



**COPPE/UFRJ**

ESTUDO DE EROSÃO PELA ANÁLISE DE SUCÇÃO E ESCOAMENTO  
SUPERFICIAL NA BACIA DO CÓRREGO SUJO (TERESÓPOLIS, RJ)

Mario Guilherme Garcia Nacinovic

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Cláudio Fernando Mahler

André de Souza Avelar

Rio de Janeiro  
Junho de 2009

ESTUDO DE EROSÃO PELA ANÁLISE DE SUCÇÃO E ESCOAMENTO  
SUPERFICIAL NA BACIA DO CÓRREGO SUJO (TERESÓPOLIS, RJ)

Mario Guilherme Garcia Nacinovic

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

---

Prof. Cláudio Fernando Mahler, D. Sc.

---

Prof. André de Souza Avelar, D. Sc.

---

Prof. Francisco José Casanova de Oliveira Castro, D. Sc.

---

Dr. Ronaldo Luis dos Santos Izzo, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2009

Nacinovic, Mario Guilherme Garcia

Estudo de Erosão pela Análise de Sucção e Escoamento Superficial na Bacia do Córrego Sujo (Teresópolis, RJ) / Mario Guilherme Garcia Nacinovic. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XIII, 167 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Cláudio Fernando Mahler

André de Souza Avelar

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referencias Bibliográficas: p. 151 -156.

1. Erosão. 2. Escoamento superficial. 3. Parcela hidro-erosiva. 4. Ensaio de papel filtro. 5. Curva característica. I. Mahler, Cláudio Fernando *et al.*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

O Engenheiro Agrônomo Roberto Selig com suas práticas de cultivo conservacionistas e estilo de vida simples e pouco ortodoxo nos ensina que o convívio pacífico e respeitoso com a natureza é possível e saudável para ambas as partes.

*À Deus,  
À minha querida esposa Claudia e aos nossos amados  
filhos Mario André, Luis Guilherme e Luana,  
Ao meu grande pai Mario Henrique (in memoriam),  
À minha mãe Esmeralda e minhas irmãs Marta e Beth,  
À minha sogra e segunda mãe Dilza e  
Ao meu sogro e segundo pai Firmo Erthal,  
Ao meu melhor amigo e cunhado Prof. Marco Antonio e  
À minha amiga Adriana Schueler.*

## **Agradecimentos**

Primeiramente, agradeço a Deus, senhor nosso que nos resguarda e, cujos passos tento seguir na minha jornada.

À minhaquerida esposa Claudia, uma mulher grandiosa, que me apoiou incondicionalmente com seu amor e carinho.

Aos meus filhos Mario André, Luis Guilherme e Luana – propósito do meu viver que estiveram longe fisicamente, mas próximos espiritualmente.

À minha mãe Esmeralda fonte da minha vida, que me amparou e consolou e, foi acima de tudo, ... Mãe.

Às minhas irmãs Marta e Beth pelo carinho e pelas horas de conversa e apoio.

Ao meu melhor amigo e cunhado Marco Antonio pela ajuda de um verdadeiro irmão.

À minha cunhada Hilda pelo apoio em casa.

Ao meu sogro Firmo Erthal e minha sogra Dilza dos Reis Erthal por terem suprido minha falta nestes dois anos de ausência física.

Ao meu cunhado Vonede e cunhada Márcia e sobrinha Thayani pelo apoio financeiro em casa.

À minha grande amiga Adriana Schueler pelo incentivo mostrando que a amizade não tem limites de espaço ou tempo.

À colega Juliana Rose pela ajuda nos trabalhos e conselhos amigos.

Ao colega Ronaldo Izzo pela sua valorosa ajuda, na qual possibilitou a conclusão deste trabalho.

Ao colega Vinícius pela conversa amiga e conselhos.

Ao grande colega Marcelo Rios pela sua ajuda despretensiosa e apoio nas horas mais difíceis.

À minha colega Agrônoma Marcela Teixeira pelos conselhos.

Ao meu colega Agrônomo Sílvio Roberto Tavares pelos contatos de trabalho.

Ao meu colega Agrônomo César da Silva Chagas da EMBRAPA / SOLOS pela ajuda técnica no campo e pela descrição do perfil do solo.

À minha colega Jaquelline Feitoza pelo apoio.

Ao meu colega Abdoul Diene pelos ensinamentos sobre tensiometria.

Aos colegas de turma: Alessandra, Ellen Jumara, Fábio, Flávia, Graziela, Harley Bacelar, Henrique, Lídice, Leonardo, Luciano Luz, Luiz, Márcia Bezerra, Maurício, Osvaldo Antunes, Rafael Cerqueira, Simão Rocha, pelos longos períodos de estudo e interação.

Aos colegas: Ben-Uhr, Gustavo, Glauco, Helena Motta, Janaína, Raquel Ofrante, Renilson, Vítor.

À grande equipe e amigos de campo, Carlos Eduardo, Ingrid, Guilherme e Leonardo Brum pelos longos e prazerosos trabalhos de campo.

Aos meus colegas da Geoheco, André Negreiros, Anderson Sato, Rogério e Vítor.

Aos graduandos e bolsistas do CNPq: Caroline van Onselen, Édipo Àzaro, Rafael Junqueira e Viktor Labuto pela ajuda e interesse nos trabalhos de laboratório.

Ao menino prodígio Geovane Lopes de Oliveira (meu braço direito) e aos seus pais Adriana e Dilair, pelo suporte e apoio.

Ao proprietário Gilberto por ter cedido de forma gratuita a sua propriedade para a realização desta pesquisa.

Ao colega Agrônomo Roberto Selig e ao Gustavo pelo apoio nas medições e por ceder a sua propriedade para a realização deste estudo.

À Maria Alice Garcia pelo seu trabalho e apoio nas horas mais difíceis.

À Stela Sampaio pelo apoio na secretaria.

À Márcia Moraes pelas longas conversas de apoio e incentivo.

À Ivete Frango pela imensa ajuda.

Ao André Salviano, meu colega de viagem, e ao Eduardo Paiva pelo apoio na área de informática.

Ao Mauro Dias pelos seus trabalhos imprescindíveis na confecção dos equipamentos.

Ao Luis Carlos de Oliveira e ao Luiz Carlos Almeida pelas análises granulométricas, que foram fundamentais no meu trabalho.

Ao Sérgio Iório não somente pelo apoio nos ensaios de permeabilidade e na calibração dos transdutores, mas, principalmente, pelas conversas amigas e sinceras.

À Maria da Glória pelas inúmeras análises físico-químicas, que tanto me auxiliaram neste estudo.

À Maiara Lacerda pelo apoio nas análises químicas e por sua presteza.

Ao Max Gomes de Souza pelo árduo trabalho de campo.

Ao Roberto Carlos pela ajuda nas ligações elétricas.

Ao Ricardo Gil Domingues pelo apoio na calibração dos equipamentos eletrônicos.

Ao João Batista da Silva por manter os equipamentos em ordem.

Ao Hécio Gonçalves pelo interesse e ajuda nos trabalhos.

Ao Luiz Mario Fernandes pela sua criatividade e apoio na confecção dos equipamentos.

Ao Álvaro Dellê pela ajuda e empréstimo do material imprescindível para a calibração.

Ao administrador Carlos Alberto Rocha pelo serviço competente.

Ao pessoal da segurança, em especial, Evandro Barros e Fredson.

Ao Márcio por manter a limpeza na nossa área de trabalho.

À Márcia pelos serviços na biblioteca.

À Andréia Souza por deixar tudo sempre em ordem e limpo.

À Vera Lucia pelos cafezinhos e arrumação do nosso ambiente de trabalho.

Aos Mestres Ana Luiza Coelho Netto, Francisco Lopes, Laura Motta, Maurício Ehrlich, Márcio de Souza de Almeida, Roberto, Teófilo Ottoni e Willy Lacerda pelos ensinamentos.

À Professora Maria Cláudia Barbosa pelas aulas brilhantes e apoio durante o curso.

Ao Professor Ian Schuman pelas valorosas explanações.

Ao Professor Francisco Casanova pelas inúmeras dúvidas sanadas.

