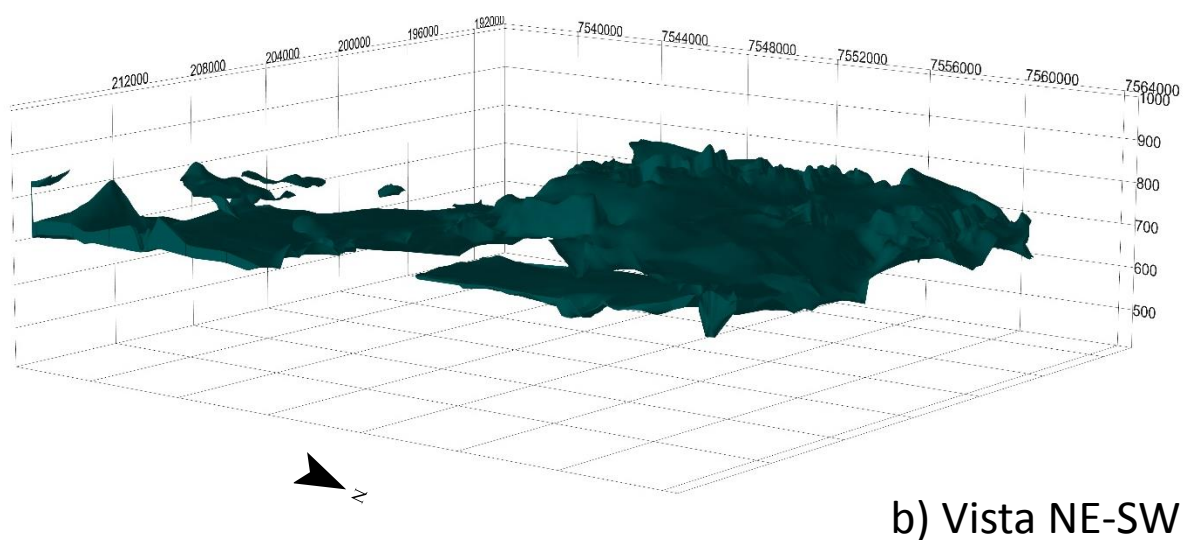
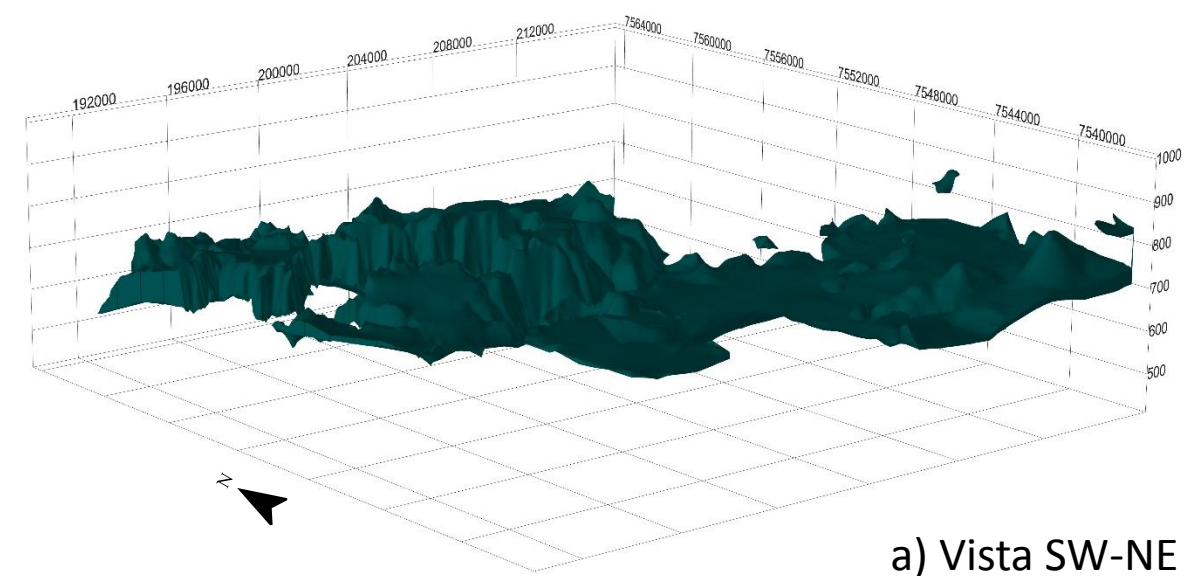


**Figura 72.** Bloco diagrama com a distribuição dos arenitos silicificados da Formação Botucatu.

**Fonte:** Autor

Os *sills* de diabásio da Formação Serra Geral (Figura 73) estão distribuído em uma área de 429,1 km<sup>2</sup> e afloram em diversos pontos (77,4 km<sup>2</sup>). Estes ocorrem em 3 camadas isoladas:

a primeira está associada aos arenitos friáveis da Formação Botucatu e estas afloram em topos; devido à erosão dos arenitos que recobriam, a segunda ocorre como *sill* nos arenitos friáveis, aflorando em alguns pontos a oeste no meio de encosta e fundo de canais de drenagem; A terceira é um *sill* entre os arenitos friáveis da Formação Botucatu e arenitos da Formação Pirambóia. Em termos de espessura, a segunda camada apresenta os maiores valores que podem atingir até 100 metros. Ao considerar as 3 camadas, o volume é de 17,412 km<sup>3</sup>.

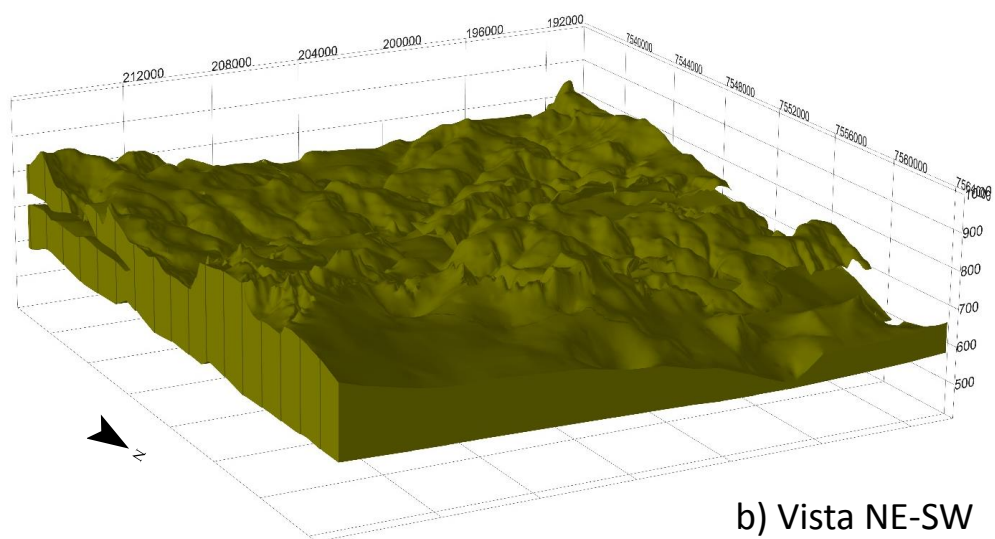
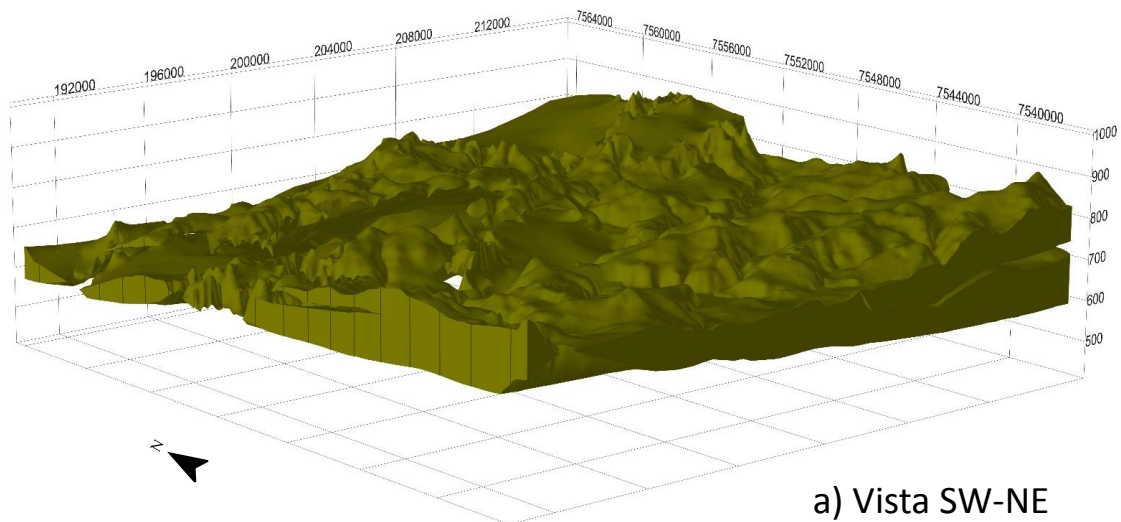


**Figura 73.** Bloco diagrama com a distribuição dos sills de diabásio da Formação Serra Geral.

Fonte: Autor

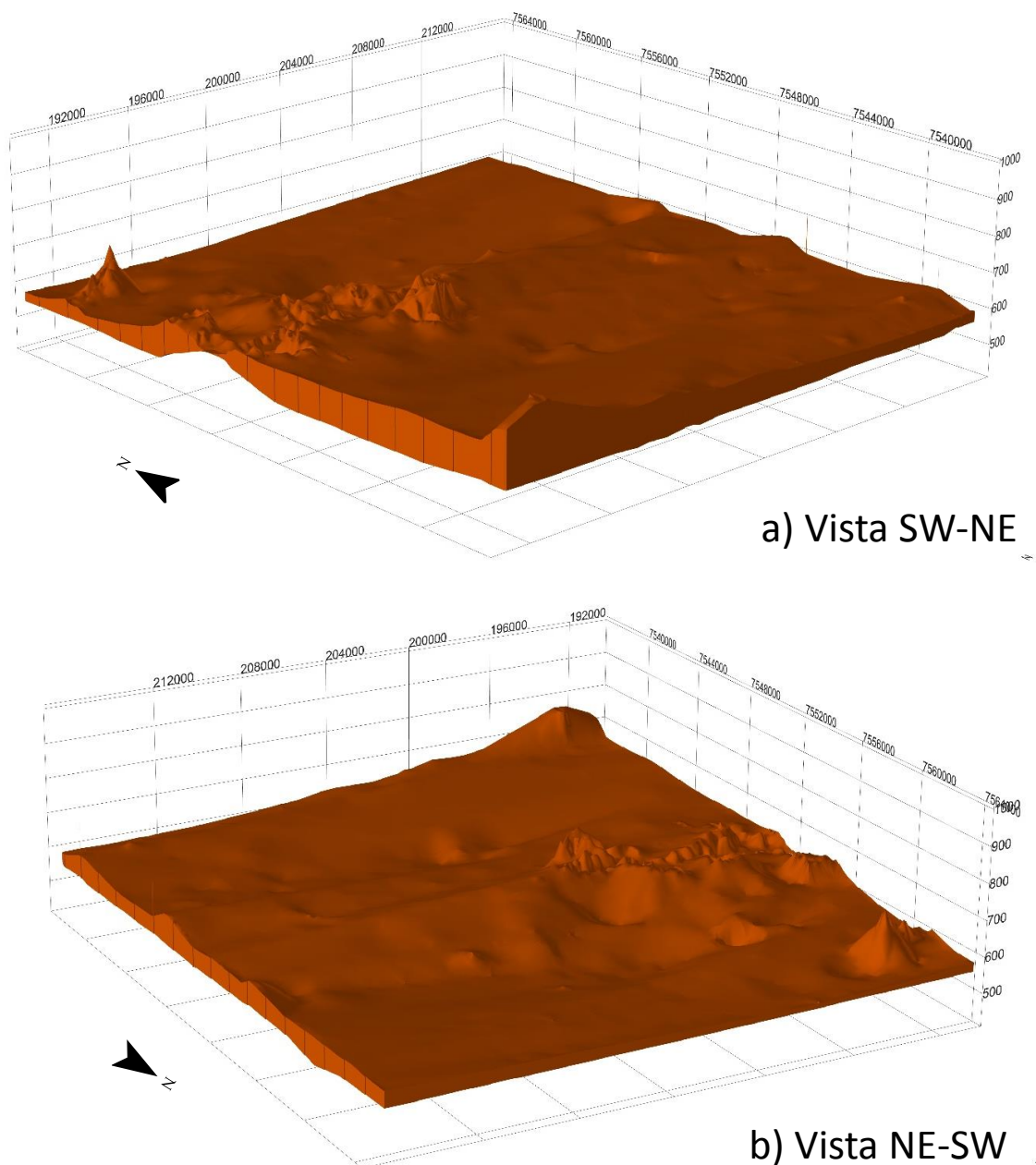
Os arenitos friáveis da Formação Botucatu (Figura 74) afloram em uma área de 455,67 km<sup>2</sup>, entre as cotas 850 e 550 metros e estão distribuídos em 693,37km<sup>2</sup>, entretanto em

profundidade apresentam variações por conta das intrusões de diabásio. Em virtude dessa variabilidade os arenitos friáveis podem ser enquadrados em 3 camadas diferentes. A primeira acima dos *sills* diabásio e aflora a oeste em altitudes mais elevadas, enquanto a segunda aflora a sudeste em altitudes mais baixas que a da primeira. A terceira está sotoposta as camadas dos *sills* de diabásio e ocorre amplamente na área de estudo, aflorando a oeste próximo ao rio Jacaré Guaçu e a sudoeste próximo a represa do Broa. A espessura dessa litologia atinge até mais de 150 metros e a soma dos diversos pacotes totaliza 93,93 km<sup>3</sup> de volume. No bloco da Figura 74 observa-se a intensa variação do topo dos arenitos friáveis da Formação Botucatu. Esta variação afeta diretamente a perfuração de poços, visto que o mesmo em pequenas distâncias atingem os arenitos em diferentes profundidades e com espessura variadas, que gera custos e rendimentos bem diferentes.



**Figura 74.** Bloco diagrama com a extensão dos arenitos friáveis da Formação Botucatu.

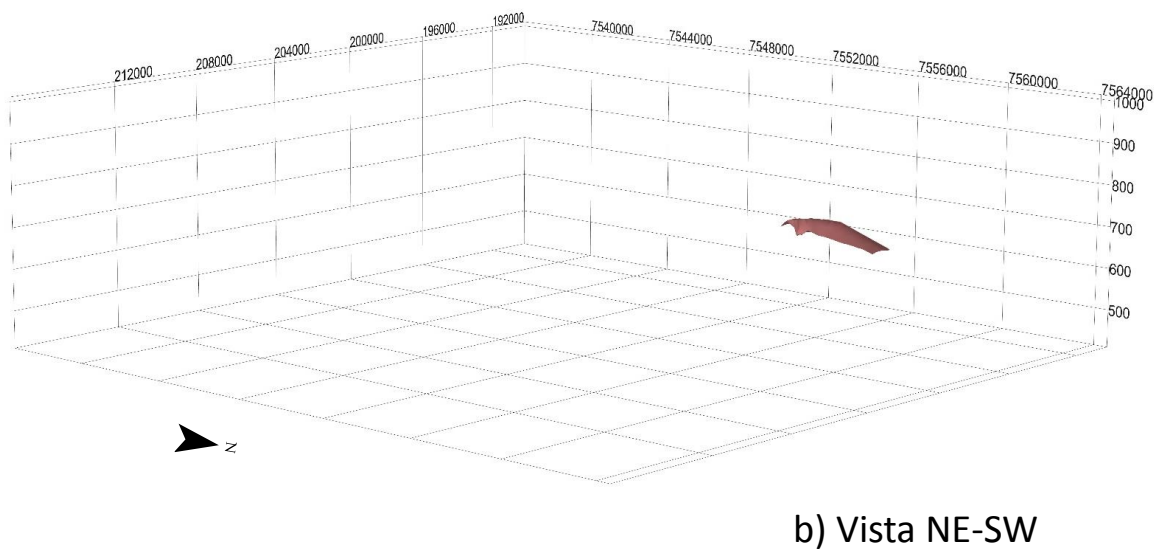
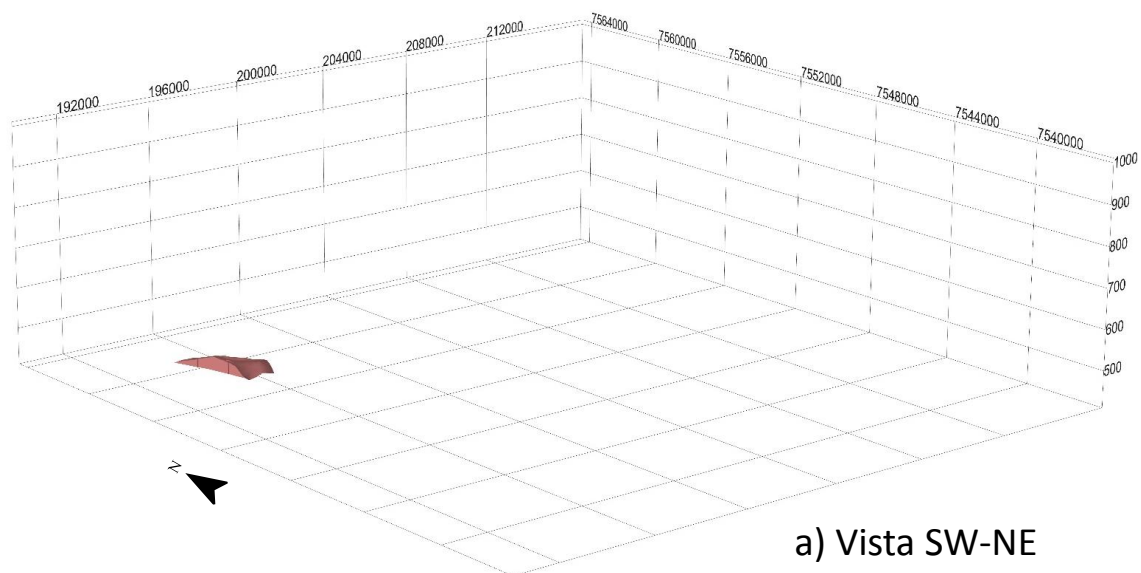
Os arenitos da Formação Pirambóia (Figura 75) estão sotopostos aos arenitos friáveis da Formação Botucatu e afloram em uma área de 20km<sup>2</sup> no vale rio Jacaré Guaçu. Assim como os arenitos friáveis da Formação Botucatu estão amplamente distribuídos (713,29 km<sup>2</sup>) em subsuperfície. Tendem a ser menos espessos a norte e mais espessos a sudoeste, onde podem alcançar até mais de 100 metros. Por conta da ausência de poços que atingissem a base do pacote desse arenito, optou-se em estabelecer como profundidade máxima 550 metros. Por conta deste fato o volume do pacote dos arenitos da Formação Pirambóia apresentou quase a metade do volume (45,280 km<sup>3</sup>) dos arenitos friáveis da Formação Botucatu.



**Figura 75.** Bloco diagrama com a ocorrência dos arenitos da Formação Pirambóia.



Os folhelhos, siltitos e argilitos da Formação Corumbataí (Figura 76) estão sotopostos aos arenitos da Formação Pirambóia e afloram em uma pequena porção da região no vale rio Jacaré Guaçu.



**Figura 76.** Bloco diagrama das ocorrências dos folhelhos, siltitos e argilitos da Formação Corumbataí.

Fonte: Autor

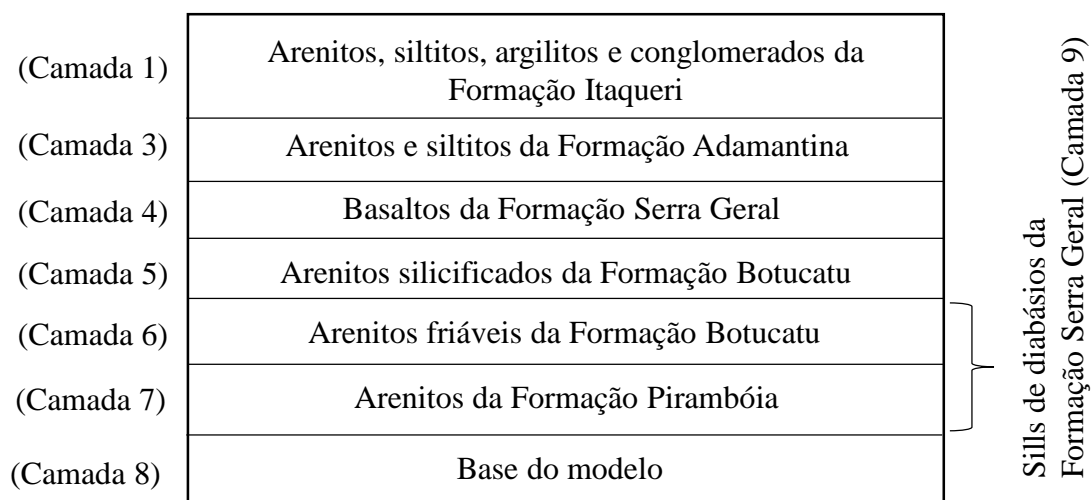
### 5.3.2.2. Modelo geológico 3D da região de Araraquara

Assim como para a área de São Carlos, o modelo geológico estruturado 3D da região de Araraquara baseou-se nas Formações geológicas e litologias presentes, assim como na estratigrafia das camadas. Foram identificadas 5 formações geológicas: Itaqueri, Adamantina, Serra Geral, Botucatu e Pirambóia. A descrição das Formações geológicas está contida no Item 4.1.6. As litologias foram:

- Arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados da Formação Itaqueri;
- Arenitos e siltitos da Formação Adamantina;
- Basaltos da Formação Serra Geral;
- *Sills* de diabásio da Formação Serra Geral;
- Arenitos silicificados da Formação Botucatu;
- Arenitos friáveis da Formação Botucatu;
- Arenitos da Formação Pirambóia.

Com base no mapa de substrato rochoso, nos perfis dos poços (Apêndice VIII), na estratigrafia e no número de camadas necessárias para compor o modelo da área, constatou-se que a folha do IBGE de Araraquara- escala 1:50.000 é composta por 9 camadas (Figura 77).

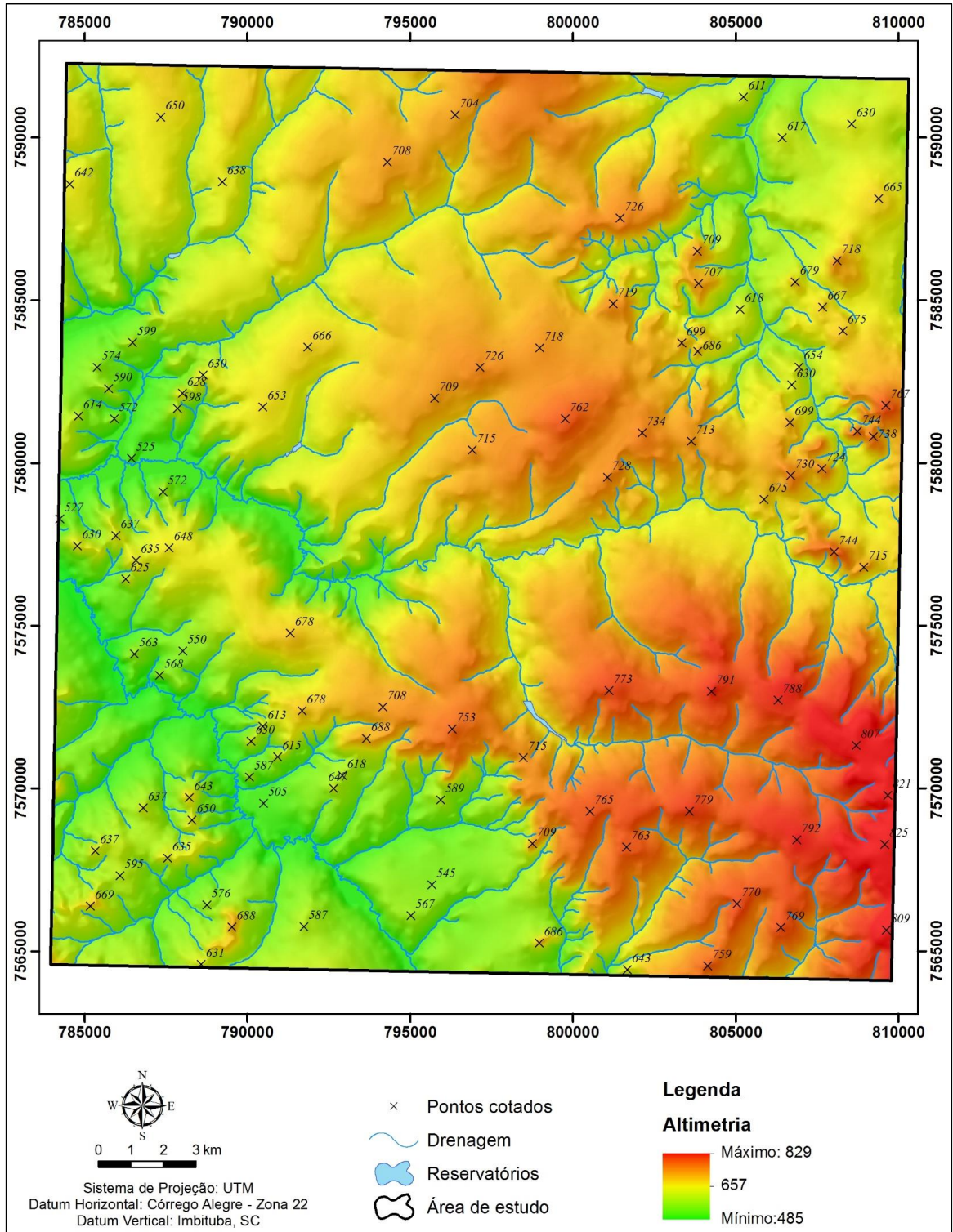
Chama-se atenção para duas camadas, uma delas representa a base do modelo a qual tem apenas função de suporte e a outra é referente aos *sills* de diabásio que ocorrem associados aos arenitos friáveis da Formação Botucatu e aos arenitos da Formação Pirambóia.



**Figura 77.** Camadas e litologias consideradas na elaboração do modelo 3D da Folha do IBGE de Araraquara.

**Fonte:** Autor

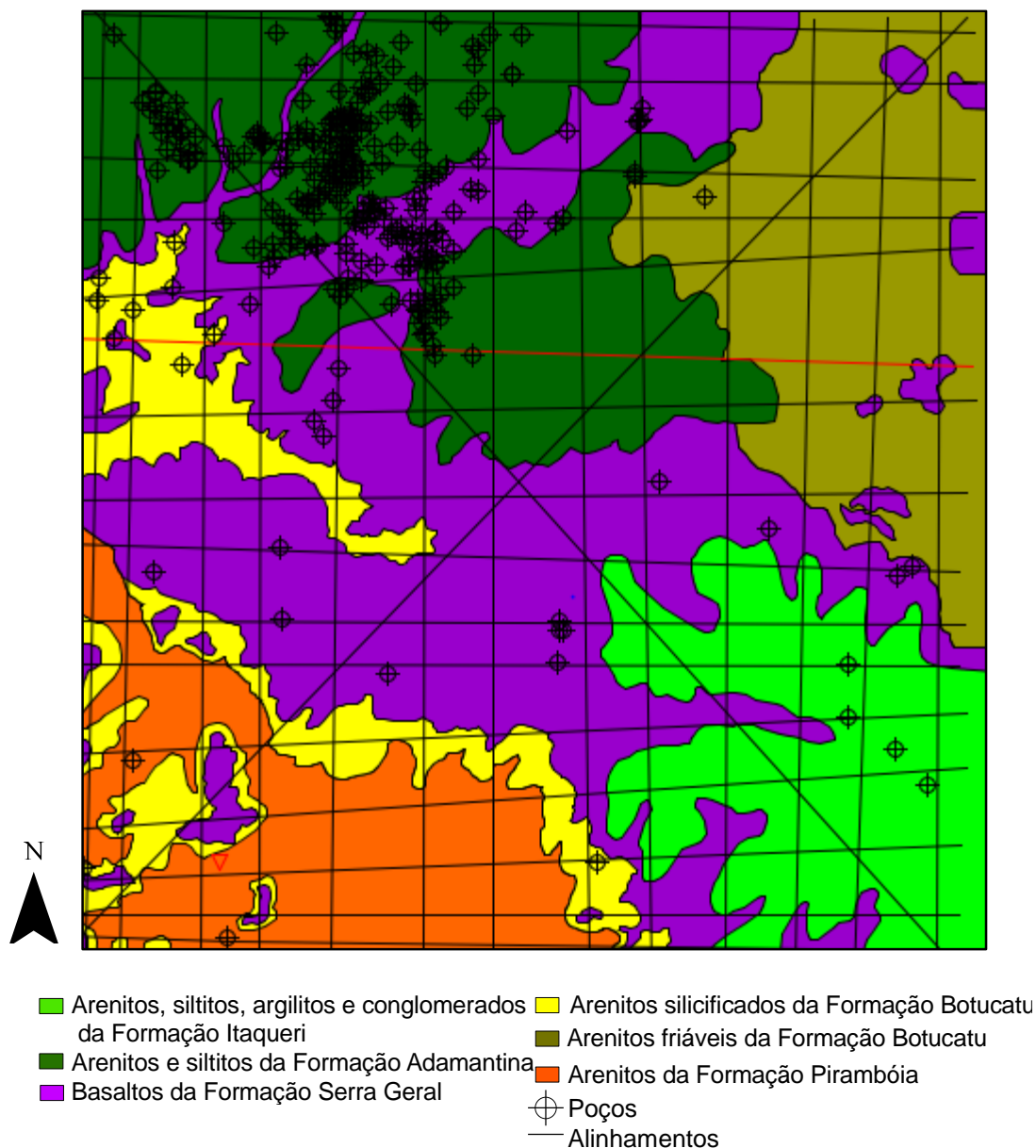
Em continuidade, elaborou-se o modelo digital do terreno (Figura 78), no qual verificou-se que as altitudes variam de 485 a 829 metros, onde as áreas mais baixas estão a oeste e as mais altas a sudeste.



**Figura 78.** Modelo digital do terreno da área de Araraquara em uma escala 1:50.000.

Fonte: Autor

De posse do MDT, da seção vertical geral, do mapa de substrato rochoso (Apêndice VI) e dos poços foram traçados diversos alinhamentos (Figura 79) para posterior elaboração dos perfis geológicos. Assim como na Folha de São Carlos, a de Araraquara apresentou incertezas relacionadas aos poços. A densidade de poços de Araraquara foi de 0,38 poços/km<sup>2</sup> localizados em maior quantidade a noroeste. A nordeste e a sudeste praticamente não foram identificados poços, ou seja, são regiões em que o modelo apresenta um maior grau de incerteza.



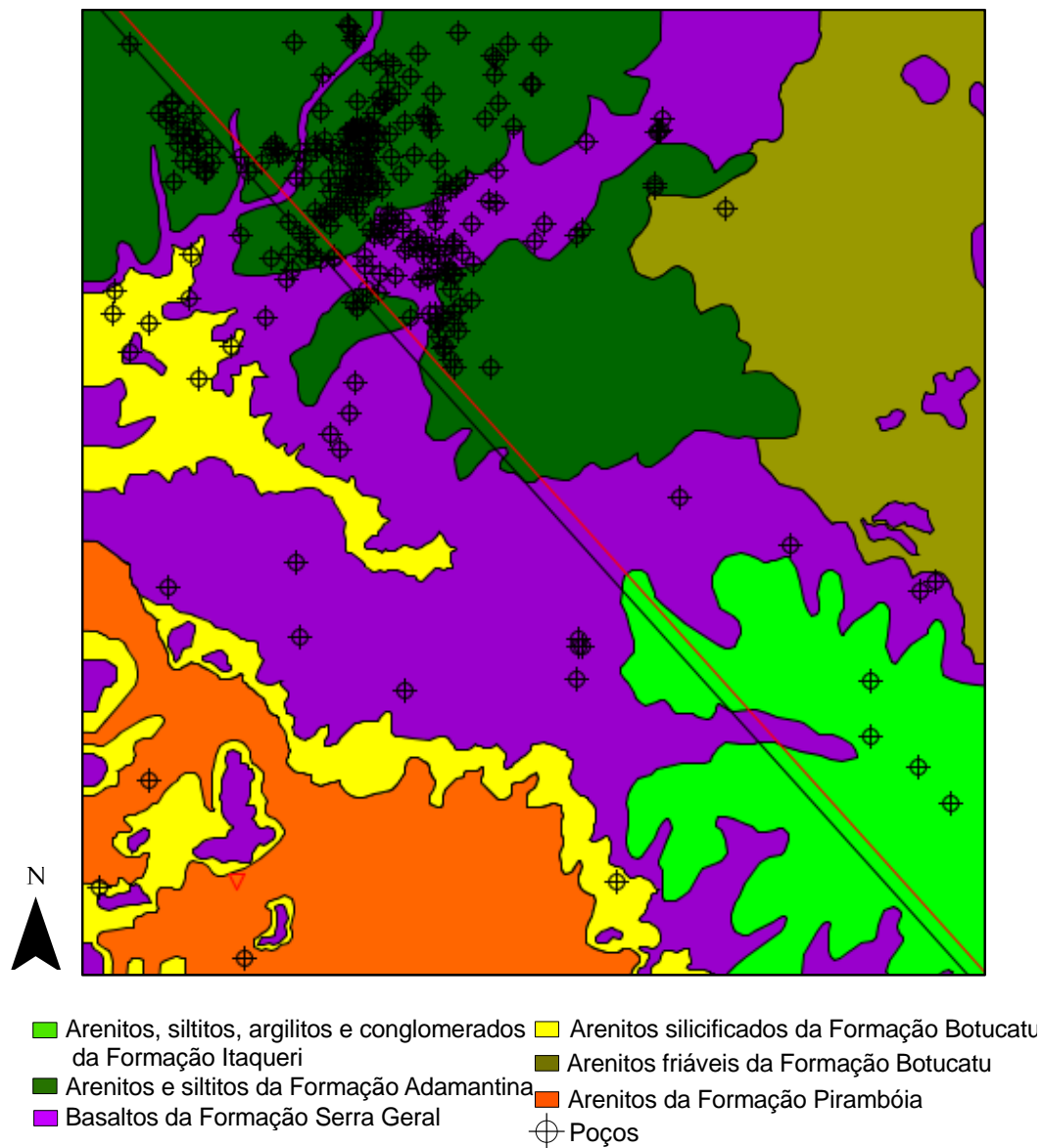
**Figura 79.** Malha dos alinhamentos considerados para obtenção do modelo geológico estruturado 3D da folha do IBGE de Araraquara.

Fonte: Autor



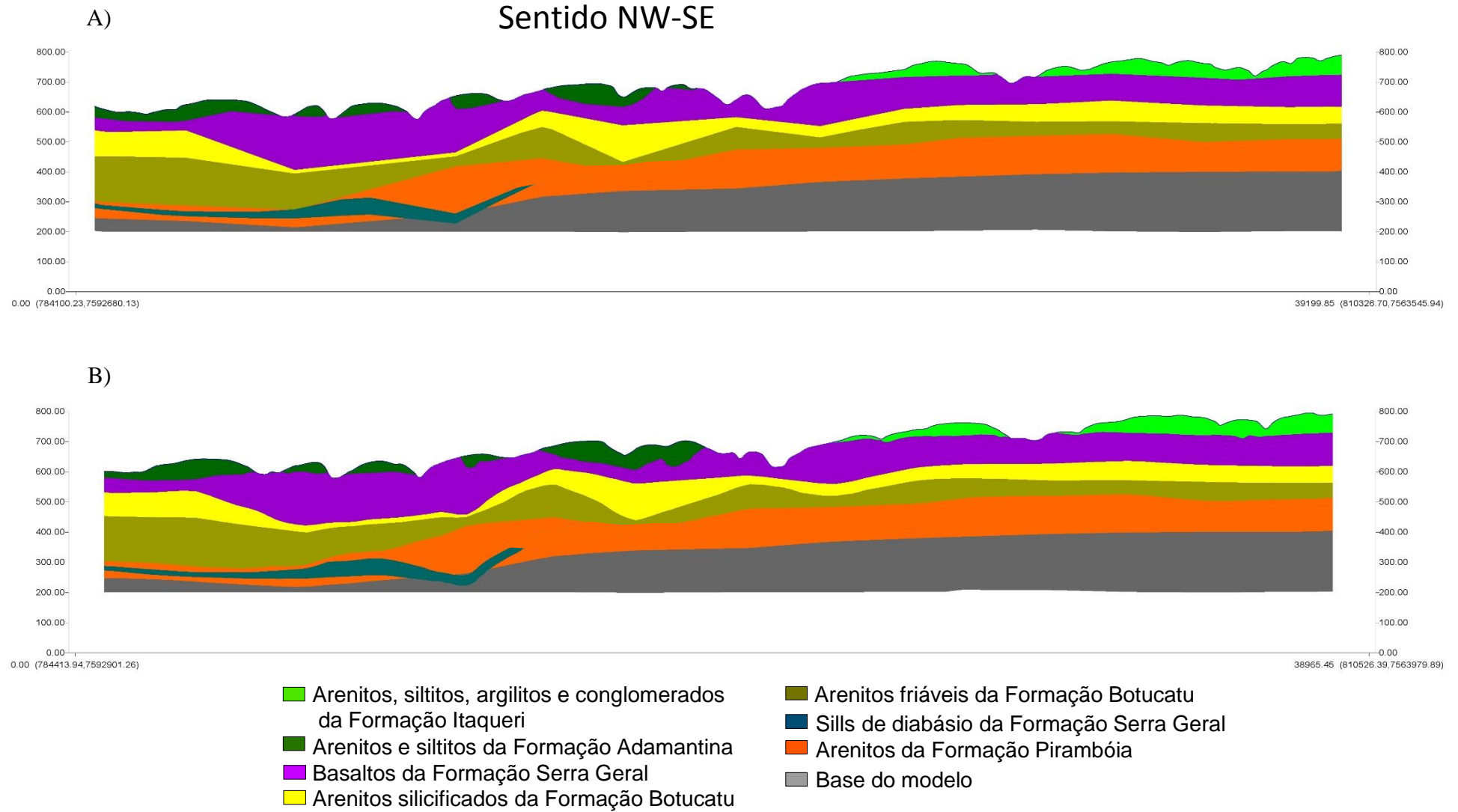
Com todos os perfis geológicos elaborados obteve-se a malha de perfis geológicos necessários para a obtenção do modelo 3D e em seguida foi feita a validação. Verificou-se que em alguns pontos próximo a contatos em afloramento ocorreram pequenas variações na geometria semelhantes a região de São Carlos, as quais não afetam qualidade global do modelo.

Para aprimorar a validação do modelo, foram traçados perfis geológicos paralelos (Figura 80) aos previamente interpretados, em seguida os comparou em termos de geometria, distribuição e espessura das camadas. Observou-se que os perfis geológicos gerados a partir do modelo 3D da região de Araraquara apresentaram geometria, distribuição e espessura bastante semelhante ao interpretado previamente (Figura 81).



**Figura 80.** Processo de validação da interpolação do modelo geológico estruturado 3D da região de Araraquara, onde se delineou um alinhamento (em vermelho) próximo a uns dos perfis (em preto) utilizados para a elaboração do modelo.

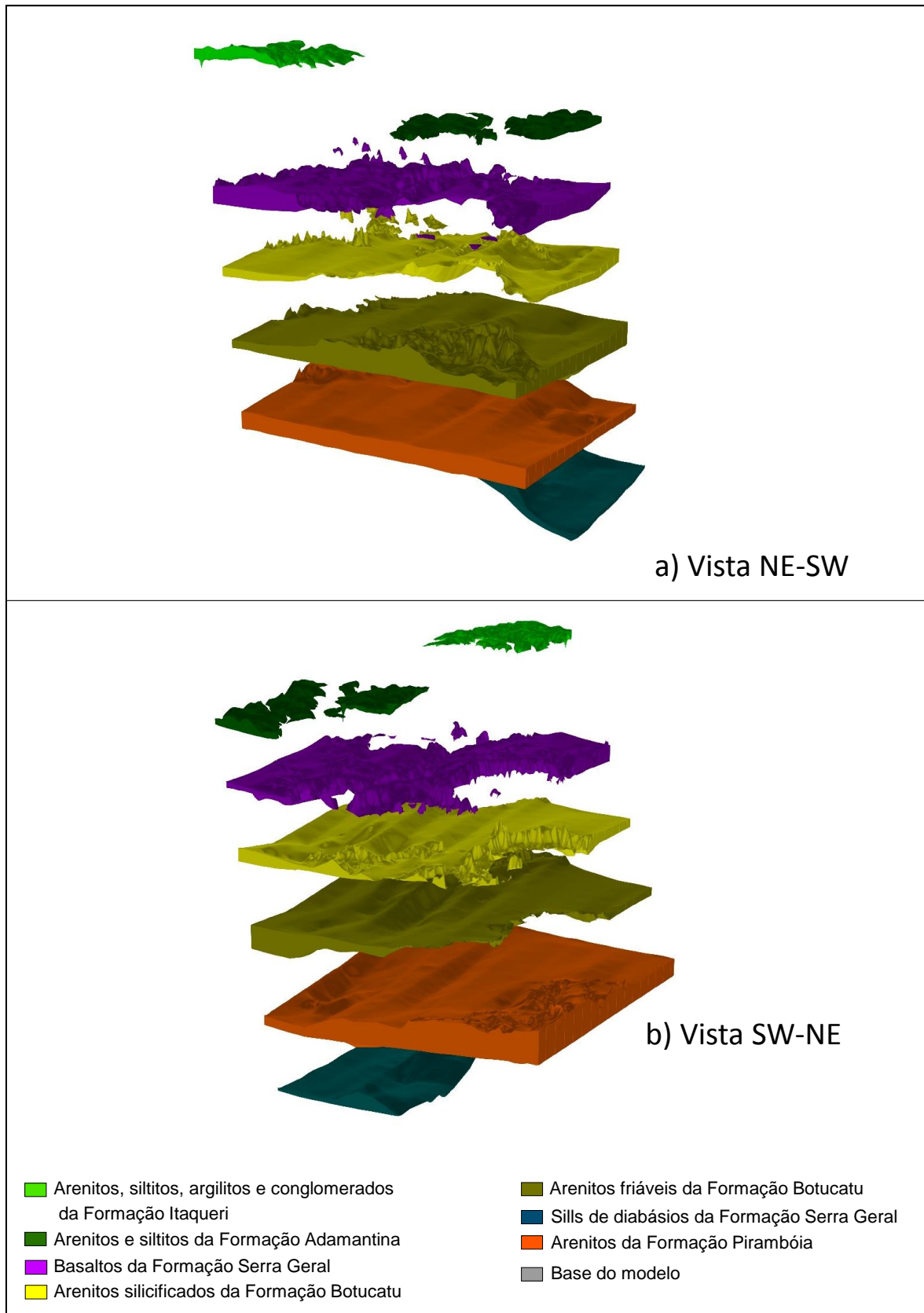
Fonte: Autor



**Figura 81.** Comparação entre o perfil geológico obtido a partir do modelo geológico estruturado 3D (B) com o interpretado e utilizado (A) na elaboração região de Araraquara.

Fonte: Autor

Após os procedimentos de validação obteve-se o modelo geológico estruturado 3D e no Apêndice X encontram-se o modelo geológico 3D em bloco diagrama com dois ângulos de visadas e dois perfis geológicos obtidos a partir do modelo. Na Figura 82 tem-se o modelo 3D com as camadas separadas, no qual é possível analisar a extensão e posição estratigráfica das diferentes camadas litológicas, enquanto na Tabela 28 tem-se a área e o volume das respectivas litologias.



**Figura 82.** Modelo geológico estruturado 3D da região de São Carlos com efeito de explosão das camadas com objetivo de mostrar a sua distribuição e sua relação espacial com as outras litologias.

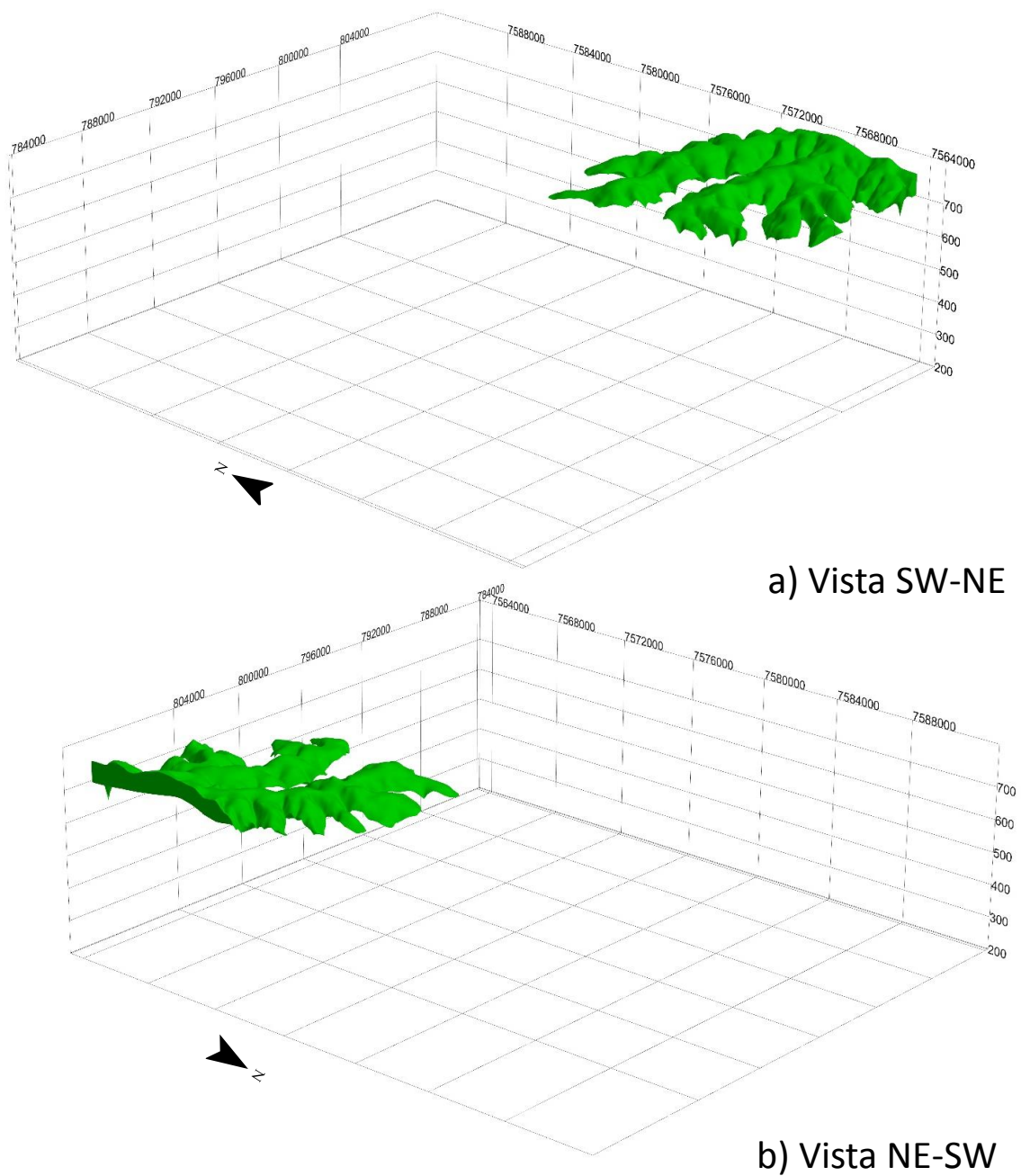
Fonte: Autor

**Tabela 28.** Distribuição e volume das diferentes camadas e litologias.

Litologia e a respectiva Formação geológica	Distribuição (km <sup>2</sup> )	Volume ( km <sup>3</sup> )	Distribuição do afloramento (km <sup>2</sup> )
Arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados da Formação Itaqueri	85,45	2,929	85,45
Arenitos e siltitos da Formação Adamantina	148,82	5,984	148,82
Basaltos da Formação Serra Geral	463,67	37,394	238,28
<i>Sills</i> de diabásio da Formação Serra Geral	198,94	4,435	Não aflora
Arenitos silicificados da Formação Botucatu	527,76	23,943	64,47
Arenitos friáveis da Formação Botucatu	615,83	56,824	99,96
Arenitos da Formação Pirambóia	716,42	82,891	79,43

**Fonte:** Autor

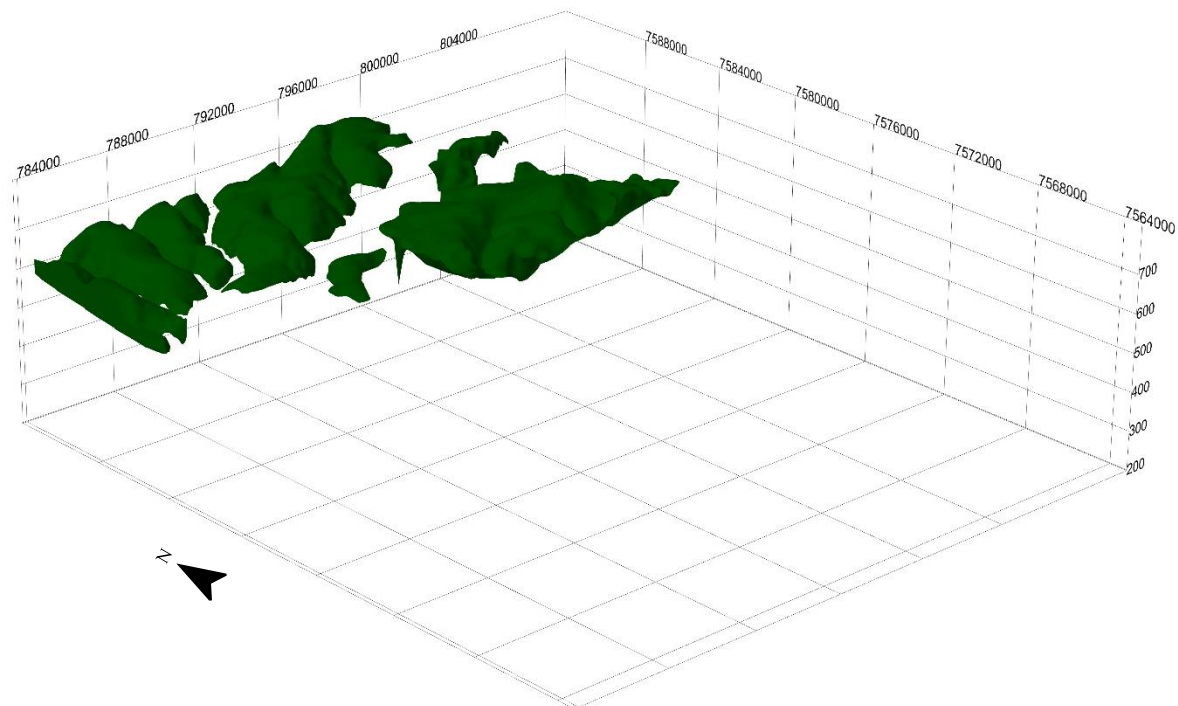
A partir do modelo geológico estruturado 3D, observou-se que as litologias da região de Araraquara no geral mergulham para oeste. Os arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados da Formação Itaqueri (Figura 83) estão distribuídos em cerca de 85,45 km<sup>2</sup> a sudeste e recobrem os basaltos da Formação Serra Geral. Estas litologias geralmente ocorrem a partir de 700 metros de altitude. O pacote é menos espesso próximo das drenagens e mais espesso nos topos de morro, com média de 30 metros. O volume total do pacote destas litologias é de cerca de 3 km<sup>3</sup>.



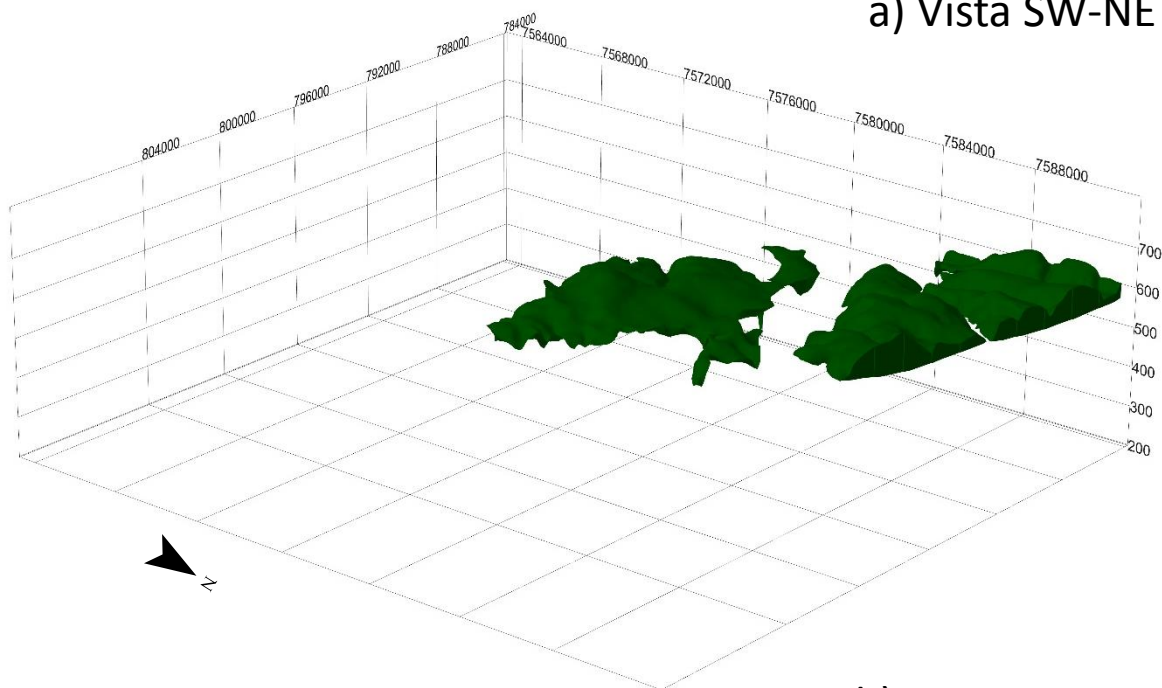
**Figura 83.** Bloco diagrama retratando a distribuição dos arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados da Formação Itaqueri.

**Fonte:** Autor

Os arenitos e siltitos da Formação Adamantina (Figura 84) estão sobrepostos aos basaltos da Formação Serra Geral, distribuídos (148,82 km<sup>2</sup>) e aflorando a noroeste a partir da altitude de 560 metros. A espessura média é de 50 metros, entretanto pode alcançar até mais de 100 metros, e o volume destas litologias é ao redor de 6 km<sup>3</sup>.



a) Vista SW-NE



b) Vista NE-SW

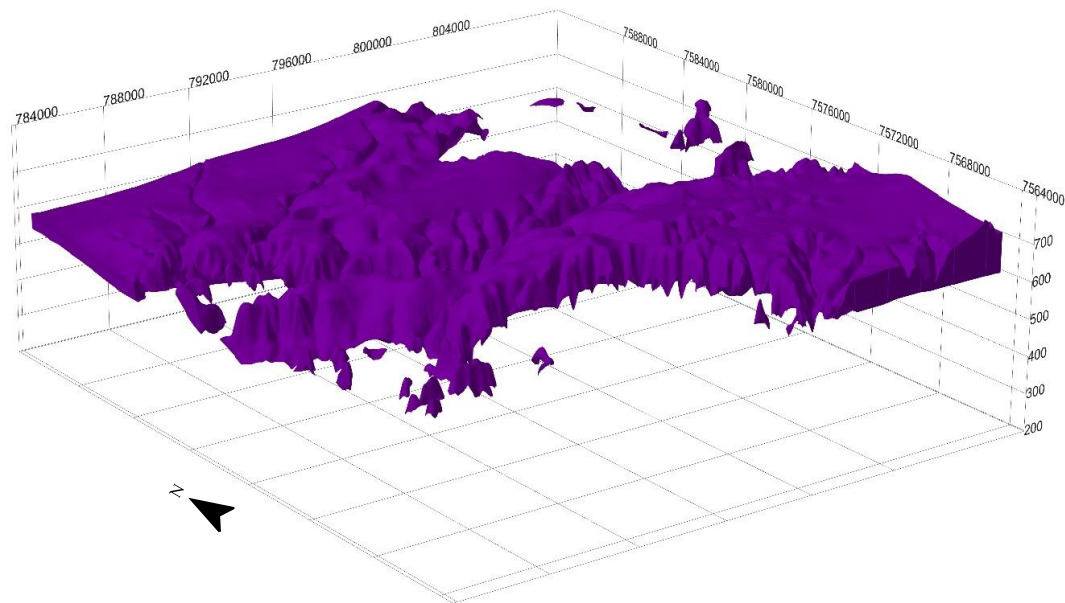
**Figura 84.** Distribuição espacial em bloco diagrama dos arenitos e siltitos da Formação Adamantina.

**Fonte:** Autor

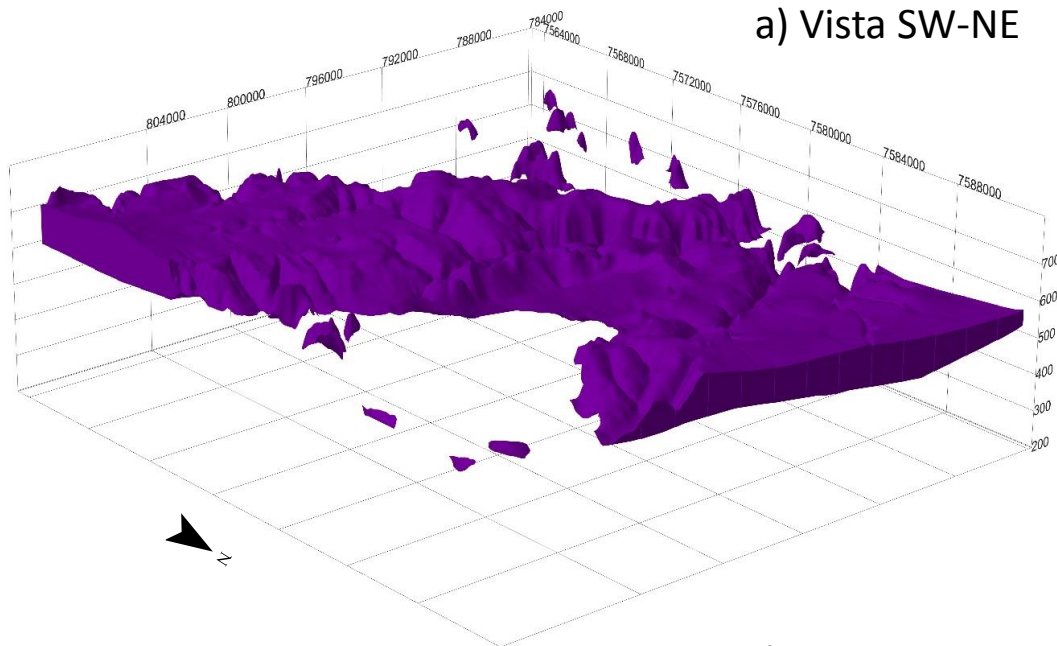
Os basaltos da Formação Serra Geral (Figura 85) estão distribuídos em 463,7 km<sup>2</sup> no eixo SE-NW e em alguns pontos isolados a nordeste e sudoeste, mas somente afloram em 238,3 km<sup>2</sup>, geralmente na porção central da área, no meio de encostas e na base dos canais de



drenagens. Os afloramentos ocorrem entre as cotas 560 e 740 metros, a espessura dessa litologia tem em média 100 metros, enquanto que o volume do pacote dos basaltos é de aproximadamente 37 km<sup>3</sup>.



a) Vista SW-NE



b) Vista NE-SW

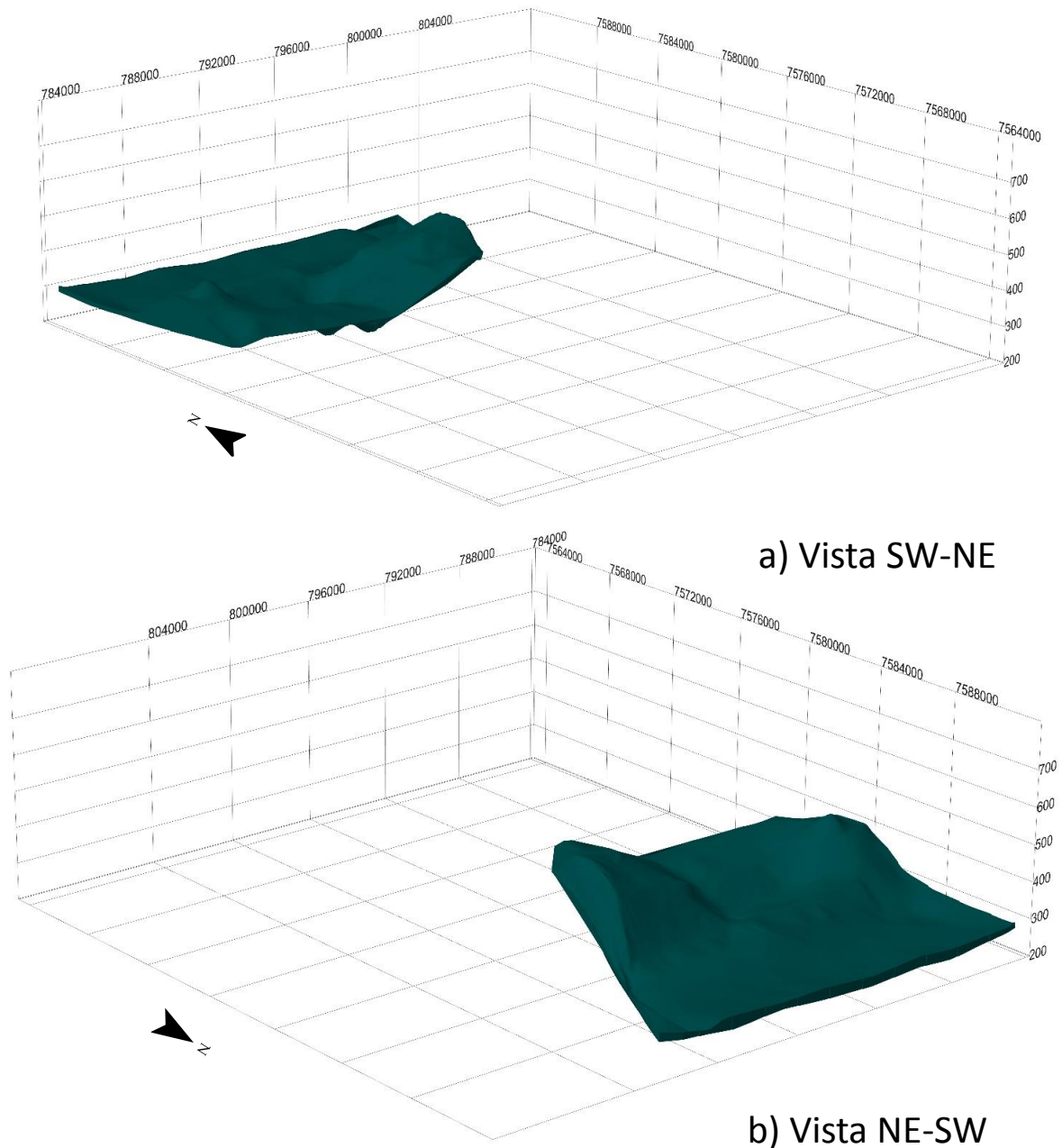
**Figura 85.** Bloco diagrama da espacilidade dos basaltos da Formação Serra Geral.

Fonte: Autor

Os *sills* de diabásio da Formação Serra Geral (Figura 86) estão distribuído em uma área de 198 km<sup>2</sup> a nordeste da região de Araraquara na forma de um sill nos arenitos da Formação



Pirambóia e nos Arenitos friáveis da Formação Botucatu. A espessura é menor que 20 metros ao longo da sua extensão, entretanto na sua borda mais ao sul tende a aumentar até aproximadamente 50 metros, e o volume total do corpo de diabásio é de 4,5 km<sup>3</sup>.