Ao meu orientador Cláudio Mahler pelos ensinamentos acadêmicos e, principalmente, pelas lições de vida.

Ao meu co-orientador André Avelar pela atuação guerreira no campo e pelo brilhante e dedicado trabalho de orientação.

À FAPERJ pelo apoio financeiro, tão fundamental para a realização deste trabalho.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

ESTUDO DE EROÇÃO PELA ANÁLISE DE SUCÇÃO E ESCOAMENTO  
SUPERFICIAL NA BACIA DO Córrego Sujo (TERESÓPOLIS, RJ)

Mario Guilherme Garcia Nacinovic

Junho / 2009

Orientadores: Cláudio Fernando Mahler

André de Souza Avelar

Programa: Engenharia Civil

Este estudo abordou os processos erosivos na região agrícola serrana do Rio de Janeiro. Para tal finalidade, foram coletados dados de produção de sedimentos e escoamento superficial através de parcelas hidro-erosivas tipo Gerlach. Sendo a sucção imprescindível para o entendimento do processo erosivo, a sua medição foi realizada indiretamente pelo método do papel filtro com a determinação das curvas características dos solos. A variação do tamanho do papel filtro Whatman® n° 42, empregado nesta pesquisa, foi avaliada, mostrando que o papel filtro pode ser utilizado indistintamente dentro de certa faixa de bom senso. A caracterização dos solos foi obtida por ensaios granulométricos, ensaios de permeabilidade, análises físico-químicas, ensaios triaxiais, difração de raios-X e descrição do perfil do solo. A erosão foi monitorada em 4 parcelas hidro-erosivas com manejo de solos diferenciados (olericultura convencional, pastagem, área de recuperação florestal e floresta nativa). As práticas de cultivo foram correlacionadas com a erosão tendo-se observado que a erosão cresce com práticas não conservacionistas do solo, como, por exemplo, na olericultura aqui estudada.



Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

STUDY ON EROSION BY ANALYSES OF SUCTION AND RUNOFF IN THE  
CORREGO SUJO BASIN (TERESÓPOLIS, RJ)

Mario Guilherme Garcia Nacinovic

June / 2009

Advisors: Cláudio Fernando Mahler

André de Souza Avelar

Department: Civil Engineering

This study concerns on research of the erosive processes involved in an agricultural region in the mountainside of Rio de Janeiro. A Gerlach-type flume was used to collect runoff and sediment yield. The knowledge of the erosive processes involves suction measurements. So forth, the filter paper method was used as an indirect type of suction measurement along with the determination of the soil-water characteristic curves. The measurement of the Whatman® n° 42 filter paper used in this research was evaluated. Various measures of filter paper can be used within a certain range of common sense. Soil characterization was performed by means of texture tests, permeability tests, physico-chemical analysis, triaxial tests, X-ray diffraction and soil profile description. Erosion was monitored in four different land management scenarios (olericulture with conventional tillage, pasture, forest recovery area and native forest). Cultivation practices were correlated with the erosive processes. It was observed that erosion increases with non conservation tillage practices, like in the olericulture with conventional tillage.

## Índice

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Importância dos estudos sobre erosão.....	1
1.2 – Objetivos.....	2
1.3 – Etapas da pesquisa.....	2
1.4 – Descrição da área de estudo.....	4
1.4.1 – Localização.....	4
1.4.2 – Geomorfologia.....	5
1.4.3 – Vegetação.....	5
1.4.4 – Clima.....	5
1.4.5 – Solo.....	5
1.4.6 – Uso das terras.....	7
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 – Erosão.....	8
2.1.1 - Erodibilidade.....	15
2.1.2 - Morfopedologia.....	16
2.1.3 - Cobertura vegetal e serrapilheira.....	17
2.1.4 - Sedimentologia.....	18
2.1.5 - Fluxo de água no solo.....	19
2.1.6 - Parcelas hidro-erosivas.....	21
2.1.7 - Ensaio de Inderbitzen.....	22
2.2 - Solos não saturados.....	23
2.2.1 - Comportamento mecânico do solo.....	24
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1- Introdução.....	27
3.2 – Descrição do perfil do solo.....	28
3.3 – Amostragem de solo nas parcelas hidro-erosivas.....	29
3.4 – Pluviômetros, termômetros e tanque classe A.....	33
3.5 – Ensaio de caracterização.....	33
3.6 – Análises físico-químicas.....	34
3.7 – Caracterização mineralógica.....	35
3.8 – Ensaio de permeabilidade.....	37

3.8.1 – Ensaio de permeabilidade de carga constante.....	37
3.8.2 – Ensaio de permeabilidade de carga variável.....	38
3.9 – Experimentos e ensaios de campo.....	39
3.9.1 – Parcela hidro-erosiva.....	39
3.9.1.1 – Instalação da parcela hidro-erosiva.....	41
3.9.1.2 – Parcela hidro-erosiva da olericultura.....	43
3.9.1.3 – Parcela hidro-erosiva da pastagem.....	44
3.9.1.4 – Parcela hidro-erosiva da área de recuperação florestal.....	45
3.9.1.5 – Parcela hidro-erosiva da floresta.....	46
3.9.2 – Análise de sucção por tensiômetros.....	47
3.9.2.1 – Pedra cerâmica porosa.....	47
3.9.2.2 – Corpo acrílico.....	49
3.9.2.3 – Transdutor.....	50
3.9.2.4 – Data logger.....	52
3.9.2.5 – Montagem do tensiômetro.....	53
3.9.2.6 – Instalação do tensiômetro no campo.....	54
3.9.3 – Ensaio papel filtro “in situ”.....	58
3.10 – Ensaios de laboratório.....	61
3.10.1 – Ensaio de papel filtro no laboratório.....	61
3.10.1.1 – Ensaio de papel filtro – sucção mátrica.....	63
3.10.1.2 – Ensaio de papel filtro – sucção total.....	67
3.10.1.3 -- Microscopia eletrônica do papel filtro.....	68
3.10.2 – Ensaio de determinação da curva característica.....	69
3.10.3 – Ensaio de Inderbitzen.....	72
3.10.4 – Ensaio de desagregação.....	76
3.10.5 – Ensaio triaxial.....	77
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	79
4.1 – Precipitação e temperatura do ar.....	79
4.2 – Descrição do perfil do solo.....	80
4.3 – Ensaios de caracterização granulométrica e limites de Atterberg.....	82
4.3.1 - Discussões dos resultados dos ensaios de caracterização.....	90
4.4 – Análise físico-química de solos.....	92
4.4.1 - Discussões dos resultados das análises físico-químicas de solos.....	94
4.5 – Ensaios de permeabilidade.....	95
4.5.1 - Discussões dos resultados dos ensaios de permeabilidade.....	95
4.6 – Caracterização mineralógica.....	96

4.7 – Parcelas hidro-erosivas.....	96
4.7.1 - Discussões dos resultados do experimento nas parcelas hidro-erosivas	105
4.8 – Curvas características.....	108
4.8.1 - Discussões dos resultados das curvas características.....	123
4.9 – Sucção "in situ".....	125
4.9.1 - Discussões dos resultados da sucção "in situ".....	135
4.10 -- Microscopia eletrônica do papel filtro.....	136
4.11 – Ensaio de Inderbitzen.....	139
4.11.1 - Discussões dos resultados dos ensaios de Inderbitzen.....	142
4.12 – Ensaio de desagregação.....	144
4.12.1 - Discussões dos resultados dos ensaios de desagregação.....	144
4.13 – Ensaio triaxial.....	145
4.13.1 - Discussões dos resultados dos ensaios triaxiais.....	146
4.14 – Tensiometria.....	147
4.14.1 - Discussões dos resultados da tensiometria.....	147
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	148
5.1 – Conclusões.....	148
5.2 – Sugestões para futuras pesquisas.....	150
Referências Bibliográficas.....	151
Anexo A – Especificações dos equipamentos.....	157
A.1 - Especificação do transdutor.....	157
A.2 - Especificação do data logger.....	157
Anexo B – Calibração dos transdutores.....	158
Anexo C – Difração de raios X.....	159
Anexo D - Ensaio de papel filtro.....	162
Anexo E - Equações para a curva característica.....	164