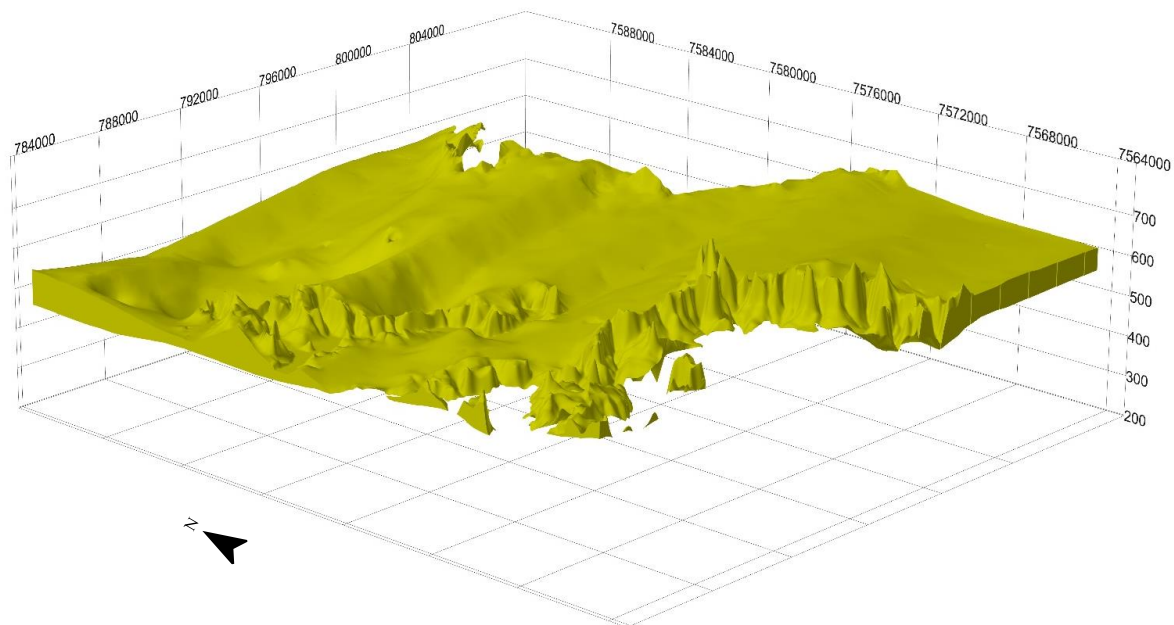


**Figura 86.** Bloco diagrama da distribuição dos sills de diabásio da Formação Serra Geral.

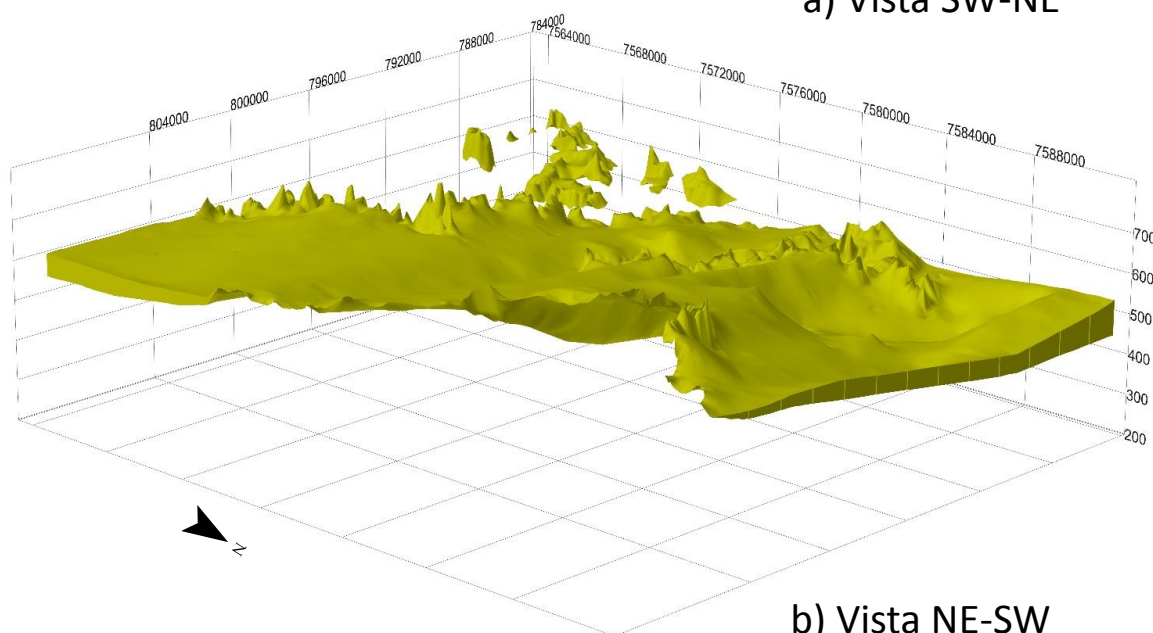
**Fonte:** Autor

Os arenitos silicificados da Formação Botucatu (Figura 87) estão distribuídos em 528 km<sup>2</sup> predominantemente ao longo do alinhamento SE-NW e afloram em 65 km<sup>2</sup> nas áreas de

maior declividade entre as cotas 450 e a 650 metros. Esta litologia está sotoposta aos basaltos da Formação Serra Geral e sobrepostos aos arenitos friáveis da Formação Botucatu. A espessura dessa litologia varia de 50 a 100 metros e o volume total do pacote é de 64,47 km<sup>3</sup>.



a) Vista SW-NE



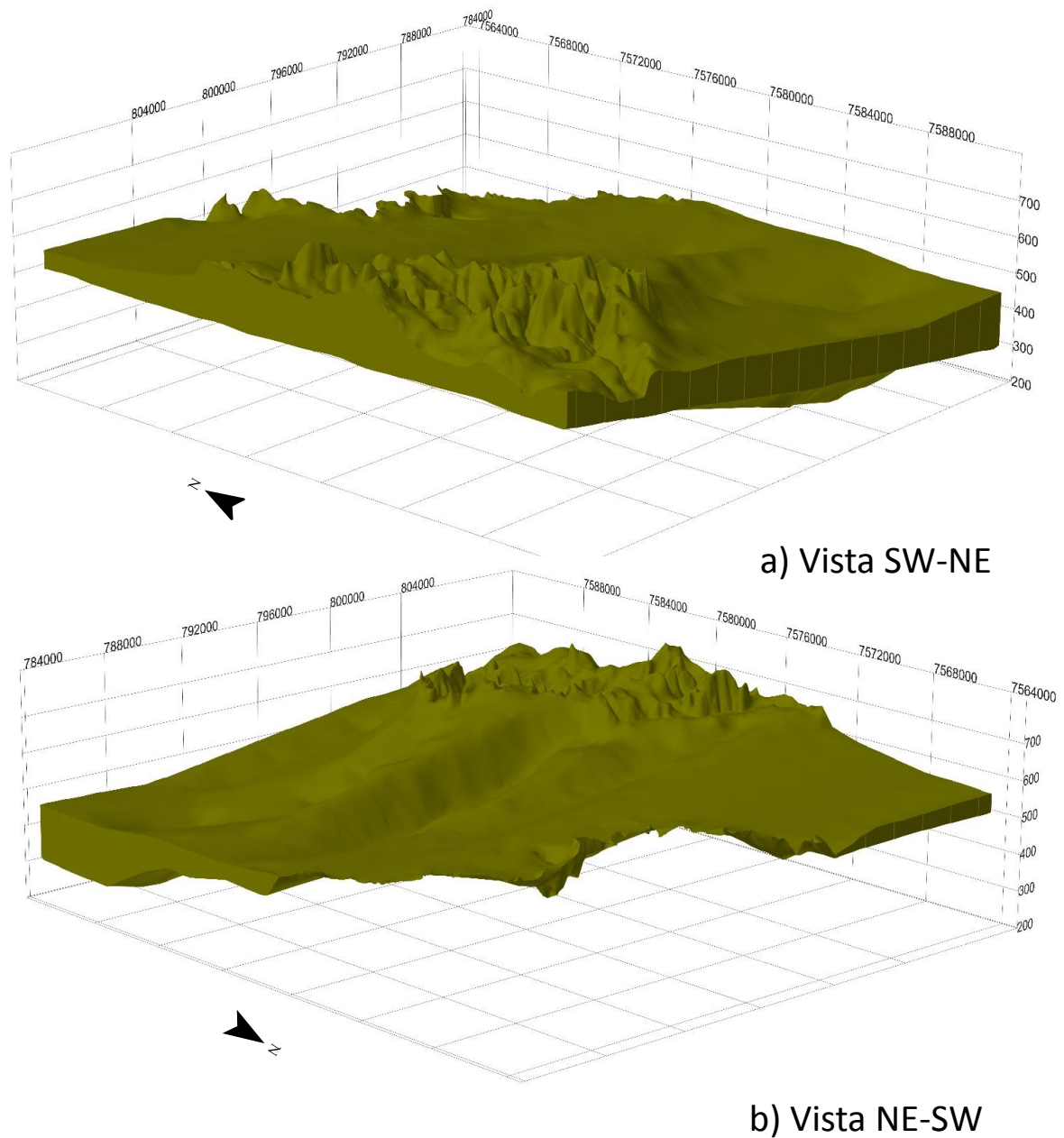
b) Vista NE-SW

**Figura 87.** Distribuição em bloco diagrama dos arenitos silicificados da Formação Botucatu.

**Fonte:** Autor

Os arenitos friáveis da Formação Botucatu (Figura 88) estão distribuídos em 616 km<sup>3</sup> e sobrepostos aos arenitos da Formação Pirambóia e sotopostos pelos arenitos silicificados da Formação Botucatu, afloram em uma área de 100 km<sup>2</sup> a nordeste entre as cotas 520 e 750

metros, com volume total dos pacotes de 57 km<sup>3</sup> e podem apresentar espessuras maiores que 150 metros e

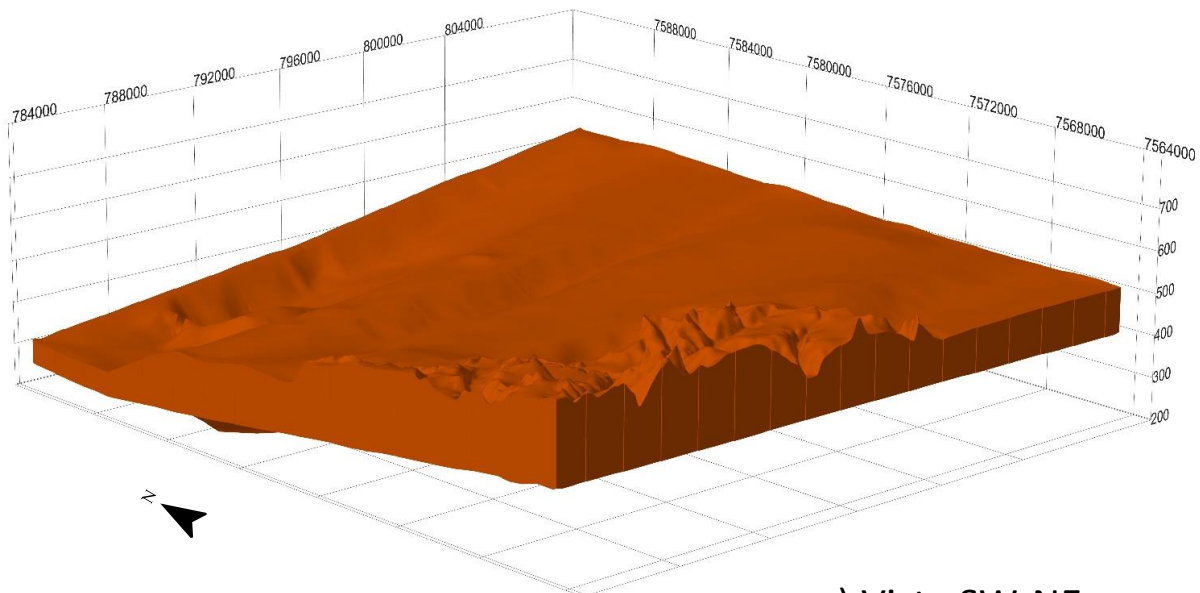


**Figura 88.** Bloco diagrama com a distribuição dos arenitos friáveis da Formação Botucatu que ocorrem na região de Araraquara.

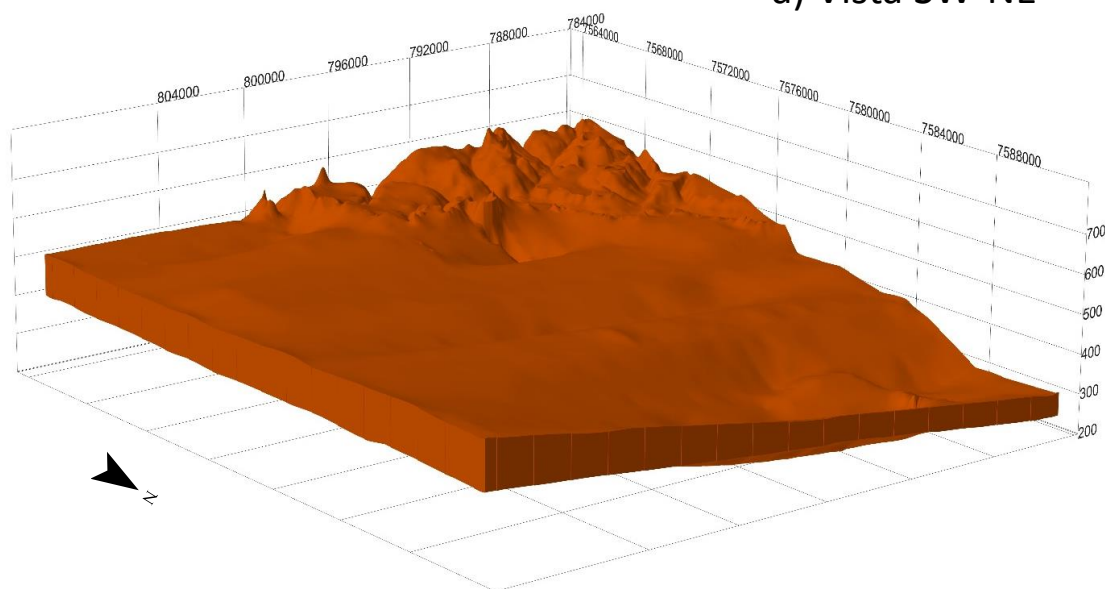
**Fonte:** Autor

Os arenitos da Formação Pirambóia (Figura 89) estão sotopostos aos arenitos friáveis da Formação Botucatu e afloram a sudoeste da área de estudo em 79,43 km<sup>2</sup> a partir de cotas próximas a 530 metros. Esta litologia está distribuída por toda a área de estudo (716,42 km<sup>2</sup>), com espessuras que podem atingir 200 metros a sul e leste da área de estudo, todavia tende a

diminuir a norte e oeste. É importante salientar que devido ao número pequeno de poços a sul da área de estudo, não foi possível identificar variações significativas da espessura.



a) Vista SW-NE



b) Vista NE-SW

**Figura 89.** Bloco diagrama retratando a espacialidade dos arenitos da Formação Pirambóia que ocorrem na região de Araraquara.

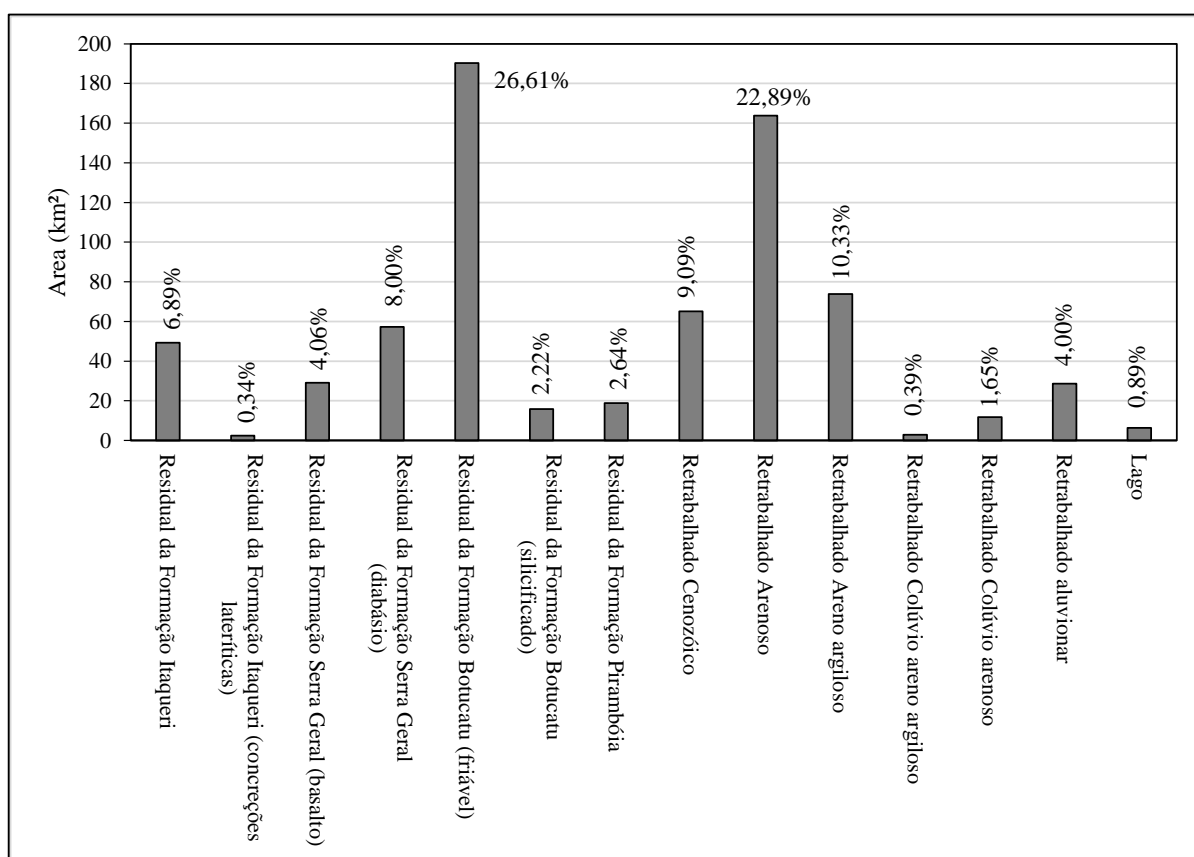
**Fonte:** Autor

### 5.3.3. Materiais inconsolidados e caracterização das unidades de condição de infiltração

Baseado nas orientações descritas no Item 4.2.6.5 foram identificadas e delimitadas 13 unidades de materiais inconsolidados nas regiões de São Carlos e Araraquara.

#### 5.3.3.1. Materiais inconsolidados presentes na Região de São Carlos

Na região de São Carlos das 13 unidades, ocorrem apenas 12, onde no Apêndice XI está contido o Mapa de Materiais inconsolidados da Região de São Carlos e na Figura 90 a respectiva distribuição das unidades em km<sup>2</sup> em porcentagem.



**Figura 90.** Distribuição em área e porcentagem dos materiais inconsolidados da região de São Carlos.

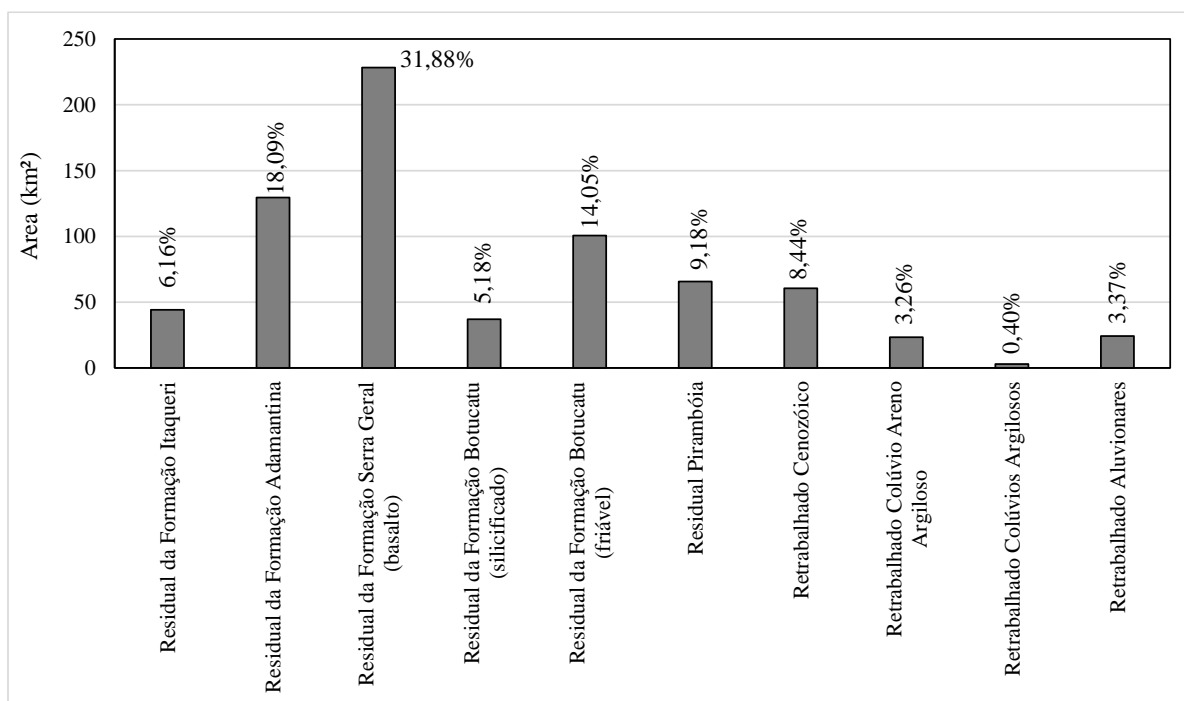
**Fonte:** Autor

Observa-se que os residuais da Formação Botucatu (friáveis) conjuntamente com os retrabalhados arenosos estão amplamente distribuídos e totalizam quase 50% (354,04 km<sup>2</sup>) da área de estudo. Estas unidades ocorrem principalmente a sul e a leste da RSC. As unidades que apresentam a menor distribuição são os residuais da Formação Itaqueri (concreções lateríticas) e da Formação Botucatu (silicificados), os retrabalhados Colúvios arenosos e areno argilosos localizados a leste, e os residuais da Formação Pirambóia a oeste. Estes quando somados totalizam 51,77 km<sup>2</sup>, área esta que não representa nem 10% do total. As unidades restantes (303,12 km<sup>2</sup> - 42,37%) corresponderam aos residuais da Formação Itaqueri, da Formação Serra

Geral (basaltos) e os retrabalhados Cenozóicos localizados na porção norte e leste, e os residuais da Formação Serra Geral (diabásios), os retrabalhados Arenos argilosos e os aluvionares que ocorrem no eixo SE-NW. Ressalta-se que devido à extensão da represa do Broa localizada a sul, esta foi considerada no cálculo de distribuição territorial.

### 5.3.3.2. Materiais inconsolidados presentes na Região de Araraquara

Na região de Araraquara, por sua vez, foram identificadas 10 unidades e no Apêndice XII está o mapa de materiais inconsolidados e na Figura 91 a área em km<sup>2</sup> e em porcentagem. Verificou-se que os residuais das Formações Serra Geral, Adamantina e Botucatu (friável) são as mais representativas espacialmente e tem como extensão 458 km<sup>2</sup> (64%). As unidades que apresentam a menor distribuição na região de Araraquara são os retrabalhados Aluvionares, Colúvios argilosos e Arenos argilosos, os quais ocupam uma área de 49 km<sup>2</sup> e representam 7 % da área de estudo. As unidades restantes são compostas pelos residuais das Formações Itaqueri, Botucatu silicificado e Pirambóia, bem como pelos retrabalhados cenozóicos e estão distribuídos em 195 km<sup>2</sup> (27,26%) ao longo da região.



**Figura 91.** Área e respectivas porcentagens dos materiais inconsolidados encontrados na região de Araraquara.

Fonte: Autor

#### 5.3.3.3. Caracterização das unidades de condição de infiltração

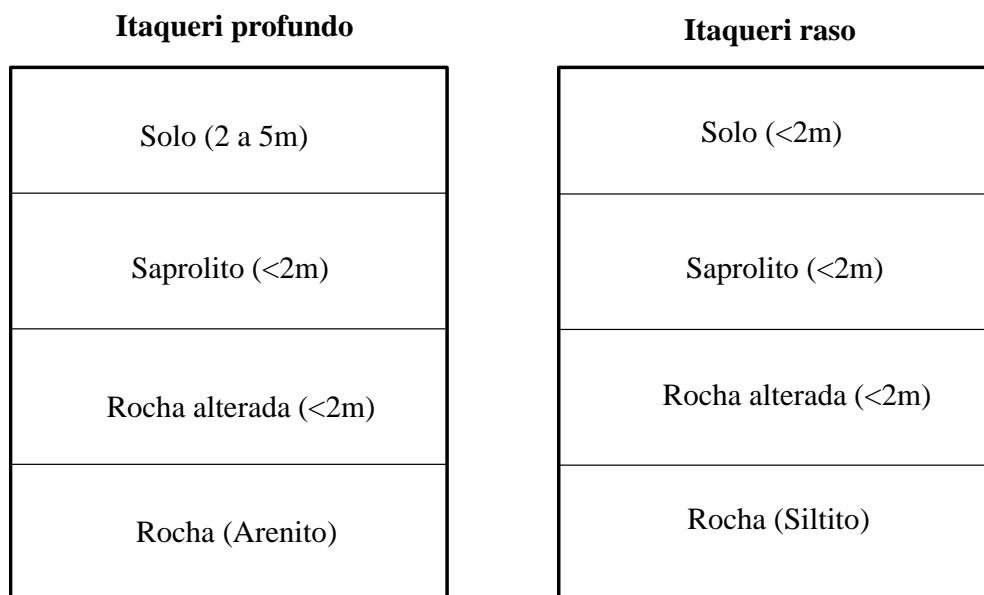
No total foram identificadas e caracterizadas 65 unidades de condições de infiltração, onde na Tabela 30 localizada no Item 5.4.1.2 tem-se um quadro resumo com as diferentes combinações identificadas entre os materiais inconsolidados e o manejo e tipo de uso do solo.

Com o objetivo de organizar a descrição e caracterização das diferentes unidades de condições de infiltração, as mesmas foram separadas por tipos de material inconsolidado conforme descrito a seguir. A descrição e caracterização contém informações a respeito das características gerais dos materiais inconsolidados (granulometria, massa específica dos sólidos, espessura, cor, minerais presentes, perfil de alteração, localização no terreno) e das condições de infiltração (massa específica seca de campo, porosidade, índice de vazios, conteúdo de água no solo, curva de retenção, capilaridade efetiva, curvas de infiltração e profundidade da frente de molhamento).

##### 5.3.3.3.1. Materiais inconsolidados residuais da Formação Itaqueri

Os residuais da Formação Itaqueri estão associados às colinas médias, predominantemente, e a morros arredondados em zonas. As texturas variam de arenosa a argilo arenosa, podendo ocorrer ainda pedregulhos em algumas porções. A coloração alterna principalmente entre avermelhada a amarelada. Os minerais que estão presentes nesse material são: quartzo, caulinita, gibsitita, ilita e esmectitas. A espessura do pacote dessa unidade varia em função da litologia de origem. Na Figura 92 é possível observar dois perfis de alteração esquemáticos, um com solos mais profundos que são oriundos do intemperismo dos arenitos e outro mais rasos que se originaram dos siltitos e argilitos (Figura 93).





**Figura 92** - Perfis de alteração esquemáticos dos materiais inconsolidados residuais da Formação Itaqueri considerando à variabilidade de espessura e das litologias.

Fonte: Autor

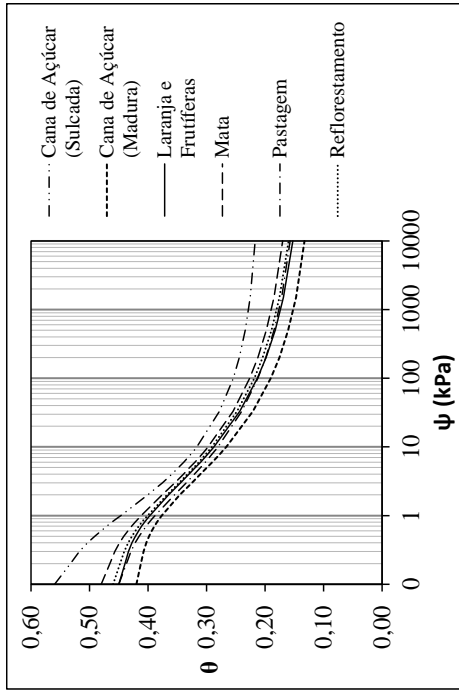


**Figura 93.** Exemplo de um perfil de alteração de um residual da Formação Itaqueri oriundos dos siltitos e argilitos.

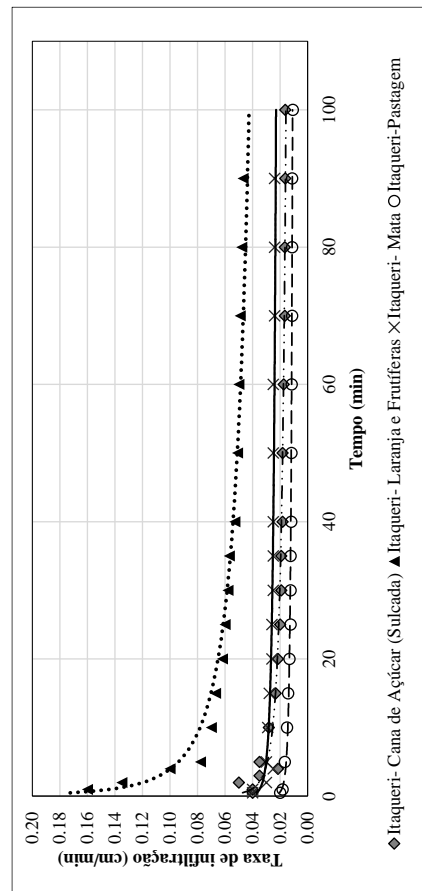
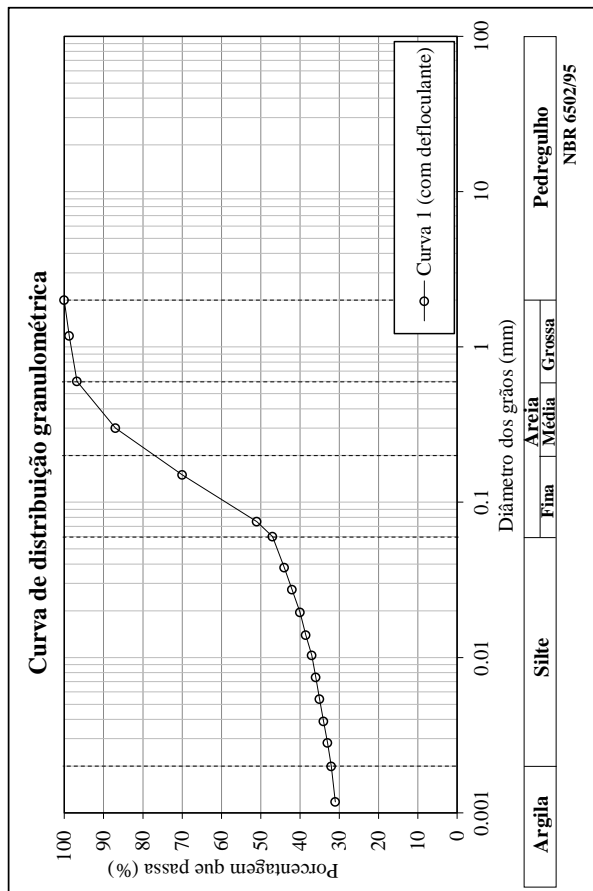
Fonte: Autor

Associado a estes materiais inconsolidados foram mapeados 5 tipos de usos do solo, os quais foram cana de açúcar (sulcada e madura), laranja e outras espécies frutíferas, mata, pastagem e reflorestamento. Na Figura 94 são mostrados os resultados de laboratório e campo das diferentes condições de uso e ocupação nos residuais da Formação Itaqueri.





Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,669 ± 0,129					
Uso do solo	Cana de açúcar (sulcada)	Cana de açúcar (madura)	Laranja e frutíferas	Mata	Pastagem	Reflorestamento
Unidade de condição de infiltração*1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Massa específica seca (g/cm³)	1,176	1,600	1,510	1,400	1,431	1,460
Porosidade	0,56	0,42	0,45	0,47	0,45	0,46
Índice de vazios	1,27	0,72	0,82	0,89	0,82	0,85
Argila (%)	33,0 *2					
Silte (%)	14,0 *2					
Areia fina (%)	30,0 *2					
Areia média + Areia grossa (%)	23,0 *2					
Textura *2	Franco argilo arenoso					
Coefficiente de Campbell (1974)	7,12	7,12	7,12	7,12	7,12	7,12
Coefficiente de sucção de saturação de Cambell (1974) (cm)log	8,63	8,63	8,63	8,63	8,63	8,63
Umidade equivalente (g/g)	0,284	0,157	0,178	0,205	0,188	0,188
Capilaridade efetiva (cm)	2,20	5,44	4,22	3,22	3,36	3,69



\*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades de infiltração.  
 \*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassella *et al.*, (2002).  
 \*3 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).

**Figura 94.** Resultados da caracterização das condições de infiltração presentes nos residuais da Formação Itaqueri.

Fonte: Autor

Observa-se que os residuais das Formação Itaqueri conforme a classificação da USDA (2017) são considerados franco argilo arenosos e apresentam em média 33% de argila, 14% de silte, 30% de areia fina, 21% de areia média e 2% de areia grossa. A massa específica seca de campo apresentou variações significativas entre os tipos de uso e manejo do solo, onde os que apresentaram os maiores valores foram a cana de açúcar madura ( $1,600 \text{ g/cm}^3$ ) e a laranja e outras espécies frutíferas ( $1,510 \text{ g/cm}^3$ ). Por outro lado, o que estava menos compactado foi a cana de açúcar sulcada com valor abaixo de  $1,200 \text{ g/cm}^3$ . Os remanescentes compreenderam as matas, reflorestamentos e pastagens os quais apresentaram valores que variam entre 1,4 a  $1,46 \text{ g/cm}^3$ . A variabilidade identificada na compactação do solo refletiu diretamente na porosidade e nos índices de vazios, que tiveram como máximos 0,56 e 1,27 e mínimos 0,42 e 0,72 respectivamente.

O comportamento da curva infiltração nas diferentes condições de infiltração foi bastante distinto. Verificou-se que a combinação que apresentou os menores valores de capacidade de infiltração foram as pastagens e a cana de açúcar madura ( $0,0083 \text{ cm/min}$ ). Este fato é explicado principalmente pelos altos valores de  $\rho_d$ , os quais refletiram diretamente nos valores de porosidade baixos, que sugere menos vazios para água infiltrar. Em contrapartida, a que apresentou a maior capacidade de infiltração foi a laranja e outras espécies frutíferas ( $0,050 \text{ cm/min}$ ), entretanto esperava-se um valor inferior ao encontrado por conta da massa específica seca de campo encontrada ( $1,51 \text{ g/cm}^3$ ). Provavelmente as altas taxas de infiltração estão associadas a presença de macroporos no lugar ensaiado ou a algum processo de manejo que alterou a estrutura do solo. Ressalta-se que as curvas referentes a cana de açúcar madura e o reflorestamento não foram inseridas no gráfico, pois apresentam comportamento semelhante ao de pastagem e mata respectivamente

Ao analisar os resultados de capilaridade efetiva, verificou-se que a sucção na frente de molhamento está diretamente relacionada com o tipo de uso e manejo do solo. Por exemplo, a cana de açúcar madura ( $5,44\text{cm}$ ) quando comparada a cana de açúcar sulcada ( $2,20\text{cm}$ ) apresenta uma grande diferença ( $3,24\text{cm}$ ), tal resultado está ligado diretamente ao valor de massa específica seca de campo.

No que tange as curvas de retenção de água dos materiais inconsolidados residuais da Formação Itaqueri, identificou-se 3 grupos com comportamentos distintos. O primeiro referente aquelas unidades que apresentam uma menor retenção de água (cana de açúcar sulcada) e pressões de entrada ar mais baixa. O segundo é composto pela cana de açúcar madura e está associado ao grupo de maior retenção e valores de pressão de entrada de ar. O terceiro, por sua

vez, relaciona-se a laranja e outras espécies frutíferas, pastagem e reflorestamento e corresponde as curvas que estão entre as dos dois grupos mencionados anteriormente.

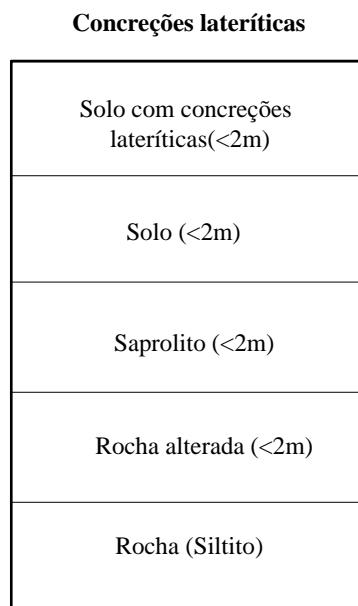
#### 5.3.3.3.2. Materiais inconsolidados residuais da Formação Itaqueri (concreções lateríticas)

Os residuais da Formação Itaqueri ocorrem com a presença de concreções lateríticas (Figura 95), e apresentam como perfil de alteração esquemático típico o mostrado na Figura 96. Geralmente estas ocorrem em zonas com grande variabilidade da declividade (Figura 97). Este tipo de material possui nodulações endurecidas, normalmente de coloração avermelhadas, amareladas e violáceas. Apresenta textura variada, entretanto tende a ser um solo mais argiloso. Os minerais encontrados neste material são quartzo, caulinita, hematita, limonita e goetita.



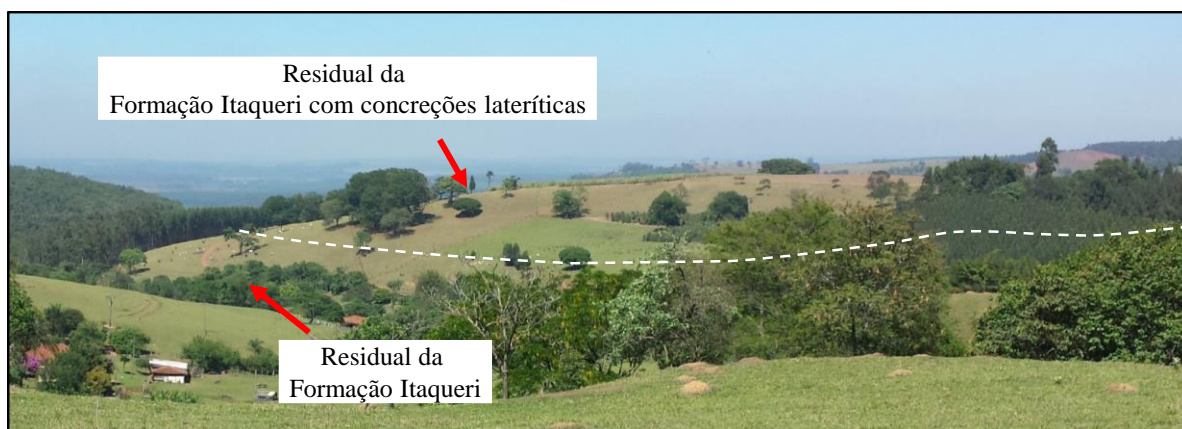
**Figura 95.** Vista da ocorrência das concreções lateríticas nos residuais da Formação Itaqueri.

**Fonte:** Autor



**Figura 96.** Perfil de alteração esquemático típico dos materiais inconsolidados residuais da Formação Itaqueri com concreções lateríticas

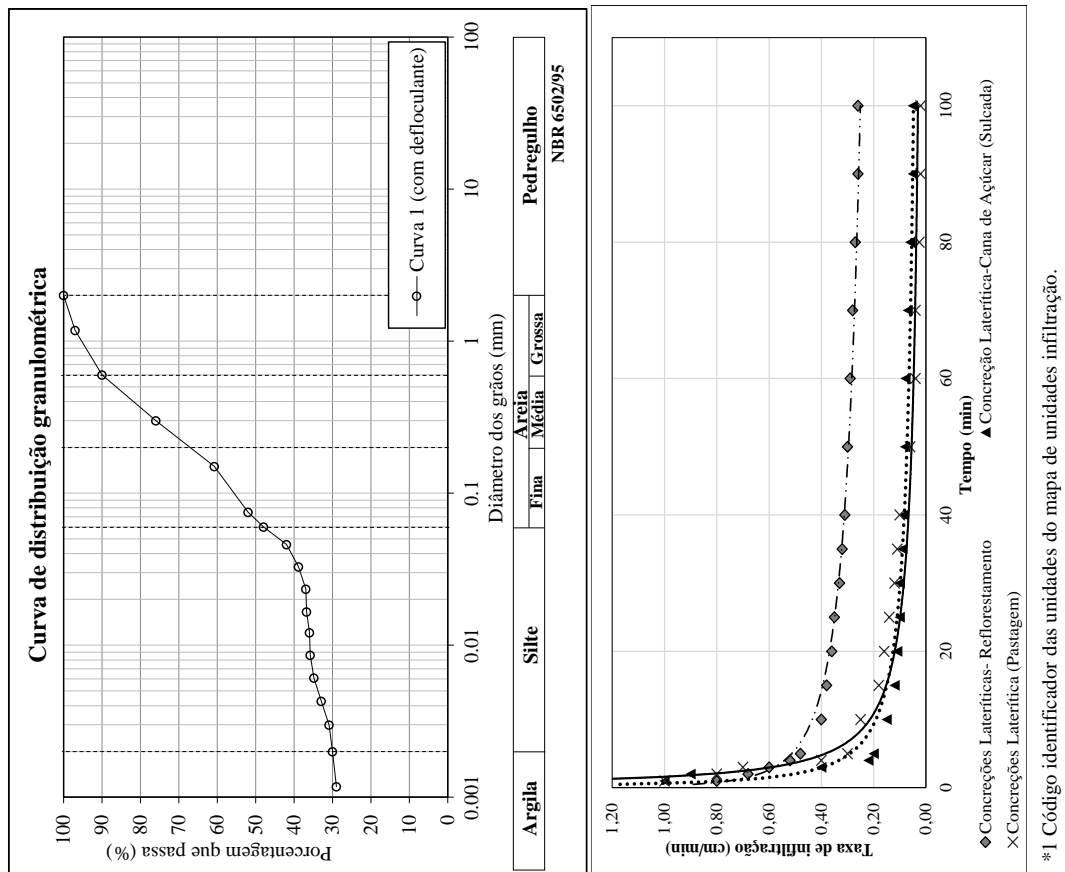
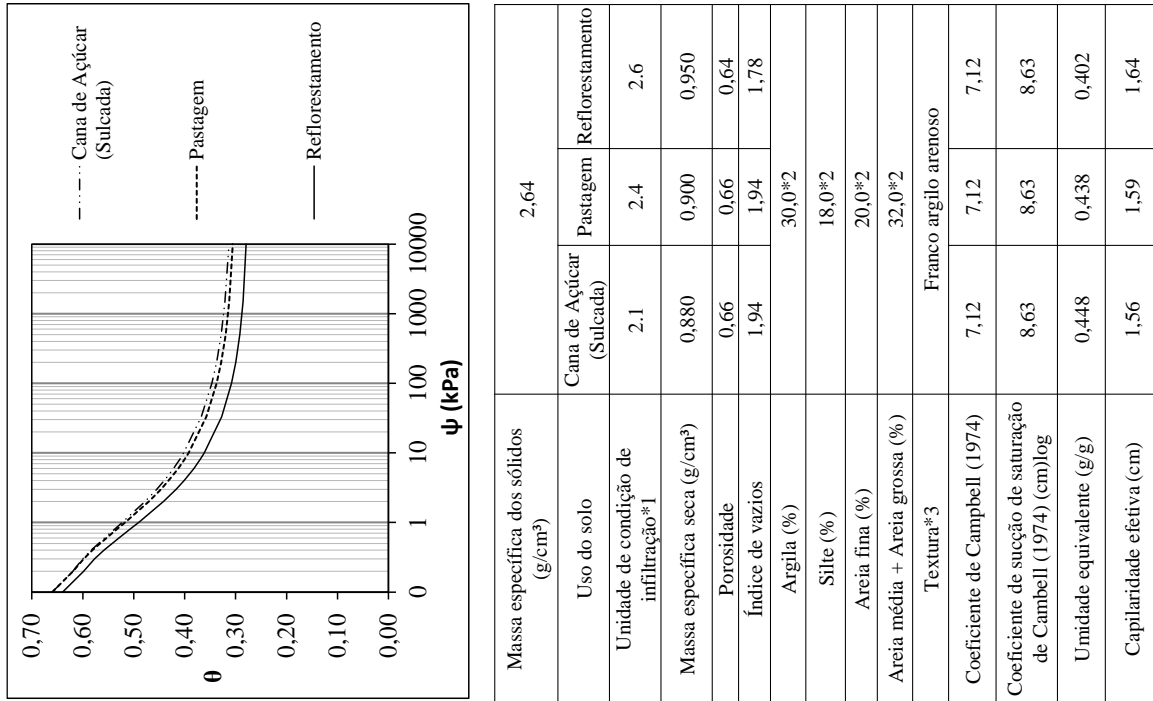
Fonte: Autor



**Figura 97.** Vista geral da ocorrência dos materiais inconsolidados residuais da Formação Itaqueri com concreções lateríticas.

Fonte: Autor

Os usos do solo identificados nas concreções lateríticas se resumem basicamente a pastagem, reflorestamento e cana de açúcar sulcada. Na Figura 98 tem-se um quadro dos resultados de ensaios de laboratório e de campo das diferentes condições de uso e ocupação nos residuais da Formação Itaqueri com concreções lateríticas.



**Figura 98.** Quadro resumo da caracterização das unidades de condições de infiltração presentes nos residuais da Formação Itaqueri com concreções lateríticas.

Fonte: Autor

\*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades de infiltração.  
 \*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica I para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassela *et al.* (2002).  
 \*3 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).

Os resultados obtidos dos trabalhos de campo e ensaios em laboratório quanto as frações granulométricas em média foram de 30% de argila, 18 % de silte, 20% de areia fina, 22% de areia média e 10% de areia grossa. Segundo a classificação da USDA (2017) este material inconsolidado foi considerado como franco argilo arenoso. A massa específica dos sólidos encontrada foi de 2,64 g/cm<sup>3</sup>. A massa específica seca de campo foi considerada baixa para todas os usos do solo a qual variou de 0,880 a 0,950 g/cm<sup>3</sup>. Esse resultado está relacionado à estrutura das concreções lateríticas, que estão associadas a presença de meso até macroporos.

Em relação a curva de infiltração, verifica-se que independentemente do tipo de uso e manejo do solo a infiltração inicial é muito alta, entretanto para a capacidade de infiltração ocorreram diferenças significativas. As áreas ocupadas por reflorestamento apresentaram valores de 0,26cm/min, os quais são considerados altos, porém estão associados à macroporosidade típica desses solos. Por outro lado, a pastagem e cana de açúcar sulcada geraram valores de 0,020 e 0,045 cm/min respectivamente, os quais podem estar associados ao fato das camadas inferiores estarem mais compactadas que a superficial.

Ao analisar as curvas de retenção de água, observou-se uma pequena variação entre a cana de açúcar sulcada e a pastagem com o reflorestamento. Todavia, esperava-se que todas as curvas apresentassem um menor potencial de retenção, fato este pode ser explicado pela presença de 48 % de finos.

A capilaridade efetiva para todos os tipos de uso e manejo do solo, assim como a sua variabilidade são consideradas baixas (<1,64cm / desvio padrão de 0,04cm), mesmo que os materiais inconsolidados apresentem valores significativos das frações argila e silte. Baseado na diferença entre  $\rho_d$  máximo (0,95 g/cm<sup>3</sup>) e o mínimo (0,88g/cm<sup>3</sup>), esperava-se encontrar uma maior variabilidade, o que revela que para valores de  $p_d$  muito baixos, a capilaridade efetiva não apresenta grandes variações.

#### 5.3.3.3. Materiais inconsolidados residuais da Formação Adamantina

Os Residuais da Formação Adamantina encontram-se na região de Araraquara, associados predominantemente à colinas médias. Os principais minerais presentes são: quartzo, caulinita e gibsitita. A sua espessura é variável e pode alcançar até mais de 10 metros quando o residual for maduro. Na Figura 99 ver-se um perfil de alteração esquemático. Este material inconsolidado apresenta coloração rosada (saproilito e residual jovem) a laranja amarronzado (residual maduro) (Figura 100), com texturas predominantemente areno-argilosas.



**Figura 99.** Perfil de alteração esquemático dos materiais inconsolidados residuais da Formação Adamantina.

**Fonte:** Autor



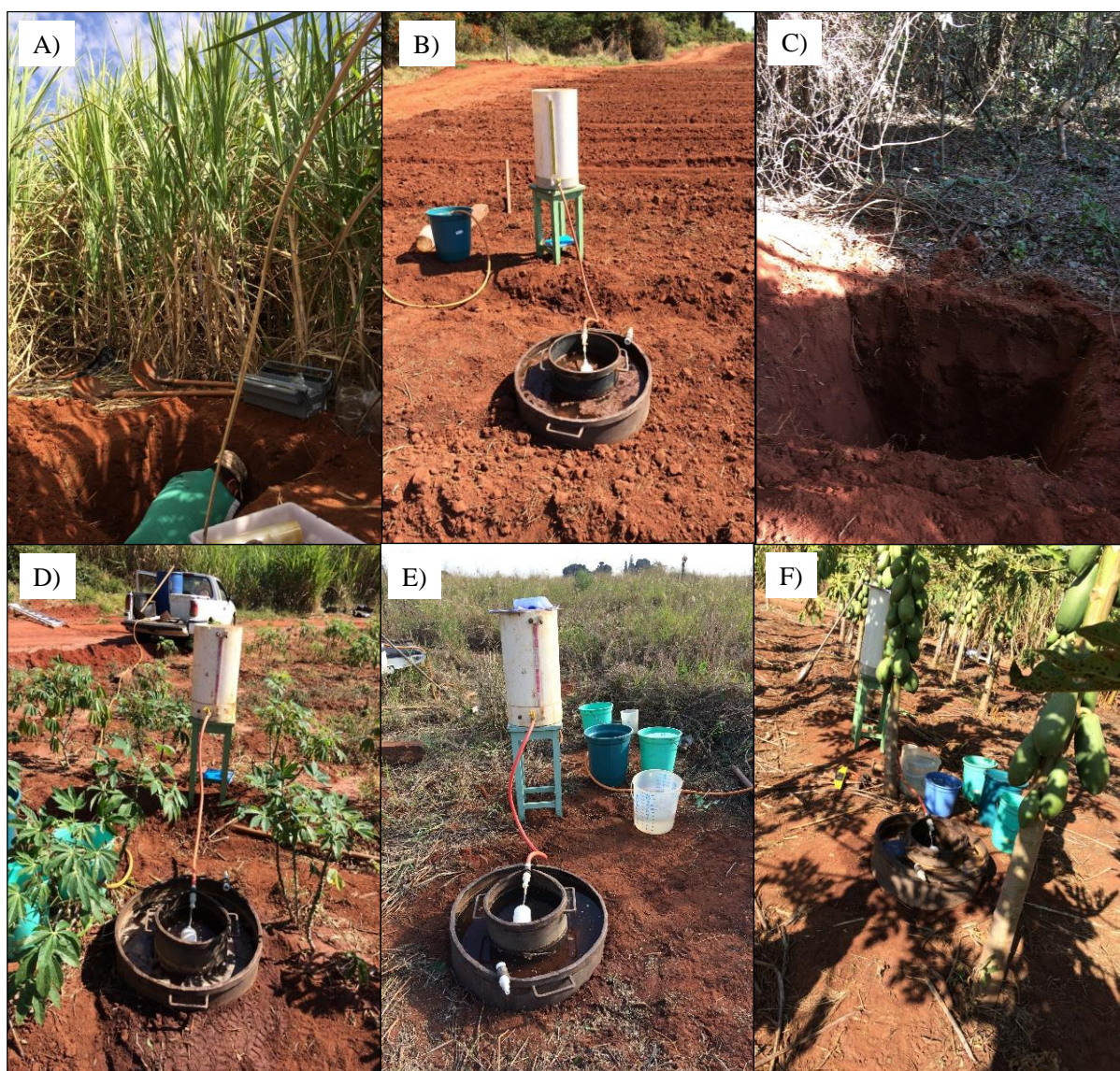
**Figura 100.** Exemplo de um perfil do residual maduro (solo) da Formação Adamantina.

**Fonte:** Autor

Os usos identificados e delimitados (Figura 101) nos residuais da Formação Adamantina são: cana de açúcar, laranja e outras espécies frutíferas, mata, pastagem, mandioca e solos preparados para plantio. A seguir, afim de caracterizar a variabilidade geológico geotécnica



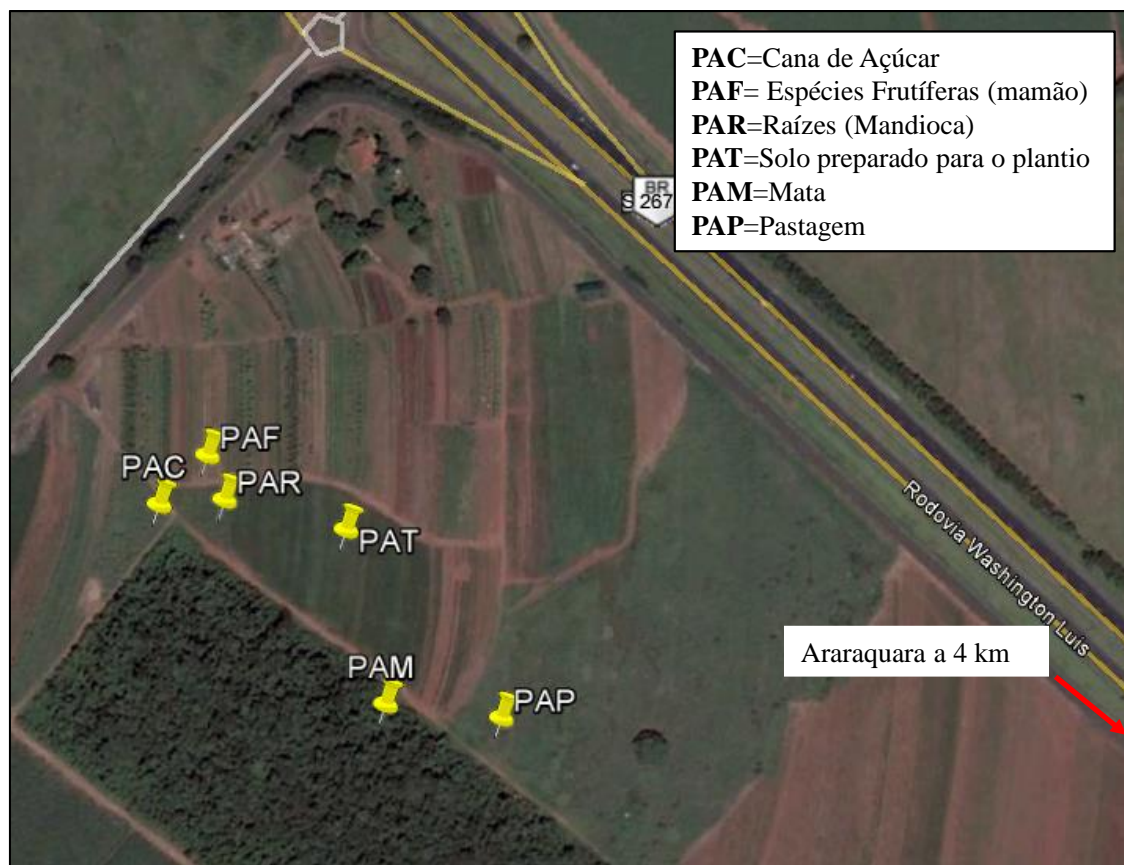
deste material são mostrados os resultados de diversos ensaios executados, sejam eles de campo e/ou laboratório para os diferentes tipos de usos e manejos do solo. Os pontos ensaiados estão localizados em uma área chave no município de Araraquara, as margens da rodovia Washington Luís (SP 310), com coordenadas centrais 7784608,2 e 7590399,3 (UTM 22), conforme observados no croqui da Figura 102. Na Figura 103 são mostrados os resultados de ensaios de laboratório e de campo das diferentes condições de uso e ocupação associados aos materiais inconsolidados residuais da Formação Adamantina.



**Figura 101.** Exemplo dos diferentes tipos de usos identificados nos residuais da Formação Adamantina: A) cana de açúcar, B) solo preparado para o plantio, C) mata, D) raízes (mandioca), E) pastagem e F) laranja e outras espécies frutíferas (mamão).

Fonte: Autor





**Figura 102.** Croqui da localização dos pontos ensaiados e amostrados dos materiais inconsolidados residuais da Formação Adamantina.

**Fonte:** Autor

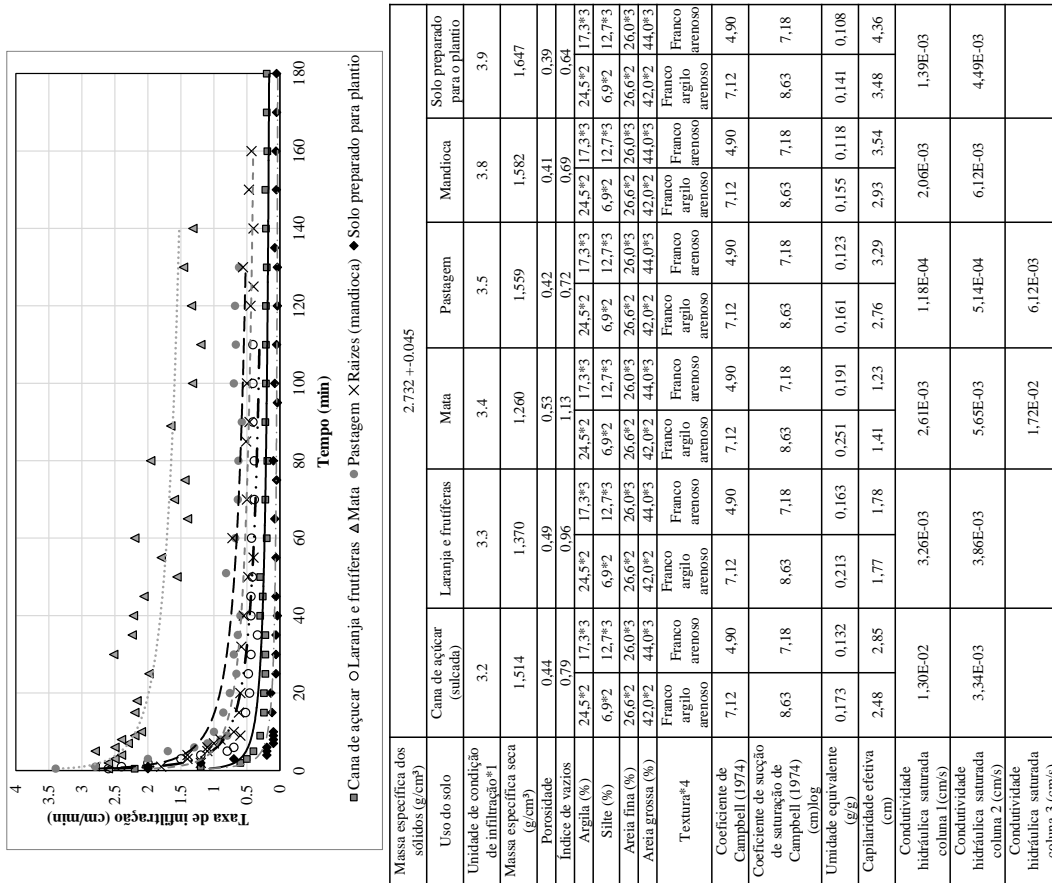


Figura 103. Resultados da caracterização das unidades de condições de infiltração associadas aos materiais inconsolidados residuais da Formação Adamantina.

Fonte: Autor

#1 Código identificador das unidades do mapa de unidades de infiltração.

#2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 (com defloculante) para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da função de pedotransferência de Tomassella et al., (2002)

#3 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 4 (sem defloculante) para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da função de pedotransferência de Tomassella et al., (2002)

#4 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).

Para a análise granulométrica e da massa específica dos sólidos por conta da proximidade entre os locais ensaiados selecionou-se amostras apenas de uma das trincheiras escavadas, a qual correspondeu a plantação de mandioca como uso. Assumiu-se portanto, que não haveria uma variabilidade espacial significativa desta propriedade. Para cada trincheira foram amostradas 3 profundidades de 20, 60 e 100 cm, afim de averiguar se em profundidade haveria uma heterogeneidade.

Os resultados da análise granulométrica mostram que com o uso de defloculante, os residuais da Formação Adamantina apresentam textura Franco areno-argilosa, nos quais verificou-se ainda um aumento da quantidade de argila a metro de profundidade. Ao comparar com as curvas sem defloculante, observou uma diminuição na porcentagem de finos, que refletiu na mudança de classificação textural para franco arenosa. A profundidade amostrada que teve a maior variabilidade foi a 1 metro, na qual praticamente não foram identificadas partículas de argilas, que conseqüentemente conferiu um comportamento de um solo de textura areno siltosa.

Os resultados dos ensaios de massa específica dos sólidos, foi verificado uma pequena variação em profundidade, onde a 20 cm de profundidade obteve-se  $2,681 \text{ g/cm}^3$  e a 100cm  $2,768 \text{ g/cm}^3$ .

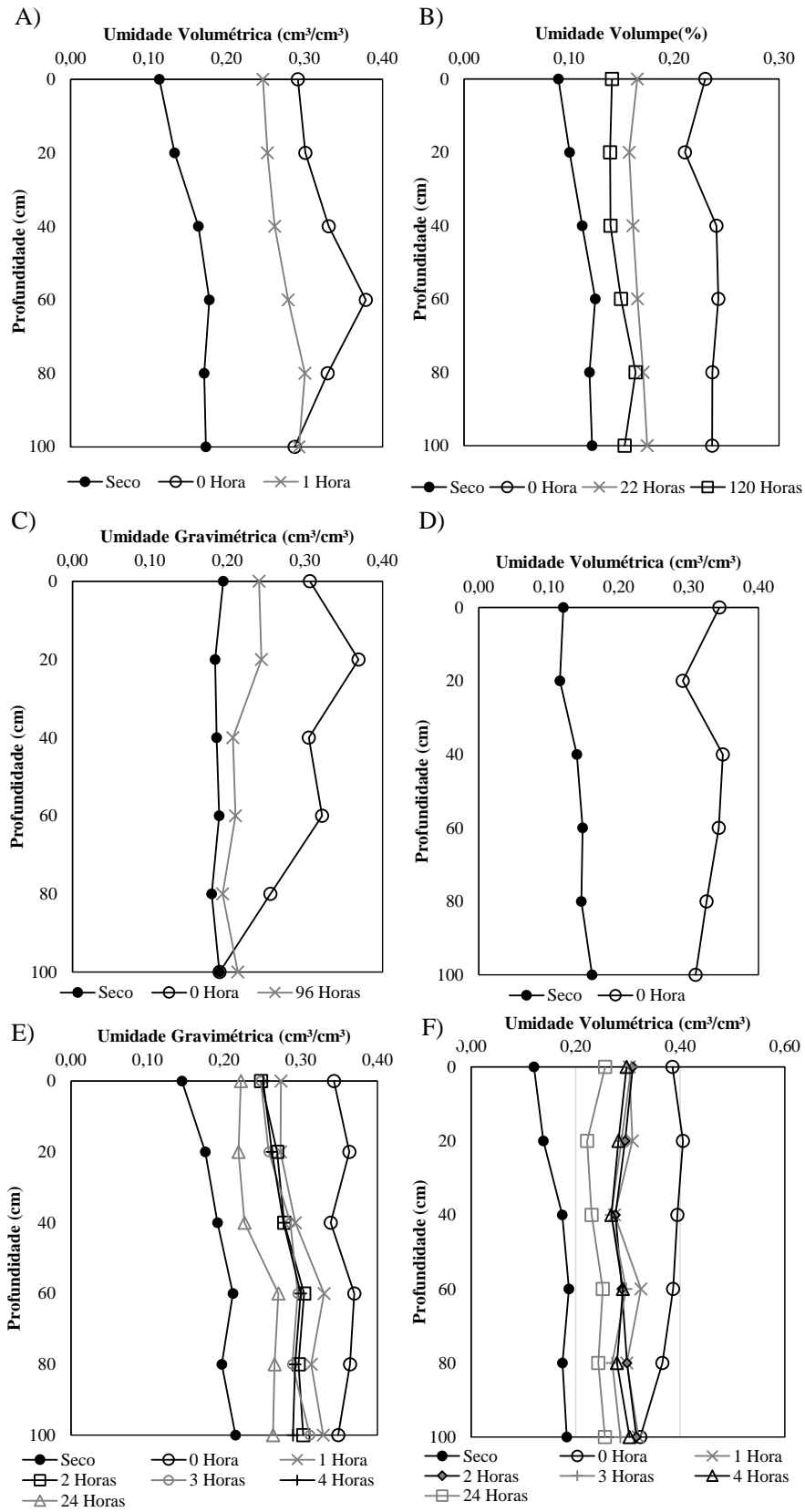
Em termos de compactação os tipos de usos de solo e respectivos manejos apresentaram diferenças significativas, onde as matas ( $1,260 \text{ g/cm}^3$ ) e a laranja e outras espécies frutíferas ( $1,370 \text{ g/cm}^3$ ) apresentaram os menores valores de massa específica seca de campo. Enquanto que o solo preparado para o plantio ( $1,647 \text{ g/cm}^3$ ) foi o que se encontravam mais compactado, entretanto esperava-se que tivesse um valor de massa específica seca de campo menor devido ao processo de preparo do solo. Os tipos de uso e manejo do solo remanescentes como a cana de açúcar sulcada, pastagem e mandioca apresentaram valores que variam entre 1,51 a 1,58  $\text{g/cm}^3$ .

Por conta dos diferentes graus de compactação e de porosidade, a capilaridade efetiva obtida a partir das frações granulométricas sem defloculante variou significativamente em torno de 3 cm entre os usos do solo mais e menos compactado.

A curva de retenção apresentou dois grupos de comportamento, o primeiro os quais não apresentavam a zona de efeito limite evidente, onde trajetória da curva já inicia na zona de transição. Neste grupo os valores de pressão de entrada de ar são baixos e os usos estão relacionados à mata e alaranja e outras espécies frutíferas. O segundo grupo é formado pelos outros usos e manejos, os quais apresentam a zona de efeito limite mais definida e apresentou valores maiores de pressão de entrada de ar.

Os ensaios de duplo anel mostram uma grande variabilidade para as unidades de condição de infiltração dos residuais da Formação Adamantina, com média de 0,534 cm/min e desvio padrão de 0,447 cm/min. O maior valor foi na mata com 1,244 cm/min, tal resultado ocorreu provavelmente por conta da atividade de animais e das raízes que promoveram o surgimento de macroporos. Por outro lado, o valor obtido para solo preparado para o plantio foi o menor (0,047 cm/min), todavia neste tipo de uso esperava-se um valor maior da capacidade de infiltração. A razão para este valor abaixo do esperado está associada ao fato que a camada que foi preparada era rasa (<que 10 cm), e a subsequente a 20 cm encontrava-se bastante compactada (1,647 g/cm<sup>3</sup>).

Afim de avaliar os resultados dos ensaios de infiltração, analisou-se os perfis de distribuição de água no solo (Figura 104) obtidos antes e depois da sua execução. Verifica-se que em quase todos os ensaios realizados, a frente de molhamento era superior a 1 metro de profundidade, exceto para o solo preparado para o plantio, que estava localizada ao redor de 1 metro. No geral a água distribuiu de forma rápida e uniforme ao longo do perfil após o término do ensaio.



**Figura 104.** Perfis de distribuição de água para cada unidade de condição de infiltração ensaiada nos residuais da Formação Adamantina: A) cana de açúcar, B) laranja e outras espécies frutíferas (mamão), C) solo preparado para o plantio, D) mata, E) pastagem e F) raízes (mandioca).

Fonte: Autor

Os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica saturada em coluna com carga constante para as unidades de condição de infiltração com laranja e outras espécies frutíferas, mata, pastagem e mandioca apresentaram valores inferiores aos ensaios *in situ*. Este resultado é esperado devido à maior possibilidade da presença de macroporos no campo. Além disso, no campo geralmente espera-se que a presença de macroporos tendam a interferir mais no resultado do que em laboratório, por conta dos caminhos preferenciais. Para a cana de açúcar jovem e o solo preparado para o plantio a condutividade hidráulica saturada foi maior provavelmente por um volume maior de macroporos. Na Figura 105 é possível observar a presença de diversos macroporos em uma amostra do solo preparado para o plantio.



**Figura 105.** Presença de macroporos em um residual da Formação Adamantina em uma amostra do solo preparado para o plantio.

**Fonte:** Autor

#### 5.3.3.3.4. Materiais inconsolidados residuais da Formação Serra Geral

Os materiais inconsolidados residuais da Formação Serra Geral apresentam no geral textura argilosa com coloração avermelhada a marrom. Frequentemente ocorrem em todas as posições no terreno em virtude da disposição dos derrames e dos *sills* e o estágio dos processos erosivos. Os principais minerais presentes nestes materiais inconsolidados são: quartzo, caulinita, esmectitas, limonita, magnetita, hematita, goetita e ilmenita. Em geral, são pouco

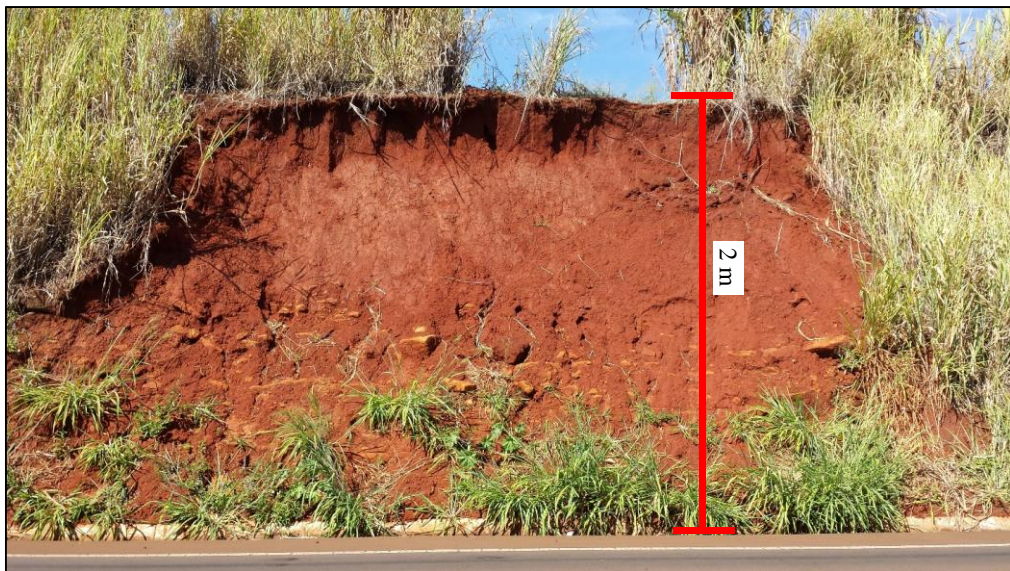


espessos e jovens quando localizados em encostas com altas declividades (Figura 106). Entretanto quando estão em fundos de vales ou em encostas menos íngremes tendem a ser mais profundos (Figura 107). Em termos de diferenciação entre os materiais inconsolidados originados do basalto e do diabásio, o do último tende a ser mais espesso, como é possível verificar nos perfis de alteração esquemáticos apresentados na Figura 108.



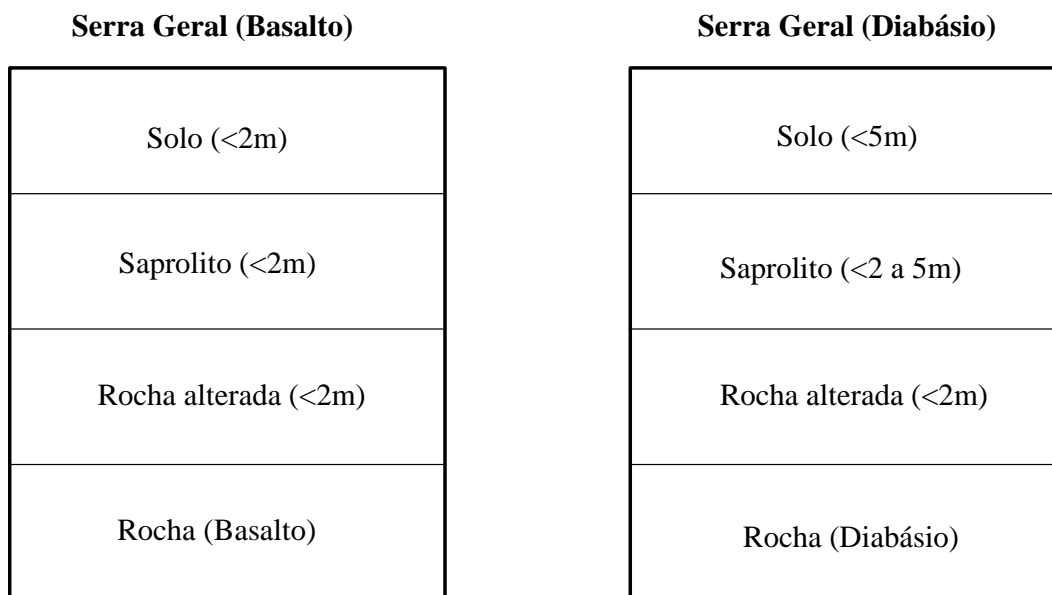
**Figura 106.** Exemplo de perfil de material inconsolidado residual da Formação Serra Geral pouco evoluído localizado em uma área com maior declividade.

Fonte: Autor



**Figura 107.** Exemplo de perfil de material inconsolidado residual da Formação Serra Geral localizado em uma área de declividade mais suave, o qual apresenta uma espessura maior que a da Figura 106.

Fonte: Autor

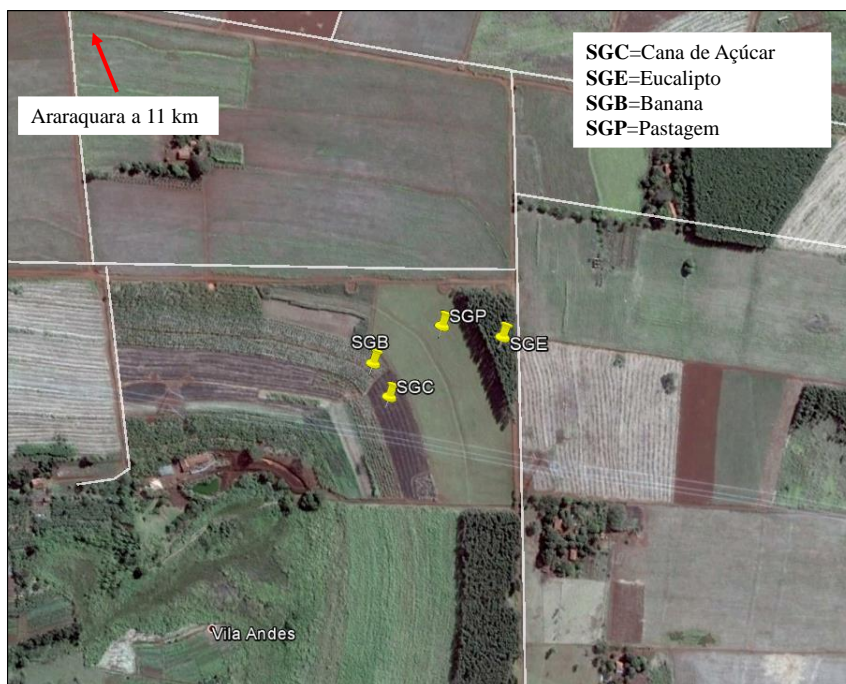


**Figura 108.** Perfis de alteração esquemáticos dos materiais inconsolidados residuais da Formação Serra Geral baseado na litologia que os originou.

**Fonte:** Autor

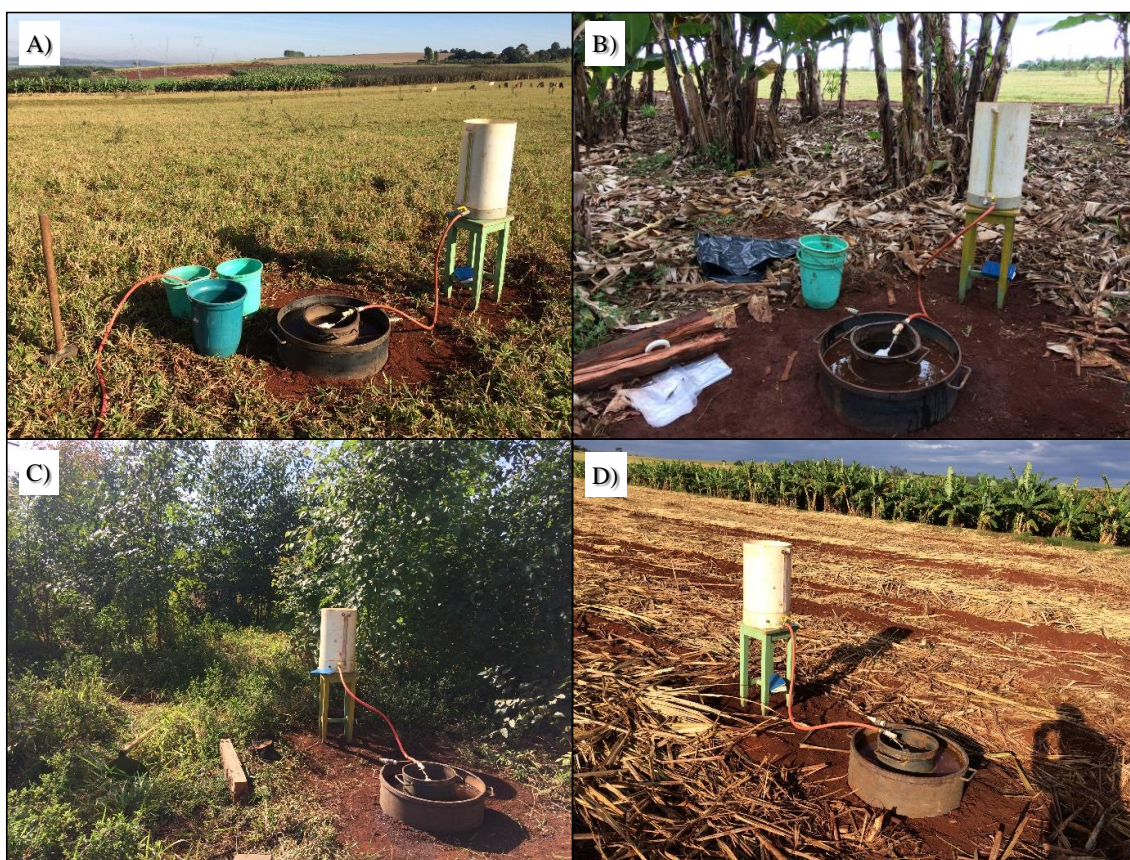
No total foram identificados 5 tipos de unidades de condição de infiltração associados aos residuais da Formação Serra Geral: cana de açúcar (madura e jovem), laranja e outras espécies frutíferas, mata, pastagem e reflorestamento. Os pontos ensaiados estão localizados em uma área piloto na região de Araraquara, com coordenadas centrais 792368,2 e 3757382,7 (UTM 22), conforme podem ser observados no croqui apresentado na Figura 109. Na Figura 110 um exemplo dos usos caracterizados enquanto que na Figura 111 são mostrados os resultados dos ensaios de laboratório e campo das diferentes condições de uso e ocupação nos residuais da Formação Serra Geral.





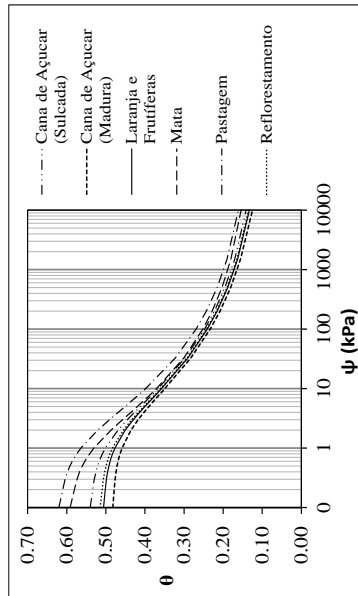
**Figura 109.** Croqui da localização dos pontos ensaiados e amostrados dos residuais da Formação Serra Geral.

Fonte: Autor



**Figura 110.** Registro de áreas com os diferentes tipos de usos associados aos residuais da Formação Serra Geral: A) pastagem, B) laranja e outras espécies frutíferas (banana), C) eucalipto e D) cana de açúcar.

Fonte: Autor



		2,918+0,09						
Massa específica dos sólidos (g/cm³)	Uso do solo	Cana de açúcar (sulcada)	Laranja e frutíferas	Mata	Pastagem	Reflorestamento		
	Unidade de condutividade de infiltração*1	4,1	4,3	4,4	4,5	4,6		
	Massa específica seca (g/cm³)	1,358	1,450	1,200	1,236	1,425		
	Porosidade	0,54	0,51	0,59	0,62	0,51		
	Índice de vazios	1,17	1,02	1,45	1,63	1,06		
	Areia (%)	31,9*2	19,1*3	31,9*2	19,1*3	31,9*2	19,1*3	19,1*3
	Silte (%)	37,9*2	37,6*3	37,9*2	37,6*3	37,9*2	37,6*3	37,6*3
	Areia fina (%)	18,2*2	21,3*3	18,2*2	21,3*3	18,2*2	21,3*3	18,2*2
	Areia média + Areia grossa (%)	12,0*2	22,0*3	12,0*2	22,0*3	12,0*2	22,0*3	12,0*2
	Textura*4	Franco argiloso	Franco argiloso	Franco argiloso	Franco argiloso	Franco argiloso	Franco argiloso	Franco
	Coefficiente de Campbell (1974)	8,52	5,39	8,52	5,39	8,52	5,39	8,52
	Coefficiente de sucção de saturação de Cambell (1974) (cm)log	36,10	14,60	36,10	14,60	36,10	14,60	14,60
	Umidade equivalente (g/g)	0,306	0,222	0,177	0,268	0,195	0,379	0,275
	Capilaridade efetiva (cm)	13,73	8,14	23,25	11,93	18,18	10,09	9,12
	Condutividade hidráulica saturada coluna 1 (cm/s)	3,53E-04	-	-	-	-	-	3,74E-03
	Condutividade hidráulica saturada coluna 2 (cm/s)	3,35E-03	-	-	-	-	-	2,21E-03
	Condutividade hidráulica saturada coluna 3 (cm/s)	-	-	-	-	-	-	5,39E-03

- \*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades de infiltração.
- \*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 (com defloculante) para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassela *et al.* (2002).
- \*3 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 4 (sem defloculante) para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassela *et al.* (2002).
- \*4 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).

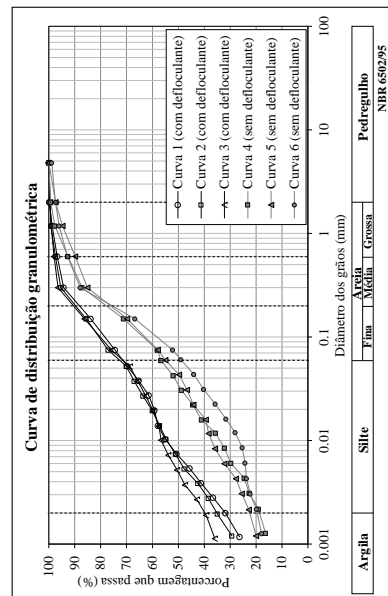
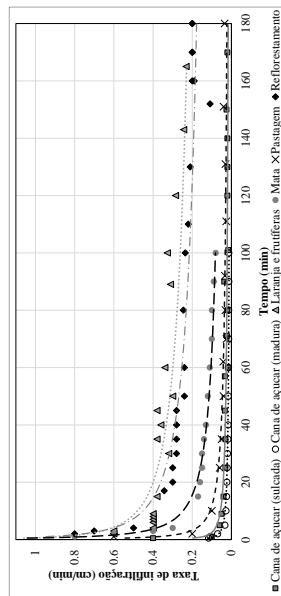
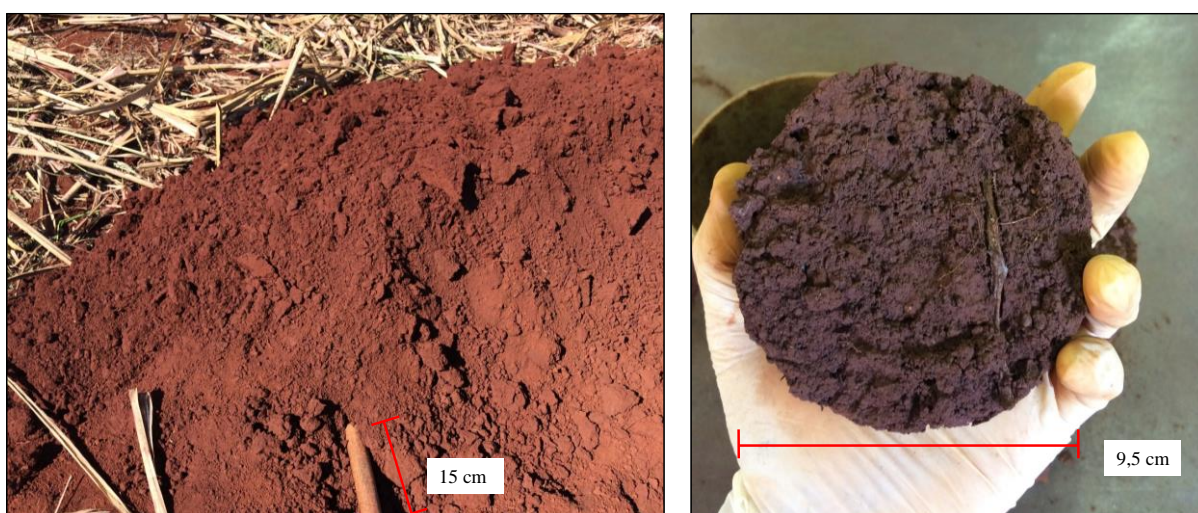


Figura 111. Quadro da caracterização das condições de infiltração presentes nos residuais da Formação Serra Geral.

Fonte: Autor



Assim como nos materiais inconsolidados residuais da Formação Adamantina, por conta da proximidade entre os locais ensaiados selecionou-se amostras apenas de uma das trincheiras escavadas para os ensaios de granulometria. Os resultados da análise granulométrica mostram que os residuais da Formação Serra Geral quando utilizado o defloculante, apresentam textura franco argilosa conforme a classificação da USDA (2017) e porcentagem de argila mais alta nas camadas superficiais (curva 1). Por outro lado, as curvas obtidas sem defloculante apresentam de 13 a 20% a menos de finos, o que resulta na formação de “peds”, os quais podem ser de diferentes tamanhos (Figura 112)



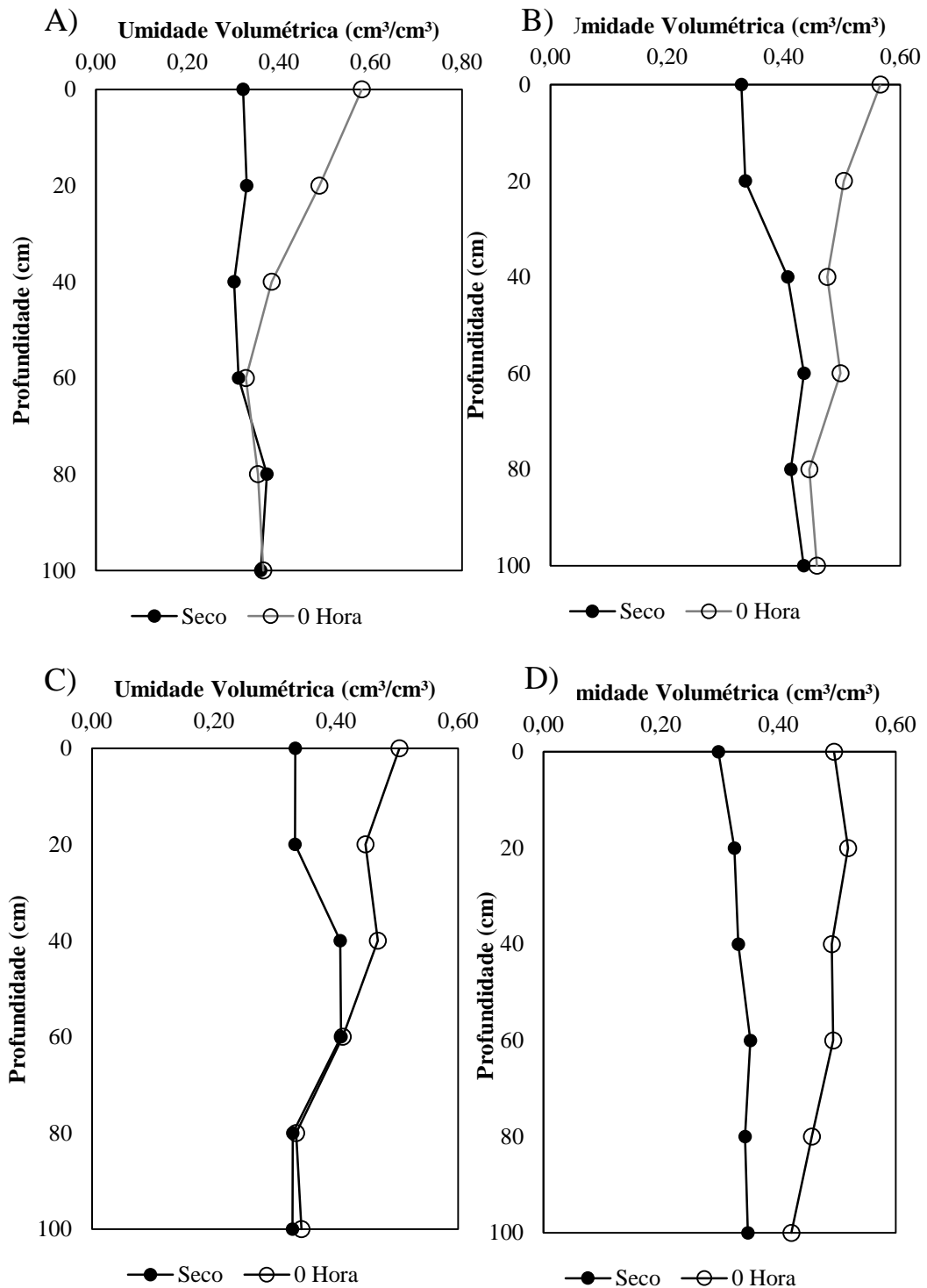
**Figura 112.** Fotos mostrando a presença dos “peds” observados nos materiais inconsolidados residuais da Formação Serra Geral.

**Fonte:** Autor

Em termos de compactação, os diferentes tipos de uso e respectivos manejos do solo conferiram aos residuais da Formação Serra Geral uma variabilidade expressiva, com valores de massa específica seca de campo e porosidade máximos e mínimos de 1,520 g/cm<sup>3</sup> e 0,62 e 1,200 g/cm<sup>3</sup> e 0,48, respectivamente.

O comportamento da infiltração nos Residuais da Formação Serra Geral frente aos diferentes tipos de uso mostrou variações significativas. As áreas ocupadas com reflorestamento e laranja e outras espécies frutíferas apresentaram altas taxas de infiltração (> 0,2 cm/min), as quais estão relacionadas a presença de macroporos. Em contrapartida para a pastagem, a cana de açúcar madura e a jovem a capacidade de infiltração foi inferior a 0,04 cm/min. No que diz respeito às diferenças atribuídas ao manejo da cana de açúcar, verificou-se que a jovem apresentou valores da ordem de 0,02cm/min, enquanto a madura 0,01 cm/min.

Ao analisar a distribuição de água no solo em profundidade (Figura 113) obtida antes e depois do ensaio de infiltração, observou-se a frente de molhamento na pastagem e cana de açúcar jovem situava-se a 60 cm de profundidade, enquanto que na laranja e outras espécies frutíferas estava ao redor de 100 cm. Contudo, no reflorestamento não foi possível observar um limite claro da frente de umedecimento. Quando comparado com o resultado do ensaio de infiltração, os perfis de umidade foram coerentes, de modo que os tipos de uso que indicaram maiores taxas de infiltração, apresentaram maior profundidade da frente de molhamento como, por exemplo, o reflorestamento.

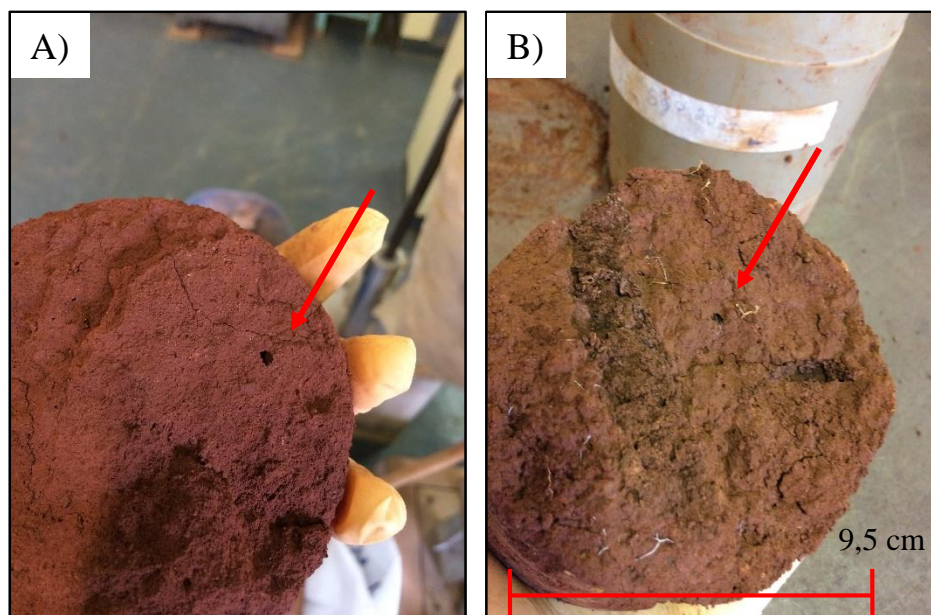


**Figura 113.** Perfis de distribuição de água nas unidades de condição de infiltração associados aos residuais da Formação Serra Geral: A) pastagem B) laranja e outras espécies frutíferas (mamão), C) cana de açúcar jovem ou sulcada e D) eucalipto.

Fonte: Autor

Quanto aos ensaios de permeabilidade com carga constante, os valores de condutividade hidráulica saturada para o reflorestamento e laranja e outras espécies frutíferas foram superiores

a 0,2cm/min, enquanto que as pastagens estão entre 0,1 e 0,2cm/min. Estes resultados estão associados à presença de macroporos, como observados na Figura 114. A cana de açúcar sulcada, por sua vez, apresentou uma alta variabilidade, onde uma amostra a condutividade hidráulica saturada foi de 0,021 cm/min e outra 0,62 cm/min. Na última notou-se a presença de macroporos, os quais podem ter influenciado de forma significativa os resultados da condutividade hidráulica saturada desta amostra.



**Figura 114.** Presença de macroporos tanto no topo da amostra (A) como no meio (B).

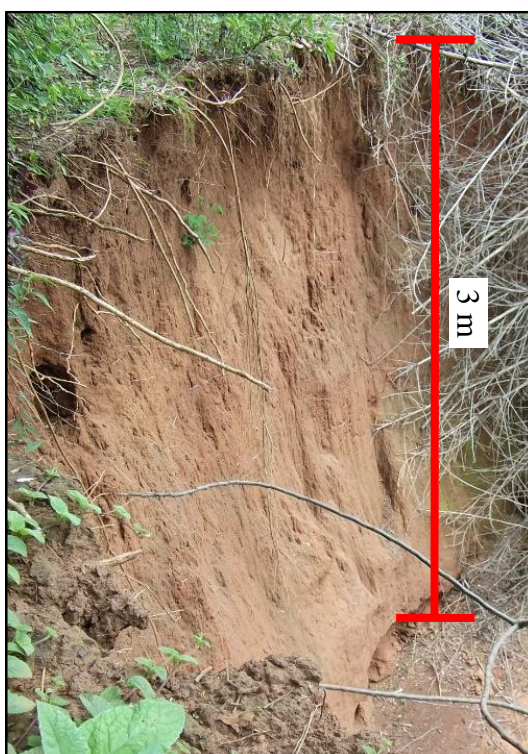
**Fonte:** Autor

Os resultados para os Residuais da Formação Serra Geral revelaram que a compactação provocada pelo tipo de uso e o respectivo manejo do solo afeta diretamente a capilaridade efetiva e a curva de retenção de água. A capilaridade efetiva apresentou uma amplitude (6,27cm) significativa entre os valores máximos (11,93cm) e os mínimos (5,66cm), os quais representam a cana de açúcar madura e a mata respectivamente.

As curvas de retenção de água estimadas refletiram os distintos valores de massa específica seca de campo e podem ser divididos em 2 grupos. O primeiro é referente as matas e pastagens, os quais apresentam menores valores de pressão de entrada de ar, enquanto que o segundo está relacionado aos maiores e são compostos pelas outras unidades de condição de infiltração. Entretanto no que diz respeito ao conteúdo de água no ponto de murchamento, foi observado diferenças expressivas, onde a amplitude entre o mínimo (0,16 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) e o máximo (0,18 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) foi de apenas 0,02 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>.

#### 5.3.3.3.5. Materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu

Os materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu são caracterizados pela textura predominantemente arenosa, onde a fração de areia fina é a mais significativa. Tem como principais minerais o quartzo, a caulinita e a gibsita. Apresentam coloração amarelada a amarelo avermelhada, ocorrem em áreas mais planas (originados dos arenitos friáveis – Figura 115), os quais estão relacionados diretamente às áreas de recarga direta do aquífero, e em escarpas (originados dos arenitos silicificados – Figura 116). Na Figura 117 ver-se a localização no terreno dos materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu. A espessura dos residuais oriundos do arenito friável pode ultrapassar os 10 metros, enquanto que dos arenitos silicificados não atingem 1 metro, no qual encontram-se blocos de arenitos misturados ao solo. Observa-se os perfis de alteração esquemáticos dos residuais da Formação Botucatu na Figura 118.



**Figura 115.** Perfil de um material inconsolidado residual originado dos arenitos friáveis da Formação Botucatu.

**Fonte:** Autor





**Figura 116.** Perfil de um material inconsolidado residual originado dos arenitos silicificados da Formação Botucatu.

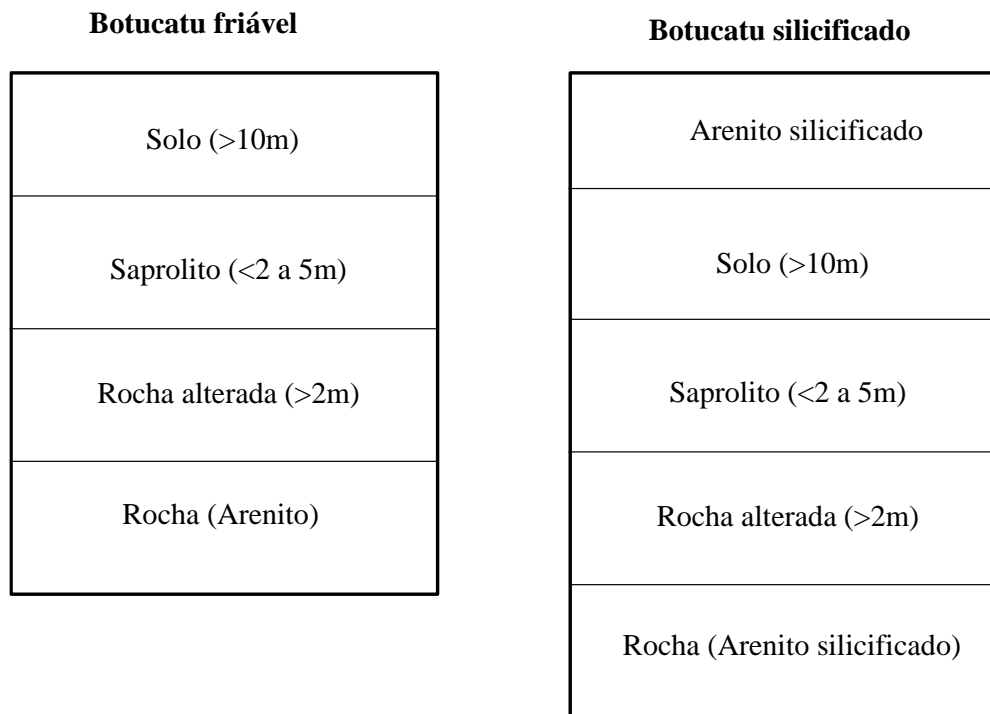
Fonte: Autor



**Figura 117.** Vista panorâmica da localização no terreno dos materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu.

Fonte: Autor

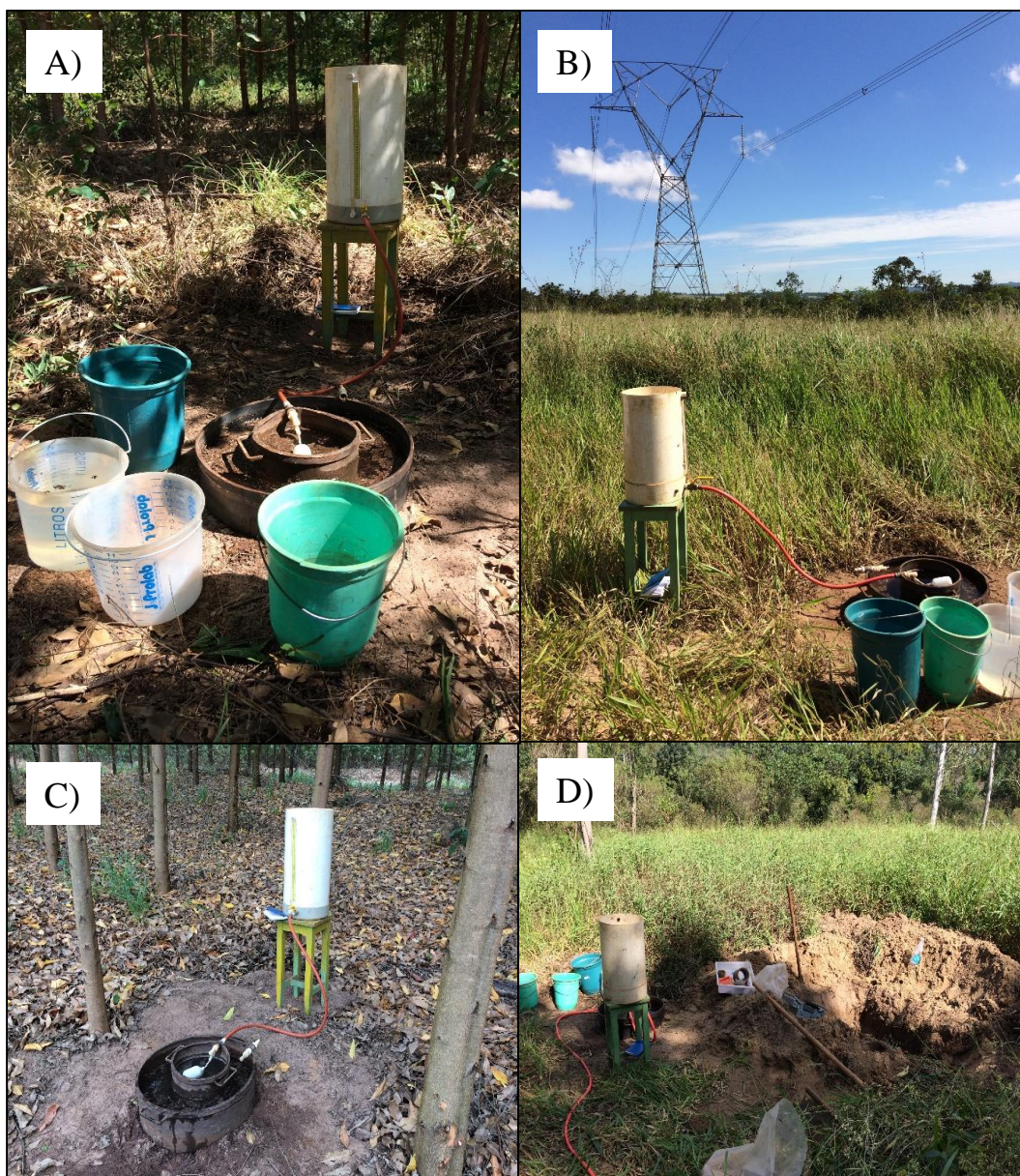




**Figura 118.** Perfis de alteração esquemáticos dos materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu considerando os arenitos friáveis e o silicificados.

**Fonte:** Autor

Os usos identificados (Figura 119) nos residuais da Formação Botucatu são: cana de açúcar (madura e jovem), laranja e outras espécies frutíferas, mata, pastagem (em uso ou que ocupam linhas de transmissão de alta tensão) e reflorestamento. Os pontos ensaiados estão localizados na região de São Carlos conforme podem ser observados no croqui apresentado na Figura 120. Na Figura 121 encontram-se os resultados de ensaios de laboratório e campo das diferentes unidades de condição de infiltração associado aos residuais da Formação Botucatu.

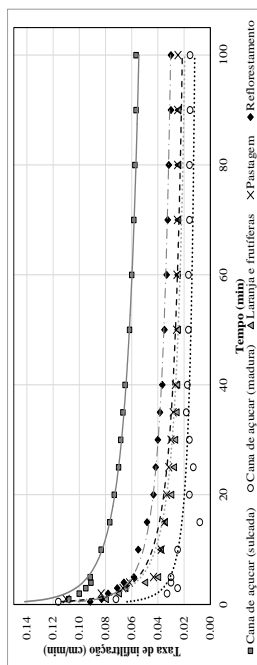
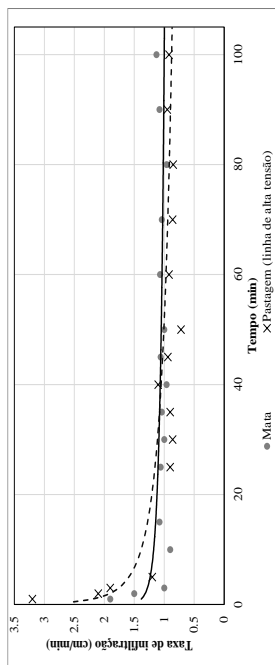
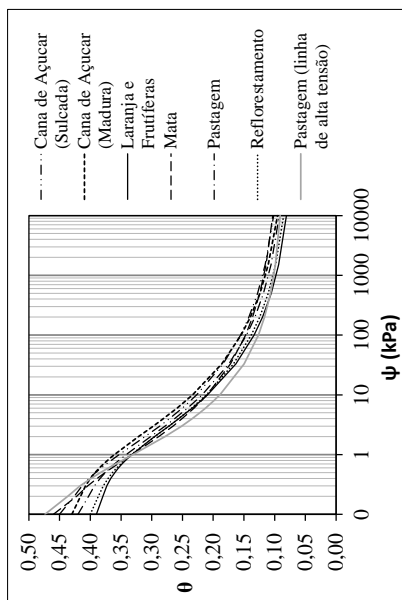
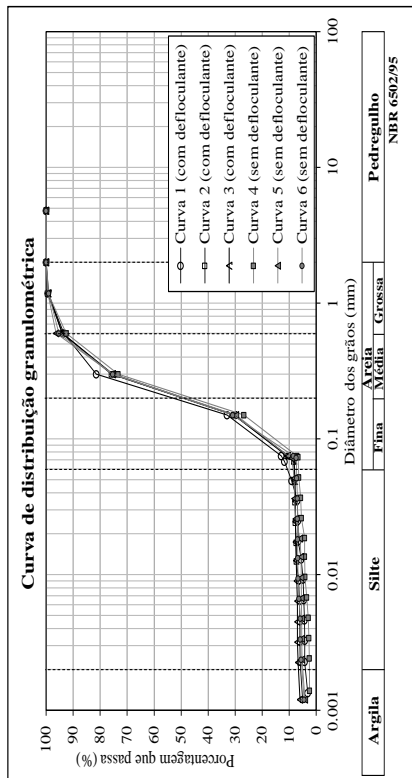


**Figura 119.** Registros dos locais ensaiados nos residuais da Formação Botucatu: A) mata, B) pastagem (alta tensão), C) eucalipto e D) pastagem

Fonte: Autor







Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,645±0,02									
Uso do solo	Mata									
Unidade de conditção de infiltração*1	Pastagem (linha de alta tensão)									
Massa específica seca	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7			
Porosidade	0,44	0,41	0,39	0,46	0,42	0,40	0,40			
Índice de vazios	0,78	0,69	0,64	0,87	0,72	0,68	0,66			
Argila (%)	4,3*2	2,5*3	4,3*2	4,3*2	4,3*2	2,5*3	4,3*2	2,5*3	4,3*2	2,5*3
Silte (%)	7,4*2	4,1*3	7,4*2	4,1*3	7,4*2	4,1*3	7,4*2	4,1*3	7,4*2	4,1*3
Areia fina (%)	34,3*2	46,4*3	34,3*2	46,4*3	34,3*2	46,4*3	34,3*2	46,4*3	34,3*2	46,4*3
Areia média + Areia grossa (%)	54,0*2	47,0*3	54,0*2	47,0*3	54,0*2	47,0*3	54,0*2	47,0*3	54,0*2	47,0*3
Textura*4	Areia									
Coefficiente de Campbell (1974)	4,05									
Coefficiente de saturação de Campbell (1974) (cm)log	3,50									
Unidade equivalente (g/g)	0,095	0,095	0,084	0,084	0,078	0,106	0,088	0,088	0,081	0,081
Capilaridade efetiva (cm)	1,66	1,69	2,78	2,92	3,62	3,87	2,29	2,37	2,89	3,12
Conductividade hidráulica saturada coluna 1 (cm/s)	-	-	-	-	-	-	2,05E-02	5,18E-04	1,88E-04	6,65E-03
Conductividade hidráulica saturada coluna 2 (cm/s)	+	-	-	-	-	-	9,00E-03	9,32E-03	2,65E-03	9,59E-03
Conductividade hidráulica saturada coluna 3 (cm/s)	-	-	-	-	-	-	1,38E-02	-	-	6,35E-03

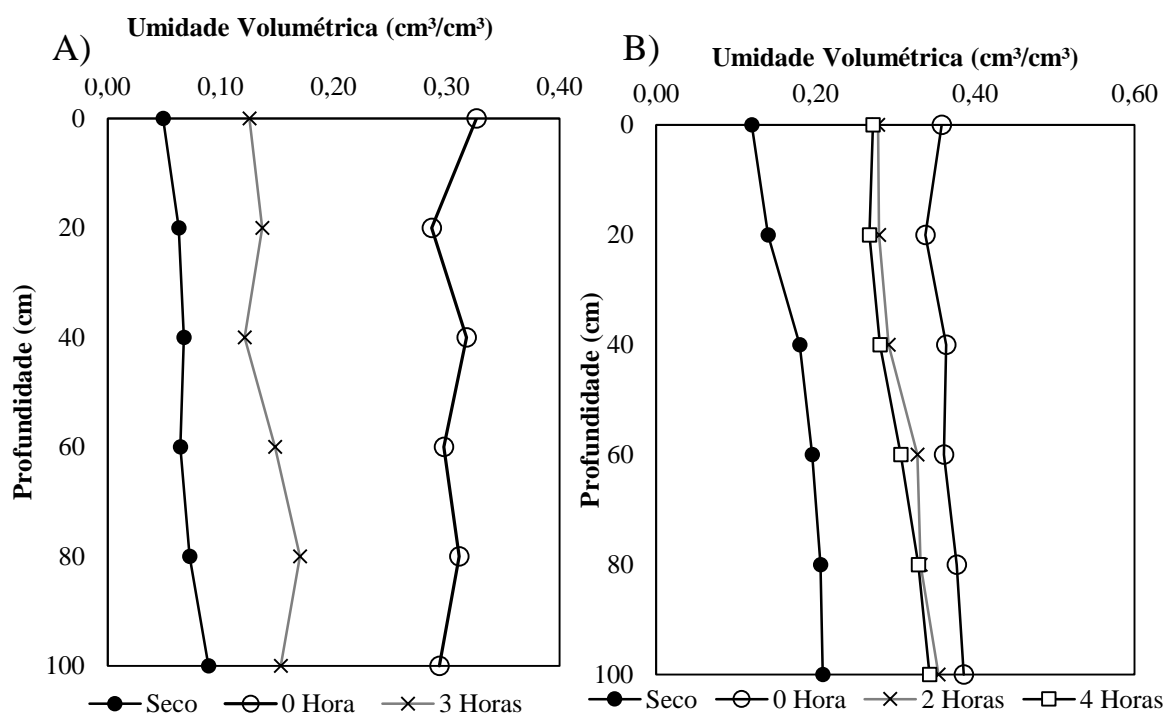
\*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades de infiltração.  
 \*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 (com defloculante) para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassella *et al.* (2002).  
 \*3 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 4 (sem defloculante) para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassella *et al.* (2002).  
 \*4 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).

**Figura 121.** Caracterização geológico-geotécnica das condições de infiltração presentes nos residuais da Formação Botucatu.

Fonte: Autor

A massa específica dos sólidos dos residuais Formação Botucatu apresentou uma média de  $2,65 \text{ g/cm}^3$  e desvio padrão de  $0,02 \text{ g/cm}^3$ . Os resultados da análise granulométrica mostram que os residuais da Formação Botucatu apresentam textura arenosa e não variam em profundidade. A partir da análise do uso ou não do defloculante observou-se que não existe variação significativa na distribuição granulométrica. A porosidade e a massa específica seca de campo variam de forma moderada entre os tipos de uso e manejo, os quais apresentam valores de  $0,39$  e  $1,620 \text{ g/cm}^3$  como máximo (laranja e outras espécies frutíferas) e  $0,46$  e  $1,420 \text{ g/cm}^3$  como mínimo (cana de açúcar sulcada).

Em ordem hierárquica de capacidade de infiltração tem-se: mata, pastagens que ocupam uma área onde atravessa uma linha de alta tensão, cana de açúcar (sulcada); reflorestamento, o qual encontrava-se pouco compactado; pastagem; laranja e outras espécies frutíferas; e cana de açúcar madura. Um fato que chama a atenção nos residuais da Formação Botucatu é a influência que o tipo de uso do solo tem sobre o comportamento da infiltração. Três pontos são importantes mencionar, o primeiro está relacionado à grande amplitude da capacidade infiltração potencial entre a mata ( $0,97 \text{ cm/min}$ ) e a cana de açúcar madura ( $0,015 \text{ cm/min}$ ). O segundo a respeito das curvas de infiltração que representam a laranja e outras espécies frutíferas e o reflorestamento, onde por mais que o início do processo seja semelhante a capacidade de infiltração é distinta. Este fato pode ser explicado pela diferença de porosidade. O terceiro está relacionado às curvas de infiltração da mata e da pastagem, as quais apresentaram valores muito elevados quando considera-se a compactação do solo, o que é um indicativo da macroporosidade exercer um forte controle na infiltração. Ao verificar os gráficos da distribuição de água no solo em profundidade realizados (Figura 122), observa-se que esta condição ocorre pelo menos até mais de 1 metro de profundidade.



**Figura 122.** Perfis de distribuição de água nos residuais da Formação Botucatu: A) mata B) e pastagem.

Fonte: Autor

A condutividade hidráulica saturada obtida a partir de ensaios de permeabilidade com carga constante, apresenta uma variabilidade alta (desvio padrão de 3,70mm/min). Os maiores valores obtidos foram os da mata (5,63mm/min) e pastagem (12,28mm/min), os quais podem ser explicados pela presença de macroporos (Figura 123). Quando comparados com os ensaios de duplo anel, verificou-se a condutividade hidráulica saturada da mata, do reflorestamento e da pastagem apresentam valores próximos.



**Figura 123.** Presença de macroporos em uma amostra obtida em uma área com pastagem associados aos residuais da Formação Botucatu.

**Fonte:** Autor

Ao analisar os parâmetros hidráulicos estimados a partir de funções de pedotransferência dos residuais da Formação Botucatu, verificou-se que para a capilaridade efetiva não houve variações significativa entre as diferentes condições de uso. Os valores obtidos são bastante coerentes para solos muito arenosos, onde a capilaridade efetiva geralmente é baixa (<4cm).

A curva de retenção de água não apresentou uma variação expressiva entre os tipos de usos e os respectivos manejos, entretanto foi possível estabelecer dois grupos de comportamento. O primeiro está relacionado aquelas com um menor potencial de retenção de água e é composto pela mata, cana de açúcar sulcada e a pastagem. No outro, por sua vez, verifica-se uma retenção maior principalmente no início da curva que reflete a zona de efeito limite e é constituído das outras unidades de condição de infiltração.

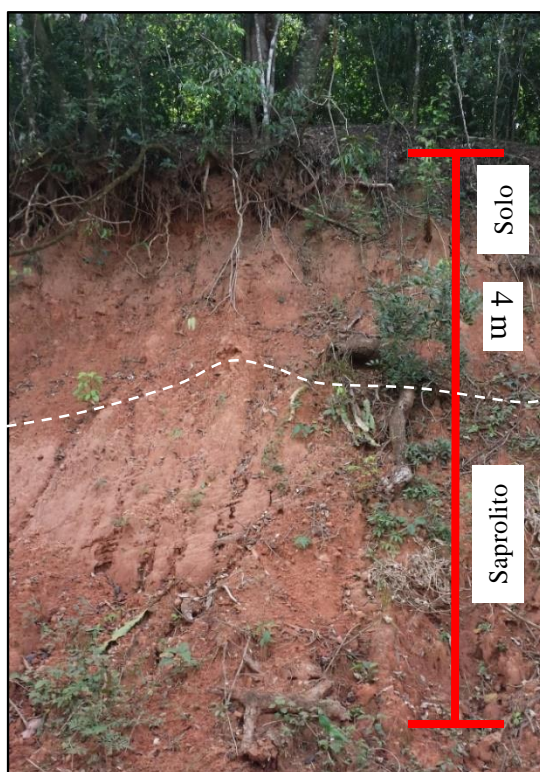
#### 5.3.3.3.6. Materiais inconsolidados residuais da Formação Pirambóia

Os materiais inconsolidados residuais da Formação Pirambóia ocorrem tanto próximo a vales, como no topo e meio de encosta, com textura arenosa, coloração amarelada a alaranjada, com perfil de alteração (Figura 124 e 125) que pode ultrapassar os 10 metros de espessura, a qual diminuir em direção ao canal de drenagem. Os principais minerais que ocorrem neste material inconsolidado são: quartzo, caulinita e gibsita.



**Figura 124.** Perfil de alteração esquemático dos materiais inconsolidados residuais da Formação Pirambóia.

Fonte: Autor



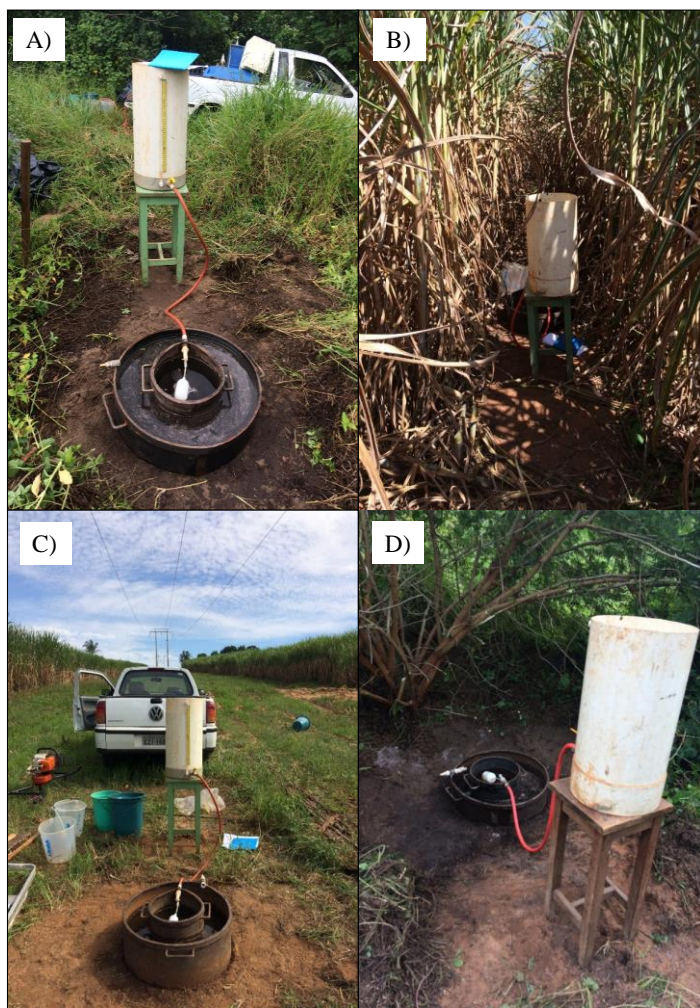
**Figura 125.** Exemplo de um perfil de alteração dos materiais residuais da Formação Pirambóia.

Fonte: Autor

Os usos identificados e delimitados (Figura 126) associados aos residuais da Formação Pirambóia são: cana de açúcar, mata e pastagem (abandonada e na linha de alta tensão). A

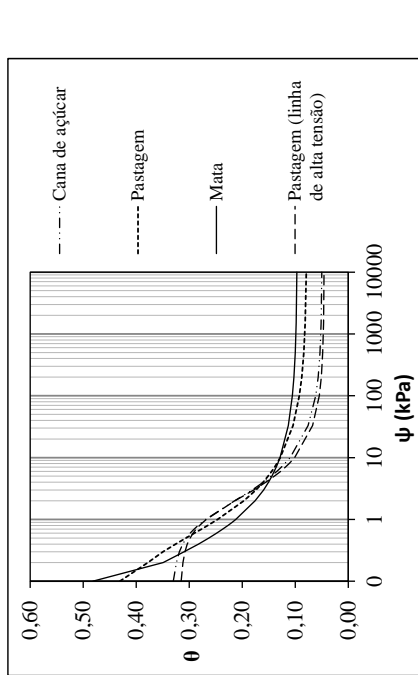


variabilidade destes materiais para os diferentes tipos de usos e manejos do solo, foi caracterizada por meio de ensaios de campo e/ou laboratório, os quais tem os seus respectivos resultados apresentados na Figura 127. Os pontos ensaiados estão localizados em uma área chave próximo a Ribeirão Bonito, com coordenadas centrais 7550417 e 787668 (UTM 22), conforme o croqui contido na Figura 128



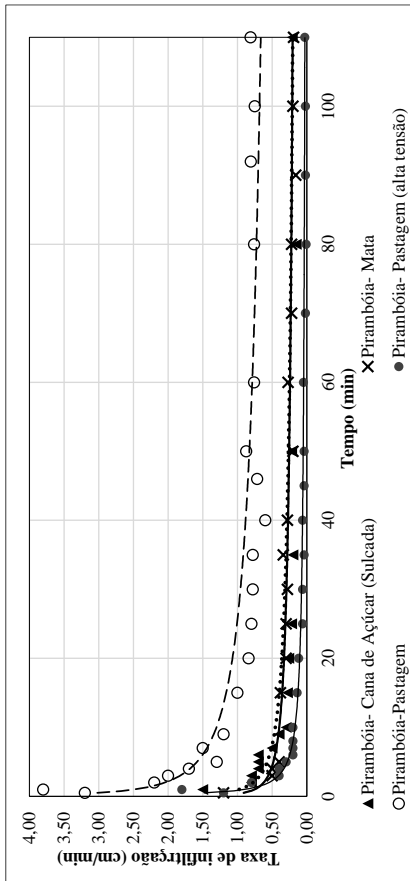
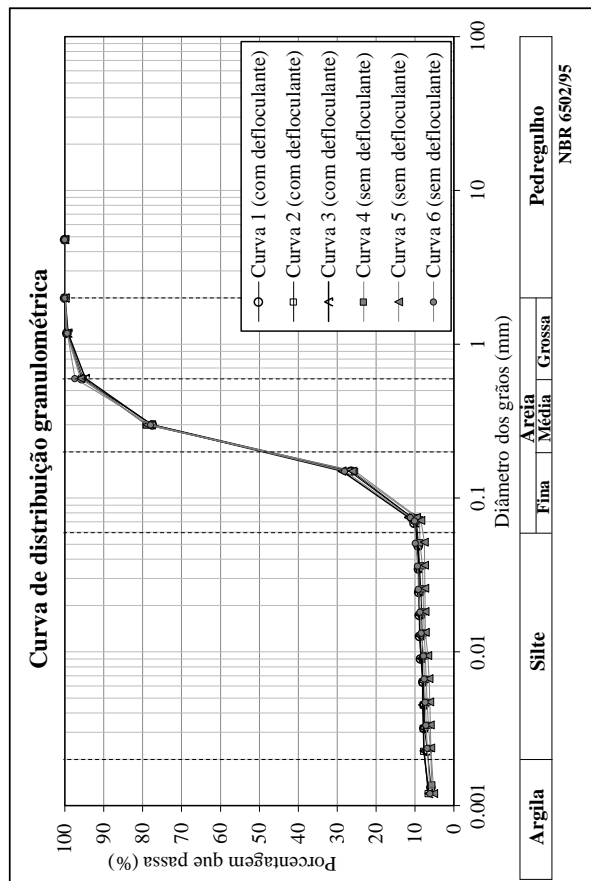
**Figura 126.** Fotos de locais ensaiados das unidades de condição de infiltração associados aos residuais da Formação Pirambóia: A) pastagem, B) cana de açúcar C) pastagem (alta tensão) e D) mata.

**Fonte:** Autor



Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,639+0,019			
	Cana de açúcar (madura)	Pastagem	Mata	Pastagem (linha de alta tensão)
Uso do solo	6.1	6.5	6.4	6.7
Unidade de condição de infiltração*1	1.781	1.520	1.385	1.829
Massa específica seca (g/cm³)	0.33	0.43	0.48	0.32
Porosidade	0.49	0.76	0.93	0.46
Índice de vazios	6.8*2	6.1*3	6.8*2	6.1*3
Argila (%)	3.4*2	2.8*3	3.4*2	2.8*3
Silte (%)	37.8*2	39.1*3	37.8*2	39.1*3
Areia fina (%)	52.0*2	52.0*2	52.0*2	52.0*2
Areia média + Areia grossa (%)	4.05	4.05	4.05	4.05
Textura*4	3.50	3.50	3.50	3.50
Coefficiente de Campbell (1974)	0.060	0.092	0.112	0.056
Coefficiente de sucção de saturação de Campbell (1974) (cm)/log	5.69	5.76	1.48	7.02
Unidade equivalente (g/g)	5.29E-04	1.56E-02	1.56E-02	2.94E-04
Capilaridade efetiva (cm)	4.71E-04	1.11E-03	5.41E-03	7.06E-04
Condutividade hidráulica saturada coluna 1 (cm/s)	-	-	-	2.08E-05
Condutividade hidráulica saturada coluna 2 (cm/s)	-	-	-	-
Condutividade hidráulica saturada coluna 3 (cm/s)	-	-	-	-

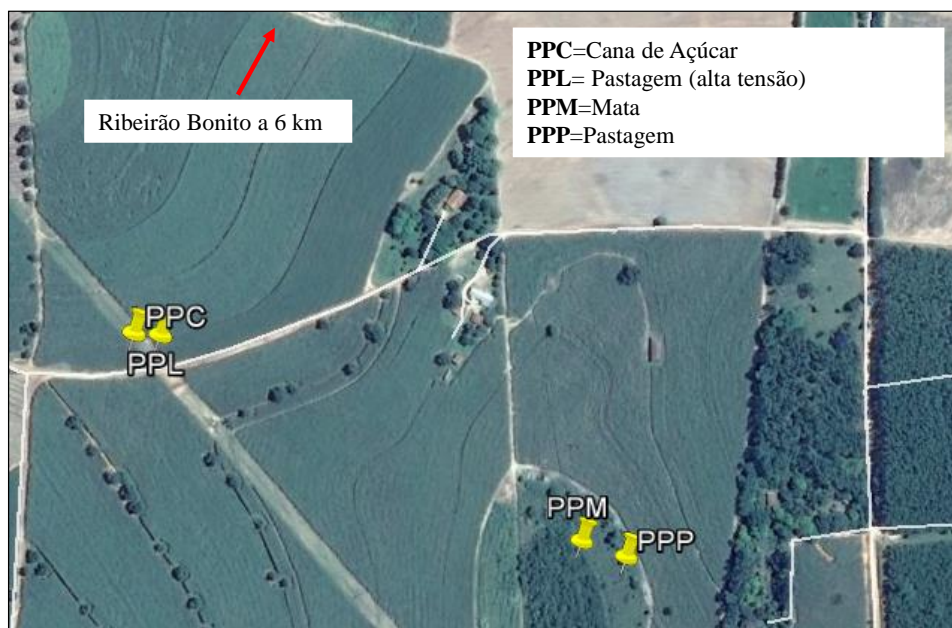
\*4 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).



- \*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades de infiltração,
- \*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 (com defloculante) para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassela *et al.* (2002)
- \*3 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 4 (sem defloculante) para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassela *et al.* (2002)

Figura 127. Resultados da caracterização das condições de infiltração presentes nos residuais da Formação Pirambóia.

Fonte: Autor



**Figura 128.** Croqui da localização dos pontos ensaiados e amostrados referente aos residuais da Formação Pirambóia.

**Fonte:** Autor

A massa específica dos sólidos dos residuais Formação Pirambóia apresentou baixa variabilidade com média de  $2,639 \text{ g/cm}^3$  e desvio padrão de  $0,02 \text{ g/cm}^3$ . Os resultados da análise granulométrica mostram que os residuais da Formação Pirambóia independentemente do uso do defloculante são classificados segundo USDA (2017) como arenoso e não variam com a profundidade.

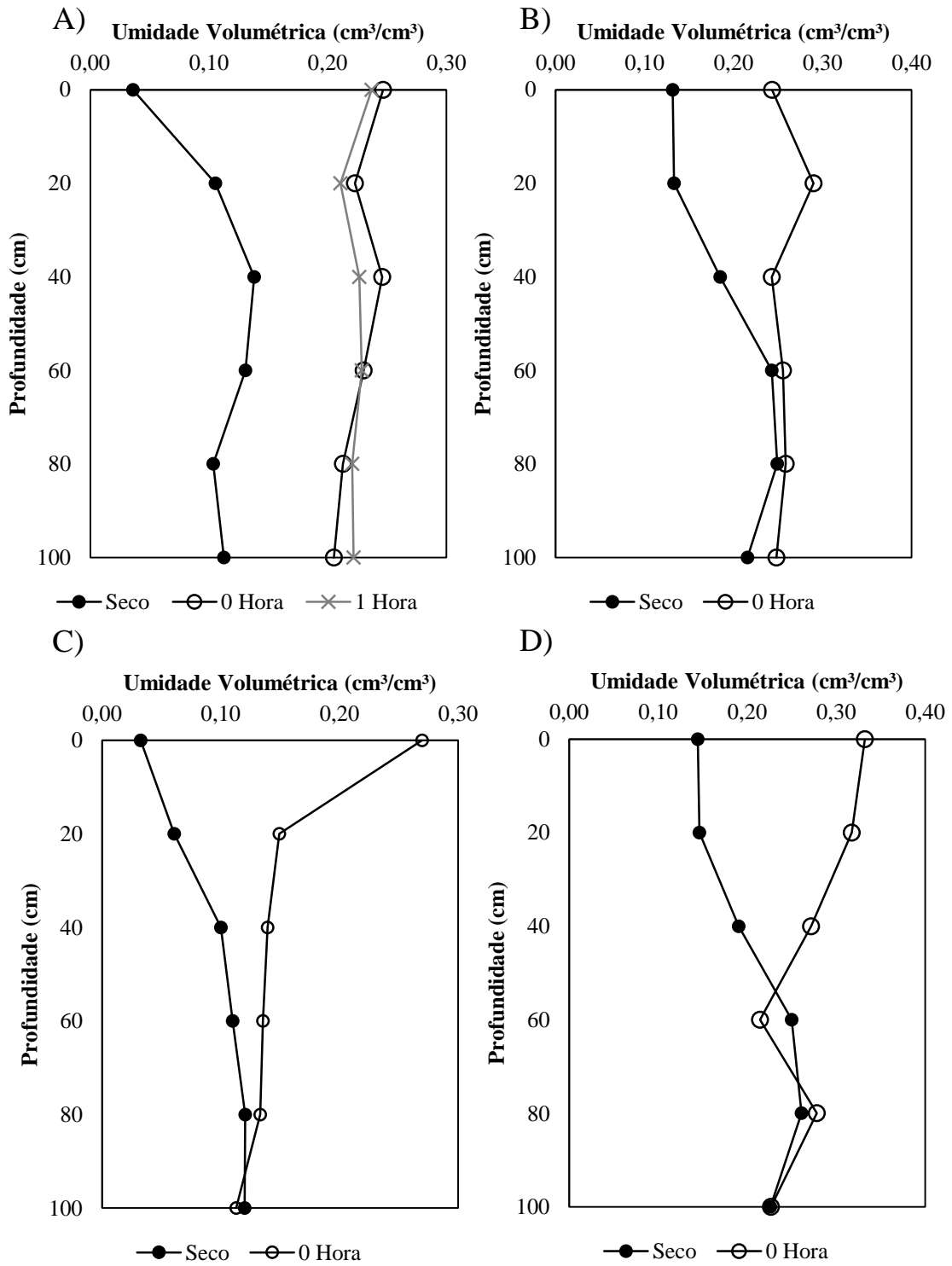
Em contrapartida a massa específica seca de campo, a porosidade e os índices de vazios variaram significativamente, e os maiores valores foram para as pastagens (linha d alta tensão) ( $1,829 \text{ g/cm}^3$ , 0,32 e 0,46) e para a cana de açúcar madura ( $1,781 \text{ g/cm}^3$ , 0,33 e 0,49). Os valores obtidos para pastagem (alta tensão) estão relacionados ao fato que no local ensaiado era um antigo caminho que conectava diversas fazendas, enquanto que os da cana de açúcar estão associados ao tráfego de maquinários pesados e ao manejo com uso de fertilizantes.

A maior compactação da camada superficial do solo em alguns dos tipos de usos afetou diretamente nos resultados tanto de infiltração como de curva de retenção e capilaridade efetiva. A capilaridade efetiva variou de forma significativa, onde os valores para a pastagem (linha de alta tensão) foi 7,14 cm e 0,61cm para as matas. Quanto a curva de retenção de água, foi possível separar em dois grupos, o primeiro o qual o volume de água disponível para drenagem era alto

(mata e pastagem) e outro o qual era baixo (cana de açúcar madura e as pastagens (linha de alta tensão)).

A partir dos ensaios de duplo anel realizados, verificou-se que a cana de açúcar e a mata apresentam comportamento semelhante, todavia a massa específica seca de campo, o resultado da cana de açúcar não refletiu a compactação do solo, pois apresentou uma capacidade de infiltração muito elevada (0,2cm/min). Este valor obtido pode estar associado à presença de macroporos na região ensaiada. Por outro lado, o da pastagem (linha de alta tensão) apresentou valores de capacidade de infiltração baixos (<0,04cm/min) ou seja, o valor determinado foi coerente com os resultados de massa específica seca de campo, porosidade e índice de vazios.

Considerando à distribuição de água no solo (Figura 129), observou-se que em quase todas as unidades de condição de infiltração foi possível identificar a frente de molhamento, exceto a cana de açúcar. A profundidade da frente da mata e da pastagem estava ao redor de 60 cm, enquanto a da pastagem (alta tensão) 90 cm. A última mostrou um comportamento interessante, onde houve uma queda abrupta de umidade entre a camada superficial até 20 cm. Este resultado está associados ao alto valor de massa específica seca de campo, o qual foi refletido na capacidade de infiltração. Por outro lado, o perfil da cana de açúcar mostra que apesar da água infiltrada ter atingido profundidades além de 1 metro, após 1 hora a umidade variou pouco, o que revela uma redistribuição lenta da água justificada pelo valor de massa específica seca de campo encontrado.



**Figura 129.** Perfis de distribuição de água dos tipos de uso do solo ensaiados nos residuais da Formação Pirambóia: A) cana de açúcar, B) mata, C) pastagem (alta tensão) e D) pastagem.

Fonte: Autor

Os resultados dos ensaios de permeabilidade com carga constante apresentaram para algumas combinações variações pouco significativas em comparação aos ensaios de infiltração.

Por exemplo, os valores obtidos para a pastagem (linha de alta tensão) no ensaio *in situ* foi 0,04cm/min enquanto que para a coluna 2 correspondeu a 0,042 cm/min. Entretanto, para a cana de açúcar (colunas 1, 2 e 3) e pastagem (coluna 2) a variação foi expressiva. Nesse sentido, observa-se que a condutividade hidráulica determinada pelo ensaio em laboratório foi mais coerente para este caso quando considerado a massa específica seca de campo. Um outro fato chama atenção a respeito da condutividade hidráulica saturada correspondente a pastagem, foi verificado uma diferença considerável entre a coluna 1 (0,93cm/min) e a 2 (0,66 cm/min), que é justificado pela presença de macroporos na Coluna 1 (Figura 130).

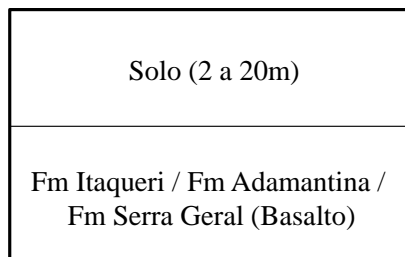


**Figura 130.** Macroporos identificados em uma das amostras nas pastagens associados aos materiais inconsolidados residuais da Formação Pirambóia

**Fonte:** Autor

#### 5.3.3.3.7. Materiais inconsolidados retrabalhados Cenozoicos

Os retrabalhados Cenozóicos ocupam as maiores altitudes do Planalto Ocidental e recobrem as Formações Adamantina e Itaqueri, conforme o perfil esquemático mostrado na Figura 131. De acordo com Pejon (1987) sofreram pequeno transporte, pois apresentam grande influência das rochas que recobrem, além disso tem-se uma linha de seixo facilmente observável que os separa dos residuais da Formação Itaqueri e Adamantina. Apresentam coloração amarelo- avermelhada e sua textura é predominante areno-argilosa. Os minerais que compõe este material inconsolidado são: quartzo, caulinita, gibsita, ilmenita e magnetita. Em termos de espessura, este material pode chegar até aproximadamente 20 metros.