## Lista de Símbolos

MJ	Mega joule
ha	Hectare
kPa	Quilo Pascal
MPa	Mega Pascal
$R^2$	Fator de correlação
ton	Tonelada
mA	Mili ampére
$\Psi$	Sucção
$\Psi_m$	Sucção mátrica
$\Psi_r$	Sucção relativa a umidade residual
$\mu_a$	Porosidade do ar
$\mu_w$	Porosidade da água
$\sigma'$	Tensão normal efetiva
$\sigma$	Tensão normal total
$\tau$	Tensão cisalhante
$C'$	Coesão efetiva ou intercepto coesivo
$\Phi'$	Ângulo de atrito efetivo
$\Phi^b$	Ângulo de atrito relacionado ao incremento de resistência pela sucção
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
IP	Índice de plasticidade
$\theta$	Umidade volumétrica
$\theta_r$	Umidade volumétrica residual
$\theta_s$	Umidade volumétrica na saturação
W	Umidade gravimétrica
W <sub>i</sub>	Umidade gravimétrica inicial
W <sub>f</sub>	Umidade gravimétrica final
$\gamma_h$	Peso específico úmido
$\gamma_s$	Peso específico seco
$e_0$	Índice de vazios
n (%)	Porosidade em porcentagem

# **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

## **1.1 – IMPORTÂNCIA DOS ESTUDOS SOBRE EROÇÃO**

Esta dissertação visa estudar a erosão do solo em área agrícola, sob diferentes coberturas vegetais e tipos de manejo de modo a contribuir para o entendimento do processo erosivo. O conceito de solo como elo fundamental na cadeia de produção de alimentos deve ser resgatado e preservado, bem como a conscientização da importância da redução da perda de solo no nosso país. Anualmente são carreados 500 milhões de toneladas de solo fértil para os cursos d'água no Brasil (FAO, 2001), que podem gerar eutrofização nos corpos de água e deverão levar muito tempo para serem repostos pela natureza. Manejos agrícolas inadequados e desmatamentos aceleram a erosão, que contribuem para o assoreamento dos cursos d'água e a desertificação de áreas férteis. SILVA (1980) estimou um carregamento anual de solo fértil para os seguintes cursos d'água: 790 milhões de toneladas no Rio Grande do Sul; 15 milhões de toneladas na região serrana de Santa Catarina; 500 milhões de toneladas no noroeste do Paraná e; 130 milhões de toneladas em São Paulo. GARÓFALO (1981) calculou uma perda global ao redor de seis milhões de hectares por ano para a desertificação. A conservação do solo deve ser enfocada como meta prioritária de agrônomos, geotécnicos, biólogos, geógrafos, geólogos, engenheiros, enfim, todos os profissionais ligados às práticas conservacionistas do solo e do meio ambiente.

Este estudo servirá de subsídio para um objetivo maior que é a compreensão e dimensionamento dos processos hidrológicos e erosivos nas encostas da região serrana do Estado do Rio de Janeiro, em vista ao processo de desmatamento de áreas de floresta de Mata Atlântica pelo cultivo de oleráceas (hortaliças que englobam culturas folhosas, raízes, bulbos, tubérculos e frutos diversos). Neste sentido o estudo enfoca a bacia do Córrego Sujo, que apresenta intensa utilização agrícola e se situa no município de Teresópolis (RJ).

## **1.2 – OBJETIVOS**

O objetivo principal deste trabalho é monitorar em campo o escoamento superficial e as perdas de solo, provenientes de eventos pluviométricos mensurados, em quatro parcelas hidro-erosivas com tipos de cultivo diferentes; e correlacioná-los com a sucção do solo.

Relação dos objetivos específicos deste trabalho:

- Mensurar os eventos pluviométricos na área de estudo;
- Monitorar em campo as perdas de solo e o escoamento superficial sob cada sistema de cultivo, através de parcelas hidro-erosivas;
- Realizar ensaios de erosão em laboratório para verificar a produção de sedimentos durante o escoamento superficial;
- Caracterização física e química dos solos das parcelas para avaliar os processos de erosão;
- Obtenção da curva característica do solo para definição das relações umidade versus sucção;
- Medir a sucção do solo por papel filtro e tensiômetros e correlacioná-la com a erosão.

## **1.3 – ETAPAS DA PESQUISA**

As etapas da pesquisa se resumem nos seguintes itens:

1. Reconhecimento da área do experimento e aferição dos instrumentos instalados em pesquisas pretéritas;
2. Preparação e confecção do material necessário para a instauração do experimento no campo;
3. Instalação e recuperação das parcelas hidro-erosivas tipo Gerlach;

4. Coleta de amostras deformadas e indeformadas para caracterização físico-química do solo na área do experimento;
5. Análise físico-química e granulométrica das amostras deformadas;
6. Ensaio de permeabilidade em laboratório;
7. Ensaio de papel filtro em laboratório;
8. Ensaio de papel filtro *in situ*;
9. Coleta mensal de papel filtro *in situ*;
10. Coleta de dados e amostras de sedimentos nas parcelas hidro-erosivas;
11. Estudo pedológico;
12. Ensaio triaxial e ensaios com a câmara de pressão de Fredlund para obtenção da curva característica;
13. Preparo e montagem dos tensiômetros no laboratório;
14. Instalação dos tensiômetros no campo.



## 1.4 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 1.4.1 – LOCALIZAÇÃO

A área de estudo compreende a bacia do Córrego Sujo (53 km<sup>2</sup>) que fica localizada no distrito de Venda Nova situado no município de Teresópolis (RJ) com altitude aproximada de 870m. A Bacia do Córrego Sujo comporta nove sub-bacias. As coordenadas da sub-bacia estudada são 0725665 mN / 7541813 mE. Este canal é um tributário direto do Rio das Bengalas, que, por sua vez, drena para o rio Paquequer e este, finalmente, drena para o rio Paraíba do Sul (Figura 1. 1). Esta é uma bacia muito peculiar pelo fato de compor um mosaico da paisagem muito diversificado e por ser constituída por um uso predominantemente agrícola e com amplas áreas de pastagens, sendo a água um recurso fundamental para a população desta região. A atividade de maior impacto na região é a olericultura (cultivo de oleráceas), sendo secundária a atividade pecuária (BARRETO, 2005).

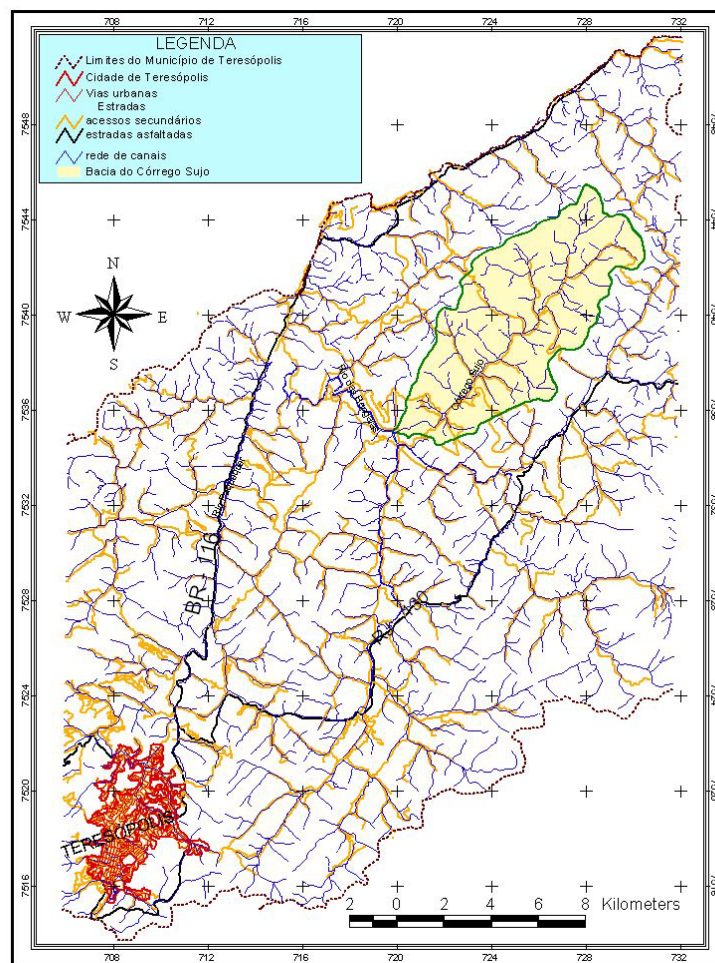


Figura 1. 1 - Mapa de localização da Bacia do Córrego Sujo (apud BARRETO, 2005).