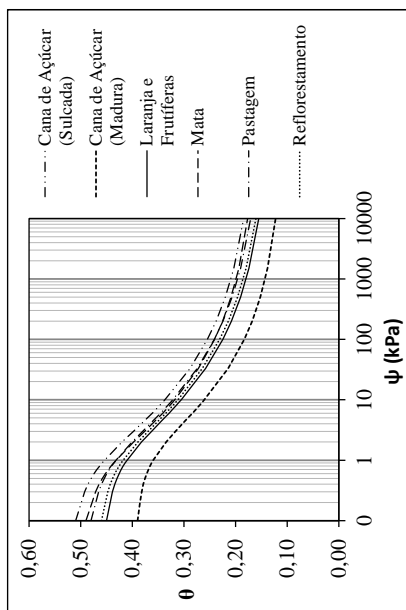


**Figura 131.** Perfil esquemático dos materiais inconsolidados retrabalhados Cenozóicos.

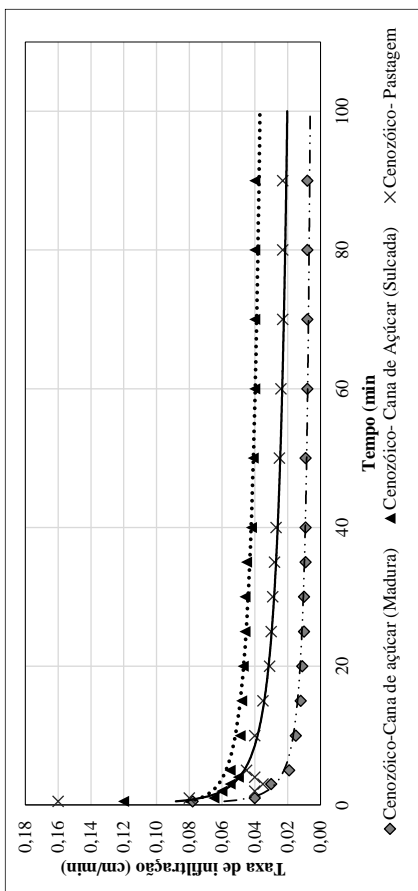
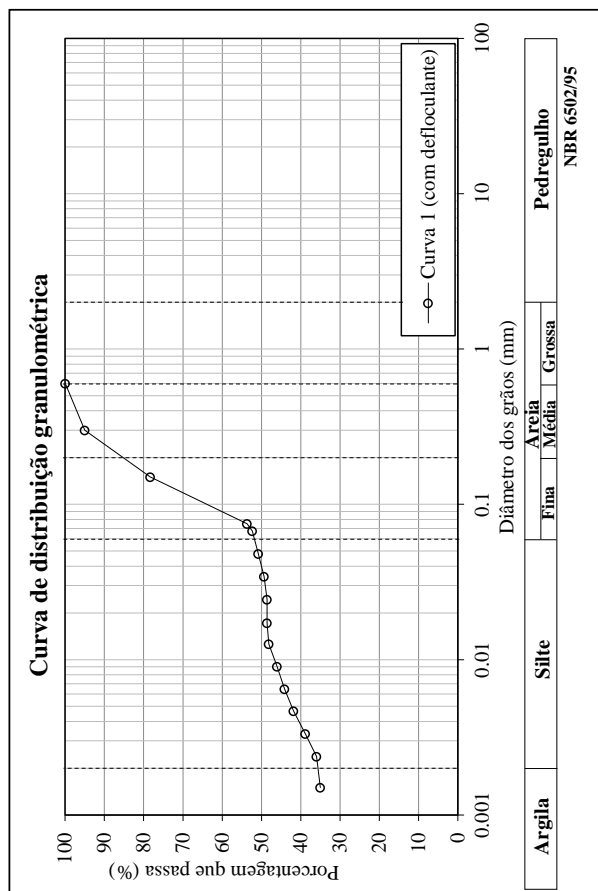
**Fonte:** Autor

Os tipos de usos do solo relacionados a este material inconsolidados são a cana de açúcar, pastagem, laranja e outras espécies frutíferas, mata e reflorestamento. Na Figura 132 encontra-se um quadro dos resultados de ensaios de laboratório e de campo das diferentes condições de uso e ocupação.





Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,696+-0,020					
Uso do solo	Cana de açúcar (sulcada)	Cana de açúcar (madura)	Laranja e frutíferas	Mata	Pastagem	Reflorestamento
Unidade de condição de infiltração*1	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6
Massa específica seca (g/cm³)	1.400	1.610	1.520	1.380	1.450	1.500
Porosidade	0.51	0.39	0.45	0.49	0.48	0.46
Índice de vazios	1.04	0.64	0.82	0.96	0.92	0.85
Argila (%)	36,0*2					
Silte (%)	16,0*2					
Areia fina (%)	34,0*2					
Areia média + Areia grossa (%)	14,0*2					
Textura*3	Franco argilo arenoso					
Coefficiente de Campbell (1974)	7,25					
Coefficiente de sucção de saturação de Cambell (1974) (cm)log	8,63					
Umidade equivalente (g/g)	0.219	0.146	0.178	0.214	0.199	0.185
Capilaridade efetiva (cm)	4.22	7.34	5.71	3.88	4.71	5.40



\*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades infiltração.  
 \*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassela *et al.*, (2002)  
 \*3 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017),

Figura 132. Quadro da caracterização das unidades de condições de infiltração relacionados aos materiais inconsolidados retrabalhados Cenozoicos.

Fonte: Autor



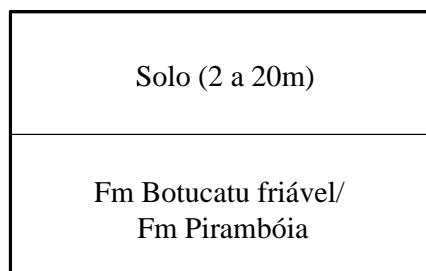
Segundo USDA (2017), esse material é classificado como franco argilo arenoso, e apresenta as seguintes frações granulométrica: 36% de argila, 16% de silte, 34% de areia fina e 9% de areia média. A massa específica dos sólidos média é de 2,696 g/cm<sup>3</sup>. Para a massa específica seca de campo, observou-se que esta variou de forma expressiva, na qual os valores máximos e mínimos foram representados pela cana de açúcar madura com valores de 1,610 g/cm<sup>3</sup> e as matas com 1,380 g/cm<sup>3</sup>.

O comportamento das curvas de infiltração observado para este material em diferentes condições de uso e manejo do solo foi bastante variável, onde as áreas ocupadas com cana de açúcar no estágio mais maduro (aproximadamente 5 anos) apresentaram a menor capacidade de infiltração (0,008 cm/min). Em contrapartida, o comportamento de infiltração da cana de açúcar recém sulcada foi totalmente distinto, a qual apresentou valores da ordem de 0,04 cm/min. Ressalta-se que as curvas de infiltração das laranja e outras espécies frutíferas e do reflorestamento são semelhantes as das pastagens, enquanto que as da mata se equiparam ao da cana de açúcar sulcada.

Os resultados da capilaridade efetiva mostram uma alta variabilidade entre os tipos de uso do solo, com amplitude de 3,46 cm entre o máximo e o mínimo, os quais corresponderam a cana de açúcar madura (7,34cm) e as matas (3,88cm). Essa diferença encontrada pode interferir de forma significativa no resultado de infiltração, principalmente no início do processo. A curva de retenção de água, por sua vez, não apresentou grande variabilidade entre os usos, exceto pela cana de açúcar madura que apresentou o menor conteúdo de água drenável (0,17) e um maior potencial de retenção.

#### 5.3.3.3.8. Materiais inconsolidados retrabalhados Arenosos

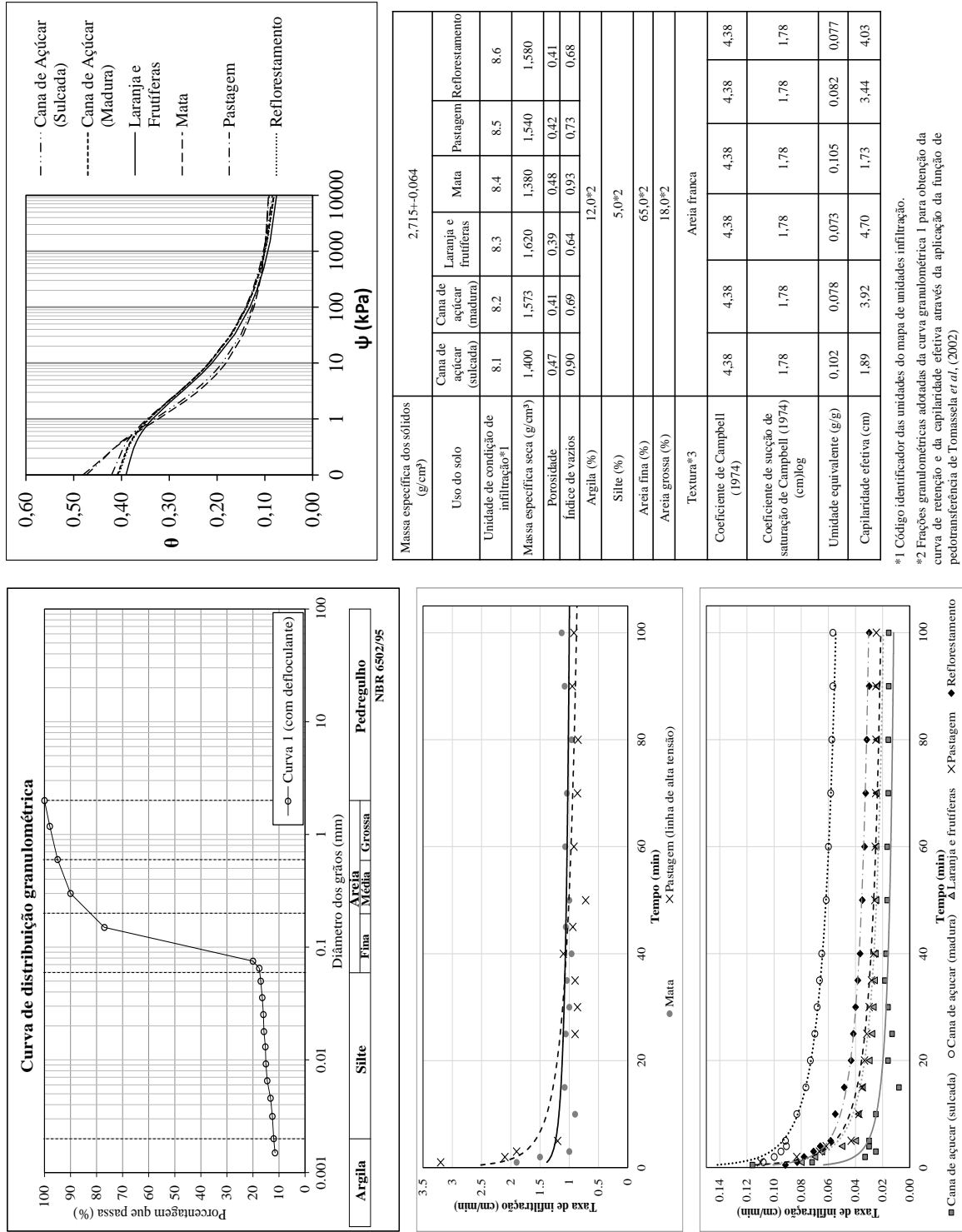
Estes recobrem os materiais residuais da Formação Botucatu e da Formação Pirambóia conforme perfil de alteração esquemático mostrado na Figura 133. Caracterizam-se pela coloração que varia de amarelada a avermelhada, homogeneidade ao longo do perfil, textura arenosa onde a fração areia fina é predominantemente e profundos, e podem alcançar até 20 metros de espessura.



**Figura 133.** Perfil de alteração esquemático dos materiais inconsolidados retrabalhados Arenosos.

**Fonte:** Autor

Os usos associados a estes materiais inconsolidados são a cana de açúcar, pastagem, laranja e outras espécies frutíferas, mata e reflorestamento. Na Figura 134 são mostrados os resultados de ensaios de laboratório e de campo das diferentes condições de uso e ocupação dos retrabalhados Arenosos.



\*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades de infiltração.  
 \*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedonansistência de Tomassella *et al.*, (2002)  
 \*3 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).

**Figura 134.** Quadro da caracterização das unidades de condições de infiltração relacionadas aos retrabalhados arenosos.

Fonte: Autor

As curvas de infiltração para essas combinações são as mesmas que as do residual da Botucatu, pois apresentam comportamento similar com as condições de infiltração do material mencionado anteriormente. Todavia para os outros parâmetros, devido uma maior porcentagem de finos foi necessário obtê-los para caracterizar as distintas condições de infiltração.

A capilaridade efetiva para as combinações de uso e manejo do solo nos retrabalhados arenosos apresentam um comportamento relativamente semelhante aos Residuais da Formação Botucatu, contudo os valores foram superiores. Neste material inconsolidado nota-se de forma mais nítida a influência da compactação do solo, onde as áreas ocupadas com laranja e outras espécies frutíferas apresentaram capilaridade efetiva quase 2cm superior ( $\rho_d$  de 1,62). As curvas de retenção obtidas a partir de Van Genuchten são distintas em termos de forma e de valores de pressão de entrada de ar, quando comparadas as do Residuais da Formação Botucatu.

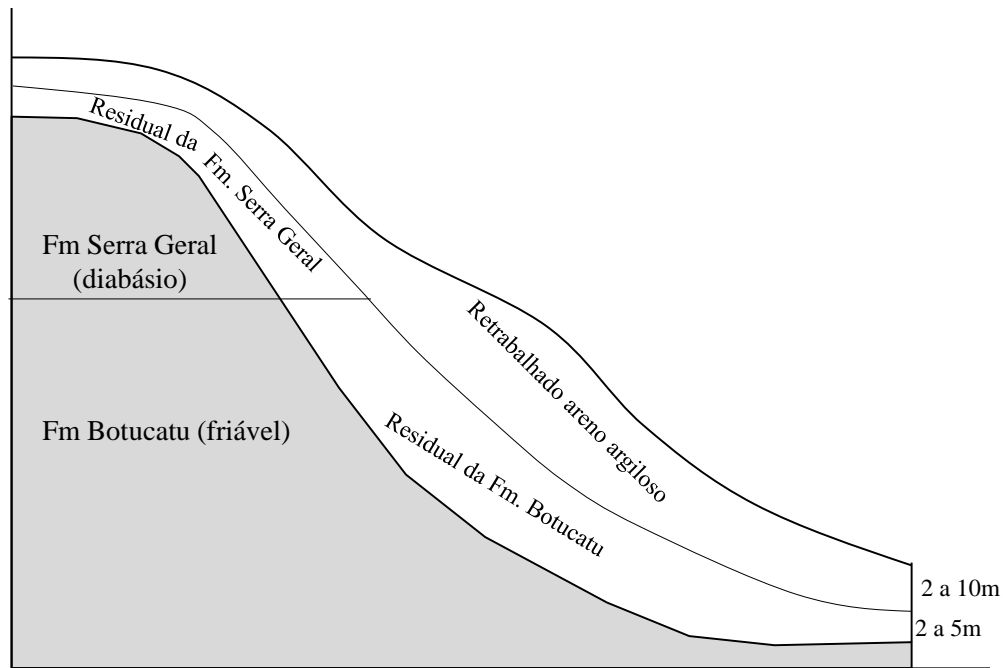
#### 5.3.3.3.9. Materiais inconsolidados retrabalhados Areno argilosos

Os retrabalhados Areno Argilosos (Figura 135) apresentam coloração amarelo avermelhada e espessuras que podem atingir até 10 metros. Estes originaram-se da mistura dos materiais residuais argilosos da Formação Serra Geral e dos materiais arenosos da Formação Botucatu. São caracterizados por apresentar textura areno argilosa, a percentagem de finos não ultrapassa os 35%, enquanto que a proporção de finos presentes no material está em função da proximidade do corpo de diabásio. Os minerais presentes neste material são o quartzo, a caulinita, a gibsita, a ilmenita e magnetita. Esta unidade recobre os materiais inconsolidados mencionados anteriormente como poder ser observado na Figura 136.



**Figura 135.** Foto do local amostrado nos materiais inconsolidados retrabalhados Areno Argiloso.

**Fonte:** Autor

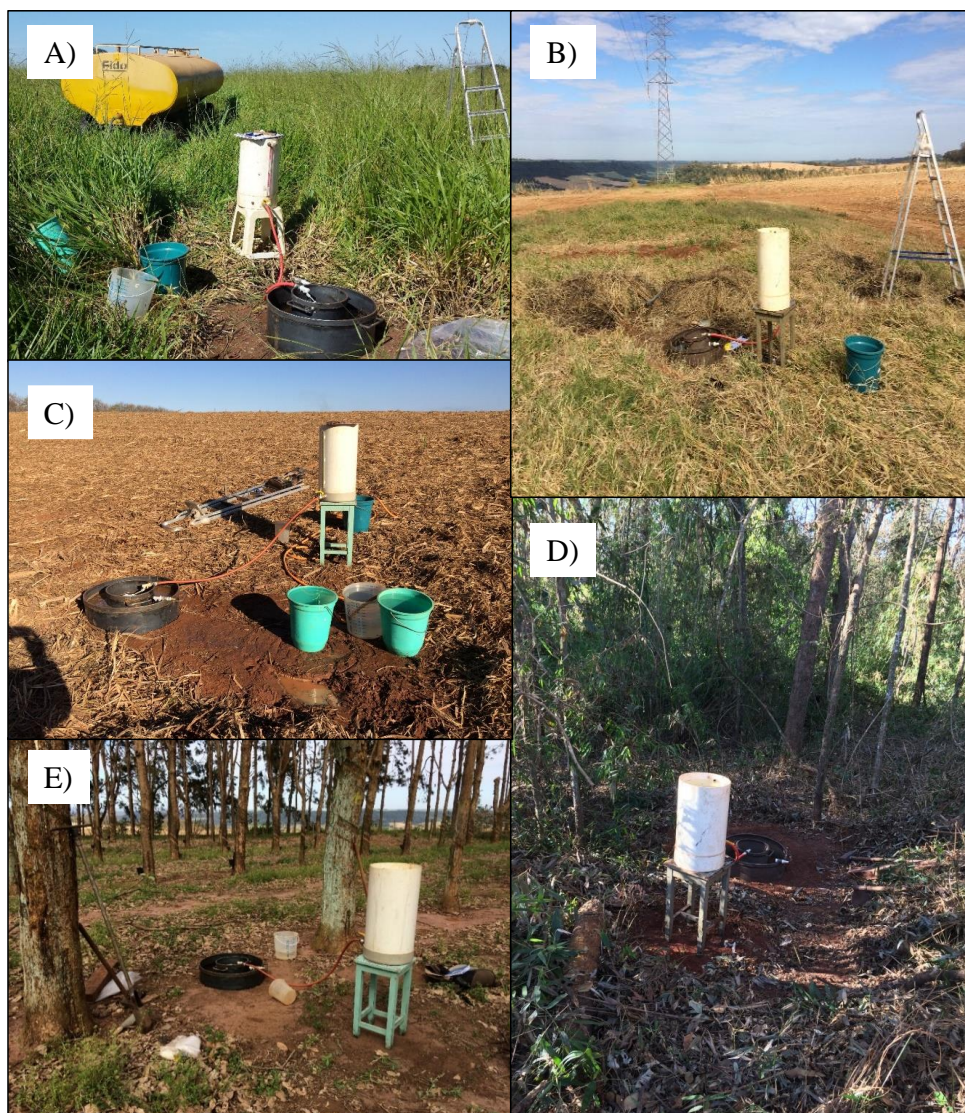


**Figura 136.** Perfil esquemático dos retrabalhados Areno Argilosos.

**Fonte:** Autor

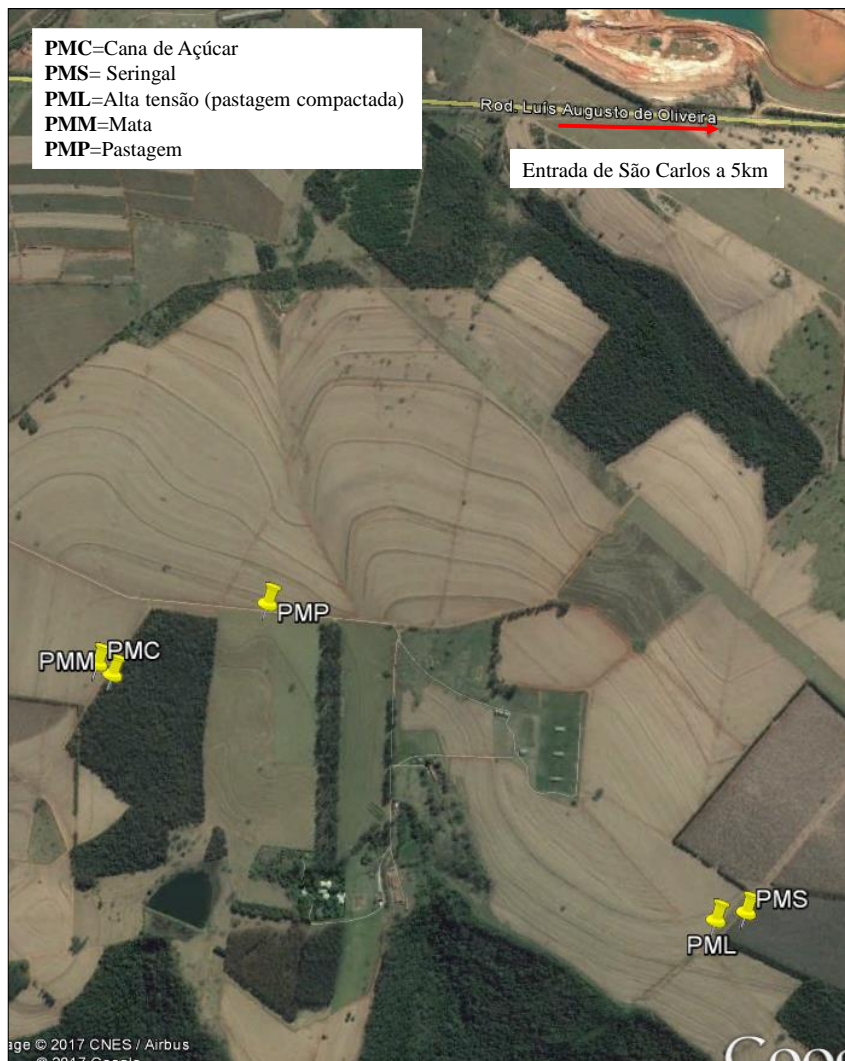
Os usos identificados (Figura 137) relacionados aos retrabalhados Areno argilosos são: cana de açúcar, mata, pastagem, seringal, pastagens (linha de alta tensão) e reflorestamento. Afim de caracterizar a variabilidade deste material inconsolidado a seguir são mostrados os resultados de diversos ensaios executados, sejam eles de campo e/ou laboratório. Os pontos ensaiados estão localizados em uma área piloto próximo a cidade de São Carlos, conforme pode ser observado no croqui contido na Figura 138. Na Figura 139 tem-se os resultados de ensaios de laboratório e de campo das diferentes condições de uso e ocupação nos retrabalhados Areno argilosos.





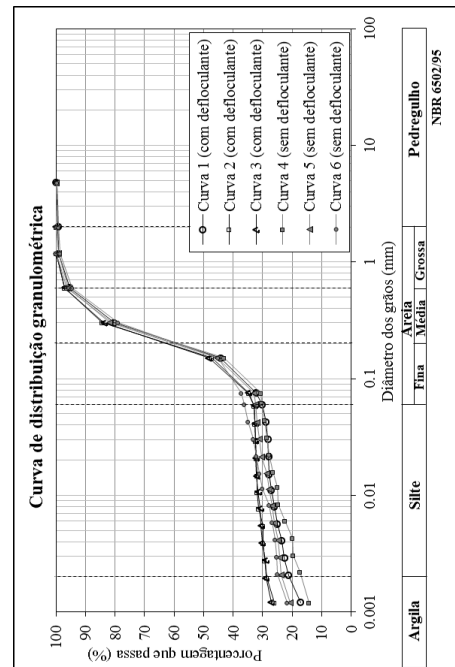
**Figura 137.** Fotos de tipos de usos relacionados aos materiais inconsolidados retrabalhados Areno argilosos: A) pastagem, B) pastagem (alta tensão), C) cana de açúcar, D) mata, E) seringal.

**Fonte:** Autor

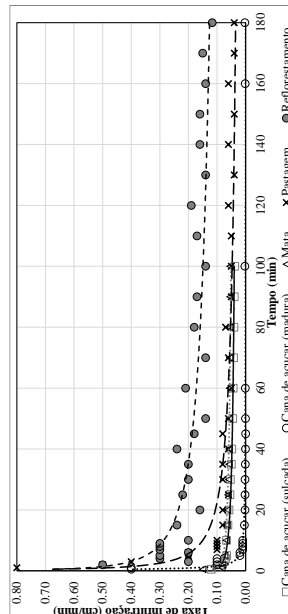
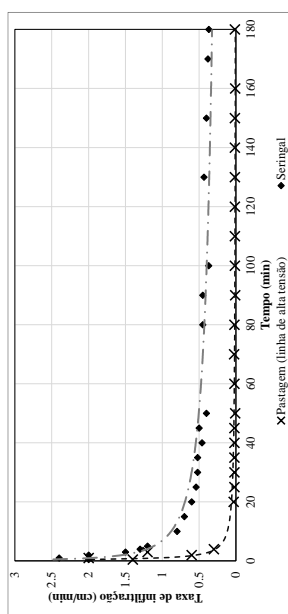
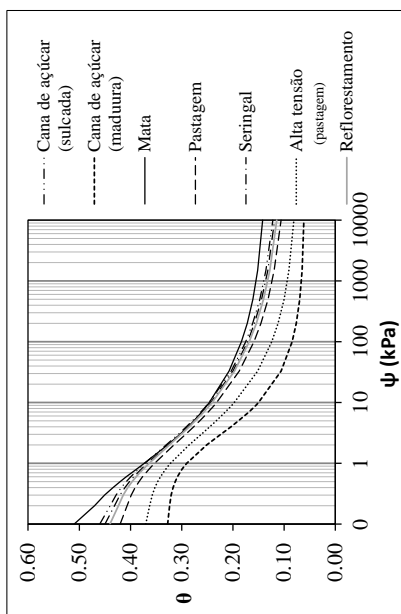


**Figura 138.** Croqui da localização dos pontos ensaiados e amostrados dos materiais inconsolidados retrabalhados Areno argilosos.

**Fonte:** Autor



Massa específica dos sólidos (g/cm³)	2,702+0,089									
	Argila	Silte			Areia			Pedregulho		
	Argila	Fina	Média	Grossa	Mata	Pastagem	Seringal	Alta tensão	Reforestamento	
Uso do solo										
Unidade de condição de infiltração <sup>1</sup>										
Massa específica seca (g/cm³)	1,822	1,470	1,420	1,420	1,420	1,567	1,489	1,708	1,520	
Porosidade	0,33	0,46	0,48	0,48	0,48	0,42	0,45	0,37	0,44	
Índice de vazios	0,49	0,86	0,91	0,91	0,91	0,73	0,82	0,59	0,78	
Argila (%)	21,2*2	17,3*2	21,2*2	17,3*2	21,2*2	21,2*2	17,3*2	21,2*2	17,3*2	
Silte (%)	8,9*2	13,0*2	8,9*2	13,0*2	8,9*2	13,0*2	8,9*2	13,0*2	8,9*2	
Areia fina (%)	29,4*2	28,7*2	29,4*2	28,7*2	29,4*2	28,7*2	29,4*2	28,7*2	29,4*2	
Areia média + Areia grossa (%)	40,5*2	41,0*2	40,5*2	41,0*2	40,5*2	41,0*2	40,5*2	41,0*2	40,5*2	
Textura*3	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso	Franco argilo arenoso	
Coefficiente de Campbell (1974)	7,12	4,90	7,12	4,90	7,12	4,90	7,12	4,90	7,12	
Coefficiente de sucção de saturação de Campbell (1974) (cm)log	8,63	7,18	8,63	7,18	8,63	7,18	8,63	7,18	8,63	
Umidade equivalente (g/g)	0,107	0,082	0,187	0,143	0,200	0,152	0,180	0,129	0,099	
Capilaridade efetiva (cm)	6,61	7,82	2,51	2,66	2,19	2,25	3,23	2,63	2,82	
Conductividade hidráulica saturada coluna 1 (cm/s)	-	-	3,82E-05	7,63E-04	1,78E-03	8,02E-04	8,02E-04	8,02E-04	8,02E-04	
Conductividade hidráulica saturada coluna 2 (cm/s)	-	-	2,35E-04	9,65E-03	1,34E-03	1,76E-03	1,76E-03	1,34E-03	1,34E-03	
Conductividade hidráulica saturada coluna 3 (cm/s)	-	-	9,17E-04	1,58E-02	-	-	-	-	-	



\*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades de infiltração.

\*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 (com defloculante) para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassella *et al.*, (2002).

\*3 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 4 (sem defloculante) para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassella *et al.*, (2002).

\*4 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).

Figura 139. Resultados da caracterização das unidades de condições de infiltração relacionada aos retrabalhados Areno argilosos.

Fonte: Autor



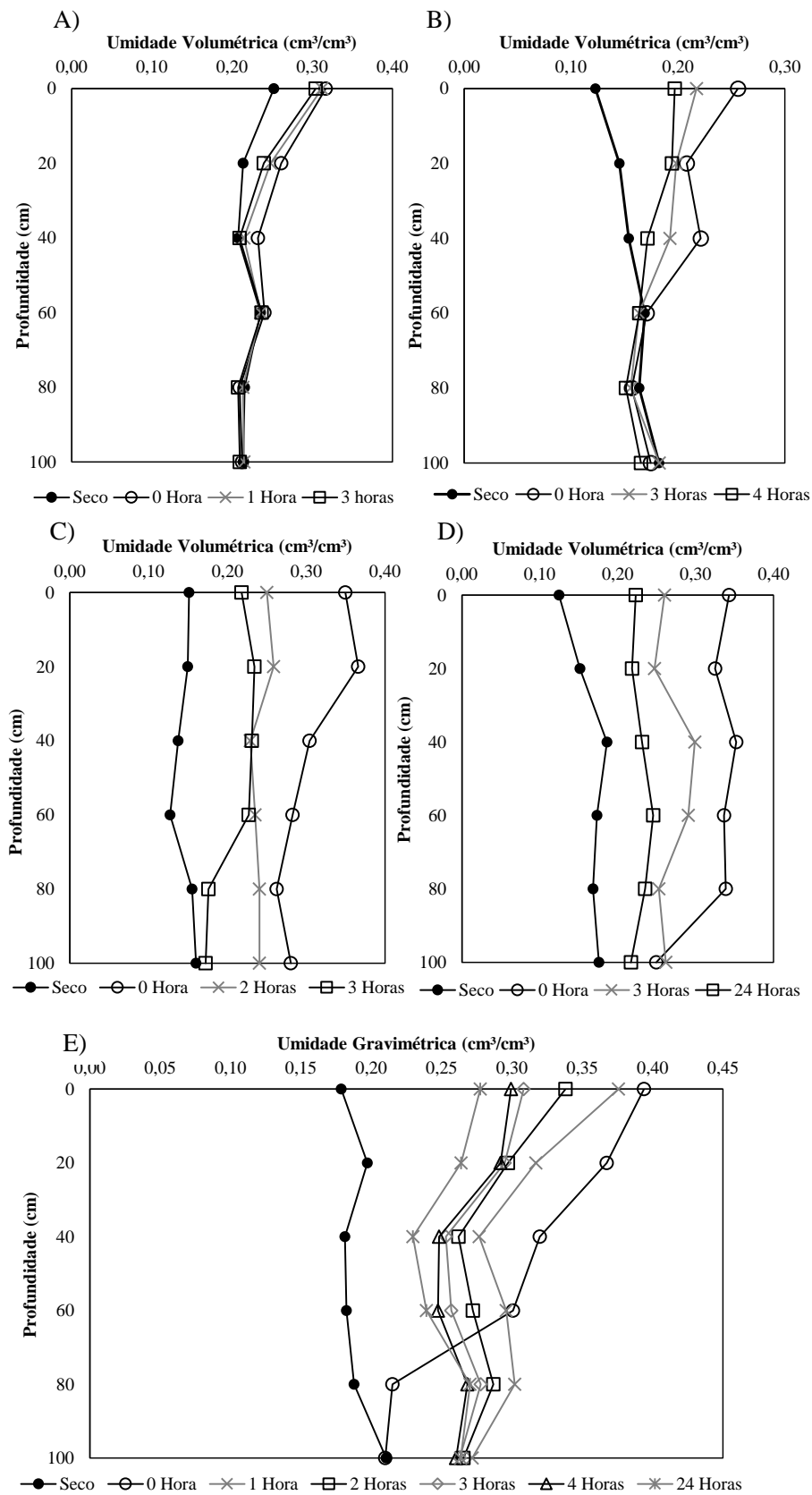
A massa específica dos sólidos média dos retrabalhados Areno argilosos é  $2,702 \text{ g/cm}^3$  com desvio padrão de  $0,089 \text{ g/cm}^3$ . Este material é classificado de forma diferente quando considerado o uso do defloculante. De acordo com a classificação da USDA (2017) é classificado como franco argilo arenoso com o uso do defloculante e como franco arenoso no caso do não uso.

A massa específica seca de campo varia de  $1,822 \text{ g/cm}^3$  a  $1,420 \text{ g/cm}^3$ , o qual os maiores valores foram os da cana de açúcar madura e da pastagem (alta tensão), devido ao tráfego intenso de maquinários pesados.

A variabilidade da compactação afetou de forma significativa os resultados da capilaridade efetiva e curva de retenção. A capilaridade efetiva apresentou uma amplitude entre o máximo ( $7,82\text{cm}$ ) e o mínimo ( $2,25\text{cm}$ ) de  $5,57\text{cm}$ , que correspondem a cana de açúcar madura e a mata respectivamente. Enquanto que na curva de retenção foi possível verificar dois grupos, o primeiro correspondente aquelas com menor potencial de retenção, ou seja, onde a água é facilmente removida independente dos valores de sucção matricial devido à maior porosidade. O segundo grupo associa-se as curvas de retenção de unidades de condição de infiltração mais compactadas, as quais apresentam uma menor disponibilidade de água drenável, como a cana de açúcar madura e a pastagem (linha de alta tensão).

Os resultados dos ensaios de duplo anel revelaram diversos comportamentos de infiltração, desde de alta à baixa capacidade de infiltração. A partir da caracterização da massa específica seca de campo verificou que as curvas de infiltração no geral refletiram a compactação obtida para cada um dos tipos de uso do solo. Os tipos que apresentaram a menor e maior capacidade de infiltração respectivamente foram o seringal ( $0,4\text{cm/min}$ ) e a cana de açúcar madura ( $0,002\text{cm/min}$ ), onde está associado à presença de macroporosidade e o segundo encontra-se bastante compactado ( $\rho_d > 1,8\text{g/cm}^3$ ).

Ao avaliar a distribuição de água no solo (Figura 140) ao término do ensaio verificou, que a água é drenada de forma rápida ao longo do tempo e da profundidade para os usos com menor compactação. Todavia, aqueles que se encontraram mais compactados, a água movimentou-se de maneira mais lenta. No que diz respeito à frente de molhamento, na mata e no seringal situou-se acima de 1 metro de profundidade. Enquanto que para a cana de açúcar madura e a pastagem (alta tensão) estava por volta de 60 cm de profundidade.



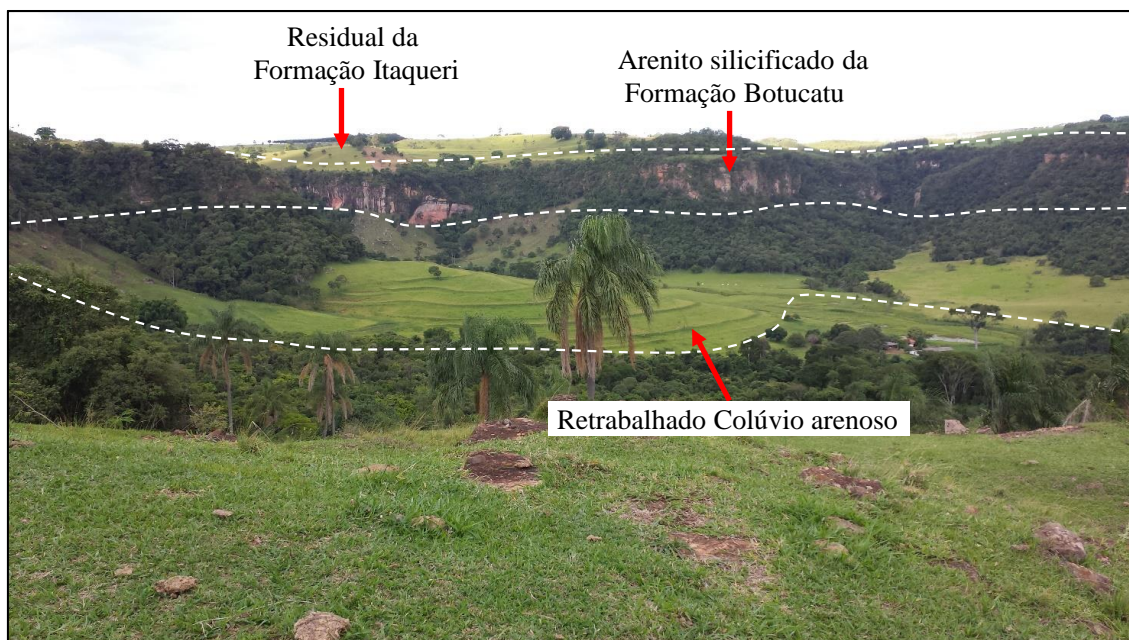
**Figura 140.** Perfis de distribuição de água nas unidades de condição de infiltração ensaiadas relacionadas aos retrabalhados Areno argilosos: A) cana de açúcar, B) pastagem (alta tensão), C) mata, D) seringal, E) pastagem.

Fonte: Autor

A condutividade hidráulica saturada obtida a partir dos ensaios de permeabilidade com carga constante para alguns tipos de usos, como a cana de açúcar madura e a pastagem (linha de alta tensão) apresentou valores relativamente próximos aos dos *in situ*. Para outros observou-se uma variação expressiva, por exemplo, para a mata, a qual para as colunas 2 e 3 verificou-se uma diferença de 0,926 (cm/min) em relação ao resultado do duplo anel. No último foi observada uma forte presença de macroporosidade por conta das raízes e atividade de animais.

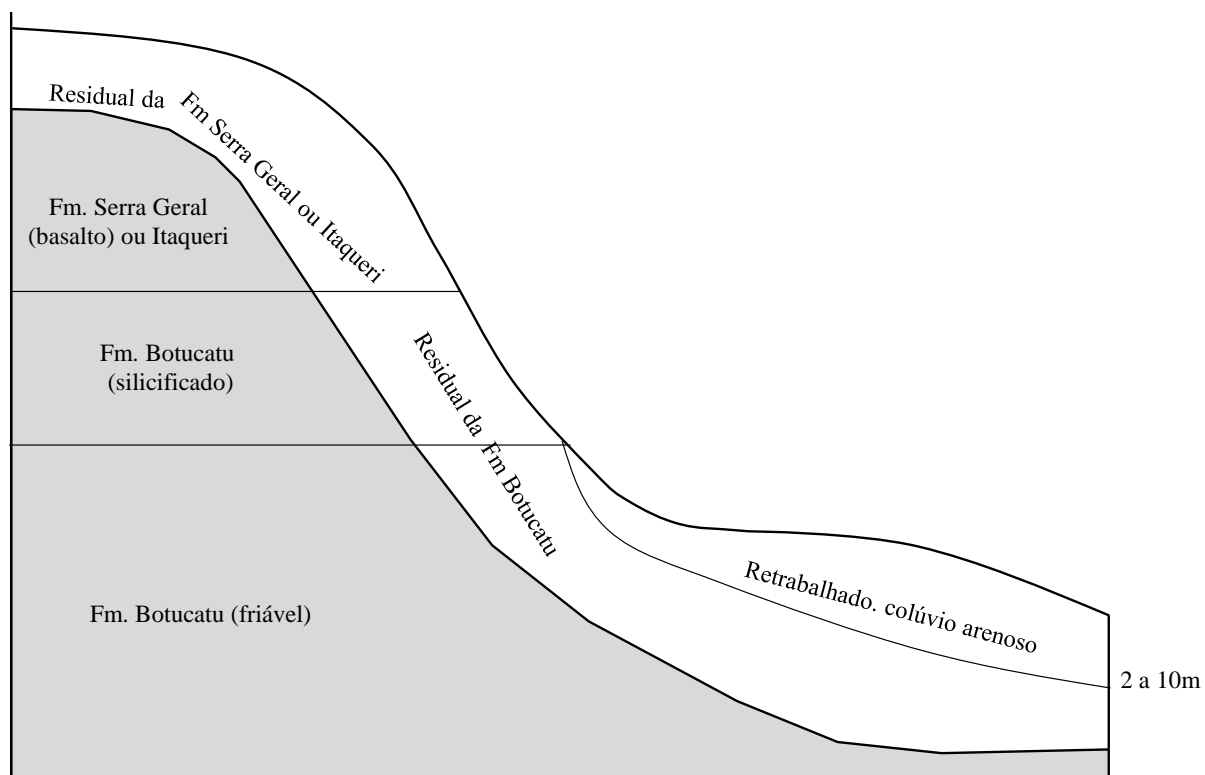
#### 5.3.3.3.10. Materiais inconsolidados retrabalhados Colúvios arenosos

Estes ocorrem na base das escarpas das *cuestas* (Figura 141), e recobrem os materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu, originados do arenito friável conforme a Figura 142, com fragmentos centimétricos a decimétricos de arenitos silicificados e ainda blocos de basalto ou diabásio. Esta unidade se assemelha bastante ao material inconsolidado residual da Formação Botucatu no que diz respeito à textura. A coloração varia de amarelo a amarelo avermelhado e a espessura não ultrapassa os 10 metros.



**Figura 141.** Localiza o no terreno dos retrabalhados Colúvios Arenosos.

**Fonte:** Autor



**Figura 142.** Perfil esquemático dos materiais inconsolidados retrabalhados Colúvios Arenoso.

**Fonte:** Autor

Os principais usos do solo são: pastagem, cana de açúcar, mata, laranja e outras espécies frutíferas e reflorestamento. Na Figura 143 estão contidos os resultados de laboratório e de campo das diferentes unidades de condição de infiltração relativas aos retrabalhados Colúvios arenosos.

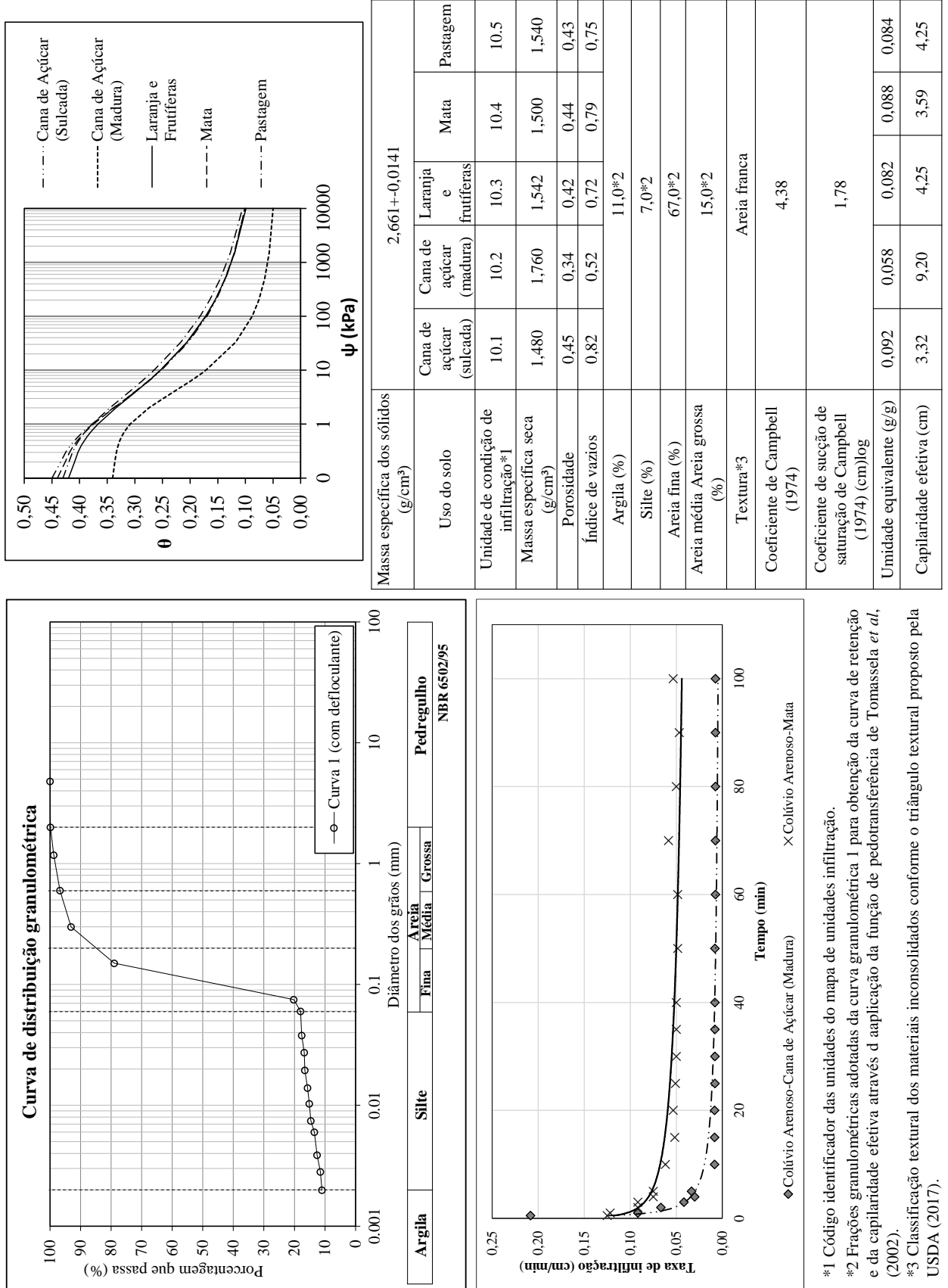


Figura 143. Resultados da caracterização das condições de infiltração presentes nos retrabalhados Colúvios arenosos.

Fonte: Autor

\*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades de infiltração.  
 \*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassela *et al.*, (2002).  
 \*3 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).

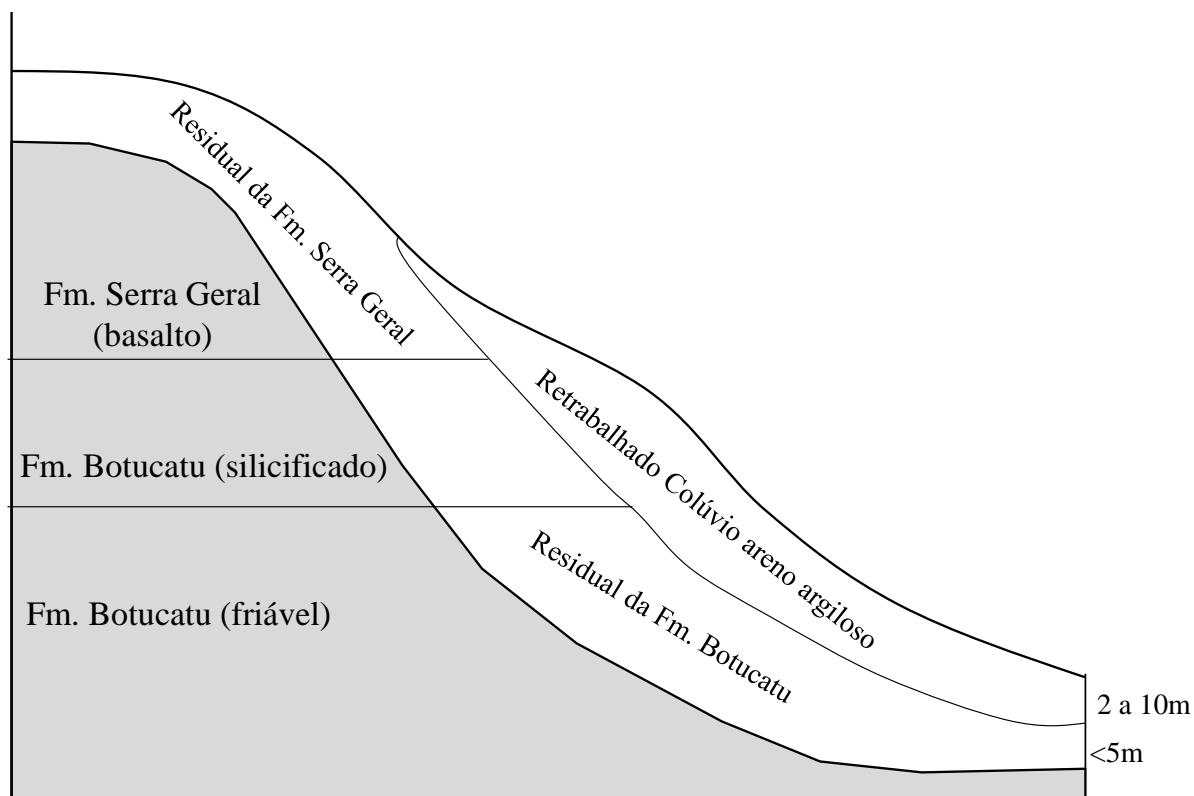
A massa específica seca de campo da cana de açúcar madura é alta ( $>1,7\text{g/cm}^3$ ), o que indica um estágio de manejo antigo. As outras unidades de condição de infiltração apresentam valores entre 1,50 a 155  $\text{g/cm}^3$ .

O comportamento de infiltração para a cana de açúcar madura apresentou altas taxas no início do processo, que estão associadas aos altos valores de capilaridade efetiva (9,20cm), entretanto baixos valores ( $<0,01\text{cm/min}$ ) de capacidade de infiltração. As matas por outro lado, apresentam menores taxas no início do processo e uma capacidade de infiltração ao redor de 0,05cm/min. Destaca-se que as curvas de infiltração relativas a cana de açúcar sulcada é semelhante a mata, enquanto a cana pastagem e laranja e outras espécies frutíferas assemelham-se a cana de açúcar madura.

Os resultados da capilaridade efetiva apresentam variabilidade baixa entre os tipos de uso, exceto para a cana de açúcar madura, a qual apresentou valores bastante elevados para um solo arenoso com baixa presença de finos. Outro problema é relativo a curva de retenção de água, onde conforme observado por Moraes (2012), solos mais compactados tendem a reter mais água, todavia ocorre o oposto, ou seja, o solo mais compactado apresentou menor retenção de água. Este fato pode estar associado à limitação da função de pedotransferência em estimar os parâmetros de Van Genuchten para solos arenosos extremamente compactados.

#### 5.3.3.3.11. Materiais inconsolidados retrabalhados Colúvios areno argilosos

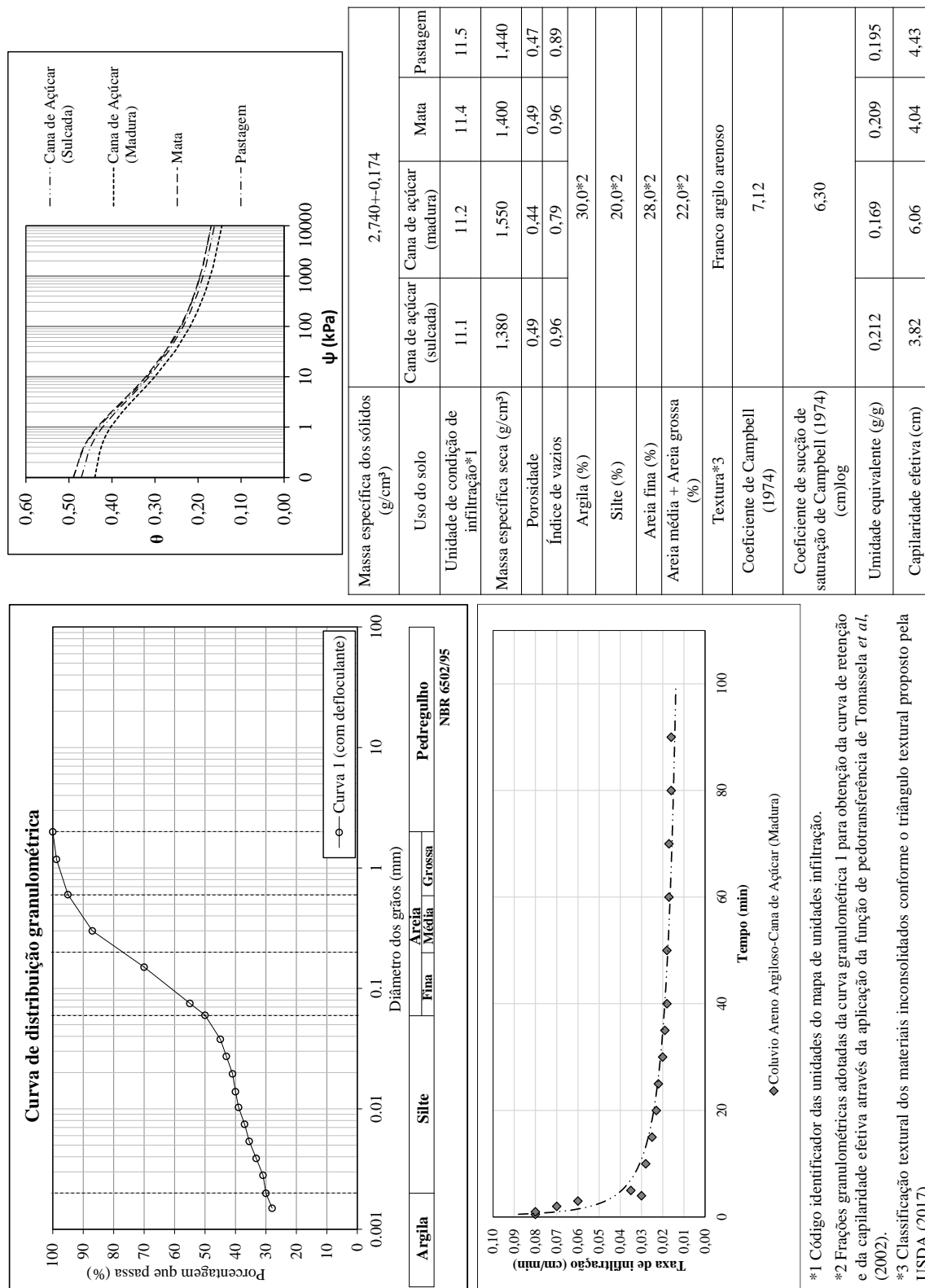
Encontram-se próximos a base da escarpa das *cuestas* (Figura 144) e a origem está associada aos materiais oriundos das Formações Botucatu e Serra Geral. Apresentam coloração amarelo avermelhada e espessuras que podem alcançar até 10 metros.



**Figura 144.** Perfil esquemático dos retrabalhado Colúvio Areno Argilosos.

**Fonte:** Autor

Os principais usos relacionados a estes materiais inconsolidados são: pastagem, cana de açúcar, mata, laranja e outras espécies frutíferas e reflorestamento. Na Figura 145 há um quadro dos resultados de ensaios de laboratório e de campo das diferentes unidades de condição de infiltração associados aos retrabalhados Colúvios areno argilosos.



**Figura 145.** Quadro da caracterização das condições de infiltração relacionadas aos retrabalhados Colúvio areno argilosos.

Fonte: Autor

- \*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades de infiltração.  
 \*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassella *et al.* (2002).  
 \*3 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).

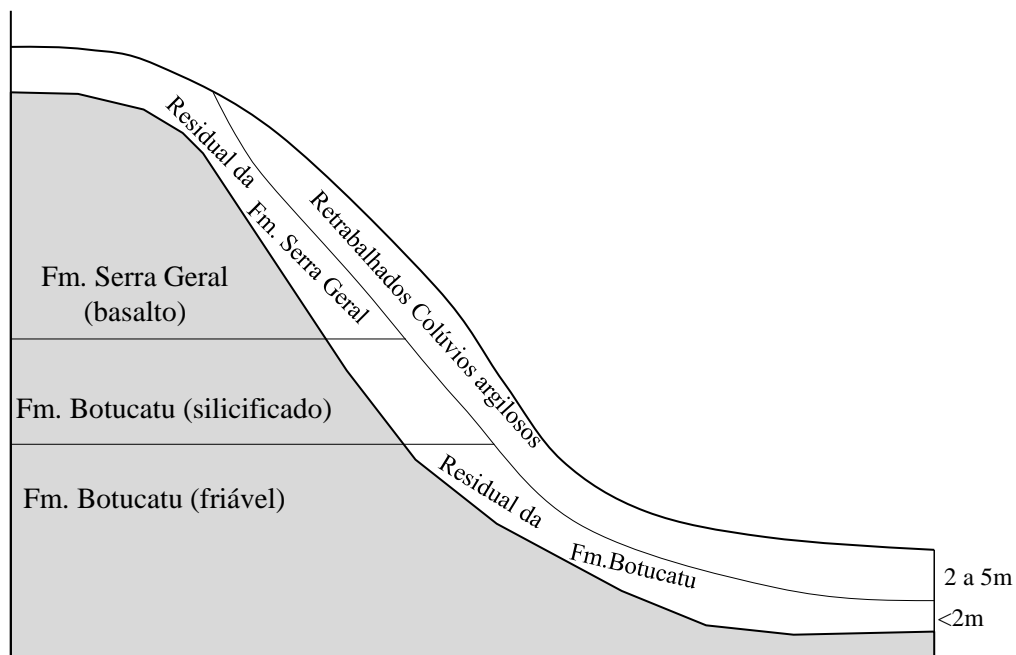


A infiltração em qualquer dos tipos de uso e manejo é representada pela curva de infiltração da cana de açúcar madura. Verifica-se que as taxas de infiltração são altas no início do ensaio, todavia apresentam valores considerados baixos ( $<0,015\text{cm/min}$ ).

Em termos de massa específica seca de campo, a cana de açúcar madura apresentou valores ( $>1,5\text{g/cm}^3$ ) muito superiores as demais unidades de condição de infiltração, as quais são inferiores a  $1,45\text{g/cm}^3$  e refletem diretamente na capilaridade efetiva. A diferença entre a cana de açúcar madura ( $6,06\text{cm}$ ) e a sulcada ( $3,82\text{cm}$ ) que representam o máximo e o mínimo foi de aproximadamente 2 cm superior.

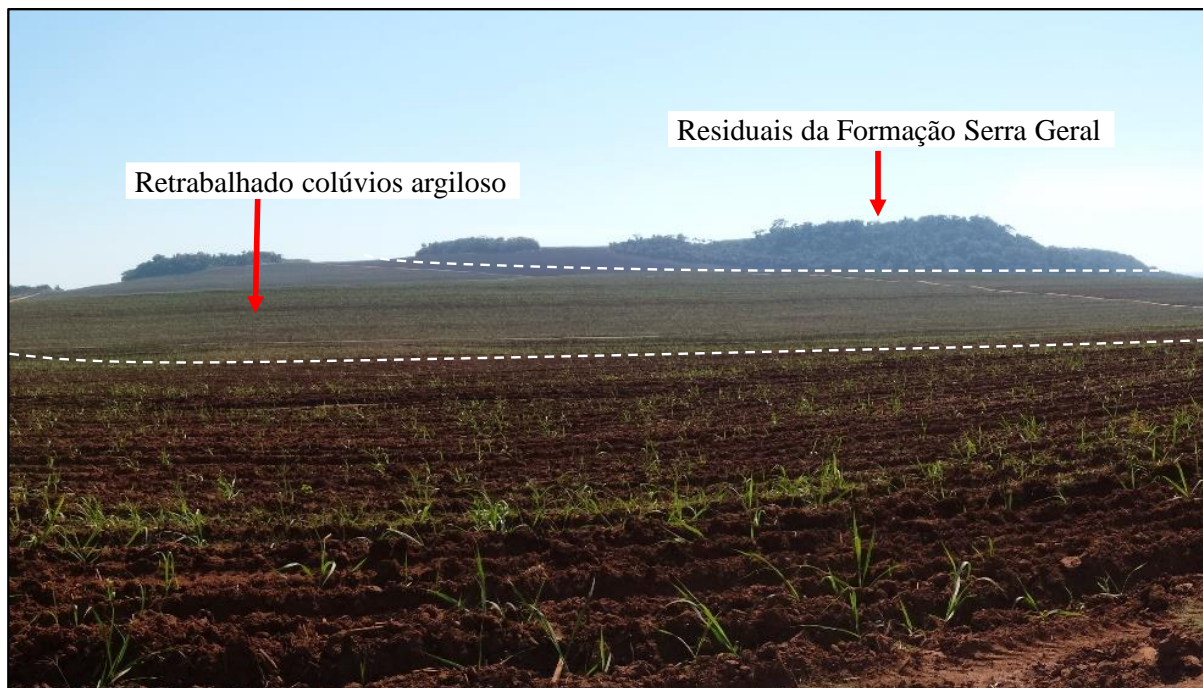
#### 5.3.3.3.12. Materiais inconsolidados retrabalhados Colúvio Argilosos

Encontram-se nas encostas associados a afloramentos da Formação Serra Geral (Figura 146 e 147) com transporte de pequenas distâncias, tendem a conservar as características mineralógicas e coloração do material residual que lhe deu origem, e as espessuras variam de 2 a 5 metros.



**Figura 146.** Perfil esquemático de ocorrência dos materiais inconsolidados retrabalhados Colúvio Argilosos.

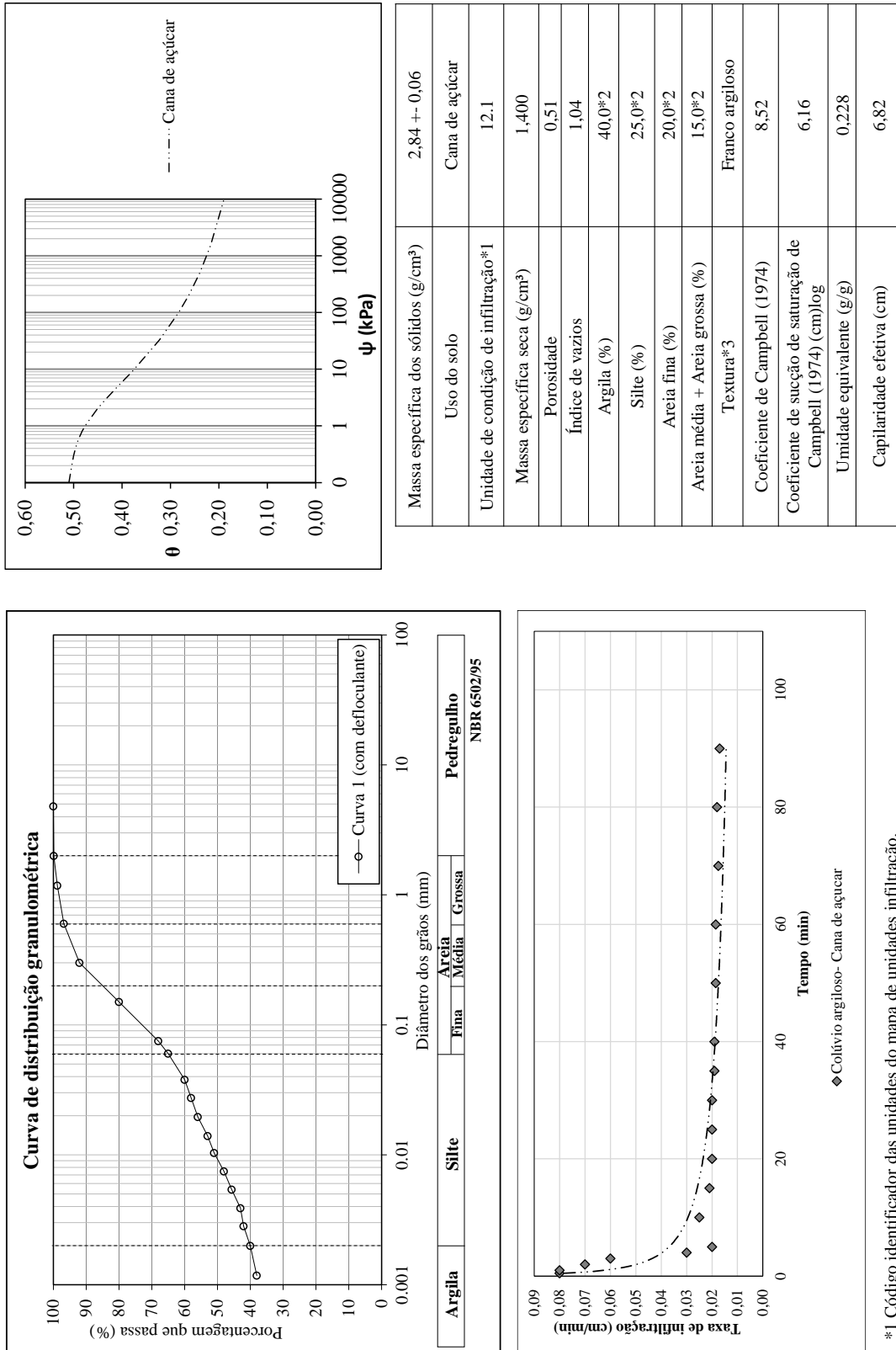
Fonte: Autor



**Figura 147.** Área de ocorrência dos materiais inconsolidados retrabalhados Colúvios Argilosos.

**Fonte:** Autor

Praticamente toda a extensão tem como uso a cana de açúcar. Um quadro dos resultados de ensaios de laboratório e de campo obtidos para os retrabalhados Colúvios arenosos está na Figura 148.



**Figura 148.** Quadro da caracterização das condições de infiltração presentes nos retrabalhados Colúvio argilosos.

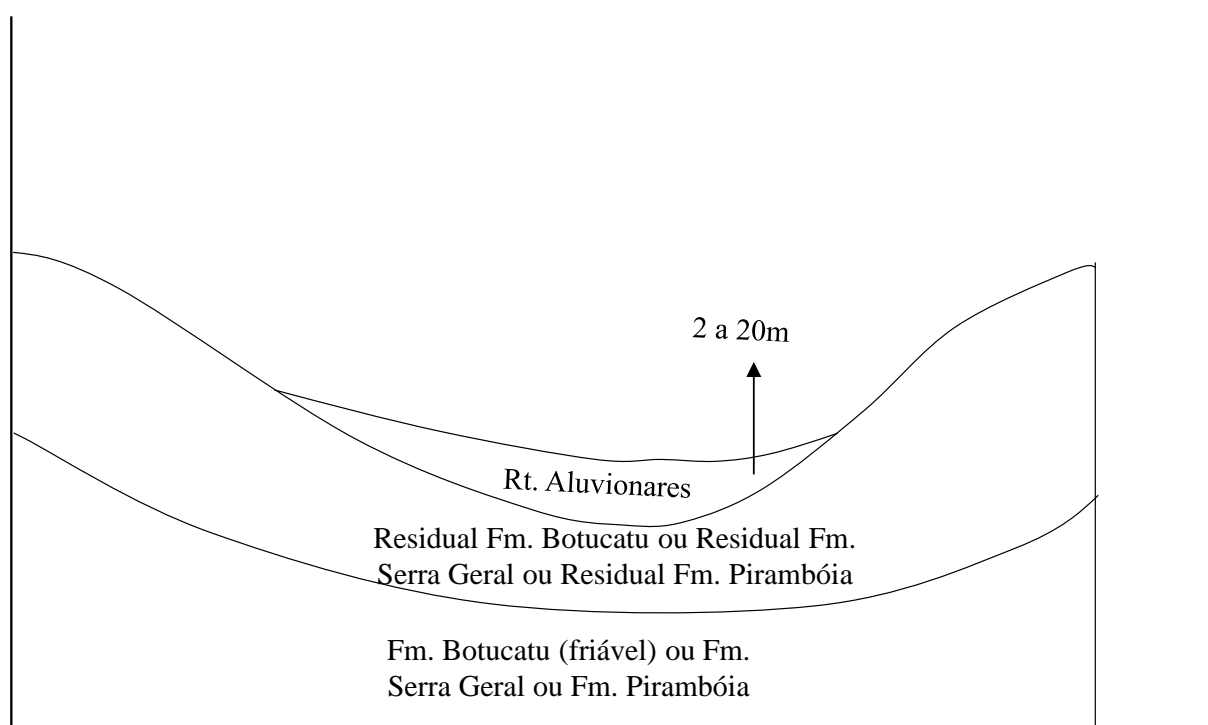
Fonte: Autor

\*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades infiltração.  
 \*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação função de pedotransferência de Tomassela *et al.* (2002).  
 \*3 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).

As principais características da condição de infiltração caracterizada estão relacionadas a valores de capacidade de infiltração ao redor de 0,02cm/min. A compactação é considerada moderada para um solo argiloso, onde o valor de massa específica de campo é 1,40 g/cm<sup>3</sup>. A curva de retenção de água apresenta um alto potencial de retenção, enquanto que para a capilaridade efetiva obteve-se valores superiores a 6cm.

#### 5.3.2.3.13. Materiais inconsolidados retrabalhados Aluvionares

Localizam-se principalmente nos fundos de vales (Figura 149), apresentam o nível de água pouco profundo, textura variada com predominância da fração areia, ricas em matéria orgânica e espessuras variadas. A coloração varia na sua extensão principalmente com tonalidades amarela clara a cinza clara (Figura 150). A mineralogia deste material inconsolidado é composta por quartzo, caulinita e illita com matéria orgânica.



**Figura 149.** Perfil esquemático dos retrabalhados Aluvionares.

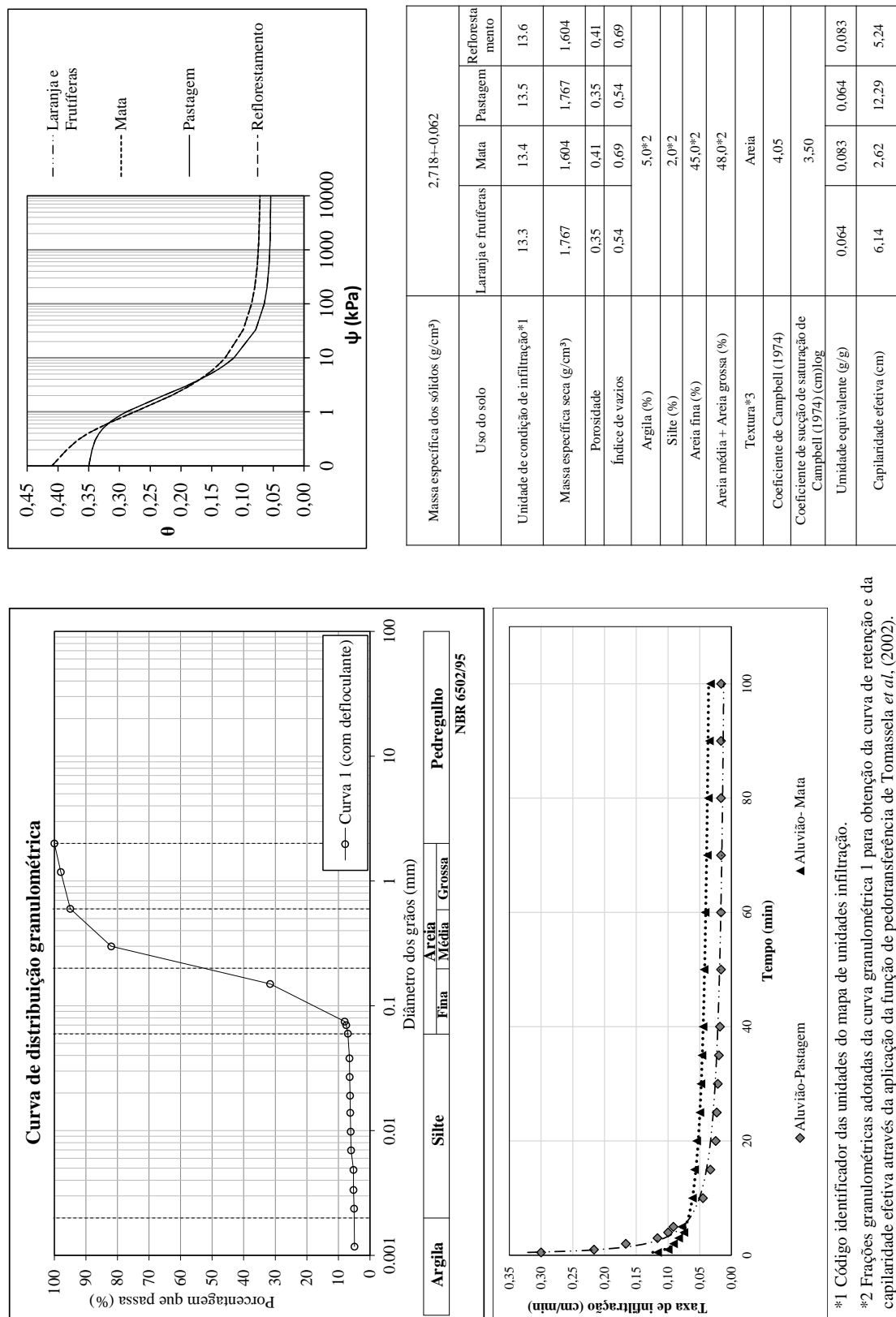
**Fonte:** Autor



**Figura 150.** Exemplo de uma área associada aos materiais inconsolidados retrabalhados Aluvionares

**Fonte:** Autor

No total foram identificados 4 tipos de uso do solo: laranja e outras espécies frutíferas, mata, pastagem e reflorestamento. Na Figura 151 têm-se os resultados de ensaios de laboratório e de campo das diferentes unidades de condição de infiltração relacionadas aos materiais inconsolidados retrabalhados Aluvionares.



**Figura 151.** Quadro da caracterização das unidades de condições de infiltração relacionadas aos retrabalhados Aluvionares.

Fonte: Autor

- \*1 Código identificador das unidades do mapa de unidades de infiltração.  
 \*2 Frações granulométricas adotadas da curva granulométrica 1 para obtenção da curva de retenção e da capilaridade efetiva através da aplicação da função de pedotransferência de Tomassela *et al.*, (2002).  
 \*3 Classificação textural dos materiais inconsolidados conforme o triângulo textural proposto pela USDA (2017).

A granulometria para as amostras coletadas tem-se valores médios de 5% de argila, 2% de silte, 45,0% de areia fina, 43 de areia média% e 5% de areia grossa e de acordo com a USDA (2017) é considerado uma areia. A compactação variou entre os diferentes tipos de uso, onde a pastagem e a laranja e outras espécies frutíferas apresentaram os menores valores de massa específica seca de campo e porosidade.

As curvas de infiltração para as pastagens apresentam uma menor capacidade de infiltração em comparação as matas, todavia no início, as taxas de infiltração são maiores na pastagem devido aos maiores valores de capilaridade efetiva. Ressalta-se que as curvas de infiltração referentes a laranja e outras espécies frutíferas e reflorestamento não foram inseridas no gráfico, pois apresentam comportamento semelhante ao da pastagem e mata respectivamente.

As curvas de retenção de água apresentam um baixo potencial de retenção. Para as unidades de condição de infiltração mais compactadas como a pastagem e a laranja e outras espécies frutíferas a zona de efeito limite é expressiva, consequentemente os valores de capilaridade efetiva são maiores (>6cm).

#### ***5.3.4. Análises físico químicas das águas subsuperficiais***

As águas subsuperficiais foram analisadas conforme aspectos contidos no item 4.2.9.3. A seleção dos pontos de coleta e de procedimento de amostragem tanto em fontes como em poços constam no Item 4.2.9.1.

##### *Fontes*

De maneira geral, as fontes amostradas apresentam condições e características distintas, seja em tipologia, vazão, estado de conservação e uso do solo presente na área de contribuição. Foram identificadas na sua maioria fontes pontuais (Figura 152), as quais podem estar relacionadas também à fratura das rochas como nos materiais geológicos da Formação Serra Geral (Figura 153). As fontes difusas, por sua vez, ocorreram somente nos residuais da Formação Botucatu (Figura 154). A vazão das fontes varia visualmente desde baixa (Figura 155-A) a alta (Figura 155-B). Os usos do solo predominantes estão associados às pastagens, matas, laranja, urbano e cana de açúcar, sendo que o último foi o mais recorrente. Em termos de estado de conservação as fontes apresentaram diversas condições, desde bem protegidas com mais de 30 metros de faixa vegetada, até sem nenhuma cobertura vegetal (Figura 156).





**Figura 152.** Exemplo de uma fonte pontual localizada sobre os materiais geológicos da Formação Itaqueri (P7).

**Fonte:** Autor



**Figura 153.** Exemplo de uma fonte pontual onde a água flui por as fraturas dos basaltos da Formação Serra Geral (P3).

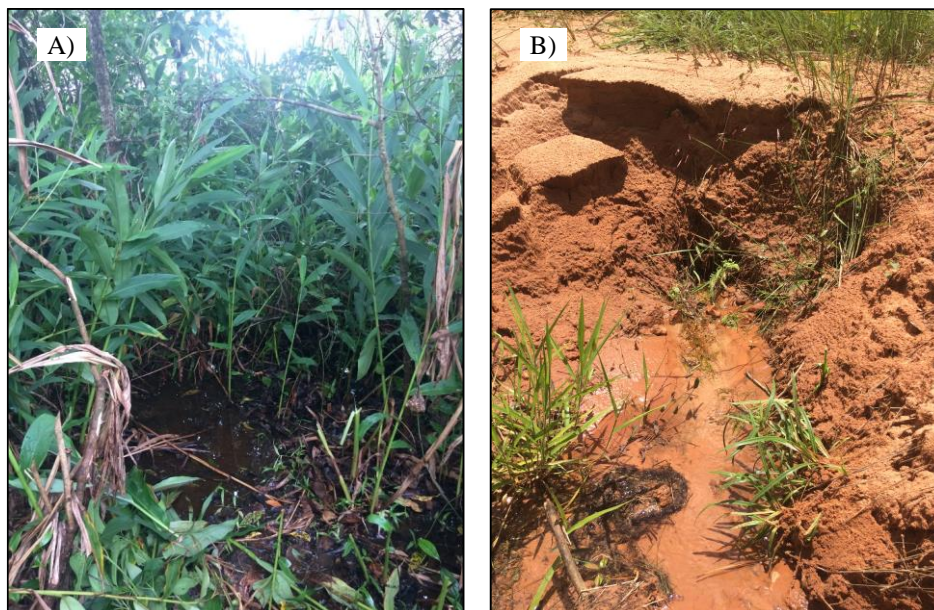
**Fonte:** Autor



**Figura 154.** Exemplo de uma fonte difusa localizada nos materiais geológicos da Formação Botucatu (P11).

**Fonte:** Autor





**Figura 155.** Exemplo de vazões A) Fonte que apresenta baixo fluxo (P72), B) Fonte que apresenta alto fluxo (P55).

Fonte: Autor



**Figura 156.** Exemplo de uma fonte que não apresenta zona de proteção vegetal ao seu redor (P10).

Fonte: Autor

### *Poços*

Os poços amostrados apresentam diferenças tanto no seu tipo como na profundidade. Os tipos encontrados foram poço rasos (Figura 157) os quais chegavam no máximo a 30 metros de profundidade e os profundos que alguns casos atingiram 80 metros.



**Figura 157.** Exemplo de um poço raso amostrado (P8).

**Fonte:** Autor

Em termos de seleção dos locais amostrados, foi considerado os diversos tipos de materiais geológicos, entretanto alguns dos materiais não apresentavam fontes e poços em condições para realizar a coleta. No total foram amostrados 82 pontos, nos quais 70 são fontes e 12 poços (Apêndice XIII). As informações das propriedades físico-química das águas subsuperficiais organizada por materiais geológicos, assim como dados referentes a área de contribuição das fontes e de influência dos poços estão na Tabela 29. A descrição das águas subsuperficiais em função dos materiais geológicos estão a seguir.

Tabela 29. Caracterização físico química das águas subsuperficiais da área de estudo.

Ponto	Tipo	Folha do IBGE	Material inconsolidado	Uso do solo ao redor	Área de contribuição (km²)	Cota (m)	Profundidade do poço (m)	Diâmetro do poço (cm)	Condutividade hidráulica saturada (m/s)	Δh (m)	Raio de ação máximo do poço (m)	Vazão de bombeamento (L/s)	Tempo de recuperação (h)	C,E, (μOhm/cm)	pH	Li <sup>+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	F <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Br <sup>-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	[CaCO <sub>3</sub> ] (mg/L)	STD (mg/L)	Classificação de Piper	Cd (mg/L)	Pb (mg/L)	Cu (mg/L)	Cr (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Zn (mg/L)	
1	Mina	São Carlos	Residual Itaqueri	Pastagem	0,147	907								17,3	6,53	<0,001	0,502	0,125	1,313	0,825	1,115	0,039	0,528	0,004	0,004	0,48	0,045	0,249	9,87	8,09	23,19	Mista Bicarbonatada									
2	Mina	São Carlos	Residual Itaqueri	Pastagem / Cana de açúcar	0,189	914								25,9	6,08	<0,001	0,808	0,233	2,929	1,144	1,235	0,075	1,519	0,008	0,007	0,798	0,028	0,435	13,396	10,98	33,595	Mista Bicarbonatada									
4	Mina	São Carlos	Residual Itaqueri	Cana/ Pastagem	0,116	917								21,7	6,73	<0,001	0,676	0,015	2,085	0,874	2,305	0,087	0,733	0,004	0,018	0,396	0,043	0,605	13,396	10,98	32,217	Mista Bicarbonatada	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,013	<LD	<LD	
6	Mina	Ibaté	Residual Itaqueri	Cana de açúcar	0,096	901								13,6	6,25	<0,001	0,645	0,017	0,992	0,291	0,467	0,054	1,08	0,004	0,007	0,404	0,026	0,065	4,233	3,47	11,755	Sódica Bicarbonatada									
7	Mina	São Carlos	Residual Itaqueri	Cana de açúcar	0,048	934								11,5	6,04	<0,001	0,937	0,073	0,551	0,337	1,531	0,027	0,978	0,002	0,004	0,937	0,013	0,132	7,747	6,35	19,618	Mista Bicarbonatada									
8	Poço	São Carlos	Residual Itaqueri	Cana de açúcar	-	967	10	100	8 x 10 <sup>-6</sup>	3	25	1	59	15,3	6,03	<0,001	1,461	0,018	2,202	0,085	1,444	0,019	2,894	0,003	0,002	1,342	0,014	0,338	4,929	4,04	18,789	Sódica Mista									
9	Mina	Araraquara	Residual Itaqueri	Cana de açúcar	1,356	722								13,7	6,25	<0,001	0,558	0,016	1,828	0,71	0,748	0,087	1,118	0,003	0,004	1,625	0,008	0,177	5,636	4,62	17,138	Mista Bicarbonatada									
10	Mina	São Carlos	Residual Itaqueri	Pastagem	0,043	944								19,5	6,31	<0,001	0,734	0,019	2,423	0,872	1,175	0,027	0,991	0,003	0,004	0,226	0,006	0,518	10,577	8,67	26,245	Mista Bicarbonatada									
45	Mina	Araraquara	Residual Itaqueri	Cana de açúcar	0,602	749								37,6	7,12	<0,001	0,894	0,031	0,707	0,424	1,997	0,023	1,025	0,003	0,013	0,97	0,008	1,67	6,344	5,2	19,309	Cálcica Bicarbonatada									
50	Mina	Araraquara	Residual Itaqueri	Cana de açúcar	0,714	738								24,7	6,57	<0,001	0,829	0,06	1,257	0,395	4,626	0,036	0,62	0,003	0,017	0,276	0,019	0,328	16,909	13,86	39,235	Mista Bicarbonatada									
58	Mina	Ibaté	Residual Itaqueri	Urbano	0,032	815								26,4	6,44	<0,001	0,584	0,028	0,995	0,763	5,167	0,029	2,196	0,005	0,003	0,903	0,007	0,136	16,214	13,29	40,32	Cálcica Bicarbonatada	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,01	<LD	0,003	
65	Mina	Ibaté	Residual Itaqueri	Mata	0,281	847								35,9	7,01	0,001	0,663	<0,001	2,004	0,663	6,362	0,056	0,194	0,005	0,005	0,272	0,004	0,149	23,961	19,64	53,979	Cálcica Bicarbonatada									
66	Mina	Ibaté	Residual Itaqueri	Chacreamento / Urbano/Pasto	0,527	850								113,9	6,74	<0,001	12,195	0,218	2,466	0,65	11,258	0,075	6,94	0,126	0,037	19,638	0,026	5,271	34,538	28,31	121,748	Mista Bicarbonatada									
70	Mina	Ibaté	Residual Itaqueri	Cana/Pasto	0,301	721								27,7	6,21	<0,001	0,415	0,013	1,344	0,432	4,972	0,026	0,918	0,003	0,005	3,383	0,008	0,2	13,396	10,98	36,093	Cálcica Bicarbonatada									
71	Mina	Ibaté	Residual Itaqueri	Cana de açúcar	0,141	781								28,5	6,31	<0,001	0,336	0,008	2,055	0,684	2,155	0,035	0,349	0,002	0,017	3,141	0,024	0,044	11,98	9,82	30,65	Mista Bicarbonatada									
73	Mina	Ibaté	Residual Itaqueri	Pastagem	0,143	763								33,5	6,92	<0,001	0,35	<0,001	2,087	0,51	6,135	0,048	1,026	0,005	0,023	1,848	0,033	0,128	19,032	15,6	46,825	Cálcica Bicarbonatada									
81	Mina	São Carlos	Residual Itaqueri	Cana de açúcar	0,279	826								23,6	6,29	<0,001	0,589	<0,001	2,869	0,642	0,906	0,062	3,791	0,001	0,038	0,391	0,014	0,652	5,636	4,62	20,211	Sódica Cloretada	<LD	<LD	<LD	<LD	0,122	<LD	<LD	0,004	
42	Poço	Araraquara	Residual Adamantina	Outras Culturas / Cana	-		22	100	3,3x10 <sup>-5</sup>	2	34	2	25	13,2	5,84	<0,001	0,491	0,012	0,406	0,062	3,806	0,022	0,273	0,003	0,005	0,767	0,005	0,675	10,577	8,67	25,773	Mista Bicarbonatada									
43	Mina	Araraquara	Residual Adamantina	Cana de açúcar	0,83	623								17,6	6,79	<0,001	0,529	0,021	1,418	0,937	2,061	0,03	0,743	0,002	0,003	0,065	0,063	0,245	12,688	10,4	29,204	Mista Bicarbonatada									
48	Mina	Araraquara	Residual Adamantina	Cana de açúcar	0,666	717								64,4	6,27	<0,001	1,446	0,099	4,378	2,075	4,577	0,046	5,161	0,014	0,017	6,328	0,015	0,487	21,143	17,33	63,114	Mista Bicarbonatada									
49	Mina	Araraquara	Residual Adamantina	Cana de açúcar	0,811	712								26,5	6,59	<0,001	1,008	0,002	0,892	0,499	4,829	0,029	0,747	0,003	0,016	1,829	0,007	0,349	15,506	12,71	38,425	Cálcica Bicarbonatada									
52	Poço	Araraquara	Residual Adamantina	Cana de açúcar	-	699	15	100	3,3x10 <sup>-5</sup>	2	34	2	25	106,7	5,87	0,002	5,037	0,026	4,373	2,461	7,035	0,086	12,976	0,011	0,018	26,932	0,017	0,205	9,87	8,09	77,139	Mista Cloretada	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,24	<LD	0,004	
3	Mina	São Carlos	Residual Serra Geral	Pastagem / outras culturas	0,459	838								69,4	6,72	<0,001	1,965	0,088	0,605	1,628	8,134	0,078	2,767	0,005	0,069	0,258	0,017	0,247	33,123	27,15	76,135	Cálcica Bicarbonatada	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	0,014	<LD	<LD	
31	Mina	Ribeirão Bonito	Residual Serra Geral	Cana de açúcar	0,366	597								23,3	6,56	<0,001	0,955	0,055	2,912	1,214	1,295	0,034	1,372	0,004	0,008	2,794	0,013	0,14	12,688	10,4	33,885	Mista Bicarbonatada									
32	Mina	Ribeirão Bonito	Residual Serra Geral	Cana de açúcar	0,162	727								85,5	6,19	0,001	1,345	<0,001	2,814	2,252	10,422	0,084	1,444	0,001	0,112	5,83	0,306	0,584	44,396	36,39	105,981	Cálcica Bicarbonatada	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	
39	Poço	Araraquara	Residual Serra Geral	Pastagem / Reflorestamento	-	523	22	30	5x10 <sup>-6</sup>	5	34	1	185	16,3	6,13	<0,001	0,531	0,041	1,274	0,241	3,126	0,034	0,482	0,003	0,003	1,767	0,005	0,228	9,87	8,09	25,693	Cálcica Bicarbonatada									
40	Mina	Araraquara	Residual Serra Geral	Outras Culturas	5,775	607								84,7	6,54	<0,001	3,094	0,008	3,807	1,969	10,828	0,065	4,578	0,004	0,003	0,28	0,004	0,184	50,044	41,02	115,89	Cálcica Bicarbonatada									
41	Mina	Araraquara	Residual Serra Geral	Cana de açúcar / Pastagem	0,169	527								41,8	5,91	<0,001	0,679	0,006	0,383	0,721	5,796	0,034	3,264	0,004	0,005	11,901	0,005	0,46	4,929	4,04	32,227	Cálcica Cloretada									
46	Mina	Araraquara	Residual Serra Geral	Cana de açúcar	0,404	713								33,9	6,6	<0,001	0,489	0,177	3,344	1,118	3,537	0,054	0,433	0,003	0,019	0,456	0,013	0,494	21,143	17,33	48,609	Mista Bicarbonatada									
47	Mina	Araraquara	Residual Serra Geral	Cana de açúcar	1,086	691								33,8	6,7	<0,001	1,56	0,002	0,606	0,798	6,153	0,069	0,69	0,002	0,004	0,145	0,008	0,427	25,376	20,8	56,638	Cálcica Bicarbonatada									
53	Mina	Araraquara	Residual Serra Geral	Cana de açúcar	0,291	675								52,5	6,94	<0,001	0,973	<0,001	1,855	1,726	5,443	0,051	2,759	0,036	0,006	11,082	0,025	0,333	15,506	12,71	52,504	Cálcica Bicarbonatada									
60	Poço	Ibaté	Residual Serra Geral	Cana de açúcar	-	781	15	100	5 x 10 <sup>-6</sup>	3	20	1	59	11,8	6,93	<0,001	0,37	0,029																							



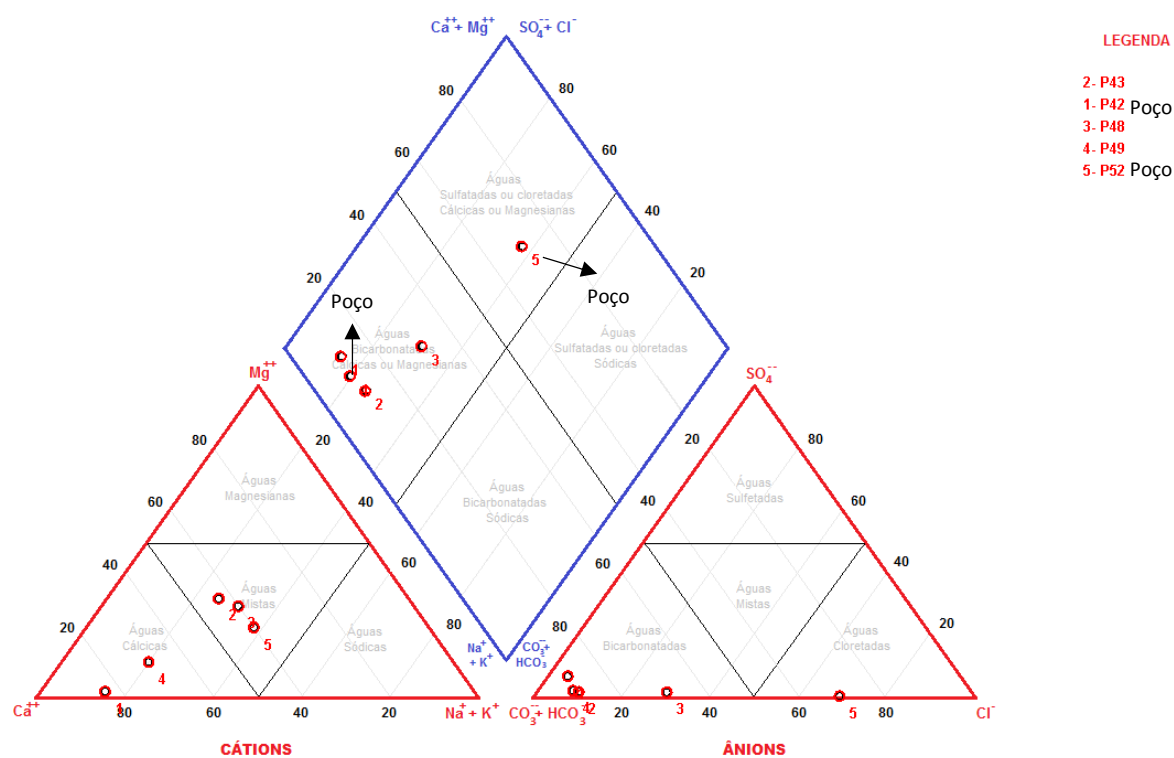
#### 5.3.4.1. Formação Itaqueri

As águas subsuperficiais amostradas das fontes associada aos nos materiais geológicos da Formação Itaqueri são águas macias (média 28,310 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ) e ácidas (média de 6,46 de pH). A composição iônica, no geral apresentou valores baixos de concentração dos constituintes majoritários ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{NH}_4^+$ ), fato este que foi refletido diretamente na condutividade elétrica (C.E.) (média de 28, 8  $\mu\text{Ohm}/\text{cm}$ ) e nos sólidos totais dissolvidos (121,748 mg/L). Entretanto o ponto 66 foi o que distou do restante das amostras, o qual apresenta uma maior condutividade elétrica (113,9  $\mu\text{Ohm}/\text{cm}$ ). Esta maior condutividade elétrica foi refletida nos valores de concentração dos íons majoritários como os do nitrato (19,638 mg/L) podem estar associados aos usos urbanos no seu entorno. Para os metais pesados foram caracterizadas 3 amostras, todavia as concentrações encontradas foram baixas ou estavam abaixo do limite de detecção do método. Afim de comparar os distintos grupos de águas quanto aos cátions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) e ânions ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{Cl}^-$ ) dominantes foi utilizada o diagrama Piper (Item 4.2.9.3) para classifica-las. A partir do diagrama de Piper (Figura 158) 14 fontes relacionadas aos materiais geológicos da Formação Itaqueri são consideradas como bicarbonatadas cálcicas ou mistas, enquanto 2 são classificadas como sódica cloretada ou mista.





identificada diversos tipos de cultura, criações de animais e plantação de cana de açúcar. Em termos de metais pesados verificou-se que as concentrações são baixas ou abaixo do limite do detectável. Baseado no diagrama de Piper (Figura 159) as águas subsuperficiais são classificadas como bicarbonatadas mista ou cálcica, exceto pelo P52 que é uma amostra mista clorurada, no qual o aporte de  $\text{Cl}^-$  possivelmente está relacionado aos usos.



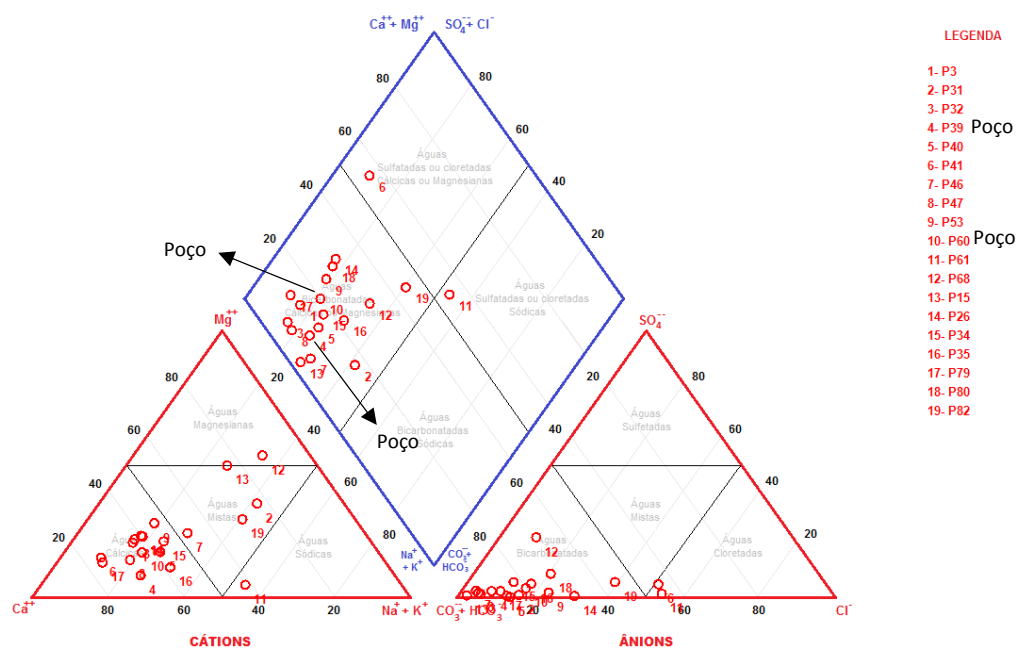
**Figura 159.** Classificação de Piper das amostras coletadas das fontes e poços localizados nos materiais geológicos da Formação Adamantina.

Fonte: Autor

#### 5.3.4.3. Formação Serra Geral

Foram coletadas 19 amostras, dentre as quais 12 (2 poços) estão associadas aos basaltos e 7 aos diabásio. As áreas de contribuição das fontes e influência dos poços estão associadas a usos como cana de açúcar, outras culturas, reflorestamento e mata. São consideradas águas ácidas (média e desvio padrão do pH de 6,51 e 0,46) e macias (média e desvio padrão de  $\text{CaCO}_3$  de 13,92 e 11,43 mg/L). A condutividade elétrica apresentou uma média de 35,9  $\mu\text{Ohm/cm}$ , com desvio padrão de 24,6  $\mu\text{Ohm}$ , valor máximo de 85,5 e mínimo de 7,5  $\mu\text{Ohm/cm}$ . Para as amostras coletadas em poços, os valores de C.E. foram inferiores a 17  $\mu\text{Ohm/cm}$ , o que é um indicativo de que as atividades antropogênicas não estão as águas subterrâneas. A composição iônica das águas da Formação Serra Geral independentemente de onde foi coletada, apresenta

como principal cátion o  $\text{Ca}^{2+}$  (média e desvio padrão de 4,412 e 3,147mg/L) e ânion o  $\text{HCO}_3^-$  (média e desvio padrão de 16,989 e 13,944 mg/L). Ao comparar as águas coletadas de fontes com as de poços, observou-se os poços apresentam concentrações mais elevadas desses íons devido à possível interferência dos usos no topo da zona saturada. Caracterizaram-se 3 amostras em termos de metais pesados, entretanto as concentrações encontradas foram baixas. De acordo com o diagrama de Piper (Figura 160), as amostras de poços foram classificadas como cálcicas bicarbonatadas e as de fontes como cálcica bicarbonatada predominantemente, ocorrendo ainda mistas e magnesianas bicarbonatadas e cálcica e sódica cloretada.



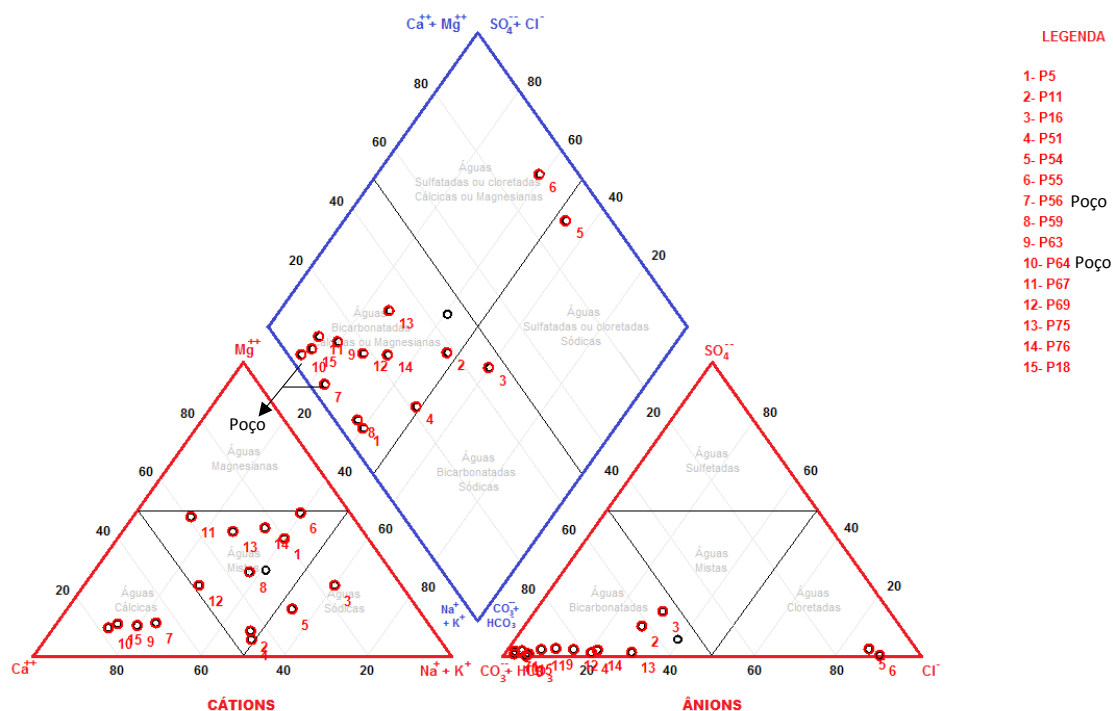
**Figura 160.** Classificação de Piper das amostras coletadas das fontes e poços associados aos materiais geológicos da Formação Serra Geral.

Fonte: Autor

#### 5.3.4.4. Formação Botucatu

Um conjunto de 13 fontes e 2 poços foi amostrado, onde os principais tipos de usos na área de contribuição das fontes e no raio máximo estão relacionados à cana de açúcar, pastagens, matas, reflorestamentos e mineração. Independentemente do local coletado, as águas apresentaram caráter ácido e baixa dureza. Baseado no diagrama de Piper (Figura 161), as águas coletadas nos poços são classificadas como cálcicas bicarbonatadas, enquanto que as das fontes variaram entre mista, sódica e cálcica bicarbonatada a sódica e mista cloretada.





**Figura 161.** Classificação de Piper das amostras coletadas das fontes e poços localizados nos materiais geológicos da Formação Botucatu.

**Fonte:** Autor

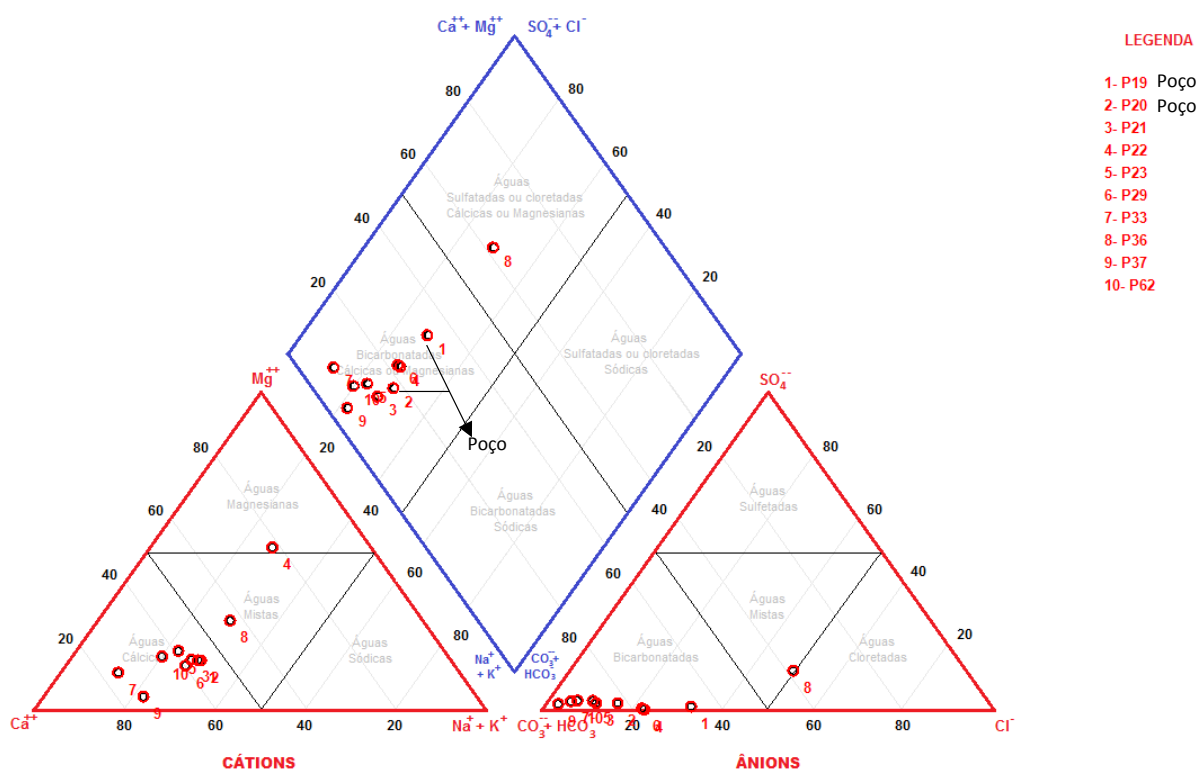
De forma específica as amostras de água obtidas dos poços tenderam a apresentar concentrações maiores comparadas as das fontes principalmente em relação ao nitrato, cálcio e ao hidrogenofosfato. Considerando às fontes, o P18 chama atenção devido aos valores de concentração superiores de cálcio e bicarbonato. Este fato pode estar relacionado à aplicação de calcário para a corrigir o pH do solo, ou por conta dos cimentos carbonáticos da Formação Adamantina que está sotoposta a Formação Botucatu.

Em termos de contaminação, verificou-se que a fonte P55 apresenta uma concentração de 30,875 mg/L de nitrato, a qual relaciona-se a um possível aporte oriundo das plantações de cana de açúcar. A fonte P54 apresenta também um aspecto interessante que são os valores de concentração do cloro (15,816 mg/L), que por conta da condição de infiltração pode ocorrer a lixiviação de produtos clorados usados na superfície por atividades agrícolas.

#### 5.3.4.5. Formação Pirambóia

O conjunto amostrado foi de 6 fontes e 4 poços. Os resultados apontaram que as águas dos poços são ácidas e macias, com condutividade elétrica que varia desde 19,1 a 75,5  $\mu\text{Ohm/cm}$ . Os poços com condutividade elétrica elevadas se diferiram em termos de íons

predominantes, dentre os quais o P62 apresentou as maiores concentrações de bicarbonato e cálcio, enquanto o P19 as de nitratos, as quais sugerem uma possível fonte de contaminação próximo aos poços. Em termos de metais pesados, quase todos os elementos estavam abaixo da concentração limite de detecção. Os poços segundo o diagrama de Piper (Figura 162) foram classificados como águas cálcicas bicarbonatada.



**Figura 162.** Classificação de Piper das amostras coletadas das fontes e poços associados aos materiais geológicos da Formação Pirambóia.

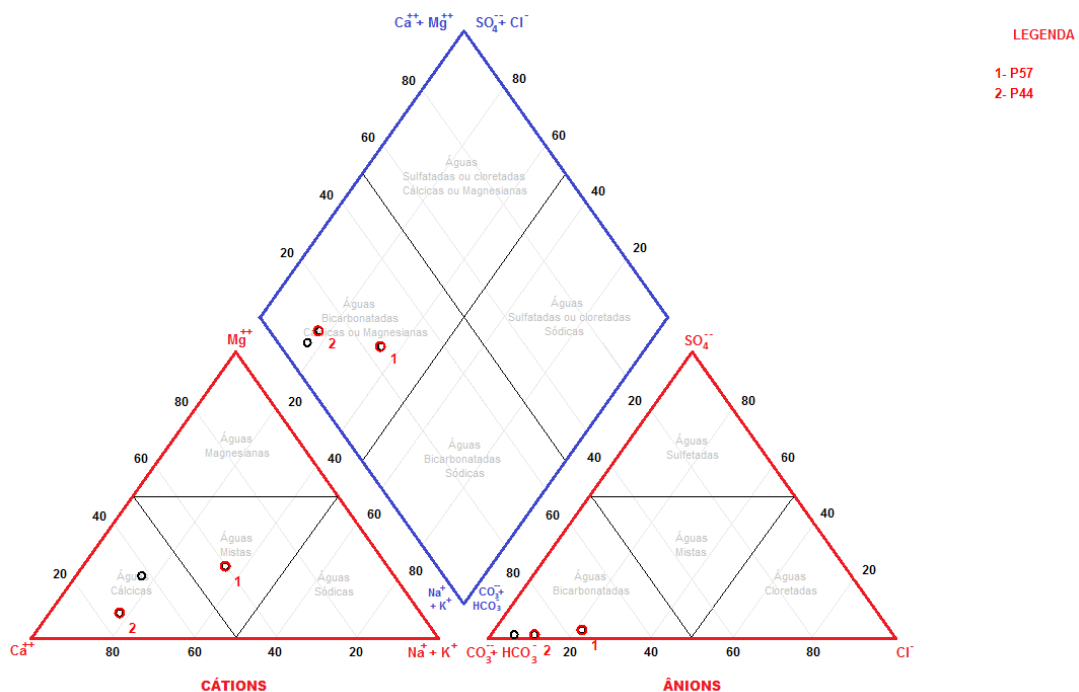
Fonte: Autor

As águas coletadas das fontes são classificadas como ácidas e macias, com condutividade elétrica que varia entre 27,8 a 105,7  $\mu\text{Ohm}/\text{cm}$ . Estas estão circundadas predominantemente por cana de açúcar. A composição iônica tendeu a apresentar concentrações dos cátions majoritários que em média não ultrapassavam 7 mg/L para o cálcio, 1,5 a 3,5 mg/L para o potássio, 2 mg/L para o magnésio e o sódio. Enquanto que para os ânions majoritários, os que se destacam são os bicarbonatos que variaram em média de 1 a 25 mg/L e os nitratos de 0,1 até quase 11 mg/L. Somente uma fonte apresentou comportamento diferente das descritas anteriormente que foi a P33. Essa fonte apresentou concentrações mais que o dobro em cálcio e bicarbonatos que refletiu na condutividade elétrica (105,7  $\mu\text{Ohm}/\text{cm}$ ), além disso foi a única

com pH acima de 7. Este resultado pode estar associado à aplicação de calcário nas culturas presente na área de contribuição da fonte. Para os metais pesados foi analisado uma amostra e assim como nos poços não foi possível determinar a concentração por conta do limite do método. Baseado no diagrama de Piper (Figura 162) as amostras dos poços foram classificadas predominantemente como cálcica e magnésiana bicarbonatada a mistas.

#### 5.3.4.6. Material inconsolidados retrabalhados Cenozóicos

Nestes foram coletadas apenas duas amostras, as quais apresentaram pH ácido e dureza macia. A área de contribuição está ocupada predominantemente por cana de açúcar. A condutividade elétrica variou de 15 a 66,4  $\mu\text{Ohm}/\text{cm}$ , e tem como íon majoritário (28,194 mg/L). Verificou-se que as concentrações de metais pesados foram baixas. Com base no diagrama de Piper (Figura 163) as amostras foram classificadas como mista e cálcicas bicarbonatadas.



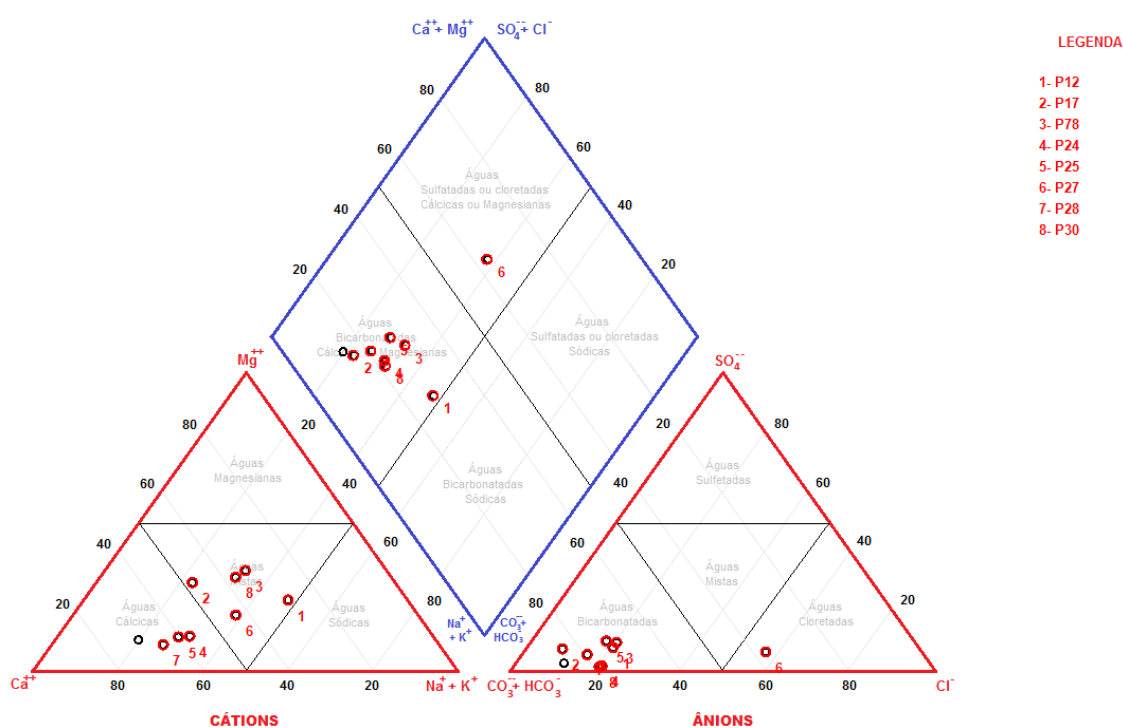
**Figura 163.** Classificação de Piper das amostras coletadas das fontes e poços associados aos materiais geológicos retrabalhados Cenozóicos.

Fonte: Autor

#### 5.3.4.7. Materiais inconsolidados retrabalhados arenosos

Nos retrabalhados arenosos foram amostradas 8 fontes as quais são classificadas como ácidas (média de pH de 5,93) e macias (média de  $\text{CaCO}_3$  de 7,36). Não apresentaram valores elevados de condutividade elétrica (média de 26,3  $\mu\text{Ohm}/\text{cm}$ ) que refletiu diretamente nos

baixos valores dos constituintes majoritários como o  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ . Todavia, nestes materiais duas amostras são importantes destacar, o ponto P27 que apresentou mais que o dobro da concentração de nitrato em relação as outras amostras, que é um indicativo de um aporte dos fertilizantes utilizados nas culturas de laranja presente na área de contribuição. O P17, por sua vez, apresentou as menores concentrações identificadas em todo conjunto amostral independentemente do tipo de material geológico, com uma condutividade elétrica de 4,89  $\mu\text{Ohm}/\text{cm}$ . Para os metais pesados as concentrações encontradas foram muito baixas ou abaixo do limite de detecção do método. Em relação à classificação de Piper (Figura 164) as águas subsuperficiais são na sua maioria consideradas como bicarbonatadas cálcicas ou mistas.



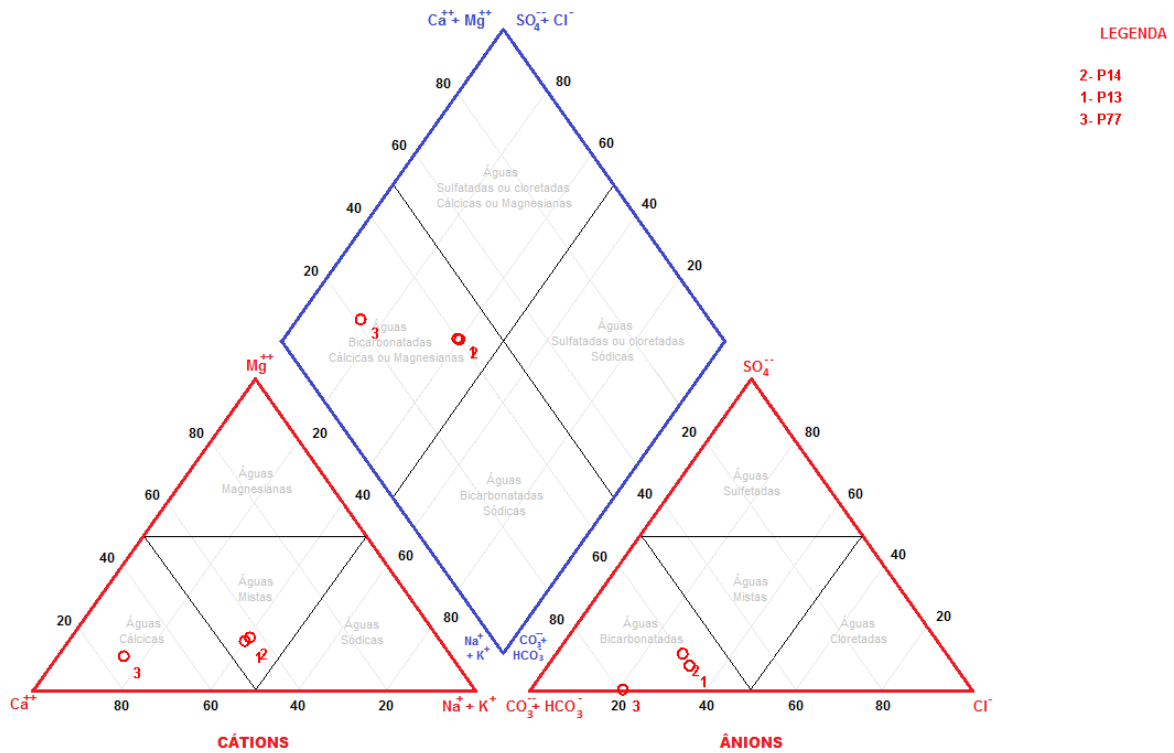
**Figura 164.** Classificação de Piper das amostras coletadas das fontes e poços relacionados aos materiais geológicos retrabalhados Arenosos.

Fonte: Autor

#### 5.3.4.8. Materiais inconsolidados retrabalhados Areno argilosos

Um conjunto de 3 amostras em fontes foram coletadas. As áreas de contribuição são ocupadas por usos variados, desde mata até cana de açúcar. As águas amostradas são predominantemente ácidas e macias. Baseado no diagrama de Piper (Figura 165) estas são classificadas como bicarbonatadas cálcicas ou mistas. A condutividade elétrica está intimamente ligada ao aumento da concentração de bicarbonato. As concentrações dos outros

elementos são consideradas baixas. Nos metais pesados as concentrações foram inferiores ao limite detectável.

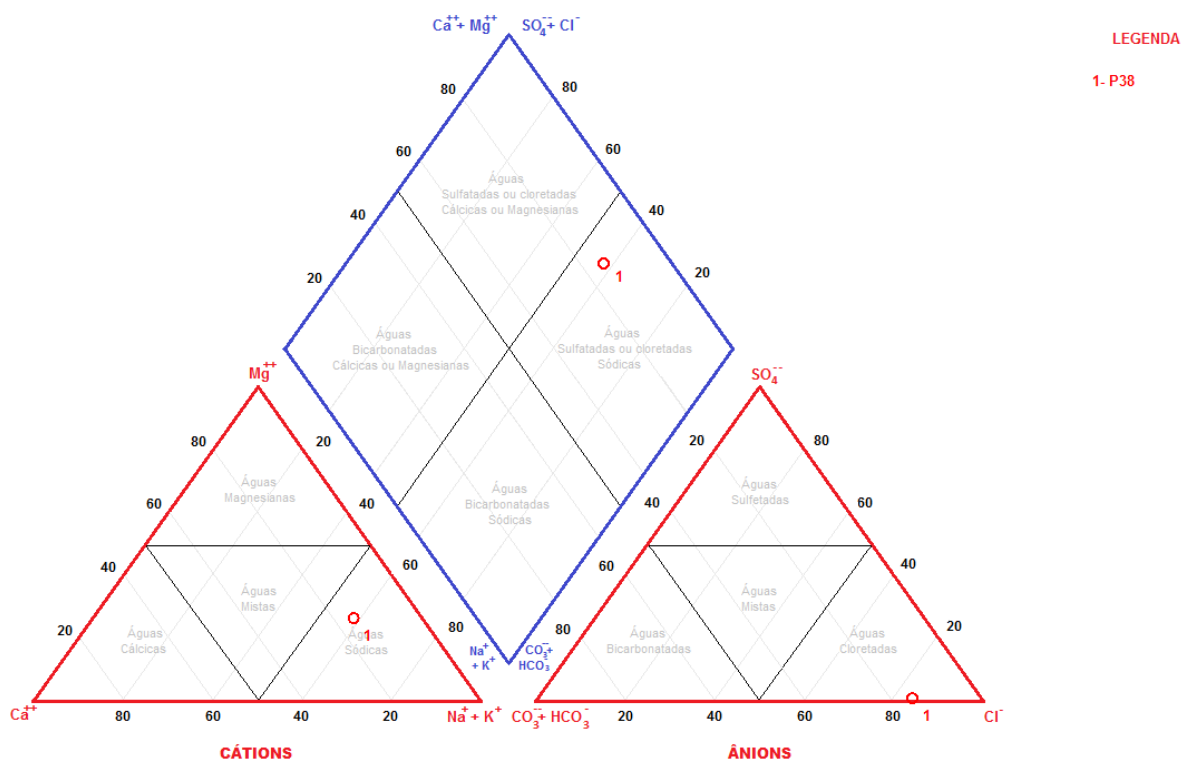


**Figura 165.** Classificação de Piper das amostras coletadas das fontes e poços localizados nos materiais geológicos retrabalhados Areno argilosos.

Fonte: Autor

#### 5.3.4.9. Retrabalhado Colúvio areno argilosos

O poço (P38) tem a área de influência ocupada por cana de açúcar. Os resultados da caracterização físico química mostraram que esta amostra apresentou o menor valor de pH, assim como de  $\text{CaCO}_3$  entre as 82 coletadas. As concentrações na maioria dos elementos majoritários são baixas. Em termos de contaminação esta amostra não apresentou concentrações altas de metais pesados, todavia a de nitrato (29,451 mg/L) indica uma possível contaminação oriunda do manejo inadequado na extração da água e vedação poço. Baseado no diagrama de Piper (Figura 166) foi classificada como sódica clorretada.

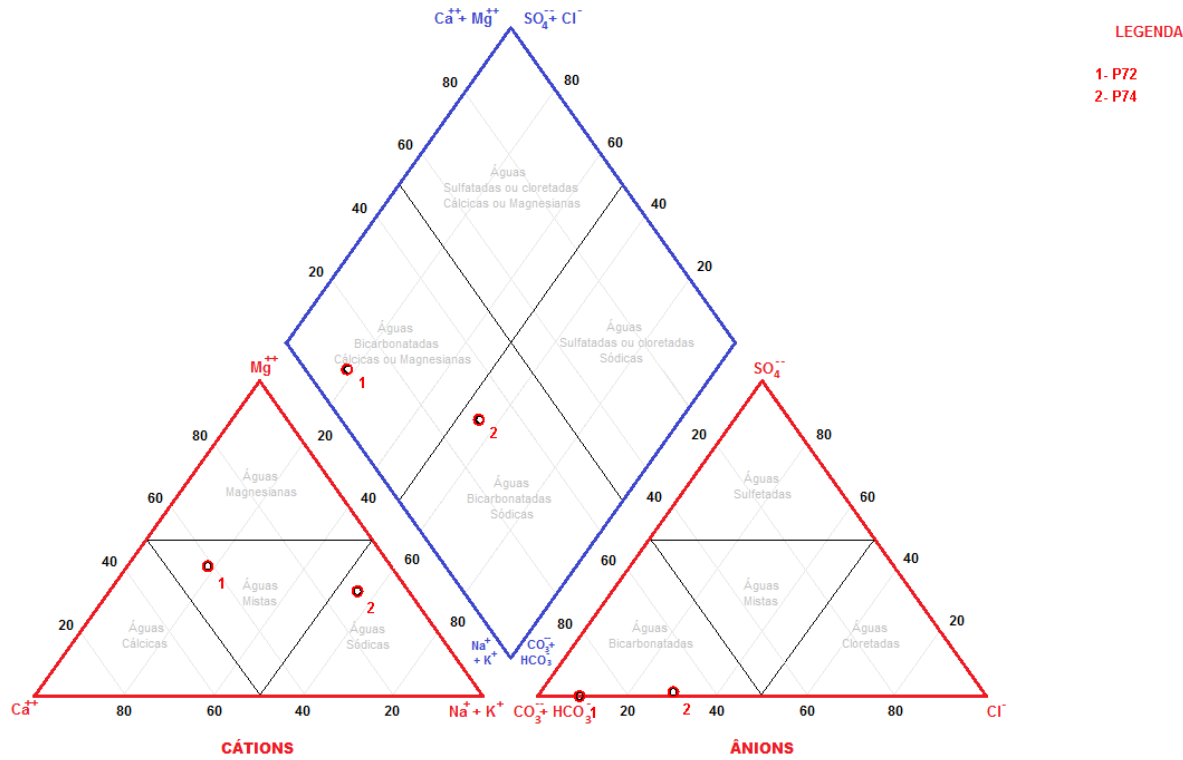


**Figura 166.** Classificação de Piper da amostra coletada em um poço associada a materiais geológicos retrabalhados Colúvios areno argilosos.

Fonte: Autor

#### 5.3.4.10. Retrabalhado Aluvionares

As duas amostras de fontes foram classificadas como ácidas, macias e como águas bicarbonatadas mista ou sódica (Figura 167). O principal uso que ocupa a área de contribuição é a cana de açúcar. A condutividade elétrica encontrada é considerada baixa e não apresenta grande variação entre as amostras e tem com máximo e mínimo 19,3 e 11  $\mu\text{Ohm/cm}$  respectivamente. Na composição iônica, exceto pelo  $\text{HCO}_3^-$  (média e desvio padrão de 9,51 e 6,48 mg/L), os outros íons apresentam concentração abaixo de 2 mg/L. Para águas subsuperficiais deste material geológico, esperava-se encontrar evidências de contaminação em virtude da zona saturada mais superficial, todavia isto não ocorreu o que é um indicativo de um alto potencial de retenção.



**Figura 167.** Classificação de Piper das amostras coletadas das fontes e poços relacionados aos nos materiais geológicos inconsolidados retrabalhados Aluvionares.

Fonte: Autor

## **5.4. Infiltração e geração de escoamento superficial Hortoniano**

Afim de determinar a infiltração potencial o escoamento superficial Hortoniano potencial gerado algumas observações devem ser levantadas. A infiltração e a geração de escoamento superficial estão intimamente ligadas com as características geológico e geotécnica da camada superficial dos materiais geológicos. Esta camada é afetada pelos diferentes tipos de uso e manejo do solo que modificam as propriedades físicas e hidráulicas do solo, por conseguinte altera o a infiltração potencial e o escoamento superficial Hortoniano gerado. Desse modo, a caracterização da variabilidade destas camadas é fundamental, pois permite selecionar os parâmetros representativos das condições de infiltração e estimar valores de infiltração potencial e geração de escoamento superficial Hortoniano potencial mais adequados.

Baseado na caracterização das unidades de condições de infiltração (condutividade hidráulica saturada, capilaridade efetiva, conteúdo de água volumétrico saturado e inicial) obtida a partir do Item 5.3.3.3 e dos eventos de chuva (intensidade, total precipitado e duração) obtidos a partir do Item 5.1, a infiltração potencial e a geração de escoamento Hortoniano potencial foram estimados, a partir das Equações contidas nos Item 4.2.3 que representam o modelo de Chu (1978).

### **5.4.1. Parâmetros do solo adotados para a estimativa da infiltração**

#### **5.4.1.1. Critérios para adoção de parâmetros de infiltração**

##### *Chuvas*

Os critérios utilizados para definir os eventos de chuvas foram baseados na intensidade, duração e transiência, de acordo com a explanação mais detalhada no Item 4.2.12. Na tabela 25 são mostrados os eventos selecionados para estimativa da infiltração potencial e a geração de escoamento Hortoniano potencial.

##### *Conteúdo volumétrico de água saturado e inicial.*

No momento em que uma determinada condição de infiltração atinja a capacidade de infiltração potencial, considera-se que o solo está saturado, portanto todos poros estão preenchidos de água. Desse modo, adotou-se a porosidade como o conteúdo volumétrico de água em condição saturada.

Em relação ao conteúdo volumétrico inicial, este foi obtido a partir da curva de retenção de água, a qual foi estimada a partir de informações da curva granulométrica, da massa específica seca e da porosidade. É importante ressaltar que quando possível, considerou-se as curvas de retenção de



água determinadas a partir das curvas granulométricas obtidas sem o uso do defloculante, para melhor representar as condições de campo. Foram selecionados dois valores afim de avaliar o efeito da umidade inicial na infiltração potencial e na geração de escoamento superficial Hortoniano superficial potencial. O primeiro valor é referente ao ponto de murchamento (sucção de 1500 kPa), ou seja, uma condição de umidade mais seca, enquanto o segundo correspondeu a umidade na capacidade campo (sucção de 33 kPa), a qual representa uma condição mais úmida, a partir da qual o fluxo já tem componente potencial gravitacional no início da infiltração.

#### *Capilaridade efetiva*

Devido à dificuldade de obtenção deste parâmetro em campo e mesmo em laboratório, a capilaridade efetiva foi estimada a partir do parâmetro  $\alpha$  do modelo de Van Genuchten (1980) de curva de retenção de água. Assim como no conteúdo volumétrico de água inicial quando possível foram consideradas as curvas estimadas a partir das curvas granulométricas obtidas sem defloculante, para melhor representar as condições de campo.

#### *Condutividade hidráulica saturada*

Este parâmetro foi determinado a partir dos valores de capacidade de infiltração, a qual foi obtida da curva de infiltração, pois dessa forma representa melhor as condições de campo, seja em termos de sucção como de condutividade hidráulica saturada. Todavia, quando observou-se que o valor da capacidade de campo não refletia a massa específica seca de campo, analisou-se os resultados da condutividade hidráulica saturada obtida a partir dos ensaios de coluna. Se o valor obtido a partir do ensaio de coluna fosse coerente com a massa específica seca de campo, adotava-se este, entretanto se não, selecionava-se o da curva de infiltração referente a capacidade de infiltração.

#### 5.4.1.2. Parâmetros adotados

Baseado nos critérios mencionados no Item 5.4.1.1, na Tabela 30 encontram-se os parâmetros adotados referentes as unidades de condições de infiltração para a aplicação do modelo de Chu (1978).

**Tabela 30.** Parâmetros adotados para aplicação do modelo físico matemático com o objetivo de estimar a infiltração potencial e a geração do escoamento superficial Hortoniano potencial.

Material inconsolidado	Uso e manejo do solo	Código da unidade de condição de infiltração	K (mm/min)	H <sub>cc</sub> (mm)	θ <sub>s</sub>	θ <sub>pm</sub>	θ <sub>cc</sub>
Residual da Formação Itaqueri	Cana de açúcar (sulcada)	1.1	0,183	22,0	0,560	0,225	0,278
	Cana de açúcar (madura)	1.2	0,083	54,4	0,420	0,147	0,221
	Laranja e outras espécies frutíferas	1.3	0,500	42,2	0,450	0,169	0,243
	Mata	1.4	0,250	32,2	0,480	0,185	0,255
	Pastagem	1.5	0,083	33,6	0,450	0,172	0,240
	Reflorestamento	1.6	0,250	36,9	0,460	0,175	0,248
Residual da Formação Itaqueri (Concreções lateríticas)	Cana de Açúcar (Sulcada)	2.1	0,450	15,6	0,660	0,321	0,367
	Pastagem	2.5	0,200	15,9	0,660	0,312	0,358
	Reflorestamento	2.6	0,450	16,4	0,640	0,285	0,327
Residual da Formação Adamantina	Cana de açúcar (sulcada)	3.1	1,869	28,5	0,440	0,131	0,200
	Cana de açúcar (madura)	3.2	0,471	43,6	0,390	0,106	0,173
	Laranja e outras espécies frutíferas	3.3	1,564	12,3	0,530	0,160	0,210
	Pastagem	3.5	0,309	32,9	0,420	0,123	0,191
	Mandioca	3.8	1,236	35,4	0,410	0,118	0,186
Residual da Formação Serra Geral	Cana de açúcar (sulcada)	4.1	0,200	81,4	0,540	0,170	0,297
	Cana de açúcar (madura)	4.2	0,133	119,3	0,482	0,155	0,283
	Laranja e outras espécies frutíferas	4.3	0,133	100,9	0,506	0,163	0,290
	Mata	4.4	0,800	56,6	0,591	0,180	0,300
	Pastagem	4.5	0,345	65,1	0,620	0,190	0,322
	Reflorestamento	4.6	0,800	95,1	0,515	0,165	0,292
Residual da Formação Botucatu	Cana de açúcar (sulcada)	5.1	0,600	16,9	0,439	0,084	0,112
	Cana de açúcar (madura)	5.2	0,150	29,2	0,407	0,074	0,108
	Laranja e outras espécies frutíferas	5.3	0,250	38,7	0,389	0,069	0,105
	Mata	5.4	1,553	10,5	0,465	0,092	0,115
	Pastagem	5.5	1,870	33,0	0,400	0,072	0,107
	Reflorestamento	5.6	0,300	30,5	0,404	0,074	0,107
	Pastagem (linha de alta tensão)	5.7	0,250	23,7	0,419	0,078	0,109
Residual da Formação Pirambóia	Cana de açúcar (madura)	6.2	0,282	57,6	0,330	0,051	0,076
	Mata	6.4	2,100	6,1	0,482	0,098	0,113
	Pastagem	6.5	0,663	14,4	0,431	0,081	0,104
	Pastagem (linha de alta tensão)	6.7	0,012	71,4	0,315	0,047	0,067
Retrabalhados Cenozóicos	Cana de açúcar (sulcada)	7.1	0,400	42,2	0,510	0,204	0,288
	Cana de açúcar (madura)	7.2	0,083	73,4	0,390	0,138	0,214
	Laranja e outras espécies frutíferas	7.3	0,233	57,1	0,450	0,174	0,258
	Mata	7.4	0,400	38,8	0,490	0,194	0,272
	Pastagem	7.5	0,233	47,1	0,480	0,190	0,274
	Reflorestamento	7.6	0,233	54,0	0,460	0,180	0,264

**Tabela 30 (continuação).** Parâmetros adotados para aplicação do modelo físico matemático com o objetivo de estimar a infiltração potencial e a geração do escoamento superficial Hortoniano potencial.

Material consolidado	Uso e manejo do solo	Código da unidade de condição de infiltração	K (mm/min)	H <sub>cc</sub> (mm)	θ <sub>s</sub>	θ <sub>pm</sub>	θ <sub>cc</sub>
Retrabalhado Arenoso	Cana de açúcar (sulcada)	8.1	0,600	18,9	0,474	0,099	0,150
	Cana de açúcar (madura)	8.2	0,150	39,2	0,409	0,096	0,170
	Laranja e outras espécies frutíferas	8.3	0,250	47,0	0,391	0,089	0,163
	Mata	8.4	0,600	17,3	0,481	0,099	0,144
	Pastagem	8.5	0,250	34,4	0,421	0,099	0,171
	Reflorestamento	8.6	0,300	40,3	0,406	0,095	0,169
Retrabalhado Areno argiloso	Cana de açúcar (sulcada)	9.1	0,383	26,6	0,462	0,136	0,204
	Cana de açúcar (madura)	9.2	0,021	78,2	0,328	0,065	0,106
	Mata	9.4	0,550	22,5	0,476	0,140	0,205
	Pastagem	9.5	0,435	36,1	0,420	0,119	0,188
	Reflorestamento	9.6	0,117	31,1	0,439	0,127	0,196
	Pastagem (linha de alta tensão)	9.7	0,120	55,9	0,370	0,090	0,152
Retrabalhado Colúvio arenoso	Seringal	9.10	1,059	28,2	0,450	0,132	0,200
	Cana de açúcar (sulcada)	10.1	0,500	33,2	0,450	0,120	0,203
	Cana de açúcar (madura)	10.2	0,083	92,0	0,340	0,057	0,118
	Laranja e outras espécies frutíferas	10.3	0,083	42,5	0,420	0,119	0,206
	Mata	10.4	0,500	35,9	0,440	0,120	0,205
Retrabalhado Colúvio areno argiloso	Pastagem	10.5	0,083	42,5	0,430	0,127	0,217
	Cana de açúcar (sulcada)	11.1	0,183	38,2	0,490	0,189	0,272
	Cana de açúcar (madura)	11.2	0,183	60,6	0,440	0,165	0,253
	Mata	11.4	0,183	40,4	0,490	0,189	0,275
Retrabalhado Colúvio argiloso	Pastagem	11.5	0,183	44,3	0,471	0,182	0,268
	Cana de açúcar (madura)	12.2	0,170	68,2	0,510	0,218	0,323
Retrabalhado Aluvionar	Laranja e outras espécies frutíferas	13.3	0,300	122,9	0,350	0,055	0,079
	Mata	13.4	0,488	52,4	0,410	0,073	0,099
	Pastagem	13.5	0,300	122,9	0,350	0,055	0,079
	Reflorestamento	13.6	0,488	52,4	0,410	0,073	0,099

Legenda	Material consolidado	Tipo de uso e manejo do solo
K=Condutividade hidráulica saturada	1. Residual da Formação Itaqueri	1.Cana de açúcar (jovem ou sulcada)
H <sub>cc</sub> =Capilaridade efetiva	2.Residual da Formação Itaqueri (concreções lateríticas)	2.Cana de açúcar (madura)
θ <sub>s</sub> = Conteúdo de água volumétrico saturado	3.Residual da Formação Adamantina	3.Laranja e outras espécies frutíferas
θ <sub>pm</sub> =Conteúdo de água volumétrico no ponto de murchamento	4.Residual da Formação Serra Geral	4. Mata
θ <sub>cc</sub> = Conteúdo de água volumétrico na capacidade de campo	5.Residual da Formação Botucatu	5.Pastagem
	6.Residual da Formação Pirambóia	6.Reflorestamento
	7.Retabalhado Cenozóico	7.Pastagem(pastagem alta tensão)
		8. Mandioca
		9.Solo preparado para o plantio
		10.Seringal

Fonte: autor

#### ***5.4.2. Infiltração potencial e escoamento superficial Hortoniano potencial gerado.***

Por meio da combinação dos parâmetros adotados das 65 unidades de condição de infiltração com os dos 21 eventos de chuvas, a infiltração potencial e o escoamento superficial Hortoniano potencial gerado foram estimados a partir da aplicação do modelo de infiltração proposto por Chu (1978). Os resultados são apresentados em termos de infiltração acumulada (Apêndices XIV e XV) e a infiltração potencial (Tabelas 31 e 32) para as duas umidades iniciais adotadas (ponto de murchamento e capacidade de campo).