### **1.4.2 – GEOMORFOLOGIA**

O Estado do Rio de Janeiro contém uma paisagem variada e diversos tipos de solos. Possui uma área de 43.909,7 Km<sup>2</sup> de extensão (FUNDAÇÃO CIDE, 1997), sendo 81% de sua superfície compreendida dentro do domínio de Terras Montanhosas, cujas unidades morfológicas são susceptíveis a processos de perda, sobretudo por erosão superficial (ROSS, 1996).

### **1.4.3 – VEGETAÇÃO**

Os fragmentos florestais, remanescentes da Mata Atlântica, são de matas secundárias em diferentes estágios sucessionais com domínio florístico do tipo Floresta Ombrófila Densa Montana, que é um ecossistema de mata perenifólia com vegetação variegada e dossel fechado com índices pluviométricos elevados e bem distribuídos. Estes fragmentos ocupam o alto dos divisores de bacias.

### **1.4.4 – CLIMA**

O tipo climático é o Mesotérmico Úmido com pouco déficit hídrico, com uma estação seca bem definida no período de maio a agosto. As temperaturas são elevadas no verão e amenas no inverno, com uma maior variação de amplitude térmica no inverno.

### **1.4.5 – SOLO**

Os solos dominantes na região serrana são os CAMBISSOLOS, geralmente ocorrendo em associação com os LATOSSOLOS VERMELHO AMARELO, em relevo montanhoso e forte ondulado; ou ainda associados a NEOSSOLOS LITÓLICOS e afloramentos de rocha, nas áreas de relevo mais acidentado (EMBRAPA, 1999).

FREITAS (1997) *apud* MENDES (2006) considera os solos como delgados nas vertentes (LITOSSOLOS e CAMBISSOLOS), espessando-se na cabeceira de drenagem (LATOSSOLOS) ou compostos por depósitos coluviais, ricos em blocos.

Os solos da região apresentam alta suscetibilidade à erosão, que é devida, principalmente, à declividade acentuada. Os deslizamentos ao longo dos cortes na construção de estradas, nas construções civis e na extração de saibro e argila são freqüentes (Figura 1. 2 e Figura 1. 3).



**Figura 1. 2** – Deslizamento em um corte de estrada.



**Figura 1. 3** – Corte com erosão para futura construção civil.



### 1.4.6 – USO DAS TERRAS

Existem somente vestígios de mata primária na região, que foi devastada pela exploração agrícola e criação de gado de corte. O manejo do solo não segue práticas de conservação de solos, como a aração em curvas de nível. A paisagem da área em estudo é diversificada e as mudanças são dinâmicas, devido à alta rotatividade da olericultura (Figura 1. 4 e Figura 1. 5).



Figura 1. 4 - Olericultura, pastagem e mata secundária.

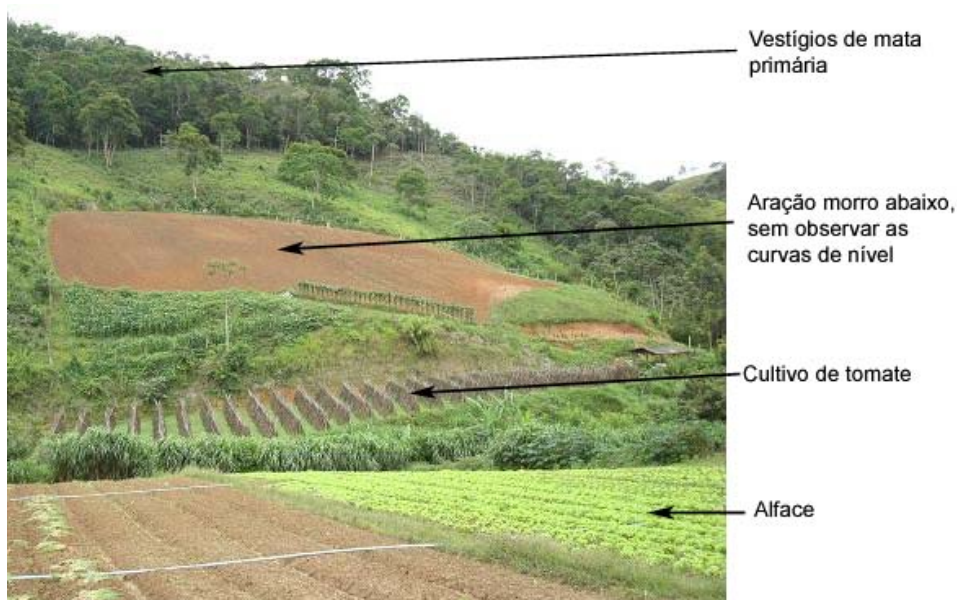


Figura 1. 5 – Cultivo no morro.

## CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

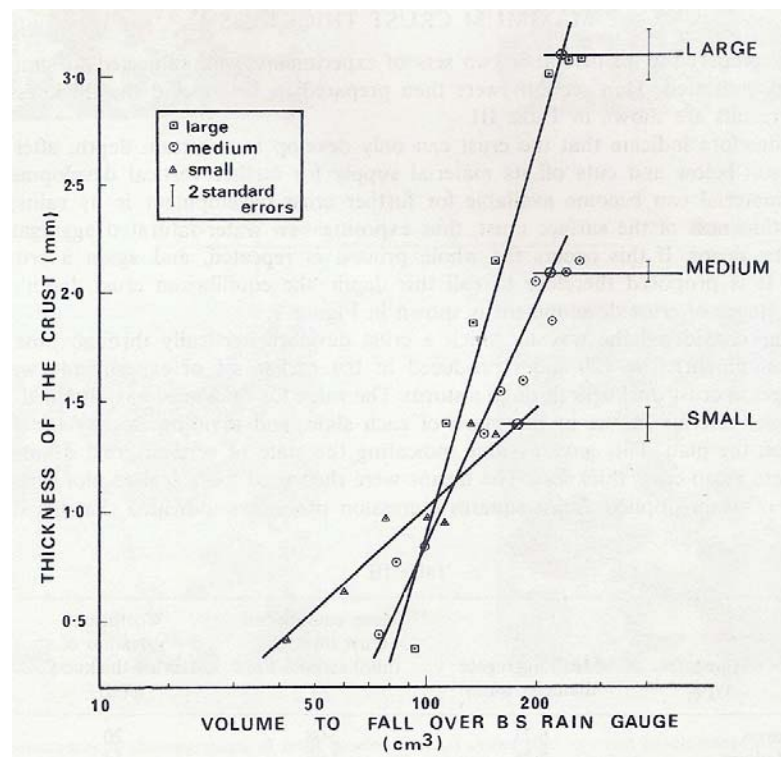
### 2.1 - EROSÃO

Erosão provém do latim *erodere*, que significa corroer. CARVALHO *et al.* (2006) salienta que os processos erosivos constituem-se numa forma natural de modelagem do relevo e atuam de modo conjugado aos processos pedogenéticos. Estes dois processos atuam de forma equilibrada e natural, havendo certa equivalência entre a quantidade de solo erodida e quantidade produzida. A erosão antrópica rompe este equilíbrio, acelerando o processo erosivo e incapacitando a recuperação natural do solo. No meio rural, as práticas de cultivo e o manejo do solo inadequados são gatilhos do processo erosivo.

Área degradada segundo a norma ABNT-NBR 10703 (1989) é toda aquela cujo solo sofreu processo de degradação, e solo degradado é definido como a alteração adversa das características do solo em relação aos seus diversos usos possíveis. Desta forma, a erosão pode ser considerada uma forma de degradação. BERTONI e LOMBARDI NETO (1990) comentam que a formação e regeneração do solo são processos muito lentos (1 cm de solo leva milhares de anos para ser formado) em vista às perdas de solo causadas pelas culturas anuais, como, por exemplo o cultivo de algodão que desgasta 15 cm de solo em um espaço de tempo relativamente curto de 70 anos. A degradação dos solos é a mais séria forma de devastação do meio ambiente.

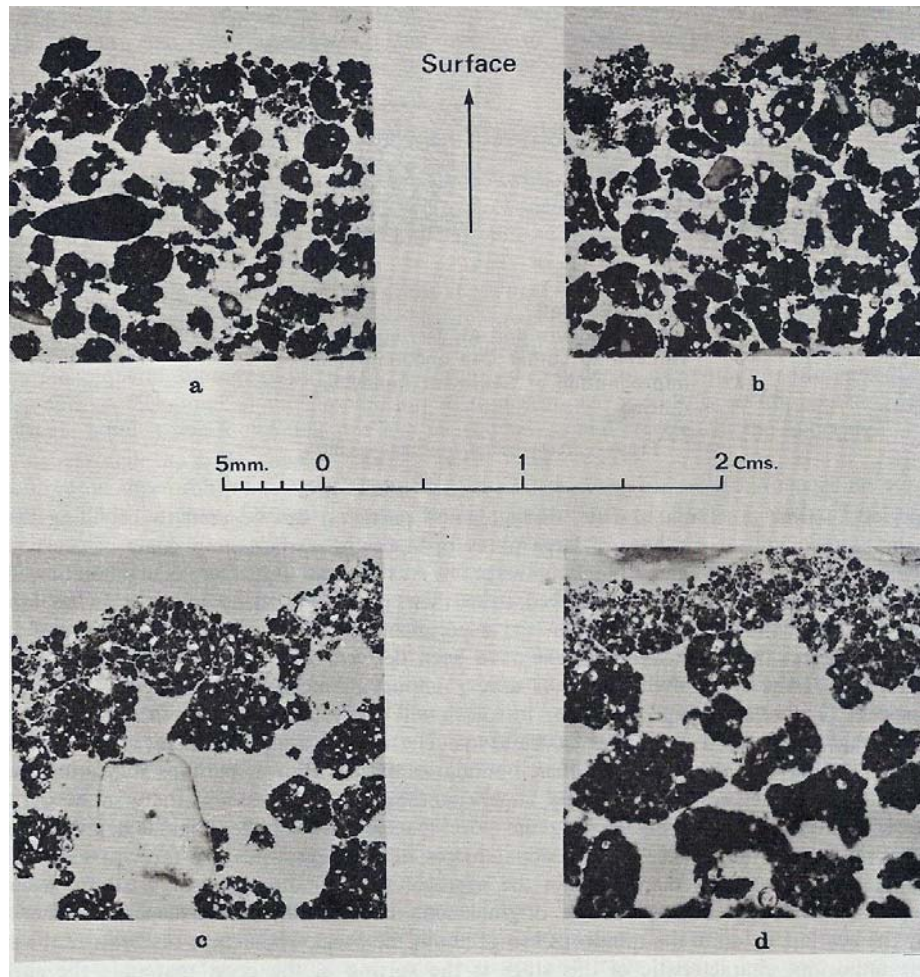
LIMA (2003) comenta que a erosão é um conjunto de processos pelos quais o solo e a rocha são desagregados e transportados pelos agentes erosivos. Os agentes erosivos são vários: água, vento, neve, gelo, plantas, animais e o homem. Os mecanismos de erosão dos solos são, ainda, listadas como: erosão pelo impacto da chuva, erosão em pedestal, erosão em pináculo, erosão da fertilidade do solo, erosão laminar, erosão em sulcos, ravinas, voçorocas, escorregamentos de taludes e erosão interna; que serão mencionados adiante. A erosão hídrica é o agente erosivo mais influente nos países tropicais pelas condições de alta pluviosidade e concentração de chuvas em determinadas estações do ano. O impacto das gotas de chuva (erosão por salpicamento) é o estágio inicial da erosão. As partículas na camada superficial do solo são desprendidas e transportadas por salpicamento diminuindo a rugosidade superficial. O impacto da gota de chuva está relacionado com a sua energia cinética, que depende do seu tamanho. Chuvas mais intensas proporcionam gotas maiores. O tamanho da gota de chuva é diretamente proporcional ao acréscimo de sua energia cinética.

FARRES (1978) estudou o processo de formação de crostas (selagem do solo) e salienta que é um dos mecanismos mais importantes que antecede o escoamento superficial ou “runoff”. O processo ocorre nos primeiros 5 a 10 minutos de chuva e depende das características do solo e da intensidade da chuva (Figura 2. 1). A água é inicialmente absorvida pelo agregado do solo, que promove uma expansão da argila. O ar contido nos microporos do agregado é expulso pela água. Estes dois processos reunidos causam a dispersão e a ruptura dos agregados em micro-agregados. Este material disperso será erodido pelo salpicamento ou será lixiviado para os espaços intergranulares. A iluviação<sup>1</sup> deste material disperso será interrompida pelos agregados situados logo abaixo da superfície, que atuam como uma barreira, e os micro e macroporos serão preenchidos e selados acarretando a formação de crostas (Figura 2. 2). Os agregados situados logo abaixo das crostas ficam protegidos do impacto da gota de chuva, e a erosão por salpicamento fica reduzida. A selagem dos poros diminui a porosidade e, conseqüentemente, aumenta a densidade aparente, dando início ao processo erosivo, pela diminuição da infiltração de água no solo, formando poças, que se interligam e começam o processo de escoamento (Figura 2. 3).

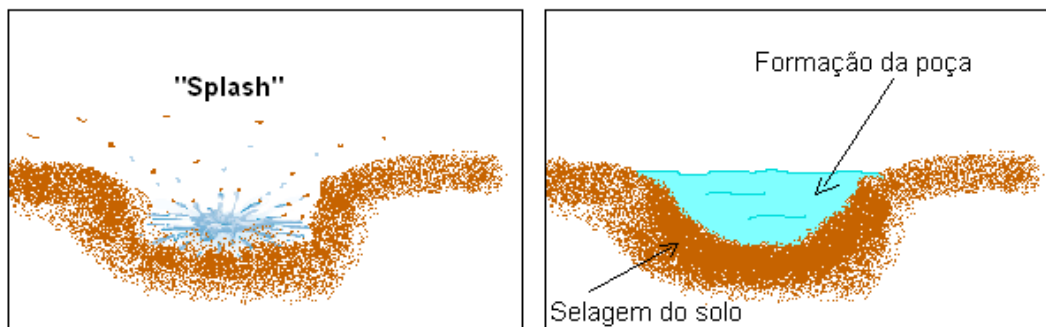


**Figura 2. 1** – Relação da espessura da crosta com o volume de água aplicado (FARRES, 1978).

<sup>1</sup> Processo de deslocamento de materiais como argilas, carbonatos, etc. ao longo de um perfil de solo.



**Figura 2. 2** – Microfotografia mostrando os estágios da formação de crosta.  
 (a) princípio da formação de crosta com agregados estáveis ainda na superfície,  
 (b) lixiviação do material disperso e incorporação dos microagregados na crosta,  
 (c) crosta quase formada com alguns agregados resistentes incrustados,  
 (d) crosta formada. (FARRES, 1978).



**Figura 2. 3** – “Splashing” ou salpicamento e formação de poça.



Quando a precipitação excede a capacidade de infiltração do solo e a micro-rugosidade do terreno é preenchida e extravasada, inicia-se o escoamento superficial. A infiltração é influenciada, por: propriedades do solo (textura, teor de matéria orgânica, estrutura, porosidade, teor de umidade, estabilidade dos agregados, atividade da argila, permeabilidade), características das chuvas, tipo de cobertura vegetal, uso e manejo do solo, características das encostas e rugosidade do terreno (YONG e WARKENTIN, 1975). O volume da enxurrada depende da razão infiltração/precipitação, do tempo de duração e da intensidade da chuva e da declividade do terreno. A velocidade do deflúvio<sup>2</sup> relaciona-se não somente com a declividade, mas, também com o comprimento da vertente e a rugosidade da superfície. BERTONI e LOMBARDI NETO (1990) citam que o comprimento da vertente do terreno é tão importante quanto a sua declividade no incremento da energia cinética do escoamento superficial.