**Tabela 31.** Infiltração potencial estimada para cada unidade de condição de infiltração e evento de chuva considerando o ponto de murchamento como umidade inicial.

Evento	18	17	13	14	12	9	19	6	8	11	7	1	5	4	10	2	3	15	20	16	21
<b>Total da chuva (mm)</b>	44,8	61,5	33,1	27,8	42,8	41,1	21,2	20,2	27,4	23,4	33,3	30,5	36,3	33,7	15,1	10,3	54,7	19,4	10,9	15,1	18,8
<b>Duração (min)</b>	25,0	50,0	20,0	15,0	35,0	35,0	10,0	10,0	20,0	15,0	30,0	25,0	35,0	40,0	10,0	5,0	60,0	30,0	10,0	20,0	40,0
<b>Intensidade média (mm/min)</b>	1,8	1,2	1,7	1,9	1,2	1,2	2,1	2,0	1,4	1,6	1,1	1,2	1,0	0,8	1,5	2,1	0,9	0,6	1,1	0,8	0,5
<b>Unidade de condição de infiltração</b>	<b>Infiltração potencial (mm)</b>																				
6.7	3,7	5,3	3,3	2,8	4,4	4,4	2,3	2,3	3,3	2,8	4,0	3,7	4,4	4,7	2,3	1,6	9,9	4,0	2,3	3,2	4,7
9.2	5,0	7,3	4,4	3,8	6,0	6,0	3,1	3,1	4,4	3,8	5,4	5,0	6,0	6,4	3,1	2,1	11,7	5,4	3,1	4,3	6,3
1.5	7,7	11,7	6,7	5,7	9,4	9,3	4,5	4,5	6,7	5,6	8,2	7,7	9,3	9,9	4,5	3,0	13,4	8,3	4,4	6,3	9,7
10.3	8,7	13,2	7,6	6,5	10,5	10,5	5,2	5,1	7,6	6,4	9,0	8,7	10,4	11,0	5,1	3,5	14,8	9,3	5,0	7,0	10,9
10.5	8,7	13,2	7,7	6,5	10,6	10,5	5,2	5,1	7,6	6,4	9,1	8,7	10,4	11,1	5,1	3,5	14,9	9,3	5,0	7,0	11,0
1.2	9,3	13,9	8,1	6,9	11,2	11,1	5,5	5,5	8,1	6,8	9,6	9,3	11,0	11,7	5,5	3,7	15,7	9,8	5,4	7,4	11,6
9.6	9,5	14,7	8,3	7,0	11,6	11,6	5,5	5,5	8,3	6,9	9,9	9,5	11,5	12,2	5,5	3,7	16,6	10,1	5,4	7,5	12,0
7.2	10,2	15,2	8,9	7,6	12,2	12,1	6,1	6,0	8,9	7,5	10,5	10,1	12,0	12,7	6,0	4,1	17,0	10,7	5,9	8,0	12,5
2.5	11,0	17,8	9,5	7,8	13,7	13,6	6,1	6,0	9,4	7,8	11,5	11,0	13,5	14,5	6,0	4,0	20,2	11,7	5,9	8,5	14,0
5.2	11,1	17,3	9,7	8,1	13,6	13,5	6,4	6,3	9,6	8,0	11,5	11,1	13,3	14,3	6,3	4,2	19,5	11,7	6,2	8,6	13,8
1.1	11,5	18,2	9,9	8,2	14,1	14,0	6,4	6,4	9,8	8,2	12,0	11,4	13,8	14,9	6,3	4,2	20,5	12,1	6,2	8,8	14,3
9.7	11,7	17,7	10,2	8,6	14,1	14,0	6,9	6,8	10,1	8,5	12,1	11,7	13,6	14,8	6,8	4,6	19,8	12,2	6,6	9,1	14,2
10.2	11,8	17,4	10,3	8,8	14,0	13,9	7,1	7,0	10,2	8,7	12,1	11,7	13,5	14,6	7,0	4,8	19,3	12,2	6,7	9,2	14,1
8.2	12,1	18,7	10,6	8,9	14,7	14,6	7,0	6,9	10,5	8,8	12,6	12,1	14,1	15,5	6,9	4,7	20,9	12,7	6,7	9,3	14,8
11.1	13,4	20,8	11,6	9,7	16,3	16,1	7,7	7,6	11,5	9,6	13,9	13,4	15,7	17,1	7,5	5,1	23,3	13,9	7,2	10,1	16,2
11.4	13,7	21,2	11,9	9,9	16,6	16,2	7,9	7,7	11,7	9,8	14,1	13,6	16,0	17,4	7,7	5,2	23,7	14,2	7,4	10,3	16,4
11.5	13,9	21,5	12,1	10,1	16,9	16,5	8,0	7,9	11,9	10,0	14,4	13,9	16,3	17,7	7,8	5,3	24,1	14,4	7,5	10,4	16,6
5.7	14,5	23,1	12,4	10,3	17,8	17,7	8,0	7,9	12,3	10,1	15,0	14,4	17,1	18,7	7,9	5,2	26,0	15,0	7,6	10,7	17,0
1.4	15,2	24,1	13,1	10,9	18,6	18,3	8,5	8,4	12,9	10,7	15,7	15,2	18,0	19,6	8,3	5,5	27,1	15,7	7,9	11,1	17,6
11.2	15,4	23,4	13,4	11,2	18,4	18,1	9,0	8,7	13,1	11,0	15,8	15,3	17,9	19,3	8,7	5,9	26,2	15,7	8,2	10,8	17,3
1.6	15,8	24,8	13,6	11,3	19,2	18,8	8,9	8,7	13,3	11,1	16,3	15,7	18,6	20,1	8,6	5,8	27,9	16,1	8,2	11,4	17,9
12.2	15,8	23,8	13,7	11,5	18,8	18,5	9,3	9,0	13,5	11,3	16,2	15,7	18,3	19,7	8,9	6,1	26,6	15,9	8,4	11,4	17,5
8.5	16,1	25,1	13,8	11,5	19,5	19,1	9,1	8,9	13,6	11,3	16,5	16,0	18,9	20,5	8,8	5,9	28,3	16,4	8,3	11,4	18,0
7.5	16,5	25,4	14,3	11,9	19,9	19,6	9,5	9,2	14,0	11,7	17,0	16,5	19,4	20,9	9,1	6,1	28,7	16,6	8,6	11,8	18,1
5.3	16,7	25,9	14,4	12,0	19,8	19,8	9,5	9,2	14,1	11,7	17,2	16,6	19,6	21,1	9,1	6,1	29,2	16,9	8,6	11,5	18,2
7.6	17,2	26,3	14,8	12,4	20,5	20,3	9,9	9,6	14,5	12,1	17,6	17,1	20,1	21,5	9,5	6,4	29,6	17,2	8,8	12,1	18,3
4.3	17,2	25,2	15,0	12,7	20,1	19,9	10,3	10,0	14,7	12,4	17,5	17,1	19,8	21,0	9,8	6,8	28,7	17,0	9,1	12,2	18,2
7.3	17,4	26,6	15,1	12,6	20,7	20,5	10,0	9,7	14,7	12,3	17,8	17,3	20,3	21,8	9,6	6,5	29,9	17,4	8,9	12,2	18,4
5.6	17,5	27,4	15,0	12,4	20,9	20,8	9,7	9,5	14,7	12,1	18,0	17,4	20,7	22,3	9,4	6,2	31,2	17,6	8,8	12,2	18,6
8.3	17,5	26,7	15,1	12,6	20,7	20,7	10,0	9,7	14,7	12,3	17,9	17,4	20,5	22,0	9,6	6,5	30,7	17,5	8,9	11,7	18,5
3.5	17,6	27,7	15,1	12,5	20,9	20,9	9,8	9,5	14,8	12,2	18,1	17,5	20,8	22,5	9,4	6,3	32,5	17,6	8,8	12,0	18,5
4.2	18,1	26,5	15,8	13,3	21,1	20,9	10,9	10,4	15,3	13,0	18,4	17,9	20,8	21,8	10,3	7,1	29,7	17,8	9,4	12,7	18,4
8.6	18,8	28,8	16,1	13,3	22,1	22,1	10,6	10,2	15,7	13,0	19,2	18,7	22,1	23,6	10,1	6,8	31,9	18,4	9,3	12,7	18,8
2.1	19,1	31,0	16,2	13,1	23,0	22,5	10,0	9,8	15,8	12,8	19,8	19,0	22,8	25,1	9,7	6,2	34,7	18,5	9,1	12,4	18,8
9.1	19,6	30,6	16,7	13,7	23,0	22,9	10,7	10,3	16,2	13,3	20,1	19,5	23,2	24,9	10,2	6,7	34,4	18,7	9,4	12,8	18,8
2.6	19,6	31,6	16,6	13,4	23,2	22,9	10,3	10,1	16,2	13,1	20,2	19,5	23,2	25,6	10,0	6,4	35,4	18,7	9,2	12,6	18,8
6.2	19,7	29,8	16,9	14,1	23,0	22,9	11,2	10,8	16,4	13,6	20,0	19,5	23,0	24,2	10,6	7,2	33,0	18,9	9,7	13,2	18,8
4.1	20,3	30,1	17,6	14,8	23,6	23,4	12,0	11,4	17,0	14,2	20,5	20,1	23,5	24,3	11,2	7,7	33,3	19,2	10,1	13,7	18,8
7.4	21,9	33,6	18,7	15,3	25,5	24,9	12,1	11,6	18,0	14,8	22,3	21,7	25,3	26,6	11,4	7,6	38,0	19,4	10,2	13,8	18,8
7.1	22,7	34,7	19,4	15,9	26,3	25,6	12,6	12,0	18,3	15,3	23,0	22,5	26,0	27,4	11,8	7,9	39,5	19,4	10,4	14,1	18,8
9.5	22,8	34,9	19,3	15,8	26,4	25,6	12,5	11,9	18,3	15,2	23,1	22,5	26,0	27,5	11,7	7,7	39,6	19,4	10,3	14,0	18,8
9.4	24,1	37,3	20,3	16,4	27,5	26,8	12,8	12,1	19,1	15,7	24,5	23,9	26,8	28,7	11,9	7,8	43,0	19,4	10,5	14,2	18,8
5.1	24,3	37,8	20,3	16,3	27,6	27,0	12,6	12,0	19,5	15,7	24,7	24,0	26,7	28,9	11,8	7,6	43,7	19,4	10,4	14,1	18,8
8.4	24,8	38,4	20,8	16,7	28,1	27,4	13,0	12,3	19,7	16,0	25,1	24,6	27,0	29,3	12,1	7,8	44,4	19,4	10,6	14,3	18,8
3.2	24,9	37,8	21,1	17,2	28,3	27,4	13,7	12,8	20,0	16,2	25,0	24,6	27,5	29,1	12,6	8,4	43,0	19,4	10,8	14,6	18,8
10.1	25,0	38,1	21,1	17,2	28,4	27,5	13,6	12,8	20,0	16,1	25,1	24,7	27,5	29,2	12,5	8,3	43,5	19,4	10,7	14,6	18,8
6.5	25,1	39,0	20,9	16,7	28,4	27,7	12,8	12,2	20,1	16,1	25,3	24,9	26,9	29,6	12,0	7,6	45,6	19,4	10,6	14,3	18,8
8.1	25,2	38,9	21,1	17,0	28,5	27,8	13,2	12,5	19,9	15,8	25,4	25,0	27,2	29,5	12,3	8,0	45,0	19,4	10,7	14,4	18,8
10.4	25,3	38,5	21,4	17,4	28,7	27,8	13,8	12,9	20,4	16,5	25,4	25,0	27,7	29,4	12,7	8,4	44,0	19,4	10,8	14,6	18,8
1.3	25,6	38,8	21,6	17,6	28,9	27,9	14,0	13,1	19,7	16,7	25,6	25,2	27,8	29,6	12,8	8,5	44,3	19,4	10,8	14,7	18,8
4.5	26,8	39,5	22,9	18,8	30,1	28,9	15,5	14,1	21,9	17,9	26,5	26,3	28,9	30,1	13,7	9,3	43,9	19,4	10,9	15,0	18,8
13.5	27,2	39,8	23,2	19,2	30,5	29,1	15,9	14,0	22,3												

**Tabela 32.** Infiltração potencial estimada para cada unidade de condição de infiltração e evento de chuva considerando à capacidade de campo como umidade inicial.

Evento	18	17	13	14	12	9	19	6	8	11	7	1	5	4	10	2	3	15	20	16	21
<b>Total da chuva (mm)</b>	44,8	61,5	33,1	27,8	42,8	41,1	21,2	20,2	27,4	23,4	33,3	30,5	36,3	33,7	15,1	10,3	54,7	19,4	10,9	15,1	18,8
<b>Duração (min)</b>	25,0	50,0	20,0	15,0	35,0	35,0	10,0	10,0	20,0	15,0	30,0	25,0	35,0	40,0	10,0	5,0	60,0	30,0	10,0	20,0	40,0
<b>Intensidade média (mm/min)</b>	1,8	1,2	1,7	1,9	1,2	1,2	2,1	2,0	1,4	1,6	1,1	1,2	1,0	0,8	1,5	2,1	0,9	0,6	1,1	0,8	0,5
<b>Unidade de condição de infiltração</b>	<b>Infiltração potencial (mm)</b>																				
6.7	3,5	5,1	3,1	2,7	4,2	4,2	2,2	2,2	3,1	2,7	3,8	3,5	4,2	4,5	2,2	1,5	9,6	3,9	2,2	3,1	4,5
9.2	4,6	6,8	4,1	3,5	5,5	5,5	2,8	2,8	4,1	3,5	5,0	4,6	5,5	5,9	2,8	2,0	11,2	5,0	2,8	4,0	5,9
1.5	6,9	10,6	6,0	5,0	8,4	8,4	4,0	4,0	6,0	5,0	7,4	6,9	8,4	9,0	4,0	2,7	12,2	7,5	3,9	5,7	8,8
10.5	7,6	11,6	6,6	5,6	9,2	9,2	4,4	4,4	6,6	5,6	8,1	7,6	9,2	9,8	4,4	3,0	13,2	8,2	4,4	6,2	9,6
10.3	7,6	11,6	6,6	5,6	9,3	9,2	4,5	4,4	6,6	5,6	8,1	7,6	9,2	9,8	4,4	3,0	13,2	8,2	4,4	6,2	9,6
1.2	8,2	12,4	7,1	6,0	9,9	9,9	4,8	4,8	7,1	6,0	8,5	8,1	9,8	10,5	4,8	3,2	14,0	8,8	4,7	6,5	10,3
9.6	8,7	13,5	7,5	6,3	10,7	10,6	5,0	5,0	7,5	6,3	9,0	8,7	10,5	11,2	4,9	3,3	15,4	9,4	4,9	6,9	11,1
7.2	8,7	13,2	7,7	6,5	10,6	10,5	5,2	5,1	7,6	6,4	9,1	8,7	10,4	11,1	5,1	3,5	14,9	9,3	5,1	7,0	11,0
2.5	10,6	17,2	9,1	7,5	13,2	13,1	5,8	5,7	9,0	7,4	11,0	10,5	13,0	13,9	5,7	3,7	19,6	11,3	5,6	8,1	13,5
10.2	10,6	15,8	9,3	7,9	12,7	12,6	6,4	6,3	9,2	7,8	11,0	10,6	12,4	13,3	6,3	4,3	17,6	11,1	6,1	8,4	13,0
9.7	10,6	16,2	9,3	7,8	12,9	12,8	6,2	6,1	9,2	7,7	11,0	10,6	12,6	13,5	6,1	4,2	18,2	11,2	6,0	8,3	13,2
5.2	10,7	16,7	9,3	7,8	13,1	13,0	6,1	6,1	9,2	7,7	11,1	10,7	12,9	13,8	6,0	4,1	18,9	11,3	5,9	8,3	13,4
1.1	10,8	17,3	9,3	7,7	13,4	13,3	6,0	6,0	9,2	7,7	11,3	10,8	13,2	14,1	6,0	3,9	19,6	11,5	5,8	8,4	13,7
8.2	11,0	17,1	9,5	8,0	13,4	13,3	6,3	6,2	9,5	7,9	11,4	11,0	13,2	14,1	6,2	4,2	19,3	11,6	6,1	8,5	13,7
11.1	11,9	18,8	10,3	8,6	14,7	14,5	6,8	6,7	10,2	8,5	12,4	11,9	14,0	15,4	6,6	4,4	21,2	12,6	6,5	9,1	14,8
11.4	12,1	19,1	10,5	8,7	14,9	14,7	6,9	6,8	10,4	8,7	12,6	12,1	14,2	15,6	6,8	4,5	21,5	12,8	6,6	9,3	15,0
11.5	12,3	19,3	10,6	8,9	15,1	14,9	7,0	6,9	10,5	8,8	12,7	12,3	14,4	15,8	6,9	4,6	21,7	12,9	6,7	9,4	15,1
12.2	13,3	20,5	11,6	9,7	16,1	15,9	7,7	7,6	11,4	9,6	13,7	13,3	15,7	16,9	7,5	5,1	23,0	13,8	7,2	10,1	16,0
11.2	13,3	20,7	11,6	9,7	16,2	16,0	7,6	7,5	11,4	9,5	13,8	13,3	15,6	17,0	7,5	5,0	23,2	13,9	7,2	10,1	16,1
1.4	13,9	22,4	12,0	9,9	17,2	17,0	7,7	7,6	11,8	9,8	14,5	13,9	16,5	18,1	7,6	5,0	25,3	14,6	7,3	10,4	16,5
5.7	14,0	22,5	12,0	9,9	17,3	17,0	7,8	7,6	11,9	9,8	14,5	14,0	16,6	18,2	7,6	5,0	25,4	14,6	7,3	10,4	16,6
4.3	14,2	21,3	12,4	10,5	16,9	16,6	8,4	8,2	12,2	10,3	14,6	14,2	16,4	17,7	8,2	5,6	23,7	14,5	7,8	10,6	16,6
1.6	14,3	22,9	12,3	10,2	17,6	17,1	7,9	7,8	12,1	10,0	14,8	14,3	16,9	18,5	7,8	5,1	25,8	14,9	7,5	10,6	16,9
7.5	14,7	23,1	12,7	10,5	17,9	17,5	8,3	8,1	12,5	10,4	15,2	14,6	17,3	18,8	8,1	5,4	26,0	15,2	7,7	10,8	17,1
4.2	14,7	22,0	12,9	10,9	17,5	17,2	8,8	8,6	12,7	10,7	15,1	14,7	17,1	18,3	8,5	5,8	24,5	15,0	8,1	10,9	16,9
8.5	14,7	23,4	12,7	10,5	18,1	17,6	8,2	8,1	12,5	10,4	15,3	14,7	17,4	19,0	8,0	5,3	26,4	15,3	7,7	10,8	17,2
7.6	15,1	23,7	13,0	10,8	18,4	18,0	8,6	8,4	12,8	10,7	15,6	15,1	17,8	19,3	8,3	5,6	26,7	15,5	7,9	11,0	17,4
7.3	15,3	24,0	13,2	11,0	18,6	18,2	8,7	8,5	13,0	10,8	15,8	15,3	18,0	19,5	8,4	5,6	26,9	15,7	8,0	11,1	17,5
8.3	15,9	24,9	13,7	11,3	19,3	18,9	9,0	8,7	13,4	11,2	16,4	15,8	18,7	20,3	8,7	5,8	28,0	16,2	8,2	11,1	17,9
5.3	16,0	25,1	13,8	11,5	19,2	19,0	9,0	8,8	13,6	11,3	16,5	16,0	18,8	20,4	8,8	5,9	28,2	16,3	8,3	11,1	18,0
3.5	16,2	26,0	13,9	11,4	19,8	19,5	8,9	8,7	13,7	11,2	16,8	16,2	19,3	21,1	8,6	5,7	29,6	16,7	8,2	11,6	18,3
5.6	16,9	26,7	14,5	11,9	20,4	20,1	9,4	9,1	14,2	11,7	17,4	16,8	20,0	21,7	9,1	6,0	30,4	17,2	8,5	11,5	18,4
8.6	17,2	27,0	14,7	12,2	20,4	20,4	9,5	9,3	14,4	11,9	17,7	17,1	20,3	22,0	9,2	6,1	29,5	17,4	8,7	11,7	18,5
4.1	17,3	26,2	15,0	12,6	20,5	20,3	10,1	9,8	14,6	12,3	17,7	17,2	20,1	21,5	9,7	6,6	29,2	17,2	9,0	12,0	18,3
9.1	18,3	29,3	15,6	12,7	21,7	21,7	9,9	9,6	15,2	12,5	18,9	18,2	21,8	23,8	9,5	6,2	32,5	18,1	8,9	12,2	18,8
2.1	18,5	30,3	15,6	12,6	22,4	21,9	9,6	9,4	15,3	12,3	19,1	18,4	22,1	24,5	9,3	5,9	33,7	18,1	8,8	12,0	18,8
2.6	19,0	30,8	16,0	13,0	22,5	22,4	9,9	9,7	15,7	12,7	19,7	18,9	22,6	25,0	9,6	6,1	34,5	18,4	9,0	12,3	18,8
6.2	19,1	29,0	16,4	13,6	22,3	22,3	10,8	10,4	15,9	13,2	19,5	18,9	22,3	23,7	10,3	6,9	32,1	18,6	9,4	12,9	18,8
7.4	20,0	31,3	17,0	13,9	23,5	23,2	10,9	10,5	16,5	13,5	20,5	19,9	23,6	25,4	10,4	6,8	35,3	18,9	9,5	13,0	18,8
7.1	20,6	32,2	17,5	14,4	24,2	23,8	11,3	10,8	16,9	13,9	21,1	20,5	24,1	25,9	10,7	7,1	36,9	19,3	9,7	13,2	18,8
9.5	21,1	32,9	17,9	14,6	24,7	24,2	11,4	11,0	17,4	14,2	21,6	21,0	24,6	26,1	10,8	7,1	37,3	19,3	9,8	13,4	18,8
9.4	22,9	35,8	19,2	15,5	26,4	25,8	12,0	11,5	18,6	15,0	23,4	22,7	25,9	27,9	11,3	7,3	41,4	19,4	10,1	13,7	18,8
3.9	23,1	35,5	19,5	15,9	26,6	25,9	12,5	11,9	18,4	15,3	23,4	22,8	26,3	27,8	11,7	7,7	40,5	19,4	10,3	14,0	18,8
10.1	23,1	35,7	19,5	15,8	26,6	25,9	12,3	11,8	18,7	15,2	23,5	22,9	26,2	27,9	11,6	7,6	40,9	19,4	10,3	13,9	18,8
10.4	23,3	36,0	19,6	16,0	26,8	26,1	12,5	11,9	18,9	15,3	23,6	23,0	26,3	28,0	11,7	7,6	41,6	19,4	10,4	14,0	18,8
1.3	23,5	36,2	19,8	16,1	27,0	26,2	12,6	12,0	18,7	15,5	23,8	23,2	26,5	28,2	11,8	7,7	41,8	19,4	10,4	14,1	18,8
4.5	23,7	35,5	20,3	16,7	27,2	26,3	13,5	12,6	19,3	15,8	23,7	23,4	26,9	27,9	12,4	8,4	39,7	19,4	10,7	14,5	18,8
5.1	23,8	37,3	19,9	16,0	27,2	26,6	12,3	11,8	19,2	15,4	24,3	23,6	26,4	28,6	11,6	7,4	43,2	19,4	10,3	14,0	18,8
8.4	24,1	37,6	20,2	16,2	27,5	26,8	12,5	11,9	19,2	15,6	24,6	23,9	26,6	28,8	11,7	7,5	43,5	19,4	10,4	14,1	18,8
8.1	24,4	37,9	20,4	16,4	27,7	27,1	12,7	12,1	19,2	15,4	24,8	24,2	26,7	29,0	11,9	7,6	43,9	19,4	10,5	14,2	18,8
6.5	24,8	38,6	20,6	16,5	28,1	27,4	12,5	12,0	19,8	15,9	25,1	24,6	26,7	29,4	11,8	7,5	45,1	19,4	10,5	14,1	18,8
13.5	26,4	38,8	22,6	18,7	29,8	28,5	15,4	14,0	21,7	17,8	26,1	26,0	28,8	29,8	13,6	9,4	42,8	19,4	10,9	15,0	18,8
13.3	26,4	38,8	22,6	18,7	29,8	28,5	15,4	14,0	21,7	17,8	26,1	26,0	28,8	29,8	13,6	9,4	42,8	19,4	10,9	15,0	18,8
13.4	27,6	41,3	23,3	19,0	30,8	29,5	15,4	14,0	22,2	18,0	27,0	26,9	28,9	30,7	13,6	9,2	46,5	19,4	10,9	15,0	18,8
13.6	27,6	41,3	23,3	19,0	30,8	29,5	15,4	14,0	22,2	18,0	27,0	26,9	28,9	30,7	13,6	9,2	46,5	19,4	10,9	15,0	18,8
4.4	36,0	51,6	29,6	24,3	37,9	37,0	20,1	17,3	27,2	23,0	32,9	30,4	32,1	33,7	15,1	10,3	54,4	19,4	10,9	15,1	18,8
9.10	36,4	52,0	29,0	23,7	37,7	36,9	18,9	16,2	26,8	22,4	32,4	30,1	31,8	33,7	15,1	10,1	54,4	19,4	10,9	15,1	18,8
4.6	37,2	53,1	30,9	25,5	39,4	38,9	21,0	18,4	27,4	23,4	33,3	30,5	33,4	33,7	15,1	10,3	54,7	19,4	1		

A partir dos resultados apresentados nas Tabelas 31 e 32 a seguir algumas análises podem ser realizadas referentes à influência da umidade inicial na infiltração potencial, ao potencial das chuvas e das unidades de condição de infiltração de infiltrar ou gerar escoamento superficial Hortoniano.

#### 5.4.2.1. Influência da umidade inicial na infiltração potencial e no escoamento superficial Hortoniano gerado

A umidade inicial interfere no tempo de *ponding* e na lâmina de água infiltrada e escoada, portanto é fundamental analisa-la quanto as diferenças encontradas na infiltração potencial. Na Tabela 33 são mostrados os resultados referentes a diferença da infiltração potencial estimada a partir de duas umidades iniciais.





**Tabela 33.** Diferença entre a infiltração potencial estimada a partir do ponto de murchamento e capacidade de campo como umidades iniciais.

Evento	18	17	13	14	12	9	19	6	8	11	7	1	5	4	10	2	3	15	20	16	21
<b>Total da chuva (mm)</b>	44,8	61,5	33,1	27,8	42,8	41,1	21,2	20,2	27,4	23,4	33,3	30,5	36,3	33,7	15,1	10,3	54,7	19,4	10,9	15,1	18,8
<b>Duração (min)</b>	25,0	50,0	20,0	15,0	35,0	35,0	10,0	10,0	20,0	15,0	30,0	25,0	35,0	40,0	10,0	5,0	60,0	30,0	10,0	20,0	40,0
<b>Intensidade média (mm/min)</b>	1,8	1,2	1,7	1,9	1,2	1,2	2,1	2,0	1,4	1,6	1,1	1,2	1,0	0,8	1,5	2,1	0,9	0,6	1,1	0,8	0,5
<b>Unidade de condição de infiltração</b>	<b>Infiltração potencial (mm)</b>																				
6.7	0,13	0,19	0,12	0,10	0,16	0,16	0,09	0,08	0,12	0,10	0,14	0,13	0,16	0,17	0,08	0,06	0,31	0,14	0,08	0,11	0,16
9.2	0,38	0,53	0,34	0,29	0,44	0,44	0,24	0,24	0,34	0,29	0,39	0,38	0,44	0,46	0,24	0,17	0,51	0,40	0,23	0,31	0,45
1.5	0,80	1,11	0,71	0,62	0,93	0,91	0,51	0,50	0,71	0,61	0,75	0,80	0,90	0,92	0,50	0,35	1,21	0,79	0,48	0,57	0,97
10.3	1,11	1,55	0,99	0,86	1,29	1,26	0,71	0,69	0,98	0,84	0,93	1,11	1,23	1,19	0,69	0,49	1,61	1,07	0,66	0,77	1,30
10.5	1,16	1,60	1,03	0,89	1,33	1,31	0,73	0,72	1,01	0,88	0,97	1,15	1,28	1,23	0,71	0,51	1,67	1,11	0,68	0,80	1,35
1.2	1,12	1,55	0,99	0,86	1,28	1,26	0,71	0,69	0,98	0,84	1,14	1,11	1,22	1,26	0,69	0,49	1,62	1,06	0,65	0,85	1,30
9.6	0,86	1,18	0,76	0,66	0,98	0,96	0,55	0,53	0,75	0,65	0,87	0,85	0,93	1,01	0,53	0,38	1,23	0,75	0,50	0,65	0,95
7.2	1,42	1,96	1,26	1,08	1,62	1,58	0,90	0,87	1,23	1,06	1,44	1,41	1,53	1,68	0,86	0,61	2,06	1,34	0,81	1,05	1,55
2.5	0,47	0,64	0,42	0,37	0,53	0,51	0,31	0,30	0,41	0,36	0,48	0,47	0,49	0,55	0,29	0,21	0,67	0,46	0,27	0,34	0,47
5.2	0,42	0,58	0,38	0,32	0,48	0,46	0,27	0,26	0,37	0,32	0,43	0,42	0,44	0,49	0,26	0,18	0,61	0,41	0,24	0,30	0,42
1.1	0,64	0,87	0,57	0,49	0,72	0,69	0,41	0,40	0,56	0,48	0,70	0,64	0,66	0,75	0,39	0,28	0,91	0,62	0,36	0,46	0,64
9.7	1,09	1,50	0,97	0,83	1,23	1,19	0,69	0,67	0,94	0,81	1,10	1,09	0,94	1,27	0,66	0,47	1,59	1,05	0,60	0,76	1,09
10.2	1,15	1,59	1,02	0,88	1,30	1,26	0,73	0,70	0,99	0,85	1,16	1,14	1,08	1,35	0,69	0,49	1,70	1,11	0,62	0,79	1,16
8.2	1,16	1,58	1,03	0,89	1,30	1,25	0,74	0,71	1,00	0,86	1,17	1,15	0,99	1,34	0,70	0,50	1,68	1,10	0,63	0,80	1,14
11.1	1,46	1,96	1,29	1,11	1,61	1,53	0,93	0,88	1,24	1,07	1,45	1,44	1,64	1,66	0,87	0,62	2,10	1,34	0,77	0,95	1,39
11.4	1,54	2,07	1,36	1,17	1,70	1,43	0,98	0,93	1,31	1,13	1,54	1,53	1,73	1,75	0,92	0,66	2,22	1,41	0,81	0,99	1,44
11.5	1,65	2,22	1,46	1,26	1,82	1,56	1,06	1,00	1,40	1,21	1,65	1,64	1,86	1,88	0,98	0,70	2,39	1,51	0,86	1,04	1,49
5.5	0,44	0,58	0,39	0,34	0,48	0,63	0,29	0,27	0,37	0,32	0,44	0,44	0,50	0,49	0,26	0,19	0,63	0,39	0,23	0,26	0,44
1.4	1,29	1,70	1,14	0,98	1,39	1,32	0,83	0,78	1,08	0,93	1,28	1,28	1,55	1,43	0,76	0,55	1,85	1,12	0,65	0,74	1,08
11.2	2,05	2,74	1,81	1,54	2,22	2,09	1,30	1,21	1,71	1,46	2,02	2,02	2,31	2,29	1,19	0,85	2,99	1,79	0,99	0,77	1,18
1.6	1,46	1,91	1,29	1,11	1,56	1,74	0,94	0,87	1,22	1,05	1,44	1,44	1,71	1,60	0,86	0,62	2,10	1,24	0,71	0,80	1,05
12.2	2,47	3,30	2,17	1,85	2,67	2,63	1,57	1,45	2,05	1,75	2,43	2,43	2,66	2,75	1,42	1,02	3,61	2,14	1,17	1,38	1,47
8.5	1,31	1,68	1,16	0,99	1,37	1,47	0,84	0,78	1,09	0,93	1,28	1,29	1,47	1,43	0,76	0,55	1,89	1,10	0,62	0,59	0,75
7.5	1,86	2,29	1,64	1,40	1,94	2,12	1,19	1,10	1,53	1,31	1,82	1,83	2,12	2,03	1,07	0,77	2,70	1,42	0,86	0,97	1,04
5.3	0,66	0,82	0,58	0,50	0,62	0,74	0,42	0,39	0,54	0,46	0,64	0,65	0,75	0,71	0,38	0,27	0,96	0,53	0,29	0,45	0,26
7.6	2,04	2,60	1,79	1,53	2,06	2,30	1,30	1,19	1,67	1,42	1,99	2,01	2,31	2,20	1,16	0,83	2,94	1,65	0,90	1,06	0,93
4.3	2,98	3,90	2,61	2,21	3,16	3,35	1,88	1,71	2,43	2,06	2,91	2,93	3,36	3,28	1,66	1,18	4,98	2,51	1,28	1,53	1,55
7.3	2,10	2,66	1,84	1,57	2,10	2,36	1,34	1,22	1,71	1,46	2,04	2,06	2,37	2,26	1,19	0,86	3,00	1,69	0,91	1,09	0,88
5.6	0,59	0,72	0,52	0,44	0,55	0,65	0,38	0,35	0,48	0,41	0,57	0,58	0,70	0,62	0,34	0,24	0,79	0,41	0,25	0,69	0,13
8.3	1,62	1,76	1,42	1,21	1,38	1,80	1,03	0,94	1,31	1,12	1,56	1,59	1,81	1,72	0,91	0,66	2,66	1,27	0,69	0,66	0,56
3.5	1,39	1,67	1,22	1,04	1,06	1,42	0,90	0,82	1,13	0,97	1,34	1,36	1,55	1,46	0,79	0,58	2,88	0,96	0,61	0,41	0,29
4.2	3,33	4,50	2,90	2,45	3,63	3,74	2,10	1,88	2,68	2,27	3,23	3,27	3,72	3,56	1,82	1,30	5,25	2,79	1,36	1,80	1,57
8.6	1,60	1,75	1,39	1,18	1,67	1,62	1,02	0,92	1,27	1,08	1,52	1,56	1,79	1,64	0,88	0,64	2,43	1,03	0,63	1,03	0,28
2.1	0,68	0,72	0,60	0,52	0,60	0,60	0,45	0,41	0,54	0,47	0,64	0,67	0,67	0,66	0,39	0,29	0,97	0,36	0,28	0,34	0,00
9.1	1,28	1,28	1,12	0,96	1,33	1,14	0,83	0,74	1,01	0,87	1,21	1,25	1,33	1,15	0,71	0,53	1,93	0,65	0,49	0,62	0,02
2.6	0,61	0,78	0,54	0,46	0,64	0,54	0,40	0,36	0,48	0,42	0,58	0,60	0,56	0,57	0,35	0,26	0,87	0,31	0,24	0,30	0,00
6.2	0,62	0,82	0,54	0,45	0,65	0,57	0,40	0,34	0,48	0,40	0,58	0,61	0,70	0,55	0,33	0,24	0,95	0,29	0,24	0,27	0,04
4.1	3,04	3,90	2,63	2,21	3,05	3,14	1,92	1,66	2,35	1,97	2,87	2,96	3,42	2,86	1,58	1,14	4,11	1,96	1,10	1,60	0,53
7.4	1,91	2,36	1,65	1,39	1,99	1,64	1,24	1,05	1,43	1,22	1,75	1,85	1,71	1,24	1,00	0,75	2,70	0,48	0,68	0,79	0,00
7.1	2,12	2,50	1,83	1,54	2,12	1,81	1,37	1,15	1,40	1,32	1,92	2,05	1,90	1,58	1,08	0,81	2,59	0,18	0,68	0,82	0,00
9.5	1,63	2,02	1,41	1,18	1,65	1,38	1,06	0,89	0,93	1,01	1,46	1,57	1,46	1,41	0,83	0,63	2,28	0,14	0,53	0,63	0,00
9.4	1,24	1,52	1,07	0,90	1,15	1,03	0,82	0,67	0,57	0,74	1,07	1,19	0,86	0,87	0,63	0,49	1,60	0,00	0,36	0,45	0,00
5.1	0,44	0,54	0,38	0,32	0,41	0,37	0,30	0,24	0,31	0,26	0,35	0,42	0,27	0,30	0,22	0,18	0,56	0,00	0,12	0,16	0,00
8.4	0,72	0,84	0,62	0,52	0,67	0,59	0,48	0,39	0,50	0,42	0,52	0,69	0,44	0,47	0,36	0,28	0,91	0,00	0,18	0,25	0,00
3.9	1,84	2,29	1,57	1,30	1,70	1,52	1,20	0,94	1,56	0,88	1,58	1,76	1,26	1,26	0,86	0,67	2,49	0,00	0,41	0,57	0,00
10.1	1,91	2,37	1,63	1,36	1,76	1,58	1,25	0,99	1,27	0,89	1,63	1,83	1,27	1,30	0,91	0,71	2,58	0,00	0,44	0,61	0,00
6.5	0,35	0,40	0,30	0,25	0,32	0,29	0,24	0,19	0,24	0,20	0,25	0,33	0,22	0,22	0,18	0,14	0,43	0,00	0,09	0,12	0,00
8.1	0,85	0,97	0,73	0,61	0,78	0,70	0,57	0,45	0,73	0,33	0,61	0,81	0,52	0,54	0,41	0,33	1,06	0,00	0,20	0,28	0,00
10.4	2,06	2,49	1,75	1,46	1,87	1,70	1,35	1,06	1,53	1,20	1,75	1,97	1,32	1,38	0,97	0,75	2,49	0,00	0,44	0,63	0,00
1.3	2,09	2,53	1,77	1,47	1,92	1,71	1,36	1,06	0,98	1,22	1,76	1,99	1,30	1,38	0,96	0,76	2,51	0,00	0,41	0,61	0,00
4.5	3,17	4,03	2,64</																		



A partir dos resultados da diferença da infiltração potencial, a qual considerou o ponto de murchamento e a capacidade de campo como umidade inicial, observou-se a ocorrência de distintos comportamentos, os quais podem ser agrupados em faixas de valores. As faixas de valores adotadas basearam-se em aspectos de armazenamento superficial de água (considerou-se 1mm) e na média e no desvio padrão da diferença de infiltração potencial, as quais são: 0 a 1mm; 1 a 1,5mm; e >1,5mm.

As unidades de condição de infiltração pertencentes a classe 1 (0 a 1mm) estão relacionadas aquelas as quais a umidade inicial não afeta de forma significativa a infiltração potencial. No total 30 unidades se encontram nessa classe as quais são: 6.7 / 9.2 / 1.1 / 1.5 / 13.3 / 13.4 / 13.5 / 13.6 / 2.1 / 2.5 / 2.6 / 3.2 / 3.3 / 3.4 / 3.8 / 5.1 / 5.2 / 5.3 / 5.4 / 5.5 / 5.6 / 5.7 / 6.2 / 6.4 / 6.5 / 8.1 / 8.4 / 9.10 / 9.6.

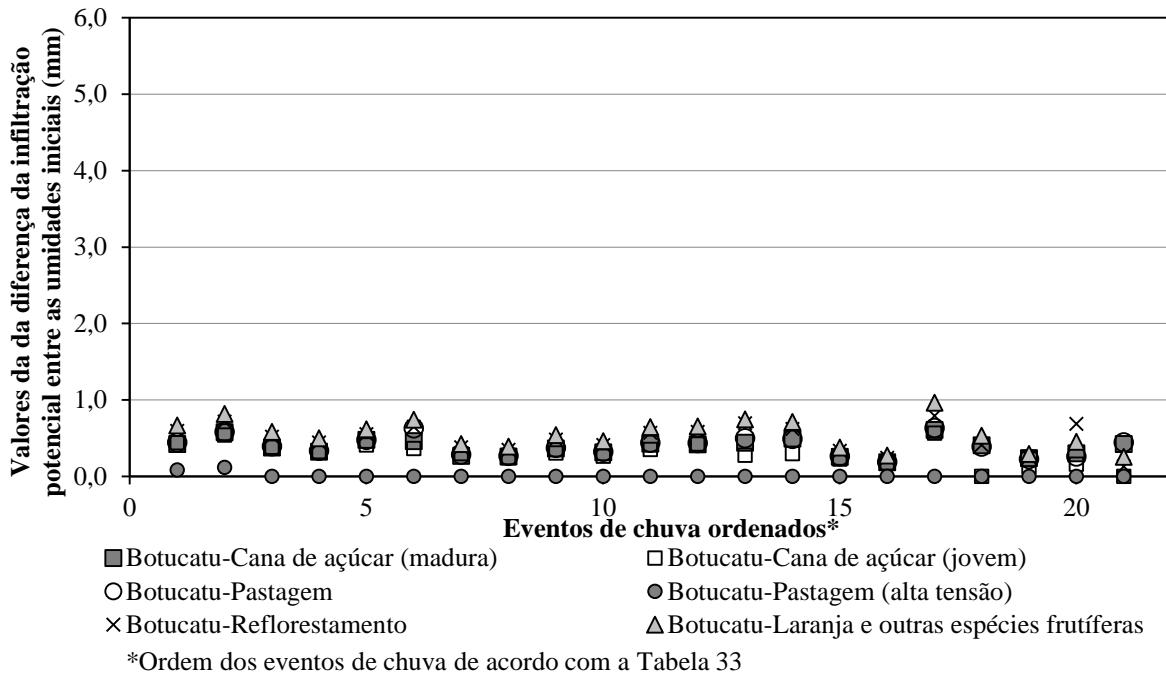
A Classe 2 (1 a 1,5mm) representa as unidades de condição de infiltração, as quais a umidade inicial pode afetar a infiltração potencial dependendo do evento de chuva. As 11 unidades que compõe esta classe são: 1.2 / 1.3 / 1.4 / 1.6 / 10.1 / 10.2 / 10.3 / 10.4 / 10.5 / 11.1 / 11.4 / 3.5 / 3.9 / 7.2 / 8.2 / 8.3 / 8.5 / 8.6 / 9.1 / 9.4 / 9.5 / 9.7 / 7.4 / 4.4 / 4.6.

A Classe 3 (>1,5mm) é composta pelas unidades 22 de condição de infiltração: 11.2 / 11.5 / 12.2 / 4.1 / 4.2 / 4.3 / 4.5 / 7.1 / 7.3 / 7.5 / 7.6. Está associada as unidades que apresentam a maior influência da umidade inicial na infiltração potencial, que resulta no aumento da geração de escoamento superficial Hortoniano potencial.

Com as classes definidas, a influência da umidade inicial foi analisada em termos de materiais inconsolidados e os eventos de chuva. A análise por material inconsolidado permitiu comparar os resultados entre os tipos de uso e manejo do solo, bem como entre os diferentes materiais. Enquanto que, por evento de chuva possibilitou comparar as unidades de condição de infiltração com os diferentes tipos de chuva.

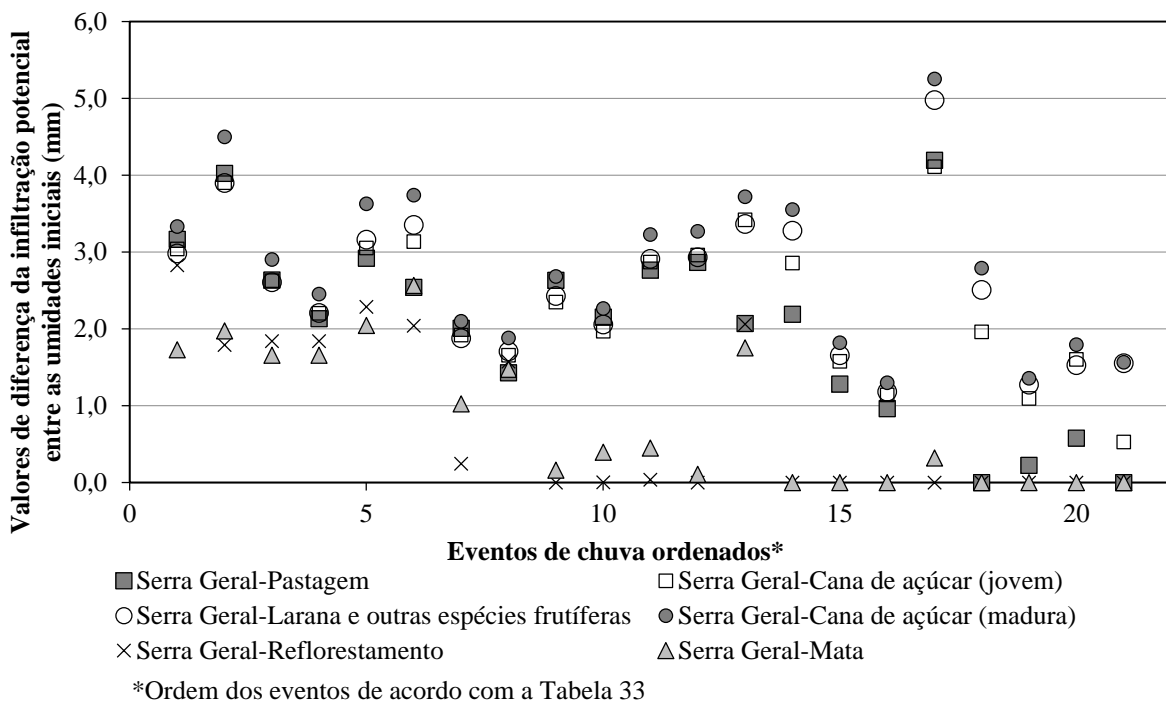
#### *Análise da influência da umidade inicial considerando os materiais inconsolidados*

Para examina-los foram selecionados quatro materiais inconsolidados que exemplificam todos os comportamentos identificados entre os materiais mapeados, os quais estão associados às classes de diferença de infiltração potencial estabelecidas anteriormente. Os resultados da diferença da infiltração potencial foram plotados em gráficos de evento de chuva x diferença de infiltração potencial, em função dos tipos de uso e manejo do solo. A seleção desses materiais inconsolidados baseou-se nos valores máximos e nos mínimos, na média e no desvio padrão da infiltração potencial. Os materiais inconsolidados selecionados foram os residuais da Formação Botucatu (Figura 168) e da Formação Serra Geral (Figura 169), os retrabalhados Cenozóicos (Figura 170) e Colúvios areno argilosos (Figura 171).



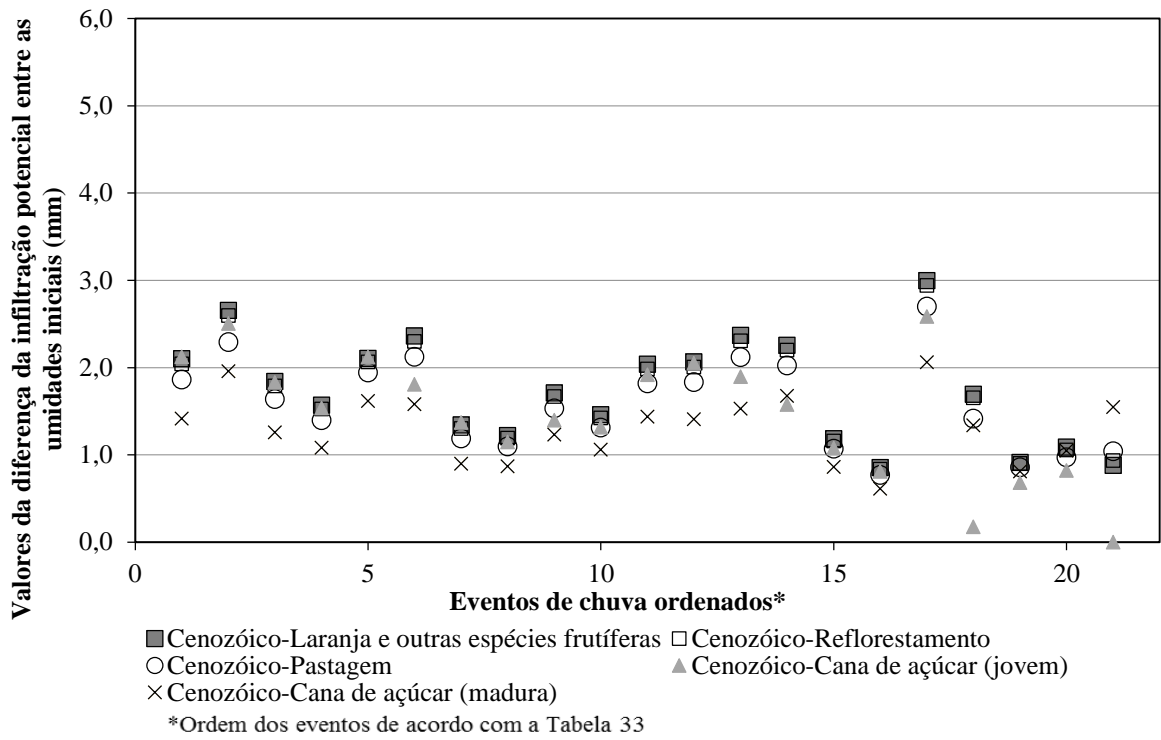
**Figura 168.** Valores da diferença da infiltração potencial estimada entre as duas unidades iniciais (PM e CC) para os residuais da Formação Botucatu.

Fonte: autor



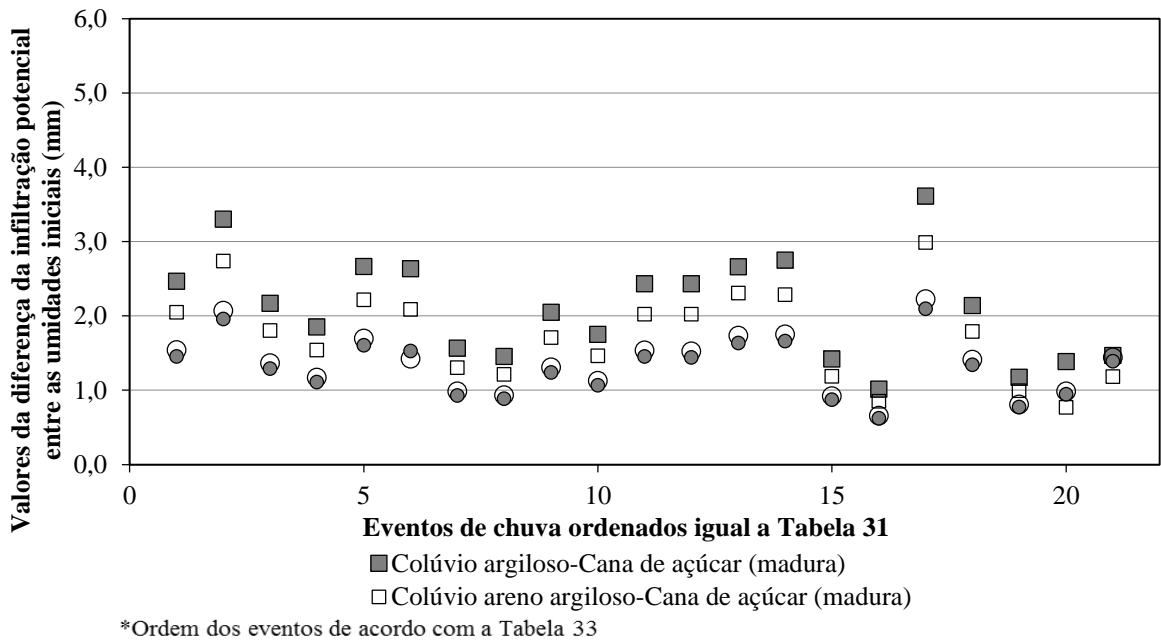
**Figura 169.** Valores da diferença da infiltração potencial estimada entre as duas unidades iniciais (PM e CC) para os residuais da Formação Serra Geral.

Fonte: autor



**Figura 170.** Resultados para os retrabalhados Cenozóicos da diferença da infiltração potencial entre o ponto de murchamento e a capacidade de campo.

Fonte: autor



**Figura 171.** Resultado para os Colúvios areno argilosos da diferença da infiltração potencial entre as duas umidades iniciais.

Fonte: autor

Ao comparar os materiais inconsolidados entre si, observou-se que para solos arenosos (ex. Residuais da Formação Botucatu) a diferença de infiltração potencial foi inferior 1mm. Entretanto, para solos mais argilosos, verificou-se que a diferença de infiltração potencial foi superior a 2 mm, a qual pode alcançar até mais de 5mm (residuais da Formação Serra Geral com cana de açúcar-evento 3). Esses valores encontrados ocorreram devido ao resultado da subtração entre a umidade na capacidade de campo e no ponto de murchamento, o qual foi superior a  $0,12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , enquanto que nos outros materiais inconsolidados não ultrapassava  $0,08 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$ . As combinações que apresentaram variações em média até 1,5 mm, no geral foram os materiais inconsolidados com textura areno argilosa, como os retrabalhados Cenozóicos e Colúvios areno argilosos. A diferença entre as umidades iniciais para estas unidades estava em torno de  $0,04$  a  $0,08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$

A análise individualizada dos materiais inconsolidados com os respectivos usos e manejos do solo, revelou que em todos os materiais ocorreram variações na infiltração potencial por conta das diferentes umidades iniciais adotadas. Este fato está diretamente ligado a compactação de cada tipo de uso e manejo do solo, em vista que esta afeta a porosidade, bem como os valores de capacidade de campo e de ponto de murchamento. Os que apresentaram as maiores diferenças da infiltração potencial foram os tipos de uso e manejo mais compactados, enquanto que os menores estão associados aos menos compactados.

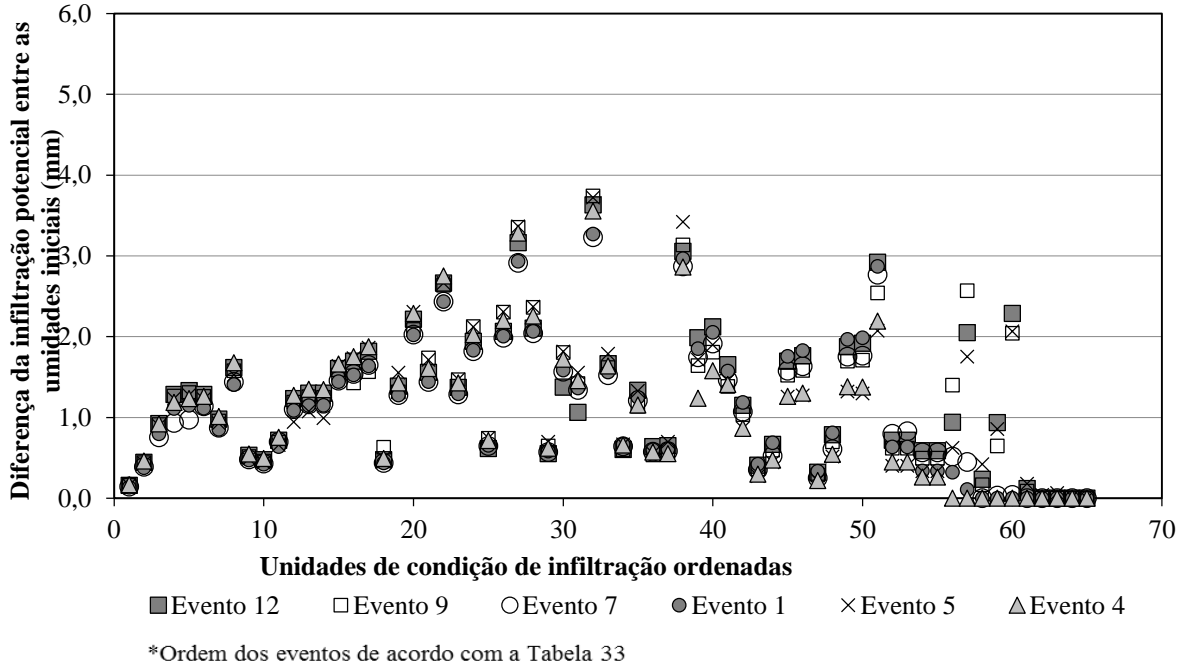
Considerando à variabilidade dos materiais inconsolidados, observou-se que as menores variações entre os tipos de uso e manejo do solo foram dos residuais da Formação Botucatu e os retrabalhados cenozóicos, onde amplitude média foi de 0,6mm. Por outro lado, nos residuais da Formação Serra Geral identificou-se amplitudes superiores a 3 mm em diversos eventos. Enquanto que os retrabalhados Colúvios areno argilosos a diferença entre os máximos e os mínimos estava ao redor de 1mm. É importante observar que nos materiais inconsolidados mencionados houveram tipos usos e manejos do solo que em determinados eventos não ocorreram diferenças. Este resultado está associado ao fato que neste evento em ambas as umidades iniciais a infiltração potencial foi igual ao total de chuva.

#### *Análise das da influência da umidade inicial considerando os eventos de chuva*

A partir da análise dos resultados, foi observado a presença de dois grupos, os quais foram definidos baseado na variabilidade e nos valores da diferença da infiltração potencial. Assim como realizado para os materiais inconsolidados, foram elaborados gráficos onde a diferença de infiltração potencial foi plotada em função dos eventos de chuvas.

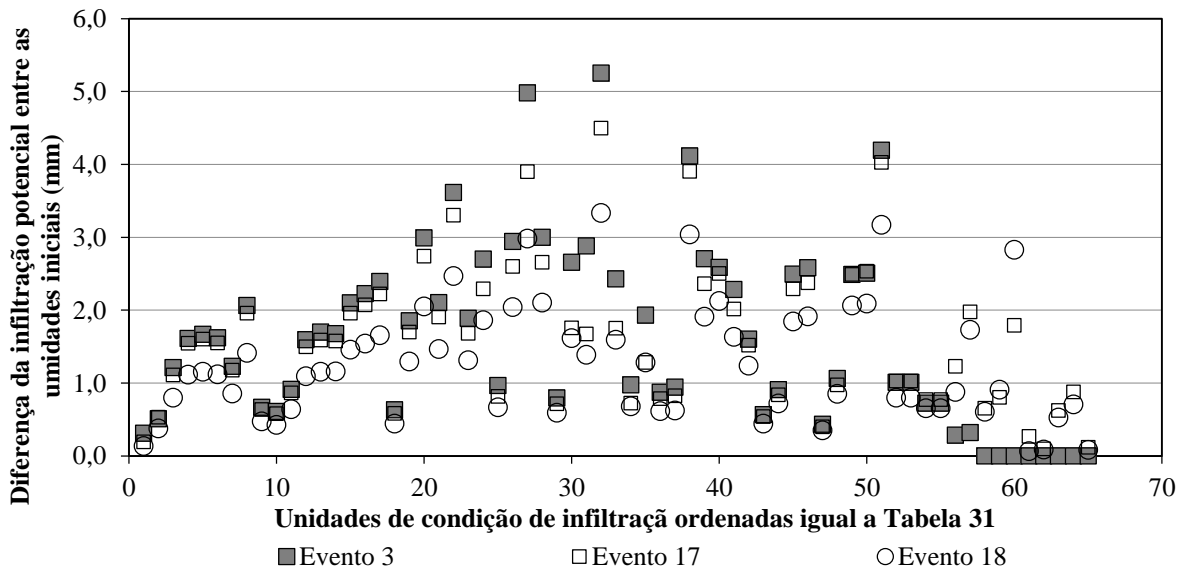
O primeiro grupo (Figura 172) refere-se aos eventos os quais não apresentam grande variação entre si independente da unidade de infiltração, onde amplitude entre o máximo e o mínimo

em média é inferior a 0,5mm. O segundo (Figura 173), por sua vez, a variabilidade é maior, onde os valores da diferença de infiltração potencial entre os máximos e mínimos está entre 0,5mm e 2mm.



**Figura 172.** Grupo 1 de eventos de chuva referente a diferença da infiltração potencial entre as duas umidades iniciais consideradas.

Fonte: autor



**Figura 173.** Grupo 2 de eventos de chuva relacionado à diferença da infiltração potencial entre a umidades iniciais no ponto de murchamento e capacidade campo.

Fonte: autor

#### 5.4.2.2. Resultado de infiltração potencial para os eventos de chuvas.

A partir dos resultados de infiltração potencial foi possível estabelecer 4 grupos de chuvas com distintos potenciais de infiltrar ou gerar escoamento superficial Hortoniano.

##### *Grupo 1*

Os eventos de chuva que fazem parte do Grupo 1 são o 15, 16, 20 e o 21, os quais são responsáveis pela infiltração na área de estudo, pois aproximadamente 90% das unidades de condições de infiltração infiltram mais que 50% dos eventos e em mais de 50% das unidades a infiltração é superior a 85%. Estes eventos apresentam duração moderada ( $>20$  e  $\leq 40$  minutos), intensidade inferior a 1mm/min em todos os intervalos, além de não ser observada grande variação ao longo dos eventos. Quanto a sazonalidade climática (períodos mais secos e mais chuvosos) que ocorre na região, estes eventos são de grande importância na recarga das águas subsuperficiais e os processos associados como à manutenção das nascentes e do fluxo superficial das drenagens. Quando analisado frente ao gráfico de frequência das intensidades (Figura 53) este ganha uma maior importância, pois mais de 99% das intensidades identificadas estão abaixo de 1mm/min.

##### *Grupo 2*

O Grupo 2 corresponde aos eventos de chuva (1, 2, 3, 4, 5 e o 10) que apresentam ainda um alto potencial de infiltração, porém inferior ao do Grupo 1. Nestes eventos, aproximadamente 70% das combinações de material inconsolidado e tipo de uso e manejo do solo infiltram mais que 50% do evento, os quais 20% das combinações infiltram acima de 85%. Os eventos de chuva que compõem este grupo apresentam duração desde longa ( $>40$  minutos), moderada ( $>20$  e  $\leq 40$ ) a curta ( $\leq 20$  minutos), a transiência pode ser variada (ex. eventos 5 e 3) ou constante (ex. evento 20), intensidade mediana por volta de 1,2 mm/min. Chama-se a atenção para dois eventos que compõem este grupo os quais são o 2 e o 3. O evento 2 apesar de apresentar uma intensidade média de mais de 2mm/min, a duração total do evento era de apenas 5 minutos. Em outras palavras, por apresentar apenas um intervalo, observou-se que neste ainda ocorre a interferência mais ativa da sucção na frente de molhamento, de modo a fazer com que as taxas de infiltração sejam superiores a intensidade da chuva, assim como o *ponding* demore mais a ocorrer. O evento 3, por sua vez, mesmo que o seu total de chuva seja considerado alto (54,73mm), apresentou muitos intervalos de baixa intensidade, os quais favoreceram a ocorrência da infiltração.



### *Grupo 3*

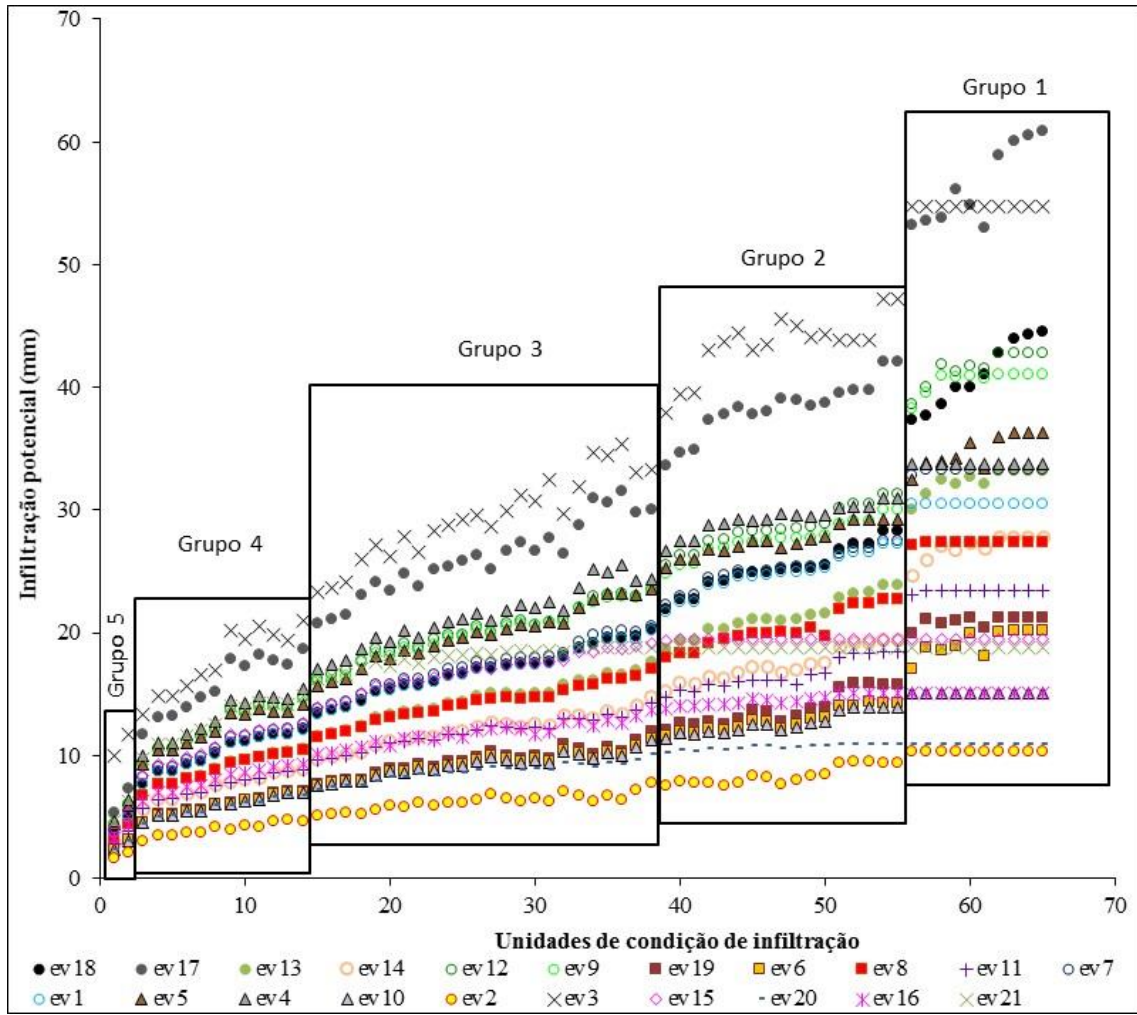
O Grupo 3 de eventos de chuva representam aqueles com potencial moderado de infiltração e geração de escoamento superficial Hortoniano, pois a porcentagem de infiltração de ambos está em função das características das unidades de condição de infiltração. Neste grupo mais de 50% das unidades de condição de infiltração infiltram mais que 60%, o qual 15% das unidades corresponde as combinações que praticamente não geram escoamento superficial, (Grupo 1 das unidades de condição de infiltração). Os eventos de chuva que constituem este grupo são o 5, 7, 8 e o 11, apresentam duração de moderada ( $>20$  e  $\leq 40$  minutos) a curta ( $\leq 20$  minutos), intensidade média variando de 1,11 mm/min a 1,56 mm/min, transiência variada. Ressalta-se que neste grupo já ocorrem intervalos com intensidade superior a 2mm/min (ex. Evento 9).