O escoamento superficial encosta abaixo com partículas de solo dissolvidas e em suspensão possui um potencial de arraste capaz de desagregar maiores porções de solo resultando em uma erosão superficial do solo denominada de erosão laminar (LIMA, 2003). Segundo HORTON (1945) *apud* GUERRA (1999), a remoção inicial de partículas pelo fluxo superficial é atribuída à força de cisalhamento exercida pelo escoamento superficial, que aumenta com a energia cinética do fluxo encosta abaixo. CALLE (2000) ressalta que a resistência do solo pode variar sazonalmente, em função das variações de umidade e da sucção matricial.

A transportabilidade (transporte das partículas do solo) está relacionada com a granulometria. Quanto menor o tamanho das partículas, maior será sua transportabilidade. A fração argila do solo é mais facilmente transportada do que a fração areia. A desagregabilidade, também, se relaciona com a granulometria. A fração areia possui uma menor coesão do que a argila e, portanto são mais facilmente desagregadas.

Quando o escoamento superficial se concentra em filetes fica caracterizada a erosão em sulcos, que poderá evoluir para ravinhas, mediante uma maior erosividade e erodibilidade do solo.

LIMA (2003) comenta que a erosão por voçorocamento é a forma mais nefasta de todos os tipos de erosão (Figura 2. 5). As voçorocas podem chegar a dimensões gigantescas com dezenas de metros de profundidade e centenas de metros de

---

<sup>2</sup> Volume de água que escoou da superfície de uma determinada área devido a uma chuva torrencial.



comprimento. Segundo GUERRA (1994) esta forma de erosão é complexa e atribuída a vários processos, como: escorregamentos de taludes, “piping”, evolução de ravinas, exfiltração<sup>3</sup> de água (Figura 2. 4).

A erosão em pedestal se processa quando existem pequenas áreas de solo protegidas do “splashing”, e o solo desprotegido ao seu redor é erodido, esculpindo o solo em forma de “pedestais” (Figura 2. 6).

Quando existe uma camada de solo mais resistente ou uma porção de rocha protegendo uma camada subjacente ocorre a erosão em pináculo (BERTONI e LOMBARDI, 1990). Este tipo de erosão ocorre em solos com sódio excessivo (ESPODOSSOLOS).

A erosão de fertilidade do solo é a lixiviação de nutrientes da camada superficial do solo, e resulta em maiores gastos com adubação química e orgânica para manter uma boa produtividade agrícola (TENGBERG *et al.*, 1997).

A erosão interna (“piping” ou entubamento ou erosão progressiva) ocorre quando há uma concentração de percolação ascendente em zonas de maior permeabilidade. Neste caso, a força de percolação está em sentido contrário à força da gravidade, e o gradiente hidráulico atinge um valor crítico em que as tensões efetivas (forças transmitidas entre as partículas do solo) ficam nulas havendo perda de resistência e ocorrência de erosão nas camadas internas do solo. A tendência é de haver uma maior concentração de fluxo para esta região, aumentando o gradiente, e acarretando uma erosão progressiva com a formação de verdadeiros tubos no solo (Figura 2. 7).

Os escorregamentos de massas de solos podem ser ocasionados por cortes do terreno na base de taludes com inclinação acentuada ou, naturalmente, por ocasião de afloramento do lençol freático em áreas de solos arenosos acarretando o solapamento pelo efeito da poro pressão positiva da água. O umedecimento do solo ocasiona o aumento da poro pressão da água que , por sua vez, acarreta mudanças na resistência ao cisalhamento e no volume do solo.

---

<sup>3</sup> Fluxo ascendente de água subterrânea.

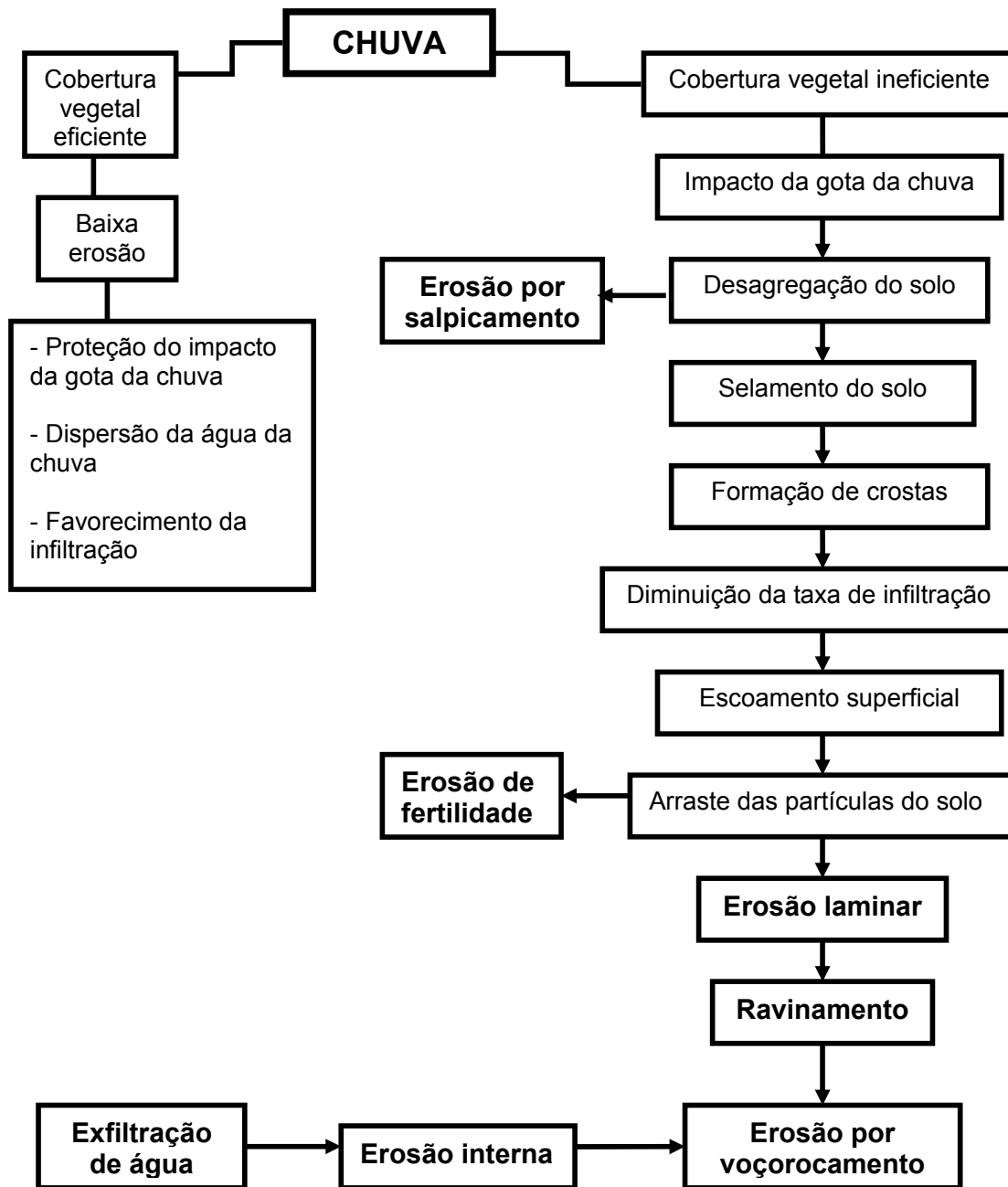
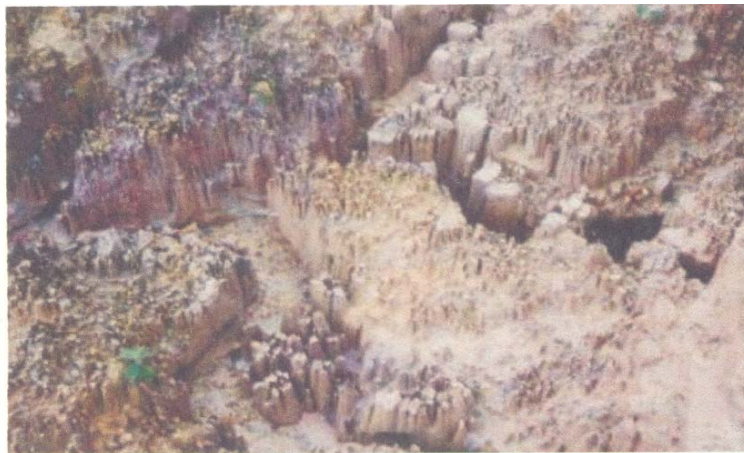


Figura 2. 4 – Fluxograma do processo erosivo.