### *Grupo 4*

O Grupo 4 representa os eventos de chuva responsáveis pela geração de escoamento superficial e os processos associados tais como à erosão, inundação e recarga dos reservatórios. Neste grupo mais de 50% das unidades de condição de infiltração infiltraram menos que 50% dos eventos. Observou-se ainda que neste grupo já ocorreram condições que infiltram menos de 15% dos eventos. Além disso, exceto pelas combinações que infiltram mais na maioria dos eventos (grupo 1 das unidades de condição de infiltração), todas as unidades de condição de infiltração infiltram menos que 85%. Os eventos de chuva que fazem parte deste grupo são o 6, 9, 12, 13, 14, 17, 18 e o 19. Estes apresentam duração de curta ( $\leq 20$  minutos) a longa ( $> 40$  minutos), intensidades médias superiores a 1,2 mm/min, transiência variada, e os picos ocorrem no início, no meio e no fim dos eventos. Quando os picos não estão localizados no início do evento de chuva (14 e 6), o escoamento superficial Hortoniano gerado é maior, em vista que o solo já se encontra mais úmido, conseqüentemente as taxas de infiltração são menores.

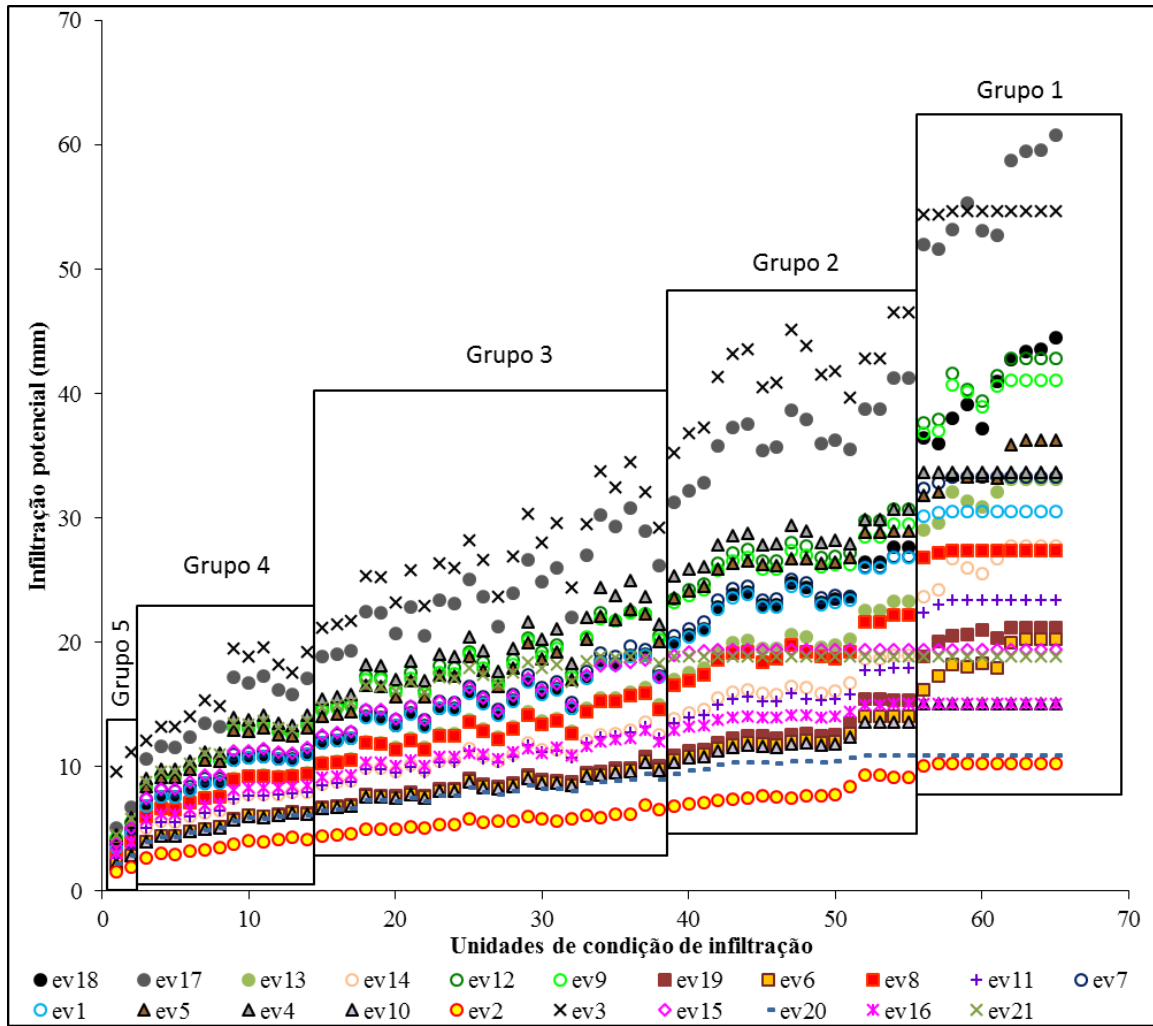
#### 5.4.2.3. Resultados de infiltração potencial para as unidades de condição de infiltração

Para auxiliar as análises da infiltração potencial (IP), os resultados de IP para todas as unidades de condição de infiltração e eventos de chuva foram plotados em dois gráficos (Figura 174 e 175), nos quais o primeiro considera o ponto de murchamento e o segundo a capacidade de campo. Os resultados foram hierarquizados do menor para o maior valor de infiltração potencial a partir do Evento 18. A escolha da hierarquização pelo evento 18 foi porque neste em todas as unidades de condição de infiltração (UCI) ocorreu a geração escoamento superficial Hortoniano.



**Figura 174.** Grupos com os distintos valores de infiltração potencial das unidades de condição de infiltração para os diversos eventos de chuva considerando o ponto de murchamento como unidade inicial.

Fonte: autor



**Figura 175.** Resultados dos grupos de infiltração potencial estimada para as unidades de condição de infiltração para os diversos eventos de chuva considerando à capacidade de campo como unidade inicial.

**Fonte:** autor

Com base nos resultados plotados de IP para as duas umidades iniciais adotadas, foi possível observar distintos padrões e características da infiltração potencial, que estão em função das propriedades dos materiais geológicos. As características de IP estão associadas à variabilidade dos valores obtidos para às UCI's em relação à todos os eventos de chuva e a diferença de comportamento da infiltração potencial entre as unidades de condição infiltração tomando em conta cada evento de chuva. A partir da análise dessas características foi possível identificar 5 grupos majoritários de infiltração potencial, onde os limites foram baseados na mudança expressiva dos valores de IP entre as unidades de condição de infiltração, conforme mostrado nas Figuras 174 e 175. As características de cada grupo são apresentadas na Tabela 34.

**Tabela 34.** Características dos grupos de unidades de condição de infiltração baseados nos valores de infiltração potencial.

<b>Grupo</b>	<b>Características dos grupos de infiltração potencial</b>
Grupo 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Grande amplitude da infiltração potencial (&gt;50mm) entre o máximo e o mínimo dos eventos de chuva</li> <li>-Os máximos de infiltração podem ultrapassar os 55mm</li> <li>-Valores crescentes a lineares e tendem a estabilizar, devido à não geração de escoamento superficial Hortoniano, conseqüentemente o valor de IP é igual ao total da chuva</li> </ul>
Grupo 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Valores crescentes e presença de patamares</li> <li>-Variabilidade alta, com amplitude entre o máximo e o mínimo de até 40mm</li> <li>-Valores máximos variam entre 30 a 45mm</li> </ul>
Grupo 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Valores crescentes lineares e ausência de patamares</li> <li>-Apresenta variabilidade considerável, onde a diferença entre os valores máximos e os mínimos varia entre 20 a 30mm</li> <li>-Valores máximos variam entre 20 a 35mm</li> </ul>
Grupo 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Valores crescentes e presença de patamares</li> <li>-Amplitudes de entre os valores máximos e mínimos em torno dos 15mm</li> <li>-Não ocorre infiltração potencial superior a 20mm</li> </ul>
Grupo 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Baixa variabilidade de IP, onde a diferença entre o máximo e o mínimo não ultrapassa os 10mm</li> <li>- Não ocorrem valores superiores a 12mm</li> <li>-Valores crescentes lineares e ausência de patamares</li> </ul>

**Fonte:** autor

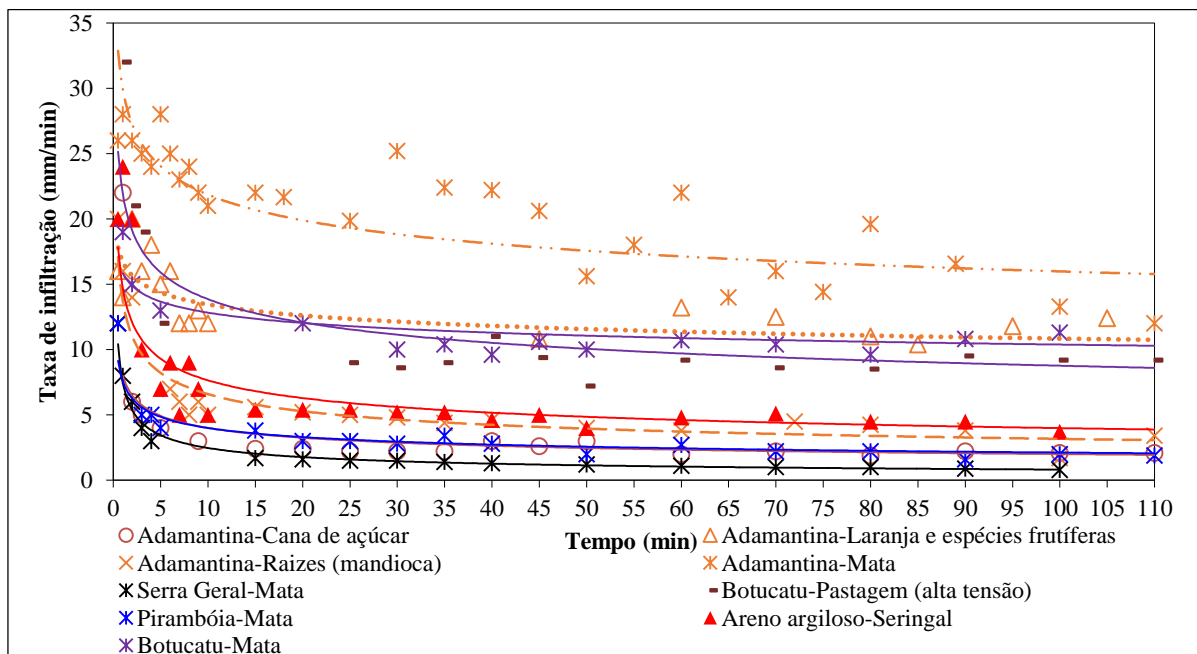
A partir da análise dos grupos de infiltração potencial identificados, verificou que estes estão em função das características geológico-geotécnica das unidades de condição infiltração. A seguir os grupos são descritos frente as curvas de infiltração obtidas no campo, aos parâmetros de entrada do modelo adotados e a relação chuva x infiltração.

#### *Grupo 1*

O Grupo 1 representa as combinações de material inconsolidado e tipos de uso e manejo do solo as quais em mais de 90% dos eventos de chuva infiltra mais de 85% do total do evento. As unidades de condição de infiltração que fazem parte deste grupo são: 9.10 / 4.4 / 5.4 / 3.4 / 3.8 / 4.6

/ 6.4 / 3.3 / 3.2 / 5.7. Os resultados para esse grupo estão diretamente relacionados aos parâmetros adotados, nos quais a condutividade hidráulica saturada (K) foi a que mais interferiu, pois apresenta valores acima de 1 mm/min. A porosidade total está acima de 0,44; a diferença entre a porosidade total e os conteúdos volumétricos iniciais (M) está acima de 0,30; a capilaridade efetiva apresentou mediana de 28,5 mm; e o produto da condutividade hidráulica saturada, da capilaridade efetiva e da diferença entre a porosidade e a umidade inicial apresentou valores superiores a 4,9min. Ressalta-se que quanto maior o produto de KSM maior a infiltração, e assim vice versa.

No que diz respeito as curvas de infiltração potencial (Figura 176), observou-se que estas apresentam altas taxas de infiltração, seja no início do processo ou quando atingem a capacidade de infiltração. Por isso, em grande parte das unidades não houve a geração de escoamento nos diversos eventos de chuva, portanto condiz com as características das curvas de infiltração. A transição ou também denominada inflexão das curvas de infiltração potencial ocorreu principalmente até a 5 minutos. Em termos de variabilidade, este grupo apresenta diferenças significativas nas taxas de infiltração, nas quais a diferença entre o valor máximo (17mm/min) e mínimo (0,8mm/min) de capacidade de infiltração potencial foi de 16,2mm/min. Esta variação é explicada pela presença de macroporosidade em unidades de condição de infiltração como as matas.



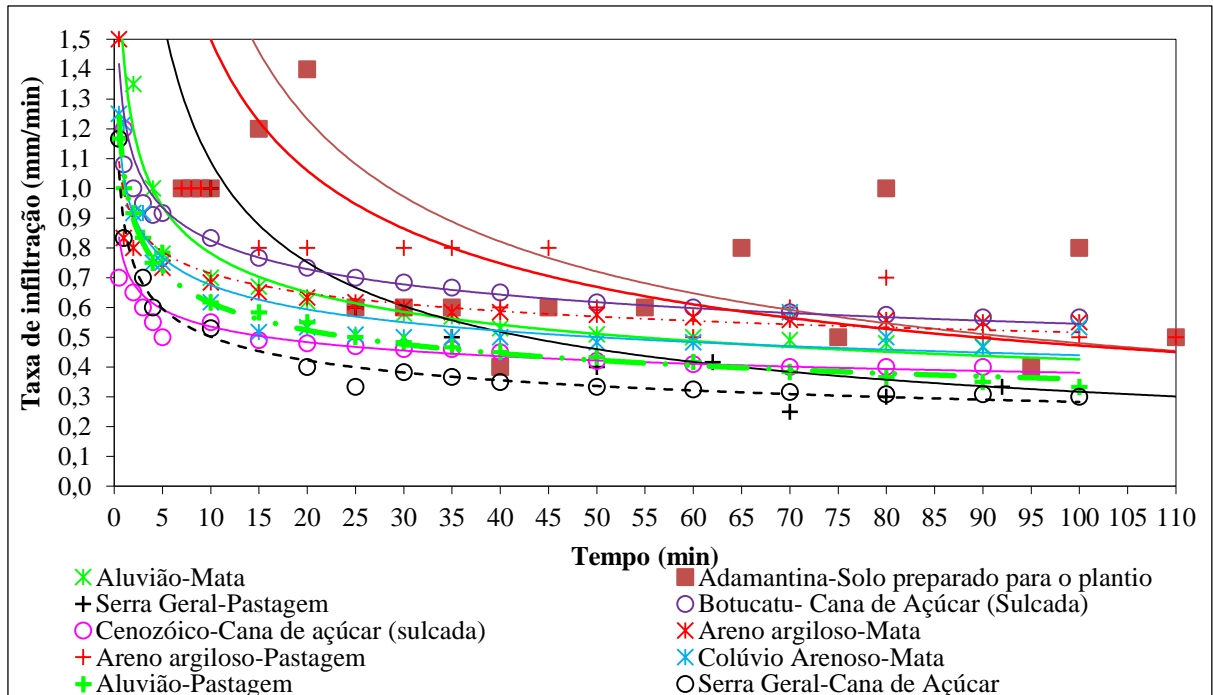
**Figura 176.** Curvas de infiltração das unidades de condição de infiltração pertencentes ao Grupo 1 de potencial de infiltração.

Fonte: autor

### *Grupo 2*

As unidades de condição de infiltração pertencentes ao Grupo 2 são: 7.4 / 7.1 / 9.5 / 9.4 / 5.1 / 8.4 / 3.9 / 10.1 / 6.5 / 8.1 / 10.4 / 1.3 / 4.5 / 13.5 / 13.3 / 13.4 / 13.6 / 4.1. Este grupo representa aquelas unidades que tendem a infiltrar predominantemente, entretanto dependendo do tipo de evento de chuva pode haver a geração de escoamento superficial Hortoniano. Neste grupo acima de 90% dos eventos de chuva infiltram mais que 50% do total precipitado, os quais entre 20% a 45% dos eventos a infiltração é superior a 85%. As combinações que compõe este grupo apresentam condutividade hidráulica saturada média de 0,463 mm/min com máximos e mínimos de 0,300 a 0,600 mm/min, capilaridade efetiva média de 36mm, porosidade total variada (0,35 a 0,62), produto médio e desvio padrão dos parâmetros K, S e M de 4,73 e 1,46 min. É importante mencionar que o produto de KSM reflete as taxas de infiltração potencial máximas ao considerar um volume de água precipitado em um determinado tempo.

Ao comparar a infiltração potencial nos diversos eventos de chuva com as curvas de infiltração das unidades de condição de infiltração pertencentes ao Grupo 2 (Figura 177), observa-se que os resultados são coerentes com as taxas de infiltração obtidas no campo, as quais são consideradas de moderada a alta. Em relação as características das curvas, verifica-se que estas apresentam capacidade de infiltração que variam entre 0,33 mm/min a 0,55 mm/min. A sucção neste grupo tem grande importância no processo de infiltração, pois além ser alta, a duração da sua influência de forma efetiva (inflexão da curva) pode chegar até mais de 10 minutos, exceto para os residuais da Formação Adamantina com o solo preparado para plantio.

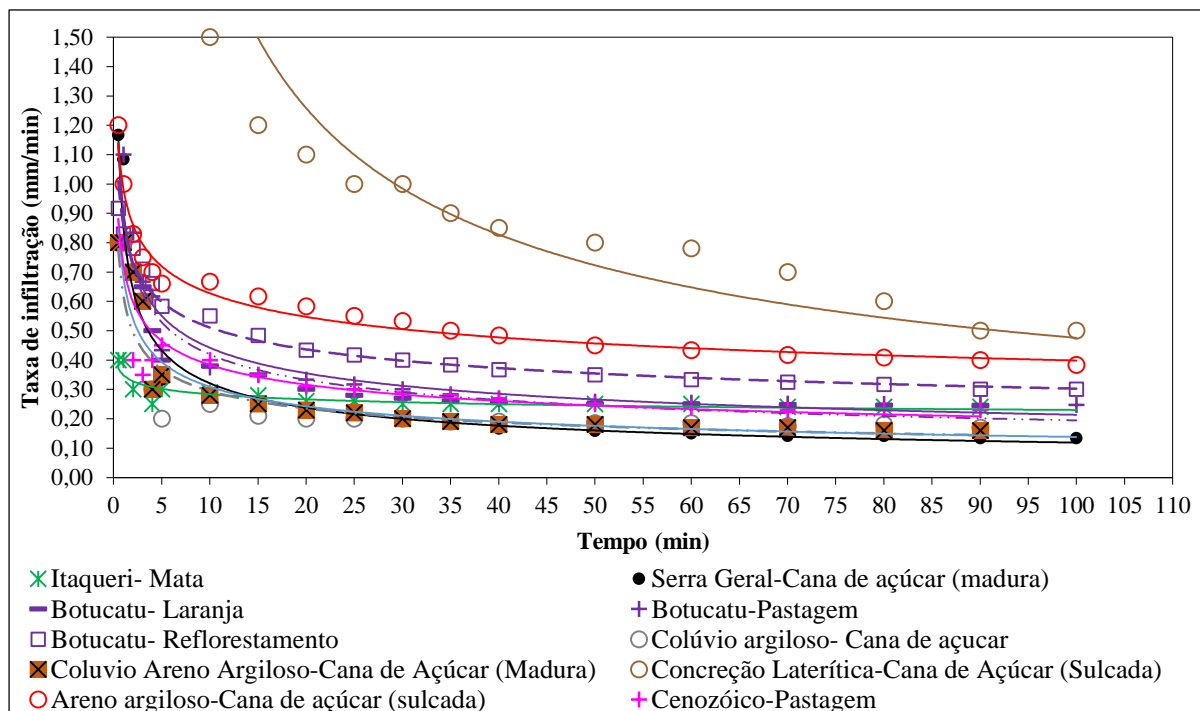


**Figura 177.** Curvas de infiltração das unidades de condição de infiltração pertencentes ao Grupo 2 de potencial de infiltração.

Fonte: autor

### Grupo 3

O Grupo 3 representa as unidades de condição de infiltração com potencial moderado de infiltração em virtude da variabilidade de suas características. As unidades que compõem este grupo são: 11.1 / 9.1 / 6.2 / 1.4 / 11.5 / 5.5 / 1.4 / 11.2 / 1.6 / 12.2 / 8.5 / 7.5 / 5.3 / 7.6 / 4.3 / 7.3 / 5.6 / 8.3 / 3.5 / 2.1 / 2.6 / 4.2 / 8.6. As curvas de infiltração deste grupo (Figura 178) apresentam uma variabilidade considerável no que diz respeito a capacidade de infiltração, onde o máximo e o mínimo foi de 0,5mm/min e 0,13mm/min. As taxas de infiltração no início da infiltração apresentavam valores em média entre 0,8 a 1,20mm/min, fora os residuais da Formação Itaqueri (0,4mm/min) provavelmente por conta da umidade inicial, e as concreções lateríticas com cana de açúcar sulcada devido à presença de macroporosidade. Em termos da inflexão das curvas, esta tende a ocorrer por volta de 5 minutos, ou seja, mais rápido que os do grupo 2, exceto pelas concreções lateríticas com cana de açúcar sulcada que está entre 25 a 30 min.



**Figura 178.** Curvas de infiltração das unidades de condição de infiltração pertencentes ao Grupo 3 de potencial de infiltração e geração

Fonte: autor

Em relação aos parâmetros de entrada adotados, a condutividade hidráulica saturada média é de 0,25 mm/min, com valores máximo e mínimos de 0,180 a 0,55mm/min. A capilaridade efetiva apresenta valores de média e desvio padrão de 39,6mm e 25,27mm. A porosidade encontrada variou desde baixa (0,38 - residuais da Formação Itaqueri com laranja e outras espécies frutíferas), a alta (0,51 - retrabalhados Colúvios argilosos). O produto médio e o desvio padrão dos parâmetros que refletiam as condições de infiltração (KSM) foi de 3,10 e 0,71 mm/min. Considerando à relação da infiltração potencial com o total das chuvas, observou-se que esta é variável, o que justifica a variabilidade encontrada nas unidades de condições de infiltração.

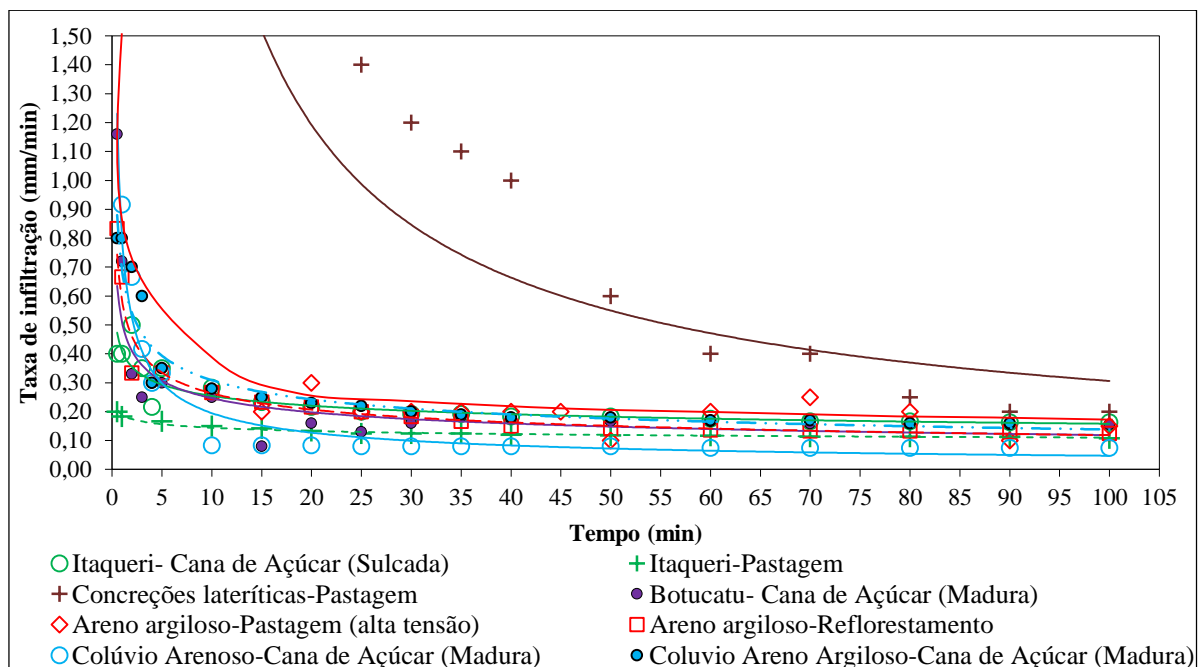
#### Grupo 4

O Grupo 4 é composto pelas unidades de condição de infiltração (1.5 / 10.3 / 10.5 / 1.2 / 9.6 / 7.2 / 2.5 / 5.2 / 1.1 / 9.7 / 10.2 / 8.2) as quais em mais de 80% dos eventos de chuva a porcentagem de infiltração em relação ao total do evento de chuva está entre 25 a 50%. Geralmente os tipos de usos e manejo deste grupo estão associados à cana de açúcar madura e a pastagens compactadas, que provocam a redução das taxas de infiltração. Esse grupo apresenta um alto potencial de escoamento superficial Hortoniano (EP) independentemente do tipo de chuva devido aos baixos valores de capacidade de infiltração (<0,2mm/min). Ao analisar os parâmetros das unidades de condição de



infiltração deste grupo, observou-se que a condutividade hidráulica varia entre 0,183 a 0,083 mm/min, a porosidade é menor que 0,43, a média da capilaridade efetiva foi de 44 mm, enquanto que o produto de K, S e M variou entre 2,17 a 1 mm/min.

As curvas de infiltração (Figura 179) apresentam altas taxas de infiltração, entretanto a inflexão da curva ocorre até no máximo em 5 minutos, ou seja, as taxas de infiltração tendem a estabilizar rapidamente. Por outro lado, este comportamento não foi observado nos residuais da Formação Itaqueri (concreções lateríticas) com pastagens, os quais a inflexão ocorre após os 20 minutos devido à presença de macroporosidade e condições mais seca do solo. A capacidade de infiltração independentemente da unidade de condição de infiltração é inferior a 0,2mm/min, e a diferença entre os valores máximos e mínimos equivale a 0,1mm/min.



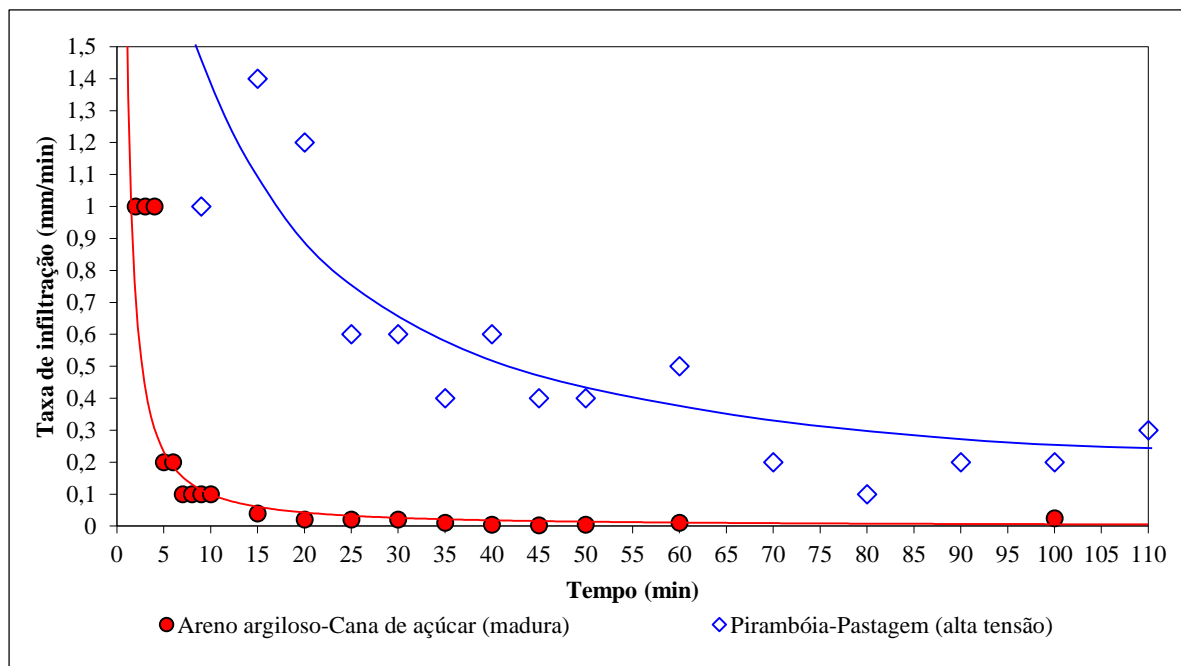
**Figura 179.** Curvas de infiltração das unidades de condição de infiltração pertencentes ao Grupo 4 de potencial de infiltração.

Fonte: autor

### Grupo 5

O Grupo 5 é composto apenas pelas unidades 6.7 e 9.2 e representam aquelas com o maior potencial de EP, as quais em mais de 80% dos eventos infiltram menos que 25%. Este resultado está diretamente relacionado aos baixos valores de condutividade hidráulica saturada ( $<0,021$  mm/min) e de porosidade ( $\leq 0,32$ ).

Ao analisar as curvas de infiltração (Figura 180), verificou-se que a curva do retrabalhado Areno argiloso com cana de açúcar madura representa de forma mais adequada este grupo, a qual apresenta taxas altas de infiltração no início do processo, todavia a transição ocorre em um tempo menor que 10 minutos. A capacidade de infiltração, por sua vez, apresenta os menores valores das unidades de condição de infiltração ensaiadas, que é reflexo dos altos valores de  $\rho_d$  ( $> 1,8\text{g/cm}^3$ ).



**Figura 180.** Curvas de infiltração das unidades de condição de infiltração pertencentes ao Grupo 5 de potencial de infiltração e geração de escoamento Superficial Hortoniano.

Fonte: autor

#### 5.4.3. Zoneamento da infiltração potencial do escoamento superficial Hortoniano

Afim de compreender a magnitude em termos espaciais dos resultados da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial foram elaborados 3 zoneamentos. Estes mapas são referentes à distribuição das unidades de condição infiltração, à diferença da infiltração potencial estimada a partir de duas unidades iniciais e aos grupos de potencial de infiltração. De forma geral os zoneamentos propostos têm a função de assistir o planejamento territorial da área de estudo e auxiliar na implementação de planos e regras necessárias para desenvolver os usos do solo e gerenciar as condições ambientais, principalmente em termos de água.

O mapa de distribuição das unidades de condição de infiltração apresenta grande importância, pois estas são consideradas as unidades territoriais de análise e gestão da área de estudo, onde a definição dos seus limites seguiu os procedimentos do Item 4.2.6.5.

O zoneamento da diferença da infiltração potencial, o qual considera o ponto de murchamento e a capacidade campo teve a função de analisar a importância da umidade inicial na infiltração potencial em termos espaciais. No Item 5.4.2.1 foram estabelecidas 3 classes correspondentes as faixas de valores da diferença da infiltração potencial, as quais as unidades de infiltração foram agrupadas.

O último correspondeu ao zoneamento dos grupos das unidades de condições de infiltração determinados e descritos conforme o Item 5.4.2.3. Estes grupos representam os distintos potenciais de infiltração e geração de escoamento superficial Hortoniano, os quais podem ser associados às funções ambientais relacionadas a dinâmica de águas tais como: recarga das águas subsuperficiais, manutenção das nascentes, controle da vazão dos canais de drenagem e fonte de água superficial dos canais de drenagens e reservatórios.

#### 5.4.3.1. Definição dos cenários

A definição de cenários é essencial na elaboração de zoneamentos em vista que estes são dinâmicos e devem considerar as variações temporais e espaciais da infiltração e a geração de escoamento superficial Hortoniano. Para estabelecer os cenários alguns aspectos referentes à relação temporal e espacial da infiltração e da geração do escoamento superficial Hortoniano com os tipos de uso e manejo do solo devem ser mencionados:

- A infiltração na área ocupada por cana de açúcar apresenta forte influência do manejo, onde em cada fase do ciclo da cultura, a estrutura e a compactação do solo são completamente distintas, o que interfere diretamente na capacidade de infiltração potencial. Em média, o ciclo da cana de açúcar tem duração de 7 anos com 6 fases, que envolvem o preparo do solo, plantio, crescimento, colheita, fim da colheita e rebrotamento.
- Usos como pastagem tendem apresentar mudanças de médio a longo prazo (ciclo de 10 anos para usos econômicos) nas propriedades físicas e hidráulicas que controlam a infiltração. Dependendo do tempo de exposição ao tráfego de maquinário ou do pisoteio de animais, os manejos podem provocar níveis de compactação muito diferentes.

Baseado no exposto acima, foram considerados dois cenários para o zoneamento dos grupos de unidades de condição de infiltração, afim de avaliar espacialmente e temporalmente a alteração do potencial de infiltração e geração de escoamento por conta do tipo de manejo. Os cenários estão associados ao início e ao final do ciclo da cana de açúcar e das pastagens, ou seja estão relacionados à duas condições extremas de compactação por conta dos manejos. A primeira refere-se ao início do

ciclo dos dois tipos de usos onde o solo é preparado através de processos de aragem, sulcamento e gradeamento com o intuito de diminuir a compactação, que conseqüentemente promove o aumento das taxas de infiltração. Enquanto a outra condição está associada ao final do ciclo, onde o solo se encontra mais compactado por conta do tráfego de maquinário, pisoteio do gado e uso de fertilizantes.

Para definir as unidades de condição de infiltração referentes a cada um dos cenários foram considerado os valores da massa específica seca de campo ( $\rho_d$ ) e capacidade de infiltração. O cenário 1 representou as unidades com cana de açúcar e com pastagem com os menores valores de  $\rho_d$  e maiores de capacidade de infiltração. Por outro lado, para o Cenário 2, foram atribuídas aquelas com menores valores de capacidade de infiltração e maiores de  $\rho_d$ . Dois pontos são importantes ressaltar: para os outros usos do solo foi considerada para ambos os cenários as unidades de condição de infiltração relacionadas aos respectivos tipos; em alguns casos não foi possível amostrar as duas condições manejo da pastagem e cana de açúcar, logo a unidade de infiltração caracterizada foi igual nos dois cenários.

Afim de visualizar quais unidades de condição de infiltração estão associadas em cada cenário, na Tabela 35 tem se a listagem das unidades associadas ao respectivo material consolidado, tipo de uso do solo e grupo de potencial de infiltração.

**Tabela 35.** Relação das unidades de condição de infiltração associadas aos materiais inconsolidados e respectivos usos, cenários elaborados para o zoneamento e os grupos de potencial de infiltração.

Material inconsolidado	Uso do solo	Cenário 1	Grupo de potencial de infiltração	Cenário 2	Grupo de potencial de infiltração
Residual da Formação Itaqueri	Cana de açúcar	1.1	4	1.2	4
	Laranja e outras espécies frutíferas	1.3	2	1.3	2
	Mata	1.4	3	1.4	3
	Pastagem	1.5	4	1.5	4
	Reflorestamento	1.6	3	1.6	3
Residual da Formação Itaqueri (Concreções lateríticas)	Cana de Açúcar	2.1	3	2.1	3
	Pastagem	2.5	4	2.5	4
	Reflorestamento	2.6	3	2.6	3
Residual da Formação Adamantina	Cana de açúcar	3.1	1	3.2	3
	Laranja e outras espécies frutíferas	3.3	1	3.3	1
	Mata	3.4	1	3.4	1
	Pastagem	3.5	3	3.5	3
Residual da Formação Serra Geral	Cana de açúcar	4.1	2	4.2	3
	Laranja e outras espécies frutíferas	4.3	3	4.3	3
	Mata	4.4	1	4.4	1
	Pastagem	4.5	2	4.5	2
	Reflorestamento	4.6	1	4.6	1
Residual da Formação Botucatu	Cana de açúcar	5.1	2	5.2	4
	Laranja e outras espécies frutíferas	5.3	3	5.3	3
	Mata	5.4	1	5.4	1
	Pastagem	5.5	1	5.7	3
	Reflorestamento	5.6	3	5.6	3
Residual da Formação Pirambóia	Cana de açúcar	6.2	3	6.2	5
	Laranja e outras espécies frutíferas	6.2	3	6.2	3
	Mata	6.4	1	6.4	1
	Pastagem	6.5	2	6.7	5
	Reflorestamento	6.5	2	6.5	2
Retrabalhados Cenozóicos	Cana de açúcar	7.1	2	7.2	4
	Laranja e outras espécies frutíferas	7.3	3	7.3	3
	Mata	7.4	2	7.4	2
	Pastagem	7.5	3	7.5	3
	Reflorestamento	7.6	3	7.6	3
Retrabalhado Arenoso	Cana de açúcar	8.1	2	8.2	4
	Laranja e outras espécies frutíferas	8.3	3	8.3	3
	Mata	8.4	2	8.4	2
	Pastagem	8.5	3	8.5	3
	Reflorestamento	8.6	3	8.6	3

**Tabela 35.** (Continuação) Relação das unidades de condição de infiltração associadas aos materiais inconsolidados e respectivos usos, cenários elaborados para o zoneamento e os grupos de potencial de infiltração.

Material inconsolidado	Uso do solo	Cenário 1	Grupo de potencial de infiltração	Cenário 2	Grupo de potencial de infiltração
Retrabalhado Arenoso	Cana de açúcar	8.1	2	8.2	4
	Laranja e outras espécies frutíferas	8.3	3	8.3	3
	Mata	8.4	2	8.4	2
	Pastagem	8.5	3	8.5	3
	Reflorestamento	8.6	3	8.6	3
Retrabalhado Areno argiloso	Cana de açúcar	9.1	3	9.2	5
	Mata	9.4	2	9.4	2
	Pastagem	9.5	2	9.7	4
	Reflorestamento	9.6	4	9.6	4
Retrabalhado Colúvio arenoso	Cana de açúcar	10.1	2	10.2	4
	Laranja e outras espécies frutíferas	10.3	4	10.3	4
	Mata	10.4	2	10.4	2
	Pastagem	10.5	4	10.5	4
Retrabalhado Colúvio areno argiloso	Cana de açúcar	11.1	3	11.2	3
	Mata	11.4	3	11.4	3
	Pastagem	11.5	3	11.5	3
Retrabalhado Colúvio argiloso	Cana de açúcar	12.2	3	12.2	3
Retrabalhado Aluvionar	Laranja e outras espécies frutíferas	13.3	2	13.3	2
	Mata	13.4	2	13.4	2
	Pastagem	13.5	2	13.5	2
	Reflorestamento	13.6	2	13.6	2
<i>Material inconsolidado</i>		<i>Tipo de uso e manejo do solo</i>			
1. Residual da Formação Itaqueri	8. Retrabalhado Arenoso	1. Cana de açúcar (jovem ou sulcada)			
2. Residual da Formação Itaqueri (concreções lateríticas)	9. Retrabalhado Areno argiloso	2. Cana de açúcar (madura)			
3. Residual da Formação Adamantina	10. Retrabalhado Colúvio arenoso	3. Laranja e outras espécies frutíferas			
4. Residual da Formação Serra Geral	11. Retrabalhado Colúvio areno argiloso	4. Mata			
5. Residual da Formação Botucatu	12. Retrabalhado Colúvio argiloso	5. Pastagem			
6. Residual da Formação Pirambóia	13. Retrabalhado Aluvionar	6. Reflorestamento			
7. Retrabalhado Cenozóico		7. Pastagem (alta tensão)			

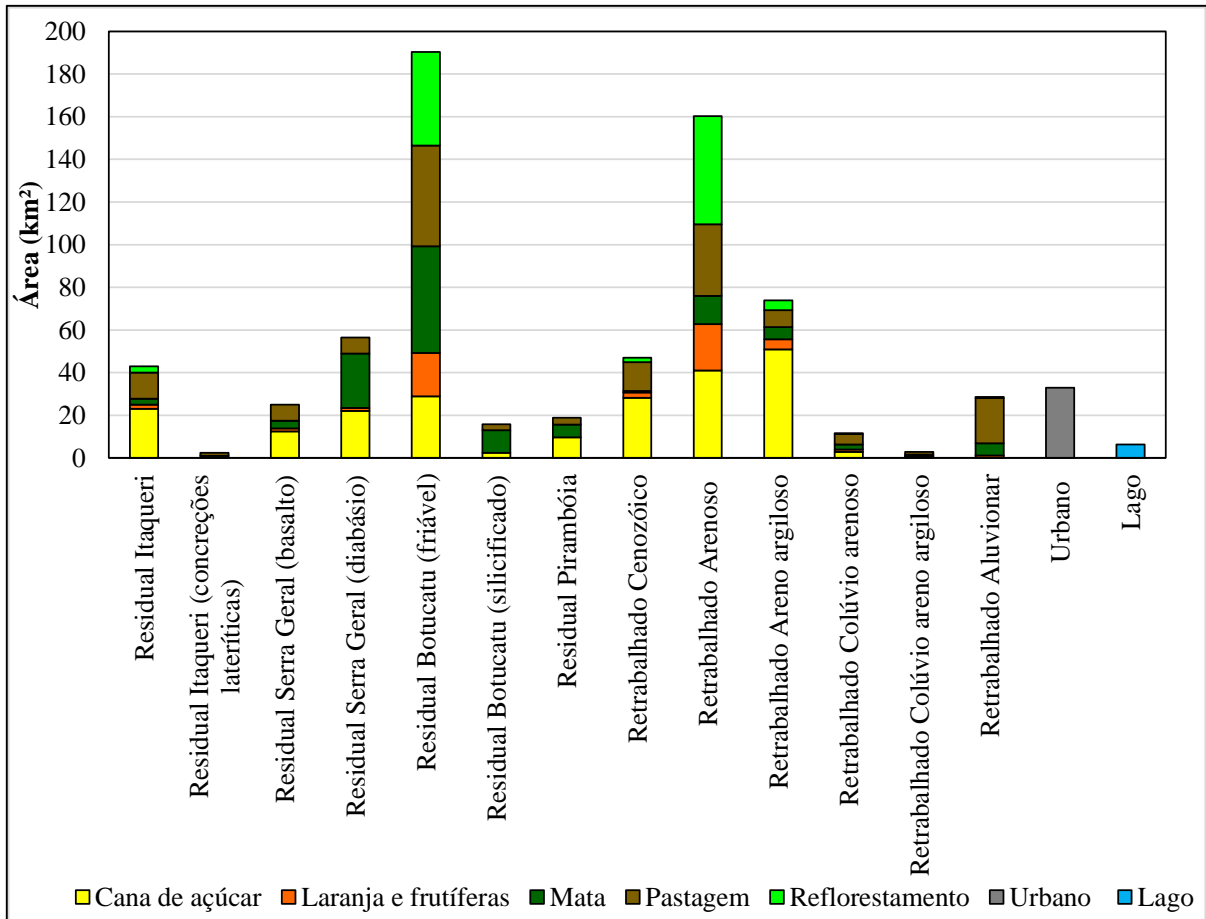
Fonte: autor

5.4.3.2. Zoneamento da Região de São Carlos

Para a região foram desenvolvidos 3 tipos de zoneamento os quais são: zoneamento quanto as unidades de condição de infiltração; zoneamento da diferença entre a infiltração potencial estimada a partir do ponto de murchamento e a capacidade e campo; zoneamento dos grupos de potencial de infiltração para os cenários 1 e o 2.

*Unidades de condição de infiltração*

A distribuição das unidades de condição de infiltração encontra-se no Apêndice XVI, enquanto que na Figura 181 é apresentada as respectivas áreas material inconsolidado e tipo de uso do solo.



**Figura 181.** Distribuição das unidades de condição de infiltração identificadas na região de São Carlos.

Fonte: autor

No total foram obtidas 336 divisões (unidades territoriais) em termos de material inconsolidado e tipo de uso do solo. Observou-se que todos os tipos de uso identificados na Formação Botucatu (friável) e nos Retrabalhados arenosos apresentam extensões espaciais

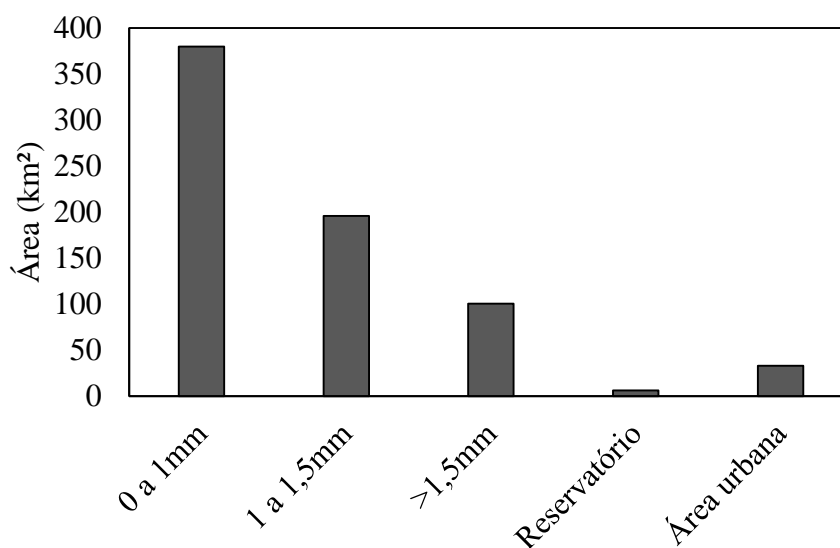
significativas, que totalizam mais de 20 km<sup>2</sup> cada um, exceto pela mata no Retrabalhado Arenoso (13,12km<sup>2</sup>). Para os retrabalhados areno argilosos o tipo de uso que chama atenção é a cana de açúcar, a qual representa mais de 65% desta unidade o que é equivalente de 50,95km<sup>2</sup>. Este resultado indica que a infiltração e a geração de escoamento superficial Hortoniano neste pode apresentar variações importantes na região de São Carlos em vista a variabilidade observada no item 5.5.3.3 por conta do tipo de manejo. Os residuais da Formação Itaqueri e Serra Geral (basalto) tem como principais usos a cana de açúcar a pastagem. Os residuais da Formação Serra Geral (diabásio), por sua vez estão em função principalmente da cana de açúcar e das matas. Os outros usos por não apresentarem uma grande distribuição na região, geralmente estavam associadas a um tipo de uso principal, como os retrabalhados Aluvionares e Colúvios arenosos os quais são recobertos por pastagens, ou os residuais da Formação Botucatu (silicificado) por matas.

#### *Análises da diferença da infiltração potencial (PM-CC)*

As unidades de condição de infiltração foram classificadas em 3 classes com base nas seguintes faixa de valores de diferenças: 0 a 1mm; 1 a 1,5mm e >1,5mm.

No Cenário 1 (Apêndice XX) para mais de 50% da extensão da região de São Carlos, conforme observado na Figura 182 que apresenta as áreas de cada classe, as diferenças são inferiores a 1mm, o que indica que a umidade inicial não afeta de forma significativa a infiltração e geração de escoamento superficial Hortoniano. As unidades que compõe a classe de 0 a 1mm estão associadas principalmente aos materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu com os mais diferentes usos e totalizam 162 km<sup>2</sup>. As outras unidades de infiltração independentemente do material inconsolidado estão relacionadas a usos como matas e cana de açúcar sulcada que totalizam uma área de 132 km<sup>2</sup>. Em termos de localização, as unidades estão distribuídas em toda área de estudo, e podem ocorrer em diversas posições do terreno.





**Figura 182.** Área das classes do zoneamento associadas a diferença da infiltração potencial considerando o ponto de murchamento e a capacidade de campo das unidades de São Carlos para o Cenário 1.

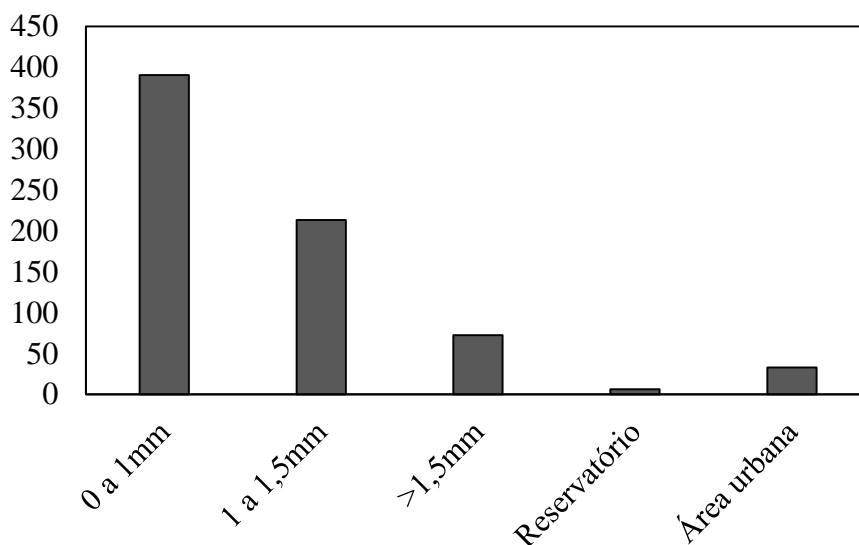
**Fonte:** autor

As unidades de condição de infiltração pertencentes a classe de 1 a 1,5mm correspondeu a 195km<sup>2</sup> (27,37%), distribuídas em grande parte da área e localizadas em todas as porções do terreno. Estas apresentam diferenças de infiltração potencial moderada, as quais sugerem que em função da condição umidade, o comportamento da infiltração e da geração de escoamento superficial pode ser distinto. Essa classe é constituída predominantemente (106km<sup>2</sup>) pelos materiais inconsolidados retrabalhados Arenosos que ocupadas por laranjas e outras espécies frutíferas, pastagens e o reflorestamento, e os retrabalhados Areno argilosos com cana de açúcar sulcada (50,95km<sup>2</sup>).

A classe com diferenças de infiltração potencial maiores que 1,5mm representaram apenas 14 % da área, distribuídas em 100 km<sup>2</sup> principalmente a norte e localizadas nas porções mais altas do terreno. Esse resultado apresenta grande importância, pois ao considerar uma condição mais úmida do solo a geração de escoamento superficial Hortoniano será maior, que pode resultar no aumento da ocorrência de processos erosivos, do transporte de sedimentos, assim como de inundação.

Ao analisar a distribuição e a extensão das classes (Figura 183) da diferença da infiltração potencial no Cenário 2 (Apêndice XXI), não observou-se mudanças expressivas. A Classe de 0 a 1mm e a de 1 a 1,5mm perderam uma área de 11km<sup>2</sup> e 17km<sup>2</sup> respectivamente, o que revela que para a região de São Carlos a alteração do manejo não afeta de forma significativa a infiltração e a geração de escoamento superficial Hortoniano. Enquanto a Classe de valores maiores que 1,5mm teve um ganho 28km<sup>2</sup>, o que era um resultado esperado, pois com o aumento da compactação, espera-se que

o conteúdo de água na capacidade campo esteja mais próximo da porosidade, desse modo, espera-se que a camada superficial sature mais rápido.

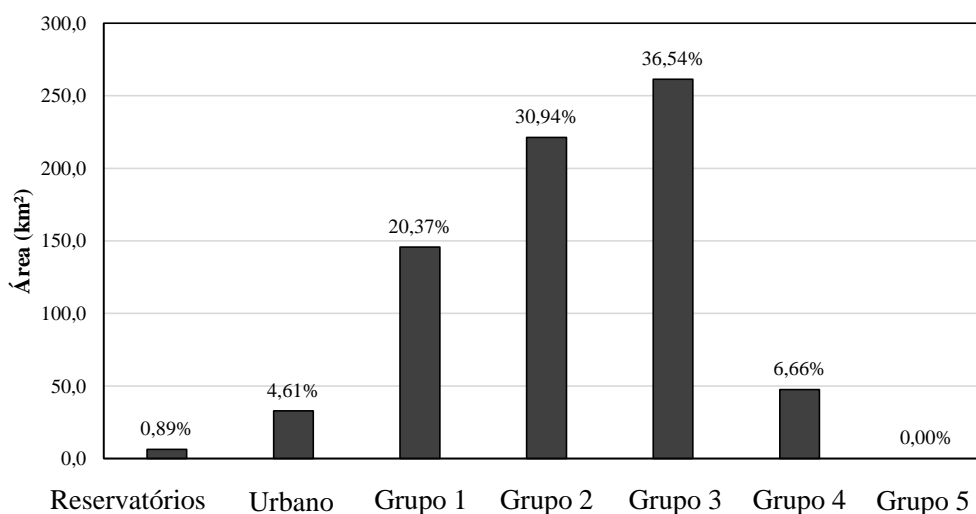


**Figura 183.** Distribuição das classes da diferença da infiltração potencial entre as duas umidades iniciais adotadas da região de São Carlos para o Cenário 2.

Fonte: autor

#### *Grupos de potencial de infiltração (Cenário 1)*

Baseado nos procedimentos propostos no Item 4.2.13.2 obteve-se o zoneamento da região de São Carlos. No Apêndice XVIII é apresentado o zoneamento considerando o Cenário 1, enquanto na Figuras 184 tem-se a extensão dos grupos.



**Figura 184.** Distribuição dos grupos do zoneamento de São Carlos para o Cenário 1

Fonte: autor

Baseado no Cenário 1 diversos aspectos foram observados, os quais estão associados às características e à distribuição de cada grupo, aspectos físicos dos materiais inconsolidados e a posição em que as unidades territoriais ocupam no terreno:

- As unidades de condição de infiltração pertencentes ao Grupo 4, representam uma das principais áreas fontes de geração de escoamento superficial e tem como materiais inconsolidados os residuais da Formação Itaqueri, os retrabalhados Arenos argilosos e Colúvios arenosos. Os tipos de uso do solo geralmente estão associados à cana de açúcar jovem, a pastagem e a reflorestamento. Estão distribuídas ao longo de 47,60 km<sup>2</sup> (6,66%), ocupam áreas próximas a diversas cabeceiras localizadas a nordeste da região de São Carlos, o que justifica as condições de inundação do Grupo 2 a montante em certos meses do ano. Além disso, estão associadas a uma das regiões com maior densidade de drenagem da área de estudo, é um indicativo de haver um maior volume de escoamento superficial gerado nas áreas mais acima do terreno.

Dois aspectos importantes desse grupo são importantes mencionar. O primeiro está associado às superfícies de difrações hídras rasas (<2 m) que ocorrem nos residuais da Formação Itaqueri conforme já verificado por Fagundes (2010), o que sugere que possa haver um aporte maior de volume escoado. O segundo refere-se aos Colúvios arenosos, nos quais verificou-se que resultado são compatíveis com os observados por Failache (2013), pois este autor identificou diversas evidências de erosão laminar, que é um indicativo da ocorrência de volumes de escoamento expressivos nestas unidades de condição de infiltração.

- As unidades de condição de infiltração pertencentes ao Grupo 1, ou seja aquelas que apresentam um alto potencial de infiltração estão relacionadas principalmente aos materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu, os quais representam espacialmente mais de 75% deste grupo. Os principais usos identificados no Grupo 1 são as matas e as pastagens não compactadas. Este grupo está distribuído ao longo de uma área de 145,70km<sup>2</sup> (20,37%), e ocupam regiões com relevo mais suave, bem como regiões com maiores declividades e próximas a regiões de cabeceiras.

Na maioria dos casos as unidades que estão localizadas nas regiões mais suaves do relevo estão associadas aos materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu representam uma importante zona de recarga do aquífero Botucatu, devido ao alto potencial de infiltração e a extensão das unidades territoriais. As que estão em regiões mais inclinadas, associam-se às áreas que apresentam uma combinação de altas taxas de infiltração e nível de água mais superficial, o que pode indicar taxas de recarga das águas subsuperficiais mais rápidas, consequentemente são responsáveis pelo principal aporte de água das fontes próximas a estas. Os materiais inconsolidados e os tipos de

usos predominantes desta condição são os residuais da Formação Serra Geral e Botucatu com cobertura de matas.

- As unidades de condição de infiltração que pertencem ao Grupo 2 estão associadas predominantemente aos retrabalhados Arenos argilosos, Arenosos, Cenozóicos e aluvionares, aos residuais da Formação Serra Geral, Botucatu e Pirambóia, os quais estão associados a usos e manejos como a cana de açúcar jovem, as matas e as pastagens. Apresentam a maior distribuição do Cenário 1 (221,33km<sup>2</sup> - 30,94%) e ocupam os topos de morro, as planícies aluvionares e em menor frequência o meio de encosta.

As unidades que estão nos topos de morro estão relacionadas a solos mais espessos, geralmente estão associadas aos retrabalhados Arenos argilosos, Arenosos e Cenozóicos que totalizam aproximadamente 60% do Grupo e são responsáveis pela recarga das águas subsuperficiais a longo prazo. As unidades de condição de infiltração localizadas em planícies aluviais apresentam condições especiais ambientais que são fundamentais para a região, pois recarregam os aquíferos rasos e controlam a vazão dos canais de drenagens durante o período de chuva mais intensas da região de São Carlos. Além disso, nestas a geração do escoamento superficial tende a ser mais rápida, acumulam na superfície e funcionam como uma fonte adicional de água disponível para infiltração, o que justifica sua função ambiental. As unidades territoriais que estão localizadas nas encostas estão associadas principalmente aos residuais da Formação Serra Geral, Botucatu e Pirambóia e são responsáveis pela recarga de médio a curto prazo devido ao nível de água mais superficial, consequentemente promovendo a manutenção o fluxo das drenagens durante o período de estiagem. É importante ressaltar que as unidades que estão relacionadas aos residuais da Formação Pirambóia apresentam superfícies de difração hídrica rasas (<2m) como observado na Figura 63. Por conta disso, durante o período de chuvas, a água brota nas encostas, e escoam posteriormente a até o canal de drenagem.

- As unidades da Grupo 3 estão amplamente distribuídas ao longo da região de São Carlos (261,34 km<sup>2</sup> - 36,54%), e ocupam as regiões com menor densidade de drenagem e ocorrem em todas as posições topográficas. Essa unidade tem como principais materiais inconsolidados os retrabalhados Arenosos e Cenozóicos e os residuais da Formação Botucatu e são recobertos principalmente por laranja e outras espécies frutíferas, pastagem e reflorestamento.

Em virtude de ser um Grupo com potencial moderado tanto a infiltração como a geração de escoamento superficial Hortoniano não são expressivos. Por conta disso e somado ao fato que os materiais inconsolidados que compõe esta classe são espessos, as taxas de recarga são muito baixas ou a água infiltrada tende a ficar armazenada no solo e não disponível para recarregar as águas subsuperficiais. Enquanto que para o escoamento superficial Hortoniano, este depende da

conectividade das unidades territoriais de mesmo grupo ou com maior potencial de geração para ser considerada como área fonte água disponível para as drenagens e reservatórios.

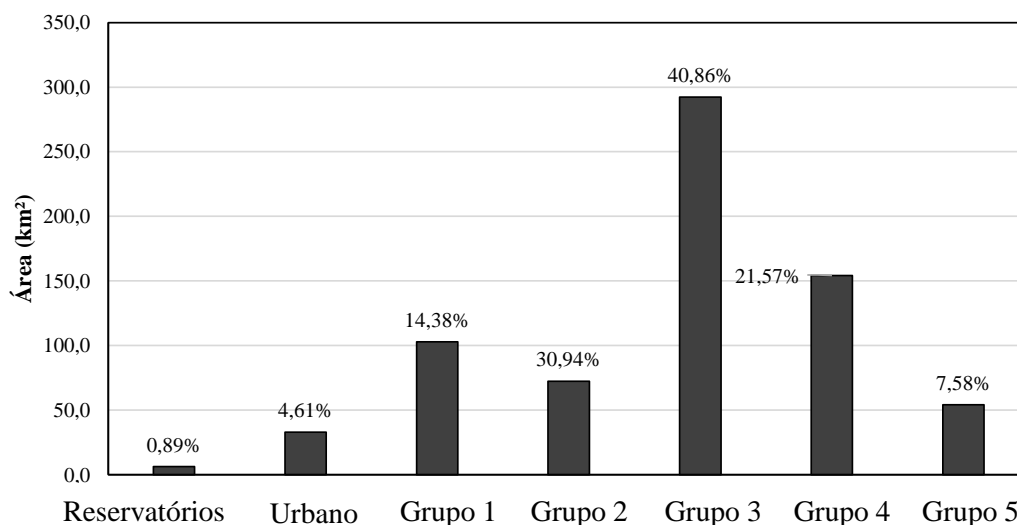
- A área urbana da folha do IBGE de São Carlos apresenta uma área considerável que totaliza mais de 32,96 km<sup>2</sup> (4,61%). Em virtude de grande parte dela ser impermeabilizada é uma grande área fonte de escoamento superficial, onde a água escoada alcança em um período curto de tempo os canais de drenagem.

- Alguns aspectos importantes devem ser avaliados independentemente do Grupo a qual a unidade de condição de infiltração pertença, os quais estão associados ao tamanho, o entorno e à conectividade da unidade territorial. Esta análise deve ser feita pois estes aspectos interferem no potencial do processo predominante ou da função ambiental da região analisada. Por exemplo, a unidade 132 que pertence a Grupo 3, ou seja, apresenta potencial moderado de infiltração e geração de escoamento superficial. Esta tem uma área de aproximadamente 1,38 km<sup>2</sup> e está rodeada de unidades classificadas como Grupo 2. Ao tomar em conta um evento de chuva com potencial de geração de escoamento superficial, a unidade 132 irá gerar escoamento, todavia dependendo do tempo e da intensidade da chuva, esse escoamento não escoará até os canais de drenagens. Este fato ocorrerá pois quando a água escoada alcançar as unidades do Grupo 2, deverá infiltrar devido ao maior potencial de infiltração desta classe.

#### *Grupos de potencial de infiltração (Cenário 2)*

Considerando o Cenário 2 (Apêndice XIX), observaram-se mudanças expressivas nos grupos e em extensão territorial. Dentre as alterações uma das que mais atenção foi a ocorrência de unidades de infiltração pertencentes ao Grupo 5, as quais não ocorrem no Cenário 1, ou seja, áreas com um grande potencial de geração de escoamento superficial.

Em termos de extensão territorial (Figura 185), houve uma diminuição de mais de 42,84 km<sup>2</sup> do Grupo 1 e de 148,98 km<sup>2</sup> do Grupo 2, que ocorreu em diversas áreas, por exemplo, em topos de morro ou próximos a fontes localizadas a nordeste, noroeste, oeste e sudeste da área de estudo. Ressalta-se que as áreas referentes a estes grupos apresentam as maiores taxas potenciais de infiltração e de recarga das águas subsuperficiais, logo são responsáveis pela manutenção das águas subsuperficiais independentemente do tipo de chuva. Por conta desta alteração, espera-se que ocorra um rebaixamento do nível de água, que resultaria na diminuição de vazão das nascentes e dos canais de drenagem.



**Figura 185.** Distribuição dos grupos do zoneamento da região São Carlos para o Cenário 1.

**Fonte:** autor

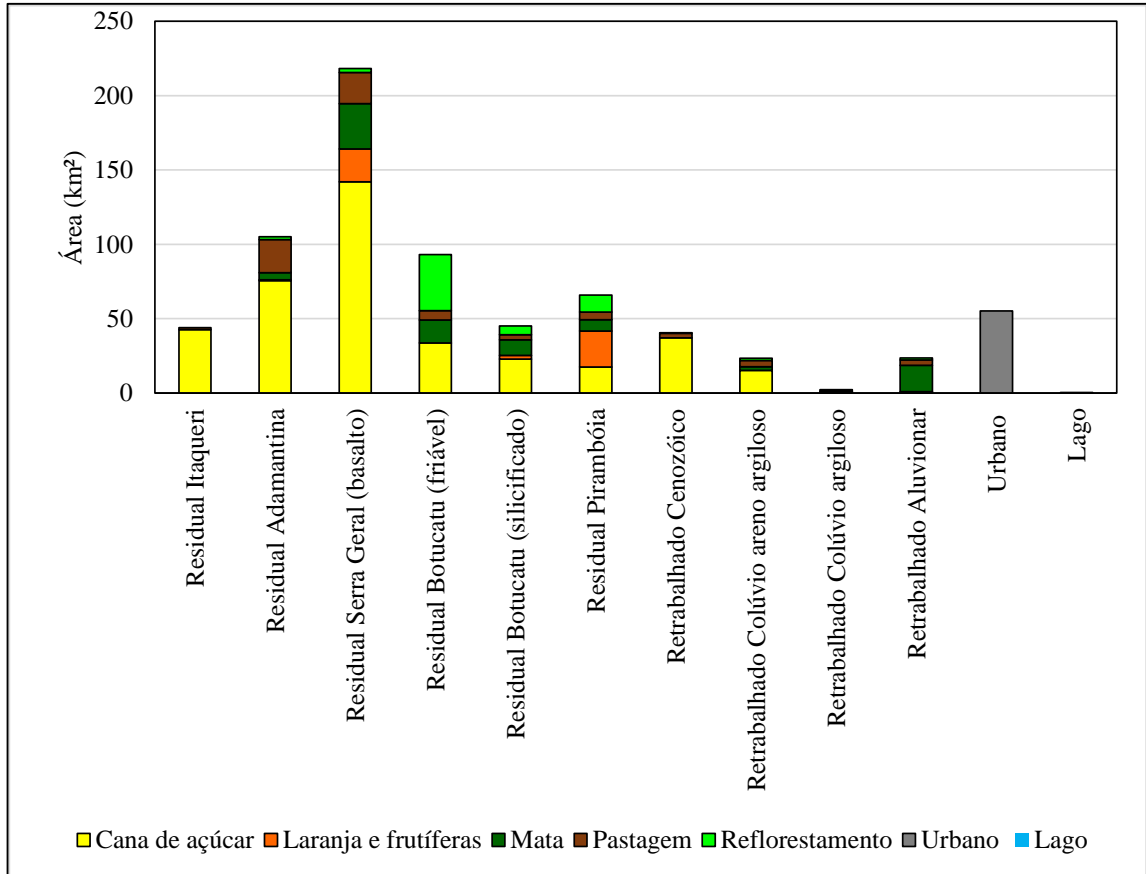
Verificou-se que o Grupo 4 apresentou o maior acréscimo em área (161,49 km<sup>2</sup>), seguido do Grupo 5 (54,18 km<sup>2</sup>) e da Grupo 3 (30,96km<sup>2</sup>). Este ocorreu principalmente nas regiões mais altas do terreno e próximo de cabeceiras como já mencionado anteriormente. Esse acréscimo de potencial de geração de escoamento superficial nessas regiões pode provocar um acréscimo no aporte de água, que resultaria no aumento dos processos erosivos, assim como nos eventos de inundação devido ao a elevação rápida do nível de água nos canais de drenagens. Ademais, é importante mencionar que a água seria rapidamente escoada com estas condições, a qual não estaria disponível para a manutenção das nascentes, canais de drenagem e reservatórios. Portanto afetaria a quantidade de água disponível para o abastecimento doméstico, industrial, irrigação ou dessedentação de animais.

#### 5.4.3.3. Zoneamento da Região de Araraquara

Os procedimentos contidos no Item 4.2.13.1 foram aplicados na Folha do IBGE de Araraquara, afim de avaliar a infiltração e geração de escoamento superficial Hortoniano

##### *Unidades de condição de infiltração*

O mapa de distribuição das unidades de condição de infiltração pode ser observado no Apêndice XVII, enquanto na Figura 186 é apresentada a áreas em km<sup>2</sup> das unidades.