**Figura 2. 5** - Erosão por voçorocamento (Bananal, SP).



**Figura 2. 6** – Erosão em pedestal (extraído de CARVALHO *et al.*, 2006).



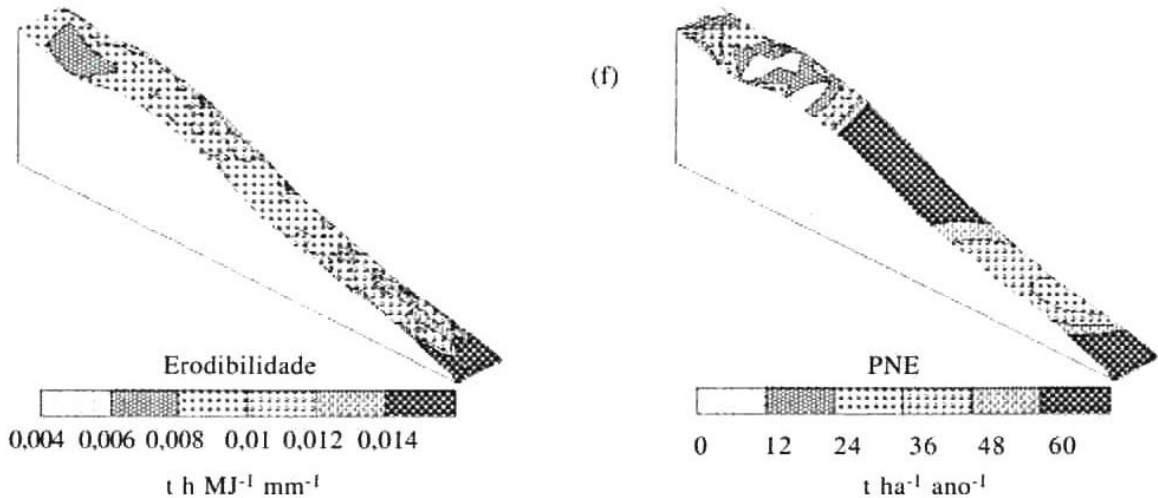
**Figura 2. 7** – Erosão interna "piping" (Bananal, SP).

### 2.1.1 - ERODIBILIDADE

A erodibilidade do solo é a sua suscetibilidade à erosão. Cada tipo de solo possui certa erodibilidade. É fundamental conhecer as propriedades do solo inerentes à permeabilidade e a resistência à dispersão (textura, porosidade e estrutura) para determinar a sua erodibilidade. SOUZA *et al.* (2003) comentam que o potencial natural de erosão (PNE) e a erodibilidade têm comportamentos diferentes dependendo das pedoformas (linear, côncava ou convexa) (Figura 2. 8).

Os solos argilosos com maiores teores de matéria orgânica são mais estáveis devido à propícia formação de agregados. Os agregados são formados por processos de flocculação, fissuração e cimentação. As estruturas contínuas não formam agregados, indicando ausência ou incipiência de alteração e pedogênese, como é o caso dos sedimentos arenosos. Segundo GUERRA (1999) a estabilidade dos agregados possui papel fundamental na erodibilidade dos solos, pois aumenta a resistência ao impacto da gota da chuva e reduz a formação de crostas no topo do solo. A estruturação do solo com agregados maiores e mais estáveis proporciona uma maior porosidade e, conseqüentemente, maiores taxas de infiltração acarretando a diminuição do escoamento superficial. A estabilidade da estrutura dos agregados do solo associada com o arranjo dos poros são propriedades importantes dos solos no entendimento dos processos de alterações físicas perante a diferenciados sistemas de manejo de solos (PARK e SMUCKER, 2005). Em resumo, a natureza argilo-ferruginosa, o teor de matéria orgânica, o grau de flocculação e o grau de desenvolvimento da microestrutura do solo conferem ao solo maior estabilidade e menor erodibilidade.

A erosão é um processo dinâmico. O intemperismo pode mudar as propriedades do solo como a textura, estabilidade estrutural, teor de matéria orgânica, mineralogia e a constituição química; e, conseqüentemente, influenciar a erodibilidade do solo.



**Figura 2. 8** – Modelo tri-dimensional gerado pelo método de interpolação tipo Krigagem para representação da erodibilidade e o potencial natural de erosão (PNE) nas pedoformas côncava e convexa (*apud* SOUZA *et al.*, 2003).

### 2.1.2 - MORFOPEDOLOGIA

Segundo QUEIROZ NETO (2000), existem duas pedologias: uma que interpreta os aspectos dos solos através de medidas e modelos, e outra que estuda os solos pelo prisma da morfologia, espacialidade e integração da paisagem, para depois recorrer a dados laboratoriais. A história do solo está ligada à própria história do relevo, tanto local quanto regionalmente.

É fundamental investir em programas de levantamentos morfopedológicos a nível de detalhe para identificar os compartimentos morfopedológicos (substrato geológico, relevo, solos e ocorrências erosivas). Este programa deve ser desenvolvido por uma equipe de geógrafos, geólogos, agrônomos (pedólogos), geotécnicos (engenheiros civis, sanitaristas, ambientais), visto a interdisciplinaridade do fenômeno erosivo. QUEIROZ NETO (2000) cita que vários pesquisadores utilizam a compartimentação morfopedológica para o entendimento dos processos erosivos lineares nas regiões do: Platô de Bauru (SP), Alta Bacia do Rio Araguaia (GO) e Bacia Hidrográfica do Alto Rio do Casca (MT). A elaboração do mapa de uso das terras é fundamental para o técnico se situar sobre o tipo de atividade agrosilvipastoril desenvolvida na área de estudo e quais as medidas de prevenção e de contenção à erosão que devem ser tomadas.

Cada compartimento morfopedológico tem certo grau de susceptibilidade à erosão. ROSS (1992) estabeleceu uma hierarquização da vulnerabilidade à erosão para horizontes diagnósticos de subsuperfície, classes de textura e declividades (Tabela 2. 1, Tabela 2. 2 e Tabela 2. 3).

**Tabela 2. 1** - Hierarquização da vulnerabilidade por horizontes diagnósticos de subsuperfície (ROSS, 1992).

NEOSSOLO (litólico e quartzarênico)	Muito alta
ARGISSOLO (solos com gradiente textural - B textural – podzólicos)	Intermediária
CAMBISSOLO (solos intermediários entre argissolos e latossolos)	Intermediária
ESPODOSSOLO (solos com B nátrico)	Muito alta
GLEISSOLO (solos hidromórficos com horizonte glei)	Muito alta
LATOSSOLO (solos geralmente distóxicos, profundos, bem drenados e bem estruturados)	Muito baixa
NITOSSOLO (solos geralmente eutróficos, profundos, bem drenados e bem estruturados - terra roxa estruturada)	Baixa
ORGANOSSOLO (solos orgânicos)	Muito alta

**Tabela 2. 2** - Hierarquização da vulnerabilidade por textura (ROSS, 1992).

Argilosa	Muito baixa
Argilosa / Média	Baixa
Média / Siltosa	Intermediária
Arenosa / Média	Muito alta
Arenosa	Muito alta

**Tabela 2. 3** - Hierarquização da vulnerabilidade por classe de declividade (ROSS, 1992).

< 5%	Muito baixa
5 a 12 %	Baixa
12 a 30 %	Intermediária
30 a 47 %	Alta
> 47 %	Muito alta

### 2.1.3 – COBERTURA VEGETAL E SERRAPILHEIRA

A capacidade de armazenamento da água captada pela interceptação da serrapilheira<sup>4</sup> é proporcional à sua produção de massa seca. Uma maior produção de massa seca proporciona uma maior superfície específica, que irá adsorver uma maior

<sup>4</sup> Cobertura que se forma na superfície do solo composta por restos de vegetação, como folhas, galhos de árvores, caules, etc.

quantidade de água. Serrapilheiras de origens diversas com diferentes espessuras, porém com a mesma quantidade de massa seca, possuem a mesma capacidade de retenção de água. Nota-se que, provavelmente, o fenômeno de adsorção prevalece sobre a da água capilar retida nos poros da serrapilheira (SATO *et al.*, 2004).