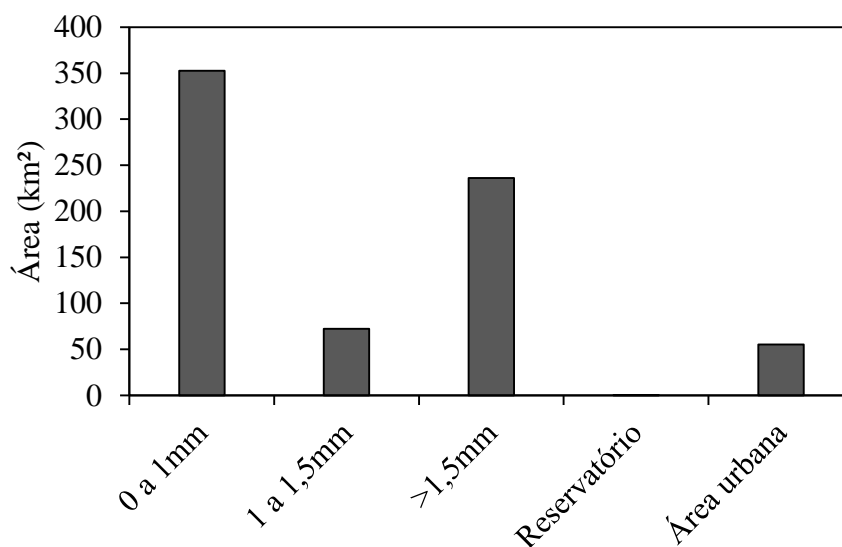
**Figura 186.** Distribuição das unidades de condição de infiltração identificadas na região de Araraquara.

Fonte: autor

No total foram obtidas 221 divisões (unidades territoriais) as quais em grande parte estão relacionados aos residuais da Formação Serra Geral, (218,20 km<sup>2</sup>), Adamantina (105,02 km<sup>2</sup>) e Botucatu (138,13 km<sup>2</sup>) que representam mais cerca de 65% da área total. Em termos de tipos de usos, o principal é a cana de açúcar, que totaliza mais de 50% da área, resultado este que indica que o processo de infiltração pode variar expressivamente por conta do manejo da cana de açúcar. A laranja e outras espécies frutíferas ocorrem praticamente só nos residuais da Formação Serra Geral e Pirambóia. As matas estão associadas geralmente aos residuais da Formação Serra Geral, Botucatu e aos retrabalhados aluvionares. Os reflorestamentos ocupam principalmente os residuais da Formação Botucatu (friável). As pastagens, por sua vez, ocorrem predominantemente nos residuais da Formação Adamantina e Serra Geral. A área urbana do município de Araraquara assim como em São Carlos apresenta uma extensão significativa (56,17 km<sup>2</sup> - 7,70%), ou seja, é uma área fonte de geração de escoamento superficial.

### *Análises da diferença da infiltração potencial (PM-CC)*

Para o Cenário 1 (Apêndice XXIV), verificou-se que as unidades territoriais estão associadas as classes de diferenças de infiltração potencial de 0 a 1mm e maiores que 1,5mm, onde na Figura 187 tem-se o gráfico com as respectivas áreas. As maiores que 1,5mm estão distribuídas de forma conectada ao longo de 236 km<sup>2</sup> e localizadas no eixo com direção NW-SE. Estão associadas principalmente aos materiais inconsolidados residuais da Formação Serra Geral (244,83km<sup>2</sup>), independentemente do tipo de uso e os retrabalhados Cenozóicos com cana de açúcar. As outras unidades pertencentes a esta classe não ultrapassam os 12km<sup>2</sup> em área. A grande extensão dessa classe é um importante indicativo que a umidade inicial para grande parte região interfira de forma significativa na infiltração na geração de escoamento superficial Hortoniano.



**Figura 187.** Área das classes do zoneamento de Araraquara para o Cenário 1 da diferença da infiltração potencial entre o ponto de murchamento e a capacidade de campo como umidade inicial

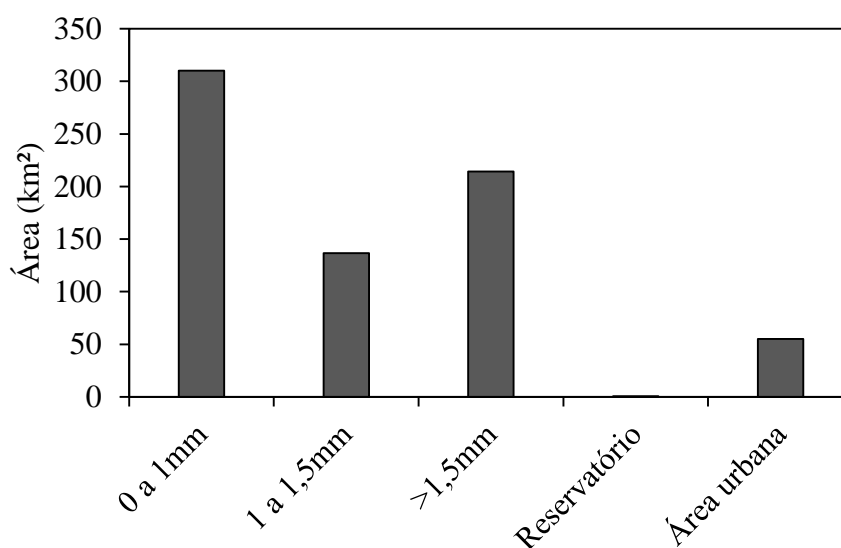
**Fonte:** autor

Por outro lado, a Classe de 0 a 1mm também ocorre de forma ampla em Araraquara, localizadas principalmente nas porções nordestes e sudeste, onde as unidades estão conectadas e apresentam uma área de 352km<sup>2</sup>. Isto é a umidade inicial destas unidades não interferem de forma significativa na infiltração que neste caso está em função da condutividade hidráulica saturada, capilaridade efetiva, porosidade e das características dos eventos de chuva. Os residuais da Formação Botucatu, Adamantina e Pirambóia, bem como o retrabalhados Aluvionares são os principais materiais inconsolidados que ocorrem nesta classe e estão ocupados principalmente pelos reflostamentos, pela cana de açúcar sulcada e matas.



Apesar das unidades condição de infiltração que pertencem a classe de 1 a 1,5mm não apresentem uma grande extensão (72km<sup>2</sup>) comparado as outras classes. Elas estão distribuídas em uma zona com alta densidade de drenagem, ou seja se o solo se encontra em uma condição mais úmida, logo haverá uma maior geração de escoamento superficial potencial Hortoniano, que consequentemente escoará até os rios e podem provocar inundações a jusante.

Considerando o Cenário 2, o mapa é apresentado no Apêndice XXV e as áreas na Figura 188. Observou-se que a Classe de 1 a 1,5mm houve um crescimento expressivo em área de 64km<sup>2</sup> aproximadamente, enquanto que as classes com diferenças da infiltração potencial menor que 1mm e maior que 1mm houveram reduções de 42 e 22km<sup>2</sup> respectivamente. Esse resultado mostra a importância de analisar em termos espaciais a variação do conteúdo de água no solo, pois ao considerar umidades iniciais diferentes, observa-se que a infiltração da região de Araraquara, se comporta de forma distinta

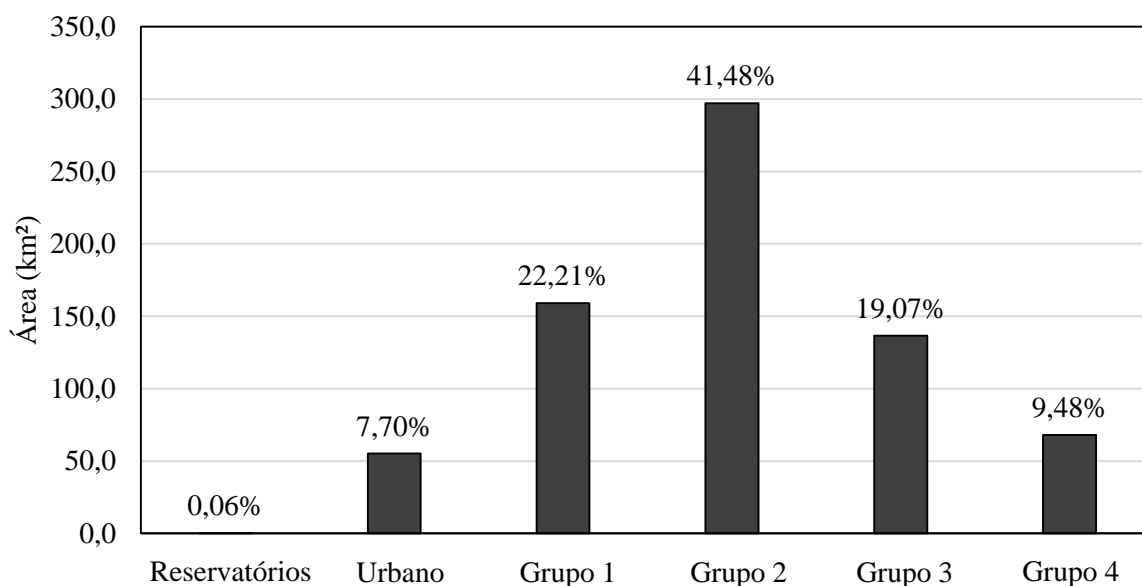


**Figura 188.** Distribuição das classes da diferença da infiltração potencial entre as duas umidades iniciais adotadas da região de Araraquara para o Cenário 2.

**Fonte:** autor

#### *Grupos de potencial de infiltração (Cenário 1)*

No Apêndice XXII é apresentado o zoneamento, que considera o Cenário 1, e na Figura 189 tem-se a extensão em área dos grupos.



**Figura 189.** Distribuição dos grupos do zoneamento no Cenário 1 da região de Araraquara.

Fonte: autor

A partir do Cenário 1 observou-se que:

- As unidades de condição de infiltração pertencentes ao Grupo 4 estão relacionadas predominantemente em ordem de extensão espacial aos residuais da Formação Itaqueri, retrabalhados Colúvios areno argilosos e residuais da Formação Pirambóia com cana de açúcar jovem. Estão distribuídas principalmente a sul da região em uma área de 67,94 km<sup>2</sup> (9,48%) e ocupam topos de morros, meio de encostas e próximas a áreas de cabeceiras. As que estão localizadas próximo as áreas de cabeceira, geralmente estão relacionadas a regiões como maior densidade de drenagem, a qual pode estar associada ao grande volume de escoamento superficial gerado nas áreas mais acima do terreno.

- As unidades de condição de infiltração pertencentes ao Grupo 1 estão distribuídas em uma área de 159,14km<sup>2</sup> (22,21%) e estão relacionadas principalmente aos materiais inconsolidados residuais da Formação Adamantina, que representam espacialmente mais de 55% da área deste Grupo. Os outros materiais inconsolidados que a compõe são os residuais das Formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia. Este Grupo ocorre ao longo de toda área de estudo e apresentam como principais usos e manejo a cana de açúcar na fase jovem e as matas. Ressalta-se que a cana de açúcar está associada predominantemente aos residuais da Formação Adamantina, a qual localiza-se preferencialmente nas porções mais altas do terreno. Estas áreas apesar de apresentarem um alto potencial de infiltração, a recarga das águas subsuperficiais é mais longa devido à espessura do pacote do material inconsolidado (>10m). As matas, por sua vez, estão associadas aos residuais da

Formações Serra Geral e Botucatu e a regiões próximas a várias fontes, com maior declividade, solos mais rasos e o nível de água mais superficial. Por estarem relacionadas ao grupo de maior potencial de infiltração, apresentam uma função ambiental essencial para região, pois são as principais áreas de recarga das nascentes quando considerado um período curto de tempo.

- O Grupo 2 corresponde aquela com a maior distribuição na região de Araraquara e totalizam uma área de 297,16 km<sup>2</sup> (41,48%). Está associada aos residuais das formações Serra Geral (166,84 km<sup>2</sup>), Botucatu (56,49 km<sup>2</sup>), aos retrabalhados Cenozóicos (37,15 km<sup>2</sup>) e aluvionares (23,82 km<sup>2</sup>), os quais estão ocupados pela cana de açúcar jovem, pastagem e pelo reflorestamento. As unidades de condição infiltração podem ocorrer em diversas porções do terreno, desde topo de morro, meio de encosta, fundos de vale e planícies aluviais. As unidades que estão nos topos de morro geralmente estão associadas aos residuais da Formação Serra Geral e os retrabalhados Cenozóicos e são responsáveis pela recarga das águas subsuperficiais a longo prazo da região de Araraquara. Por outro lado, as áreas que estão localizadas no meio de encosta são compostas pelos residuais das Formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia, os quais estão relacionados predominantemente a cana de açúcar jovem. Estas têm como principal função ambiental a recarga a médio prazo das águas subsuperficiais e são responsáveis pela manutenção do fluxo das drenagens durante o período de estiagem. Por fim, as que estão localizadas próximos aos fundos de vale e planícies aluviais, são importantes para a região de Araraquara, pois recarregam os aquíferos rasos.

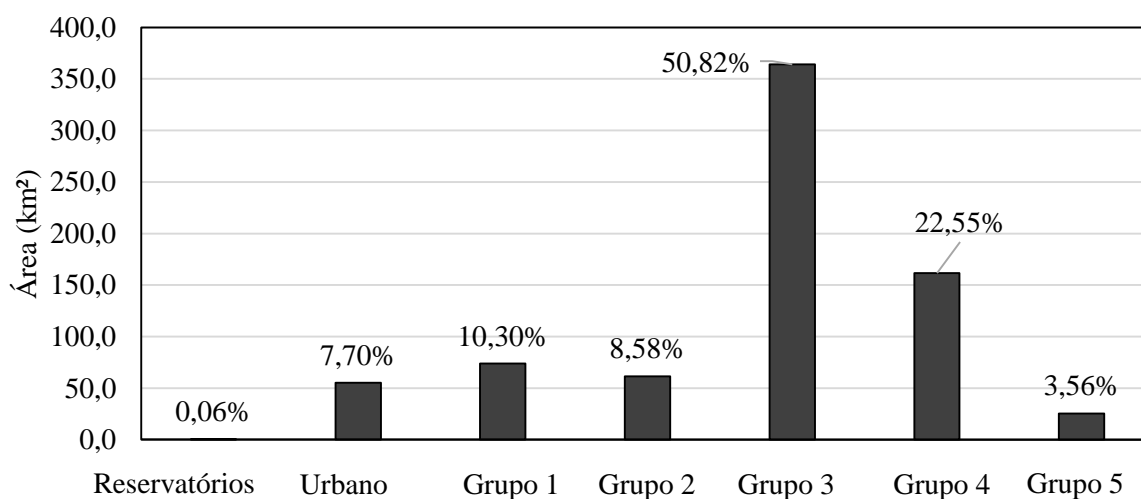
- As unidades da Grupo 3 estão localizadas principalmente a sudoeste, nordeste e noroeste da área de estudo e ocupam uma área de 136,88 km<sup>2</sup> (19,07%). Estão associadas a regiões de encostas e topo de morro, além disso, assim como na Região de São Carlos ocupam áreas com menor densidade de drenagem. Apresentam como principais materiais inconsolidados os residuais das Formações Botucatu (55,83 km<sup>2</sup>) e Serra Geral (22,02 km<sup>2</sup>) e são recobertos prioritariamente por reflorestamento (45,38 km<sup>2</sup>), pastagem (40,17 km<sup>2</sup>) e laranja e outras espécies frutíferas (22,02 km<sup>2</sup>). Por ser um Grupo com potencial moderado, a infiltração potencial e o escoamento superficial Hortoniano depende das características da chuva. Todavia, parte das áreas desse grupo estão associadas a solo menos espessos, e por conta disso, quando houver chuvas longas porém não intensas, a recarga das águas subsuperficiais deve ser mais rápida. Entretanto para as áreas com solo mais espesso o comportamento será parecido com São Carlos.

- Em relação ao tamanho, o entorno e a conectividade da unidade territorial, verificou-se que a região de Araraquara tem unidades com extensões significativas e conectadas. Por exemplo, a unidade 81 (Serra Geral com cana de açúcar) apresenta uma área de 95,73 km<sup>2</sup> e praticamente atravessa a região inteira no sentido de sudestes a noroeste. Apesar de que tenham sido identificadas várias unidades com dimensões pequenas, geralmente estavam conectadas com outras de mesmo

grupo ou semelhante como observado a sudoeste da área de estudo entre as unidades 13, 12, 3, 2, e 1. Isto é, a região mencionada apresenta um comportamento de alto potencial de infiltração, em vista que as unidades pertencem aos Grupos 1 e 2. Todavia, assim como em São Carlos foram identificadas unidades que estão isoladas como a 119, localizada a oeste da área de estudo.

#### *Grupos de potencial de infiltração (Cenário 2)*

A partir do zoneamento dos grupos de potencial de infiltração, o qual considera o Cenário 2 (Apêndice XXIII) e do gráfico das áreas (Figura 190), observou-se a diminuição de 90km<sup>2</sup> do Grupo 1 e de 165 km<sup>2</sup> do Grupo 2. Esta redução ocorreu em diversas regiões, por exemplo, em topos de morro ou próximos a fontes localizados a nordeste, noroeste, oeste e sudeste da área de estudo. Por conta dessa mudança, espera-se nessas áreas uma diminuição das taxas de infiltração, que afetará a recarga das águas subterrâneas e vazão das nascentes e dos canais de drenagem.



**Figura 190.** Distribuição dos grupos do zoneamento, a qual considera o Cenário 2 da região de Araraquara.

**Fonte:** autor

O Grupo 3 por outro lado, apresentou o maior acréscimo em área de 136km<sup>2</sup> para 297km<sup>2</sup>, seguido do Grupo 4 de 67 km<sup>2</sup> para 137km<sup>2</sup>. Além disso, houve o surgimento de UCIs pertencentes ao Grupo 5 (25km<sup>2</sup>), as quais não ocorrem no cenário 1. As unidades de infiltração que trocaram de grupo por conta do manejo, localizam-se em todas as porções do terreno. O acréscimo em área destes grupos indica que poderá haver um maior volume de escoamento superficial gerado, ou seja, água disponível para provocar a ocorrência de processos erosivos como observados na unidade 189 através do uso de imagens de satélite. Ademais, associam-se ao aumento rápido no nível de água nos canais de drenagens que pode provocar inundações a jusante.

#### 5.4.3.4. Medidas de manejo

Tomando em conta os resultados do zoneamento aplicado nas folhas do IBGE de São Carlos e Araraquara, verificou-se a necessidade de propor sugestões de medidas de manejo afim de garantir a qualidade ambiental da área de estudo. As sugestões foram baseadas nas características dos Grupos do zoneamento as quais contemplam informações da infiltração e da geração de escoamento superficial Hortoniano, do processo dominante e das funções ambientais. Na Tabela 36 são apresentadas recomendações e sugestões para cada grupo afim de auxiliar o planejamento territorial e o gerenciamento das águas da região estudada, bem como as características básicas de cada grupo do zoneamento proposto.

**Tabela 36.** Sugestões de medidas potenciais de manejo para cada grupo do zoneamento proposto visando o planejamento territorial e gerenciamento das águas da área de estudo.

Classe	Processo	Função ambiental	Medidas potenciais de manejo
Grupo 1	Infiltração	Recarga das águas subsuperficiais/ manutenção das nascentes	É importante controlar o uso de produtos químicos por conta da alta possibilidade de contaminação das águas subsuperficiais. Realizar um manejo adequado da camada superficial do solo com o objetivo de manter as taxas de infiltração, desse modo preservando as taxas de recarga das águas subsuperficiais. Monitorar as fontes em termos de vazão e parâmetros físico químicos das águas subsuperficiais.
Grupo 2	Infiltração > Escoamento superficial	Recarga das águas subsuperficiais	Por conta da alta possibilidade de contaminação das águas subsuperficiais é importante controlar o uso de produtos químicos. Em vista a importância das águas subterrâneas para a área de estudo, é fundamental propor usos do solo e medidas de planejamento territorial que aumentem as taxas de infiltração para melhorar a taxa de recarga das águas subterrâneas, evitar a geração de grandes volumes de escoamento superficial Hortoniano e a ocorrência dos processos subsequentes (erosão, transporte de contaminantes, etc.). Monitoramento dos poços e trabalhos de campo para avaliar problemas relacionados à contaminação das águas subterrâneas e erosão é bastante apropriado.
Grupo 3	Escoamento superficial = Infiltração	Fonte de água superficial dos canais de drenagem e reservatórios / Recarga das águas subsuperficiais	Aplicar medidas de manejo que aumentem as taxas de infiltração para reduzir a geração de escoamento superficial Hortoniano e melhorar as taxas de recarga das águas subsuperficiais. Monitoramento dos poços e trabalhos de campo para avaliar problemas relacionados à contaminação das águas subsuperficiais e erosão.
Grupo 4	Escoamento superficial > Infiltração	Fonte de água superficial dos canais de drenagem e reservatórios	Devem ser adotadas práticas de manejo que aumente as taxas de infiltração, bem como aquelas que reduzam a energia e velocidade do escoamento superficial. Monitoramento das águas superficiais e trabalhos de campo para avaliar problemas relacionados à contaminação das águas superficiais e de erosão.
Grupo 5	Escoamento superficial	Fonte de água superficial dos canais de drenagem e reservatórios	Os usos do solo devem ser desenvolvidos com práticas de manejo severas que reduzam a energia e velocidade da água para evitar processos erosivos, assoreamento dos canais de drenagem e reservatórios, inundação e contaminação das águas superficiais. Aplicação de técnicas que favoreçam o aumento das taxas de infiltração. Monitoramento das águas superficiais e trabalhos de campo para avaliar problemas relacionados à contaminação das águas superficiais e de erosão

Fonte: Autor



## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões referentes aos objetivos estabelecidos, aos procedimentos adotados e aos resultados obtidos ao longo desta tese de doutorado.

### 6.1. Modelo geológico 3D

Por meio da elaboração dos modelos geológicos estruturados 3D foi possível analisar as informações espaciais em superfície e em subsuperfície das camadas geológicas, além disso, auxiliou no melhoramento dos contatos das unidades do mapa de substrato rochoso.

Nas regiões estudadas foram identificadas 8 litologias e 6 formações geológicas. Algumas das litologias são relativamente simples e apresentam apenas 1 camada como os Arenitos das Formações Adamantina, Itaqueri e Pirambóia, os Arenitos silicificados da Formação Botucatu, os Basaltos da Formação Serra Geral e os argilitos e siltitos da Formação Corumbataí. Todavia, outras camadas como as dos Arenitos friáveis da Formação Botucatu e dos *sills* de diabásio da Formação Serra Geral são mais complexas e apresentam mais de uma camada.

Em termos de espessura, concluiu-se que as camadas de todas as litologias são variáveis, principalmente os Basaltos da Formação Serra Geral e os Arenitos Silicificados da Formação Botucatu.

Quanto as incertezas do modelo geológico 3D, concluiu-se que as regiões com maior densidade de poços, as quais estão associadas as áreas urbanas e periurbanas, apresentam um menor grau de incerteza, seja em termos de espessura ou limite das camadas.

Em termos de aplicabilidade, os modelos geológicos 3D elaborados podem ser usados em diversos propósitos, por exemplo, escavação, perfuração de poços, elaboração de projetos de engenharia e gerenciamento das águas subterrâneas. Enquanto que em termos de usabilidade, estes podem facilmente ser consultados, em vista que o software *Subsurface View MX* disponibiliza uma versão gratuita que permite a visualização dos mesmos, assim como executar outras funções como delineamento de seções verticais e transversais e o fatiamento do modelo.

### 6.2. Caracterização físico químicas das águas subsuperficiais

Em relação as águas subsuperficiais, concluiu-se que estas são predominantemente cálcicas ou mistas bicarbonatadas e no geral não se encontram poluídas. As que indicaram

indícios de poluição, encontram-se próximas de áreas urbanas e plantações de cana de açúcar, usos estes que podem aportar concentrações significativas de  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{K}^+$ .

Considerando a relação da concentração dos diversos elementos químicos encontrados nas águas subsuperficiais com os diferentes materiais geológicos, não se encontrou uma relação clara entre ambos, de maneira a classificar e diferenciar os materiais geológicos frente aos diferentes elementos químicos.

Por meio da caracterização das águas subsuperficiais, buscou-se ainda estabelecer padrões associados às classes de potencial de infiltração por meio da análise das concentrações dos elementos químicos que fazem parte de compostos utilizados na agricultura, esperando que estes fossem lixiviados para as águas subsuperficiais. Todavia, não foi possível identificar uma associação bem definida com as classes de infiltração, apenas exemplos isolados como o ponto 55, o qual apresenta concentrações altas de  $\text{NO}_3^-$  e sua área de contribuição está recoberta por áreas da classe de maior potencial de infiltração.

### **6.3. Variabilidade e caracterização dos materiais geológicos**

Na área de estudo ocorrem mais de 13 tipos de materiais inconsolidados, os quais são compostos por residuais e retrabalhados. A textura destes materiais inconsolidados varia desde argilosa como os residuais da Formação Serra Geral, areno argilosa como os retrabalhados areno argilosos e arenosa como os residuais da Formação Botucatu, sendo o último de maior extensão espacial. Os usos e manejos do solo identificados nestes materiais inconsolidados totalizam mais de 8 tipos, os quais apresentam a maior área são a cana de açúcar e as pastagens.

A combinação entre os materiais inconsolidados e os tipos de uso e manejo do solo gerou 65 unidades de condição de infiltração. Constatou-se que estas condições de infiltração apresentaram uma variabilidade significativa das características e propriedades geológico-geotécnicas e hidráulicas. Visando caracterizar de maneira adequada a variabilidade das condições de infiltração, concluiu-se que esta deve ser feita por meio da combinação de ensaios *in situ* e laboratoriais e funções de pedotransferência.

Os resultados dos ensaios *in situ* infiltrômetro tipo duplo anel mostraram uma variabilidade significativa entre as diferentes unidades de condição de infiltração em termos da capacidade de infiltração e da inflexão da curva. A capacidade de infiltração encontrada variou de 0,01 mm/min a 2,10 mm/min, enquanto que para a inflexão da curva de infiltração, identificou-se diversos períodos desde muito rápidas (<5 minutos) a demoradas (<15 minutos).



Entretanto, a utilização deste ensaio apresenta algumas desvantagens como a necessidade de grandes volumes de água, principalmente para solos arenosos, além de demandar um tempo expressivo para executá-lo. Como vantagens, o infiltrômetro tipo duplo anel possibilita captar a influência da macroporosidade e heterogeneidade intrínseca do material inconsolidado nas taxas de infiltração devido ao tamanho da área ensaiada. Por meio do uso deste ensaio foi possível ainda classificar os materiais conforme o seu comportamento frente ao processo de infiltração.

Em termos dos ensaios laboratoriais, concluiu-se que é fundamental determinar os índices físicos, a granulometria e a condutividade hidráulica saturada, pois por meio da análise destas propriedades foi possível correlacionar e avaliar os resultados de infiltração obtidos *in situ*. Além disso, forneceu os dados necessários para a aplicação das funções de pedotransferência.

De forma específica, os ensaios de granulometria devem ser feitos considerando e não a utilização do defloculante, a fim de verificar o grau de agregação das partículas, a qual pode interferir na infiltração, como evidenciado nos reflorestamentos que recobrem os residuais da Formação Serra Geral.

Concluiu-se que independentemente do tipo de solo, os tipos de uso e manejo do solo alteram de forma significativas a massa específica seca de campo, a porosidade e o índice de vazios. Essa alteração foi observada também na condutividade hidráulica saturada, todavia, verificou-se que em algumas unidades de condição de infiltração a forte influência da macroporosidade. Consequentemente é fundamental realizar quando possível pelo menos 3 amostras, com o objetivo de determinar um valor médio.

O uso de funções de pedotransferência para estimar a capilaridade efetiva e a umidade inicial foi essencial em vista ao número elevado de condições de infiltração, ao tamanho da área e a dificuldade de determinar estes parâmetros em laboratório ou no campo. Os resultados foram coerentes, devido à seleção apropriada da função de pedotransferência. Concluiu-se que a seleção deve basear-se em uma análise da granulometria, porosidade, massa específica seca de campo e umidade equivalente dos materiais geológicos, os quais serviram de base para desenvolvê-la e compará-las com as da área que se deseja estudar, a fim de verificar sua similaridade. Por meio desse procedimento, garante-se que os resultados das unidades de condição de infiltração apresentem uma lógica física, devido os dados de entrada utilizados estão dentro da variabilidade dos dados base utilizado na elaboração da função de pedotransferência.

Em termos da utilização dos dados obtidos da caracterização das unidades de condição de infiltração em outras áreas, esta deve ser feita de forma sensata e tomar em conta as características dos materiais inconsolidados da região estudada, tais como a massa específica dos sólidos, a massa específica seca de campo, porosidade, índice de vazios, granulometria e condutividade hidráulica saturada. Em outras palavras, é essencial realizar uma caracterização preliminar para averiguar a compatibilidade entre as características dos materiais geológicos de ambas as áreas.

#### **6.4. Parametrização, modelo de infiltração e estimativa da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano**

Concluiu-se que a seleção dos parâmetros das condições de infiltração é uma etapa vital durante o processo de estimativa da infiltração potencial e do escoamento superficial Hortoniano potencial. Todavia, depende diretamente da caracterização da variabilidade dos materiais inconsolidados, a qual permite selecionar valores que reflitam de maneira próxima das condições de campo. Esta conclusão reforça a importância de se realizar uma caracterização adequada e baseada em dados de campo, laboratório e obtidos a partir da aplicação de funções de pedotransferência.

O modelo para estimar a infiltração potencial e o escoamento superficial Hortoniano potencial se mostrou flexível e apresentou bons resultados em simular as diferentes unidades de condições de infiltração e de chuvas. Entretanto, este apresentou desvantagens, as quais estão relacionadas a necessidade de uma robustez matemática e computacional para poder ser aplicado e um forte controle dos parâmetros de entrada.

A robustez matemática e computacional está relacionada a necessidade do desenvolvimento de um código em Visual Basic no software Excel e o tempo necessário para calcular a infiltração potencial e o escoamento superficial Hortoniano quando se tem um número elevado de linhas. O controle dos dados de entrada está associado diretamente à caracterização da variabilidade das condições de infiltração, pois somente do entendimento da variabilidade é possível selecionar os parâmetros mais apropriados de cada combinação, conseqüentemente estimar valores de infiltração potencial e de escoamento superficial Hortoniano mais adequados.

Concluiu-se que a infiltração potencial e geração de escoamento superficial Hortoniano potencial variaram significativamente, e estão em função do tipo de evento de chuva, das características geológico-geotécnicas e hidráulicas das unidades de condições de infiltração e

da combinação dos dois. A infiltração potencial e a geração de escoamento superficial Hortoniano potencial está em função de um evento de chuva, quando independentemente da unidade de condição de infiltração ocorre predomínio de um dos dois processos para quase todas as combinações. Quando está em função da unidade de condição de infiltração, há a preponderância da infiltração ou da geração do escoamento superficial Hortoniano para quase todos os eventos de chuva. Os casos que o resultado depende da combinação das chuvas e das unidades de condição de infiltração não se verifica um predomínio claro de nenhum dos processos.

Concluiu-se ainda, que a análise do processo de infiltração deve considerar a sazonalidade das chuvas e das condições de infiltração, bem como o aspecto da transiência dos eventos de chuva. A sazonalidade das chuvas está relacionada ao período em que as elas ocorrem com maior frequência, pois é neste o qual irá ocorrer o maior aporte de água disponível para a infiltração e geração de escoamento superficial. A sazonalidade das condições de infiltração está diretamente relacionada ao período em que a camada superficial tem suas características modificadas em virtude do manejo. Por exemplo, cultivos anuais como a cana de açúcar nos residuais da Formação Botucatu, a capacidade de infiltração foi 3 vezes menor quando madura devido à compactação provocada pelo tráfego de maquinário e o uso de produtos químicos. Enquanto que a transiência das chuvas deve ser considerada, pois dependendo do intervalo de tempo selecionado, a intensidade pode apresentar variações importantes que interferem no tempo *ponding*, na lâmina d'água infiltrada e escoada.

### **6.5.Zoneamento da infiltração e do escoamento superficial Hortoniano**

Os grupos de procedimentos propostos permitiram analisar a infiltração e a geração do escoamento superficial em termos espaciais e temporais. Em ambas as regiões estudadas (São Carlos e Araraquara), as áreas foram compartimentadas em diversas unidades territoriais e e zoneadas em classes conforme o seu potencial de infiltração e geração de escoamento Hortoniano. Considerando as distintas classes propostas no zoneamento foi possível identificar as principais áreas fontes de infiltração de geração de escoamento superficial, bem como compreender a sua relação com as funções ambientais associada a dinâmica de água no solo.

O emprego da sistemática proposta nesta tese pode ser feito em outras escalas, dependendo apenas da disponibilidade de mapas de material consolidado e tipo de uso na escala desejada e com qualidade adequada, em vista que as unidades territoriais são baseadas na combinação dos materiais consolidados e tipos de uso. Todavia, quanto maior a escala de

trabalho maior será o número de unidades territoriais devido ao detalhamento das informações principalmente em termos de tipo de uso e manejo do solo, por conseguinte irá demandar uma quantidade maior de trabalho de campo e laboratório. Enquanto que para escalas menores o problema está associado ao aumento da área e a representatividade das características geológico-geotécnicas das unidades de infiltração. Nesse sentido, para escalas muito detalhadas ou áreas muito grandes os procedimentos propostos neste trabalho podem se tornar onerosos. Caso não se possa fazer muitos ensaios de campo, deve-se utilizar funções de pedotransferência, desde que haja um banco de dados confiável que contenham as características básicas das diversas condições de infiltração.

## **6.6. Análise integrada dos dados**

Concluiu-se que pesquisas, as quais visam estudar a infiltração e a geração de escoamento superficial Hortoniano de uma região devem incorporar a integração de diferentes tipos dados. Pois através dela é possível avaliar de forma sistêmica, holística e sinóptica todos fatores envolvidos na infiltração e a geração de escoamento superficial Hortoniano de uma região a partir de uma perspectiva espacial e temporal. Desse modo, a contribuição desta pesquisa está relacionada ao estabelecimento de uma sistemática que permite analisar ambos os processos e subsidia as políticas de planejamento territorial e de recursos hídricos de uma região afim de garantir a qualidade ambiental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABU-TALEB, M.F. The use of infiltration tests for ground water artificial recharge. **Environmental Geology**, v. 37, p. 64-71. 1999
- AGYARE, W.A.; PARK, S.J.; VLEK, P.L.G. Artificial neural network estimation of saturated hydraulic conductivity. **Vadose Zone Journal**, v.6, p. 423-431, 2007.
- AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais - Proposta de um sistema de previsão: Aplicação na área urbana de Campos de Jordão - SP**. 390 f. 2005. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 3385-88**: Infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer. Annual books of ASTM standards, Soil and rocks, 1994. 516p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Solo, determinação da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 1984. 8 p.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6502**: Rochas e solos – Análise granulométrica conjunta. Rio de Janeiro, 1995. 18p.
- ANA-Agência Nacional de Águas- Série pluviométrica histórica. 2017.
- ANON. Tropical residual soils. Quarterly **Journal of Engineering Geology** 23:1–101. 1990.
- ANON. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Geological Society Engineering Group Working Party Report. Quarterly Journal of Engineering Geology 10, 207–242. 1995.
- ARAÚJO, J.C., GONZÁLEZ PIEDRA, G.I. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrol. Process.** v.23 (8), 1169–1178. 2009. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7232>
- ARRUDA, F.B. ZULLO JR., J. & DE OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.11, p.11-15, 1987.
- AWITI, A.O.; WALSH, M.G.; SHEPHERD, K.D.; KINYAMARIO, J. Soil condition classification using infrared spectroscopy: a proposition for assessment of soil condition along a tropical forest-cropland chronosequence. **Geoderma**, v.143, p.73-84, 2008.
- BAKER, L. Development of class pedotransfer functions of soil water retention - A refinement. **Geoderma**, 144:225-230, 2008.
- BASHA, H. A., Multidimensional linearized nonsteady infiltration toward a shallow water table, **Water Resour. Res.**, 36, 2567–2574, 2000.
- BIEMELT, D.; SCHAPP, A.; GRUNEWALD, U. Hydrological observation and modelling relationship for the determination of water budget in Lusatian post-mining landscape. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 36, n. 1–4, p. 3-18, 2011.
- BITTELLI, M. Measuring Soil Water Potential for Water Management in Agriculture: A Review. **Sustainability**, 2(5), 1226-1251. 2010.
- BJÖRKLUND, M.; ARVIDSSON, J.; KELLER, T.; J. KOESTEL, J.; LAMANDÉ, M.; LARSBO, M.; JARVIS, N. Effects of subsoil compaction on hydraulic properties and preferential flow in a Swedish clay soil. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p. 91-98, 2016.

BOCHKOV, A.P. AND ZAVODCHIKOV, A.B. - Methods for computation of current water balance of river drainage basins in the U.s.s.R. - Paper presented in the proceedings of the Reading Symposium, July. V.II, pages 274-280. 1970.

BOTULA, Y.; RANST, E.; CORNELIS, W. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.679-698, 2014.

BOUWER, H. Infiltration of water into nonuniform soil. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v. 95, p. 451-462, 1969.

BOUWER, H. Intake Rate: Cylinder Infiltrometer. **In: Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and Mineralogical Methods**. Ed. SSSA: Wisconsin, p. 825-844, 1986.

BOUWER, H. Rapid field measurement of air-entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. **Water Resources Research**, v. 2, p. 729-738, 1966.

BORGESSEN, C. D.; SCHAAP, M. G. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. **Geoderma**, v. 127, p. 154-167, 2005.

BRADLEY, P.; GEORGE, M.; CHANGWOO, A. Assessment of water budgets and the hydrologic performance of a created mitigation wetland - A modeling approach. **Ecological Engineering**, v. 71, p. 667-676, 2014.

BREILING, M. Integrated Environmental Modelling: a Tool in Science and Planning. **Contribution to the annual report 1997/98**. Laboratory of Land Resource Sciences. 1998.

BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. **Bulletin 230**. Washington: Department of Agriculture, 1912. 83p.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Hydrology Paper: Colorado, n. 3, 1964. 37 p.

BRUTSAERT, W. Vertical Infiltration in Dry Soil. **Water Resources Research**, v. 13, p. 363-368, 1977.

BU, C.; WU, S.; YANG, K. Effects of physical soil crusts on infiltration and splash erosion in three typical Chinese soils. **International Journal of Sediment Research**, v. 29, n. 4, p. 491-501, 2014.

BUCKINGHAM, E. Studies on the movement of soil moisture. **Soils Bulletin 38**. Washington: USDA Bureau, 1907. 61p.

CALLE, J. A. C. **Análise de Ruptura de Talude em Solo não Saturado**. 2000. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

CAMAPUM DE CARVALHO, J.; GITIRANA JUNIOR, G. D. F. N.; LEÃO CARVALHO, E. T. Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. **Brasília: Faculdade de Tecnologia**, v. 4, 2012.

CAMPBELL, G. S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil Science**, v. 117, n. 6, p. 311-314, 1974.

CECÍLIO, R.; MARTINEZ, M.; PRUSKI, F.; SILVA, D.; ATAÍDE, W. Substituição dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson para estimativa da infiltração em alguns solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1141-1151, 2007.

CECÍLIO, R.; PRUSKI, F.; MARTINEZ, M. Modelagem da infiltração em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p.789-798, 2003.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 20 dez. 2013.

CERATTI, J. A.; GEHLING, W. Y. Y.; BICA, A. V. D.; RODRIGUES, M.R. (1996). Influência da Sucção no Módulo de Resiliência de um solo típico do Rio Grande do Sul. **In: Reunião Anual de Pavimentação**, Salvador, v. 2, p. 541-555, 1996.

CHU, S.T. Infiltration during an unsteady rain. **Water Resource Research**, v. 14, n. 3, p. 461-466, 1978.

CHU, X.; MARINO, M. A. Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady conditions. **Journal of Hydrology**, v. 313, n. 3, p. 195-207, 2005.

CHUNALE G. L.; ATRE, A. A.; BANGAL, G. B.; KAREPPA, S. M. On the initial abstraction of SCS curve number model for various storm sizes in sub humid region of Maharashtra –I. **Indian Journal of Soil Conservation**, v.29, n. 3, p. 248-255, 2001.

CLAPP, R.; HORNBERGER, G. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.* 14, 4, 601-604. 1979

COLLIS-GEORGE, N. 1977. Infiltration Equations for Simple Soil Systems. **Water Resources Research**, v. 13, p. 395-403, 1977.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO Norma CETESB 6410 - Amostragem e monitoramento das águas subterrâneas. São Paulo, 21 p. 1988.

CETESB-COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2001 – 2003**. Série Relatórios, São Paulo, 2004.

CORRADINI, C.; FLAMMINI, A.; GOVINDARAJU, R. A conceptual model for infiltration in two-layered soils with a more permeable upper layer: From local to field scale. **Journal of Hydrology**, v.410, p. 62–72 2011.

CORRADINI, C.; MELONE, F.; SMITH, R. E. Modeling Infiltration During Complex Rainfall Sequences. **Water Resources Research**, v. 30, n. 10, p. 2777-2784, 1994.

CPRM- Base de dados SIAGAS.2017. Disponível em : <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>

CRAIG, R. **Soil Mechanics**. Chapman e Hall, London , Reino Unido, 1995. 427 p.

DARCY, HENRY. **Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon**. Victor Dalmon, Paris, 1856. 647 p.

DEARMAN, W.R. 1991. Engineering geological mapping. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd.

DELGADO, J., LLORENS, P., NORD, G., CALDER, I. R., GALLART, F. Modelling the hydrological response of a Mediterranean medium-sized headwater basin subject to land cover change: The Cardener River basin (NE Spain). *J. Hydrol.*, 383, 125–134. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.024>

DEMISSIE, M. KHAN, A. Q. *Influence of Wetlands on Streamflow in Illinois*, Contract Report 561, Illinois State Water Survey, Champaign, IL, 47 pp.1993.

DIAS, C. L. **Determinação da condutividade hidráulica de solos não saturados**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Construção Civil) – Departamento de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

DING, W.; LI, M. Effects of grass coverage and distribution patterns on erosion and overland flow hydraulic characteristics Wenfeng, **Environ Earth Sci**, 75, 477, 2016. <http://doi.org/10.1007/s12665-016-5329-7>

DUNN, G.; PHILLIPS, R. E. Macroporosity of a well-drained soil under no-till and conventional tillage. **Soil Science Society of American Journal**, v. 55, p. 817-823, 1991.

DUPUIT, J., **Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables**, 2eme edition; Dunot, Paris, 1863.

DYKES, A.P. & THORNES, J.B. Hillslope hydrology in tropical rainforest steep lands in Brunei. **Hydrological Processes**, v.14, p. 215 – 235, 2000.

EAGLESON, P.S. Climate, Soil, and Vegetation 3 - A Simplified Model of Soil Moisture Movement in the Liquid Phase. **Water Resources Research**, v. 14, n. 5, p. 722-730, 1978.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Disponível em: <<http://www.cnpma.EMBRAPA.br/projetos/index.php3?sec=guara>>. Acesso em: 20 de jan. 2013.

**EPA-UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY**. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: Compilation of simple mathematical models, v. 1, 1998. 84 p.

**EPA-UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY**. Integrated Modeling for Integrated Environmental Decision Making. Office of the Science Advisor, Washington, DC. 2008.

FAGUNDES, J. R. T. **Estudo integrado das características geológico geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP**. 2004. Tese PhD (PhD em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

FAZAL, M. A.; IMAIZUMI, M.; ISHIDA, S.; KAWACHI, T.; TSUCHIHARA, T. Estimating groundwater recharge using the SMAR conceptual model calibrated by genetic algorithm. **Journal of Hydrology**, v. 303, p. 56-78, 2005.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 3ª ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

FLERCHINGER, G. N.; WALTTS, F. J.; BLOOMSBURG, G. L. Explicit solution to Green-Ampt equation for nonuniform soils. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 114, p. 561-565, 1988.

FOOKES, P.G. **FookesA review: genesis and classification of tropical residual soils for engineers** Geotechnics in the African Environment, Balkema, Rotterdam, Netherlands (1994), pp. 423-442

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley & Sons, INC, 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, p. 533-546, 1994.

GAMA JR., E. A. 1979. Sedimentação do Grupo Passa Dois (Exclusive Formação Irati): Um Modelo Geomórfico. *Revista Brasileira de Geociências*, 1 (9): 1-16.

GERSCOVICH, D. M. S. Equações para a Modelagem da Curva Característica Aplicada a Solos Brasileiros. **In: 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, Porto Alegre, p. 76-93, 2001.

GIAMBELLUCA, T.W., RIDGLEY, M.A. & NULLET, M.A. Water balance, Climate change and land-use planning in the Pearl Harbor basin. **Water Resources Development**, v. 12, p. 515-530, 1996.

GOMES, J. **Estudo sobre fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro**. 2007. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.



GOVINDARAJU, R.S.; KOELLIKER, J. SCHWAB, A.; BANKS M. Spatial variability of surface infiltration properties over two fields in the Konza Prairie. **Hazardous Waste Research Conference**, Kansas, 1995.

GOVINDARAJU R.S.; MORBIDELLI R.; CORRADINI C. Areal infiltration modeling over soil with spatially correlated hydraulic conductivities. **Journal of Hydrological Engineering**, v. 6, p.150–158, 2001.

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

GUBER, A.K., PACHEPSKY, Y.A., Yakirevicha.M., Shelton.R., Whelang., Goodrich.C., Unkrich.L. Modeling overland flow and microbial overland transport with KINEROS2/ STWIR model: Accuracy and uncertainty as affected by source of infiltration parameters, **J. Hydrol.** 519, 644–655. 2014. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.005>

GOOGLE. Imagem de Satélite. 2015.

HAGHVERDI, A.; CORNELIS, W. M.; GHARAMAN, B. Pseudo-continuous neural network approach for developing water retention pedotransfer functions with limited data. **Journal of Hydrology**, v. 442, p. 46-54, 2012.

HEALY, R.W., WINTER, T.C., LABAUGH, J.W., AND FRANKE, O.L., Water budgets: Foundations for effective water resources and environmental management: **U.S. Geological Survey Circular** 1308, 90 p. 2007.

HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. New York, Academic Press, 1980. p.5-49; 50-75; 147-196.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. San Diego: Elsevier, 2004. 494 p.

HILLEL, D.; GARDNER, W. R. Transient Infiltration into Crust-Topped Profiles. **Soil Science**, v. 109, p. 69-76, 1970.

HOLTAN, H. N. **A concept for infiltration estimates in watershed engineering**. U.S. Department of Agriculture: Agricultural Research Service Publication, 1961.34 p.

HORTON, R. E. Analysis of runoff plot experiments with varying infiltration capacity. **Transactions of the American Geophysicists**, Union Part IV, p. 693-694, 1939.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Eos, Transactions, American Geophysical Union**, v. 14, n. 1, p. 446–460, 1933.

HORTON, R. E., (1939), "Approach toward a Physical Interpretation of Infiltration Capacity," **Proc. Soil Sci. Soc. Am.**, 23(3): 399-417.

HORTON R.E. 1940. An approach towards physical interpretation of infiltration capacity. **Proc. Soil Sci. Soc. Am** 5: 399– 417.

HORTON, R.E. Hydrologic interrelations between lands and oceans. Volume 24, Issue 2, 753–764. 1943

IAEG. **Rock and soil description and classification for engineering geological mapping**. Report by the IAEG Commission on Engineering Geological Mapping, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, vol. 24 (1981), pp. 235-274.1981

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cartas topográficas, folhas: SF-23-Y-A-I-1 (São Carlos) e 22-X-D-VI-4 (Araraquara). 1971. Escala1:50.000.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística –Censo 2017.

IBGE. Manual técnico de pedologia, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2. Ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 323p.

INSIGHT - Geologische Softwaresysteme GmbH. Manual Subsurface View MX. 6.0. 2014

IPT- SÃO PAULO (ESTADO) DIVISÃO DE MINAS E GEOLOGIA APLICADA. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Mapa Geológico do Estado de São Paulo – escala 1:500.000. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, volume I, 1981

JARVIS, J; MESSING, I.; LINDAHL, M. Influence of soil, land use and climatic factors on the hydraulic conductivity of soil N. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v.17, p. 5185–5195, 2013.

JUNIOR, N. S. **Avaliação do processo de infiltração da água em solo residual de biotita-gnaise para superfícies com diferentes declividades utilizando lisímetros**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia Ambiental) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2013.

KALE, R.; SAHOO, B. Green-Ampt Infiltration Models for varied field conditions: a revisit. **Water Resources Management**, v. 25, p. 3505-3536, 2011.

KAYOMBO, B; LAL, R., 1986a. Effects of soil compaction by rolling on soil structure and development of maize in no-till and disc ploughing systems on a tropical Alfisol. *Soil Tillage Res.*, 7: 117-134.

KIRKBY, M. J. **Hillslope Hydrology**. Chichester: Wiley, 1978. 375 p.

KING, R.B. Overview and bibliography of methods for evaluating the surface-water-infiltration component of the rainfall-overland flow process, Water-Resources Investigations Report 92-4095. 1992.

KNIGHT, J.H. **Solutions of the Nonlinear Diffusion Equation: Existence, Uniqueness, and Estimation**. 1973. Tese PhD – Universidade Nacional da Austrália, Canberra, 1973.

KOSTIAKOV, A. N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. **In: Transactions Congress International Society for Soil Science**, Moscow, Part A, p. 17-21, 1932.

LAL, R. Effects of slope length on runoff from Alfisols in western Nigeria. *Geoderma* 31: 185-193. 1983.

LANIAK, G.; OLCHEIN, G.; GOODALL, J.; VOINOV, A.; HILL, M.; GLYNN, P.; WHELAN, G.; GELLER, G.; QUINN, N.; BLIND, M.; PECKHAM, S.; REANEY, S.; GABER, N.; KENNEDY, R.; HUGHES, A. Integrated environmental modeling: A vision and roadmap for the future. **Environmental Modelling & Software**. V. 39. P. 3-23. 2013

LASDON, L. S.; WAREN, A. D.; JAIN, A.; RATNER, M. Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. **ACM Transactions on Mathematical Software**, New York, v. 4, n. 1, p. 34-50, 1978.

LEMOES, F.P.O. **Elaboração de carta de vulnerabilidade: contaminação das águas subterrâneas região da folha IBGE-Ibaté-SP**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

LEVIEN, R.; DE JONG VAN LIER, Q.; ALVES, A. G. C. Influence of surface crust on water infiltration rates measured by a rotating-boom rainfall simulator and a double-cylinder device. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 479-486, 2000.

LI, L.; LAMBERT, M. F.; MAIER, H. R.; PARTINGTON, D.; SIMMONS, C. T. Assessment of the internal dynamics of the Australian Water Balance Model under different calibration regimes. **Environmental Modelling & Software**, v. 66, p. 57-68, 2015.

- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.
- LIKOS, W.; NING LU, F.; GODT, J. Hysteresis and Uncertainty in Soil Water-Retention Curve Parameters. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering** V. 140 (4), p.1-11 2014.
- KLEIN, V.; LIBARDI, P. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:857-867, 2002.
- LILLY, A.; NEMES, A.; RAWLS, W.; PACHEPSKY, Y. Probabilistic approach to the identification of input variables to estimate hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, p. 16–24, 2008.
- LIN, H. S.; MCLNNES, K. J.; WILDING, L. P.; HALLMARK, C. T. Macroporosity and initial moisture effects on infiltration rates in vertisols and vertic intergrades. **Soil Science**, v. 163, n. 1, p. 2-8, 1998.
- LIN, B., CHEN, X., YAO, H., CHEN, Y., LIU, M., GAO, L., JAMES, A.. Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model. **Ecological Indicators**, 58,55-63, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.031>
- LIPIEC, J.; KUS, J.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; NOSALEWICZ, A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 2, p. 210-220, 2006.
- LUBCZYNSKI, M. W.; GURWIN, J. Integration of various data sources for transient groundwater modelling with spatio-temporally variable fluxes—Sardon study case, Spain. **Journal of Hydrology**, v. 306, p. 71–96, 2005.
- MAMEDOV, A. I.; SHAINBERG, I.; LEVY, G. J. Wetting rate, sodicity, and soil texture effects on infiltration rate and runoff. **Australian Journal of Soil Research**, v. 39, n. 6, p. 1293-1305, 2001.
- MARQUES, G. Seleção de áreas para aterros sanitários baseada em mapeamento geotécnico e Analytic Hierarchy Process – AHP. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002 (
- MARTINELLO, I. A. **Estudo das condicionantes hidráulicas de uma ruptura de talude em São Vedelino (RS)**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- MASROURI F. BICALHO KV , KATSUYUKI K Laboratory Hydraulic Testing in Unsaturated Soils. **Geotechnical and Geological Engineering**.v. 26 (6),p.691-704. 2008. DOI:10.1007/s10706-008-9202-7
- MATULA, M., 1981b. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. IAEG Comm. Eng. Geol. Mapping, **Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.**, 24: 235-274. BSE 5930 (1981)
- MCDUGALL, J. R.; PYRAH, I. C. Simulation Transient Infiltration in Unsaturated Soil. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 35, n. 6, p. 1093-1100, 1998.
- MEIN, R.; LARSON, C. Modelling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, v. 9, n. 2, p. 384-394, 1973.
- MILLS, A.J.; FEY, M.V.; GRÖNGRÖFT, A.; PETERSEN, A.; MEDINSKI, T.V. Unravelling the effects of soil properties on water infiltration: segmented quantile regression on a large data set from arid south-west Africa. **Australian Journal of Soil Research** v.44,p.783-797, 2006.
- MINASNY, B; HARTEMINK, A. Predicting soil properties in the tropics, **Earth-Science Reviews**, Volume 106, Issues 1–2, 2011, Pages 52-62, ISSN 0012-8252,
- MOBUS, G. Qualigraf: programa para análise da qualidade da água. Fortaleza: FUNCENE, 2002.

- MORBIDELLI, R.; SALTALIPPI, C.; FLAMMINI, A.; CIFRODELLI, M.; CORRADINI, C.; GOVINDARAJU, R. S. Infiltration on sloping surfaces: Laboratory experimental evidence and implications for infiltration modeling. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 79-85, 2015.
- MOREL-SEYTOUX, H. J.; KHANJI, J. Derivation of an equation for infiltration. **Water Resources Research**, v. 10, n. 4, p. 795-800, 1974.
- MOREL-SEYTOUX, H. J. 1988. Soil-aquifer-stream interactions - a reductionist attempt toward physical-stochastic integration, **J. Hydrol.**, 102, 355-379.
- MOREL-SEYTOUX, H.; MEYER, P. D.; NACHABE, M.; TOUMA, J.; VAN GENUCHTEN, M.; LENHARD, J. Parameter equivalence for the Brooks-Corey and van Genuchten soil characteristics: Preserving the effective capillary drive. **Water Resources Research**, v. 32, p. 1251-1258, 1996.
- MIYAZAKI, T. **Water flow in soils**. Marke Dekker, inc, Nova York 1993.
- NACHABE, B. Macroscopic Capillary length, sorptivity and shape factor in modelling the infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, v.60, n.4, 1996.
- NACHABE, M.H. Refining the definition of field capacity in the literature. **J. Irrig. Drainage Eng-ASCE**, 124:230–232, 1998.
- NARULA, K.; GOSAIN, A. Modeling hydrology, groundwater recharge and non-point nitrate loadings in the Himalayan Upper Yamuna basin. **Science of the Total Environment**, v. 468, 2013.
- NIELSEN, P.; PERROCHET, P. Watertable dynamics under capillary fringes: Experiments and modelling, **Adv. Water Resource Research**, v. 23, n. 1, p. 907-908, 2000.
- NISHIYAMA, L. **Mapeamento geotécnico preliminar da quadrícula de São Carlos – SP**. 1991. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.
- NGUYEN, P.; VAN LE, K.; BOTULA, Y. CORNELIS, W. Evaluation of soil water retention pedotransfer functions for Vietnamese Mekong Delta soils, **Agricultural Water Management**, Volume 158, 126-138, 2015.
- NIU, J., SIVAKUMAR, B. Study of runoff response to land use change in the East River basin in South China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**. 28, 857–865. 2014. <http://doi.org/10.1007/s00477-013-0690-5>
- OBI, J.; OGBAN, P.; ITUEN, U.; UDOH, B. Development of pedotransfer functions for coastal plain soils using terrain attributes. **Catena**, v.123, p.252, 2014.
- OLIVEIRA, L. B.; MELO, V. Estudo da disponibilidade de água em um solo da estação experimental de Itapirema, Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Série Agronomia, Rio de Janeiro, v.6, p. 31-37, 1971.
- OLIVEIRA, G.C.; SEVERIANO, E.C. & MELLO, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da microrregião de Goiânia, GO. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, 11:265-270, 2007.
- OR, D.; TULLER, M.; WRAITH, J. M. **Soil Water Potential**. Disponível em: <[http://www.engr.uconn.edu/environ/envphys/pdf/vadose\\_pdf/Potential\\_revised01.pdf](http://www.engr.uconn.edu/environ/envphys/pdf/vadose_pdf/Potential_revised01.pdf)>. Acesso em: 12 jan. 2016.
- PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W.J. Development of pedotransfer functions in soil hydrology. **Developments in Soil Science**, New York, v. 30, 2004.
- PACHEPSKY, Y. A.; VAN GENUCHTEN, M. Pedotransfer functions. **In: Encyclopedia of agrophysics**. Berlin : Springer, 2011.

- PALMA, J. B. **Avaliação integrada, em diferentes escalas, dos atributos que controlam a dinâmica das águas: aplicação para análise de risco de contaminação das águas subsuperficiais na região entre São Carlos e Ribeirão Preto**. 2004. Tese PhD (PhD em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.
- PAPANICOLAOU, A.N., M. ELHAKEEM, C.G. WISON, C.L. BURRAS, AND B. ONEAL. Observations of soils at the hillslope scale in the Clear Creek Watershed in Iowa, USA. **Soil Survey Horizons**, v.49, p. 83-86, 2008.
- PARAGUASSU, A. B. Experimental silicification of Sandstone. **Geological society of American Bulletin**, n. 19, 24 p., 1972.
- PARLANGE, J. Y. A Note on the Green and Ampt Equation. **Soil Science**, v. 119, n. 6, p. 466-467, 1975.
- PARLANGE, J. Y.; HAVERKAMP, R. Infiltration and Ponding Time. **In: Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling, Theory and Practice**. Ed. H.J. Morel-Seytoux: Kluwer Academic Publishers, p. 95-126, 1989.
- PEEL, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 11, 1633-1644. 2007. ISSN 1027-5606.
- PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. **Soil Science**, v. 83, p. 345-357, 1957.
- PHILIP, J. R. **Theory of Infiltration. Advances in Hydroscience 5**. Academic Press, New York, p. 215-296, 1969.
- PRUSKI, F. F. Infiltração da água no solo. **Engenharia na Agricultura - Caderno Didático**, v.25, p. 26. 1997.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. **R. Bras. Ci. Solo**, 12:211-216, 1988.
- REICHARDT, K. Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas. USP/ESALQ, Piracicaba, 1996.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Journal of Applied Physics**, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.
- RITZEMA H. P. Determining the Saturated Hydraulic Conductivity. **In: H. P. Ritzema Drainage Principles and Applications**. ILRI Publ. 16, Wageningen, Netherlands, 1994.
- ROMANO, I.; SANTINI, A. Water retention and storage: field. In: DANE, J.H.; TOPP, C. (Eds.) **Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p.721-738
- ROSE, C. An introduction to the environmental physics of soil, water and watersheds. Cambridge University Press, Cambridge. 2004.
- RUBIN, J. Theory of Rainfall Uptake by Soils Inijially Drier than their Field Capacity and this Application. **Water Resources Research**, v. 2, n. 4, p. 739-749, 1966.
- SÁ, S.O.; ALTHMANN, D.; FIGUEIREDO, K.L.; BERNOUX, M.; POPPI, R.J.; CERRI, C.C. NIRS-LS-SVM to estimate carbon content of agricultural land in Brazilian Cerrado soils. IOP Conf.: **Series: Earth and Environmental Science**, v.6, p. 242037, 2009.
- SANTOS, C. R.; VILLAR, O. M. Análise Paramétrica da Estabilidade de Taludes em Solos não Saturados: A Influência do Tipo de Solo. In: \_\_\_\_\_ 5º Simpósio Brasileiro de Solos não Saturados. Agosto. ed. São Carlos: [s.n.], v. 1, 2004. p. 181-188.
- SAXTON, K.; RAWLS, W. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Soil Science Societ of America**, v.70, p.1569-1578, 2006.

SCHIFF, L., F. R. DREIBELBIS, Movement of water within the soil and surface runoff with reference to land use and soil properties, **Eos Trans. AGU**, 30(3), 401–411, 1949.

SCHOFIELD, R. K. (1935). "The pF of the Water in Soil," **Transactions, 3 rd International Congress of Soil Science**, Vol. 2, pp. 37-48.

SHARMA, M. L. Measurement and prediction of natural groundwater recharge - an overview. **Journal of Hydrology**, v. 25, n. 1, p. 8, 1986.

SHARMA, S. K.; MOHANTY, B. P.; ZHU, J. T. Including topography and vegetation attributes for developing pedotransfer functions. **Soil Science Society of America**, v. 70, p. 1430-1440, 2006.

SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 2, p. 213-220, 1997.

SIMUNEK, J., M. SEJNA, AND M.T.H. VAN GENUCHTEN. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 2.0, IGWMC-TPS-70. International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden.

SLACK, D. C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation systems. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.3, p.596-600, 1980.

SICHARDT, W.; KYRIEIEIS, W. Grundwasserabsenkungen bei Fundierungsarbeiten. J. Springer, Berlin, 1930.

SOARES, P. C. **O Mesozóico Gondwânico no Estado de São Paulo**. 1973. 152 f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro. 1973.

SOARES, P. C. *et al.* Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. *Revista Brasileira de Geociências*, Paraná, v. 10, n. 3, p.177-185, 1980.

SONAJE, N. Modelling of infiltration process. **Indian Journal of Applied Research**, v. 3, 2013.

SORACCO, C.; LOZANO, L.; SARLI, G.; GELATI, P.; FILGUEIRA, R. Anisotropy of Saturated Hydraulic Conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. [Soil and Tillage Research](#), v. 109, p. 18–22, 2010.

SOTO, M. A. A. **Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados**. 2004. 194 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

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

STIBINGER, J. **Example of determining the hydraulic conductivity of soils theory and applications of selected basic methods**. University Handbook on Soil Hydraulics, **Jakub**, 2014.

SULLIVAN M.; WARWICK J. J.; TYLER, S. W. Quantifying and delineating spatial variations of surface infiltration in a small watershed. **Journal of Hydrology**, v. 181, p. 149–168, 1996.

SWARTZENDRUBER, D. Infiltration of constant-flux rainfall into soil as analyzed by the approach of Green and Ampt. **Soil Science**, v. 117, p. 272-281, 1974.

SWARTZENDRUBER, D.; CLAGUE, F. R. An Inclusive Infiltration Equation for Downward Water Entry into Soil. **Water Resources Research**, v. 25, n. 4, p. 619-626, 1989.

- TEIXEIRA, C.; MORAES, S.; SIMONETE, M. Desempenho do tensiômetro, TDR e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 161-168, Apr. 2005.
- TITTONELL, P.; SHEPHERD, K.D.; VANLAUWE, B.; GILLER, K.E. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya - an application of classification and regression tree analysis. ***Agriculture, Ecosystems and Environment***, v.123, p.137-150, 2008.
- TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.A.; CRESTANA, S. & RAWLS, W.J. Comparison of two approximation techniques to develop pedotransfer functions for Brazilian soil. ***Soil Science Societ of America***, v. 67, p. 1085-1092, 2003.
- TOUHAMI, I.,CHIRINO, E.,Andreu,J.M.,Sánchez,J.R.,Moutahir,H.,Bellot,J. Assessment of climate change impacts on soil water balance and aquifer recharge in a semiarid region in south east Spain, ***J. Hydrol.*** 527, 619–629. 2015. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.012>
- TURNER, E. R. Comparison of infiltration equations and their field validation with rainfall simulation. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Pesquisas Biológicas, Maryland, 2006.
- (USDA) CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL Soil Survey Staff. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 436. 1975.
- SOIL CONSERVATION SERVICE- USDA. **Hydrology**. National Engineering Handbook. Sect. 4, Supplement A, 1957.
- VACHANAUD, G.; THONY, J. Hysteresis during infiltration and redistribution in soil column at different initial water content, *Water resources research*, 7 (1), 111-125, 1991.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. ***Soil Science Societ of America***, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
- VANAPALLI, D. G.; FREDLUNG, D. G.; PUF AHL, D. E.; CLIFTON, A. W. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. ***Canadian Geotechnical Journal***, v. 33, p. 379-392, 1996.
- VALENTIN, C.; BRESSON, L. M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma*, Amsterdam, v.55, p. 225-245, 1992.
- VERECKEN, H., WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SCHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. T. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mmuaem. ***Vadose Zone Journal***, v. 9, p. 795-820, 2010.
- VEIHMEYER, F.J.& HENDRICKSON, A.H. Methods for measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. ***Soil Sci.***, 68:75-94, 1949.
- VIIJI, A.; RASEJSH PRASSANA, R.; ILANGO VAN. Modified SCS-CN and Green-Ampt Methods in Surface Runoff Modelling for the Kundahpallam Watershed, Nilgiris, Western Ghats, India. ***Aquatic Procedia***. v.4, p. 677–684, 2015.
- VILAR, O. M. **Introdução à mecânica dos solos não saturados**. Notas de aula da disciplina Mecânica dos solos não saturados. São Carlos: EESC/USP: Departamento de Geotecnia. 2009.
- WANG, H.; GAO, J. E.; ZHANG, M.; LI, X.; ZHANG, S.; JIA, L. Effects of rainfall intensity on groundwater recharge based on simulated rainfall experiments and a groundwater flow model. *Catena*, LOCAL, v. 127, p. 80-91, 2015.

WANG, Q. J.; SHAO, M. A.; HORTON, R. Modified Green and Ampt models for layered soil infiltration and muddy water infiltration. **Soil Science**, v. 164, p. 445-453, 1999.

WANG, J. CHEN, L. ZHONGBO, Y. Modeling rainfall infiltration on hillslopes using Flux-concentration relation and time compression approximation. **Journal of Hydrology** V.557, 243-253. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.031>

WESLEY, L.; IRFAN, T. **The classification of residual soils**. In Blight, G.E.(ed) *Mechanisc of Residuals soils*, Balkema, Rotterdam, 1997.

WEST, L.T.; ABREU M.A.; BISHOP, J. Saturated hydraulic conductivity of soils in the Southern Piedmont of Georgia, USA: Field evaluation and relation to horizon and landscape properties. **Catena**, v.73, p.174-179, 2008.

WHITE, I.; SULLY, M.J.; PERROUX, K.M. Measurement of surface-soil hydraulic properties: Disc Permeameters, tension infiltrometers and other techniques. **In: Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice**. Madison: SSSA, p.69-104, 1992.

WOOD, E. F., SIVAPALAN, M., BEVEN, K., BAND, L., 1988. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling, *J. Hydrol.*, 102, 29–47. [http://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90090-X](http://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90090-X)

WÖSTEN, J.H.M.; PACHEPSKY, Y.A. & RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 123-150, 2001.

YU, B. A comparison of the Green-Ampt and a spatially variable infiltration model for natural storm events. **Trans. ASAE**, v.42, n.1, p. 89-97, 1999.

ZUQUETTE, L. V. **Mapeamento geotécnico preliminar na região de São Carlos**. 1981. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1981.

ZUQUETTE, L. V. **Análise Crítica da Cartografia Geotécnica e Proposta metodológica para as Condições Brasileiras**. 1987. 673 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. *Cartografia geotécnica*. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

ZUQUETTE, L. V.; PALMA, J. B. Avaliação da condutividade hidráulica em área de recarga do aquífero Botucatu. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v.59, n.1, Ouro Preto, 2006.