A morfologia da serrapilheira (forma das folhas, galhos e gravetos) e a abrangência de sua área de cobertura condicionam a capacidade de dispersão da água interceptada. Quanto maior a dispersão, menor será o escoamento superficial. Uma maior capacidade de armazenamento de água da serrapilheira permite maiores taxas de infiltração devido à lenta e gradual difusão da água para o solo (SATO *et al.*, 2004).

A cobertura vegetal com as suas raízes, troncos, caules e hastes aumenta a rugosidade superficial, que retarda o escoamento superficial. A rizosfera<sup>5</sup> aumenta a capacidade de infiltração.

O uso da cobertura morta não serve somente para proteger o solo contra o impacto da gota de chuva e formar barreiras para conter a velocidade da enxurrada, mas, também, a sua incorporação ao solo melhora a estruturação e a capacidade de infiltração do solo.

#### **2.1.4 – SEDIMENTOLOGIA**

A sedimentologia estuda o fenômeno de transporte de partículas sólidas (sedimentos) derivados da erosão de solos, rochas ou de material orgânico; pelos rios, ventos ou geleiras. A importância deste estudo na área em questão consiste no entendimento dos processos de assoreamento dos rios, que diminuem a capacidade do canal, predispondo a ocorrência de enchentes. VIEIRA e CUNHA (2008) avaliaram os ajustes ocorridos na morfologia do canal dos rios de 3ª ordem, afluentes do rio Paquequer, localizados na microrregião serrana do Rio de Janeiro em Teresópolis. VIEIRA e CUNHA (2008) concluem que a remoção pontual de sedimentos nos afluentes implica no assoreamento do rio principal e que a ampliação da capacidade do canal através de dragagens ou de alargamentos das seções transversais é, na realidade, a criação de uma seção de acúmulo de sedimentos. As obras de dragagem e aumento da capacidade do canal não mantêm a proporcionalidade de aumento da calha em direção à jusante. O problema de sedimentação é passado à jusante. As remediações do assoreamento nos rios principais da região serrana requerem,

---

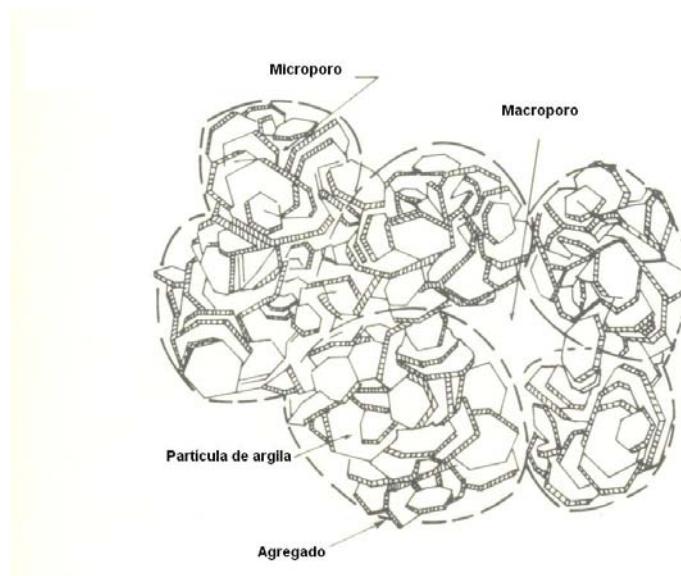
<sup>5</sup> Região do solo influenciada pelas raízes.



também, maiores estudos e um planejamento mais adequado. Um planejamento consciente tem que considerar a bacia hidrográfica como um todo.

### 2.1.5 – FLUXO DE ÁGUA NO SOLO

A água é removida do solo pela evapotranspiração (evaporação na superfície do solo e das plantas mais a transpiração das plantas), que causa um fluxo ascendente de água no solo, pela aplicação de tensões à poro pressão da água de 1 a 2 MPa (TAYLOR e ASHCROFT, 1972 *apud* FREDLUND e RAHARDJO, 1993). A precipitação ocasiona um fluxo descendente de água no solo. A infiltração é controlada pelo fluxo gravitacional em contraposição à resistência da força capilar. O nível do lençol freático é influenciado pelo fluxo total ascendente ou descendente de água no solo em determinado período. O peso da água atua nos macroporos, enquanto que a água nos microporos é regida pela força capilar (Figura 2. 9). A água é retida nos poros por forças capilares e por forças de superfície devido à sorção das moléculas de água pelos íons no solo. Como as partículas de solo (silte e argila) são colóides ( $10^{-6} \text{ mm} < \varnothing < 0,001 \text{ mm}$ ) as forças de superfície prevalecem sobre a força gravitacional, decorrente da grande superfície específica das argilas. O somatório das forças de retenção de água no solo equivale à sucção matricial.



**Figura 2. 9** – Desenho esquemático dos macro e microporos (*apud* YONG e WARKENTIN, 1975).

A lei de Darcy pode ser aplicada para solos não saturados. Porém, o coeficiente de permeabilidade para um solo não saturado varia em função do conteúdo



de água e da sucção mátrica. A água irá percolar pelos poros preenchidos com água, visto que, os poros com ar formam canais não condutivos.

COELHO NETTO (1994) cita 4 tipos de fluxos de água: o fluxo superficial hortoniano, o fluxo subterrâneo de base, o fluxo subsuperficial de chuva e o fluxo superficial de saturação.

O fluxo superficial hortoniano ocorre, quando, em um evento de precipitação, a capacidade de infiltração do solo se esgota e a água começa a preencher as pequenas depressões das terras, que ao serem ultrapassadas, passam a escoar, na forma de um lençol de água, declive abaixo. O tempo necessário para o acúmulo de água e o início do escoamento superficial está relacionado à umidade antecedente e a intensidade e duração da chuva (SOUZA, 2003). A umidade antecedente limita a capacidade de absorção de água do solo e, conseqüentemente, diminui os volumes de infiltração. O fluxo superficial pode ocorrer em condições de solo saturado, mesmo que a infiltração não tenha cessado, sendo denominado fluxo superficial de saturação.

O fluxo subsuperficial ocorre em solos que possuem horizontes com transição de gradiente textural abrupta (i.e., PODZÓLICOS – B textural). A água infiltra-se a certa velocidade pelo horizonte mais permeável e, quando atinge o horizonte de iluviação menos permeável, devido à colmatação dos poros neste horizonte pela argila e silte lixiviados, a condutibilidade hidráulica diminui, origina o fluxo subsuperficial sob esta camada. O fluxo subsuperficial preferencial também ocorre em camadas coluviais com condutividades hidráulicas diferenciadas (FERNANDES *et al.*, 1994 *apud* SOUZA, 2003). A água subsuperficial poderá vir à superfície caracterizando a exfiltração dos fluxos d'água subsuperficiais por meio de: intersecções do lençol freático com as vertentes, descontinuidades geológicas (i.e., gnaisses bandados), ductos da fauna escavadora (i.e., formigas saúvas) e cortes de estrada. Esta exfiltração de água provoca a erosão de vazamento, onde a vazão é tamanha que desloca partículas de solo, e a lavagem em túnel (“piping”) (COELHO NETTO, 1994).

KNAPP (1978) *apud* SOUZA (2003) salienta a importância da estrutura do solo na orientação e velocidade dos fluxos de água, influenciando a capacidade de infiltração e o escoamento superficial. Solos com estrutura granular e em bloco permitem o fluxo em todas as direções, a estrutura prismática (ESPODOSSOLOS) favorece o fluxo vertical, e uma estrutura laminar ocasiona o fluxo horizontal.

### 2.1.6 – PARCELAS HIDRO-EROSIVAS

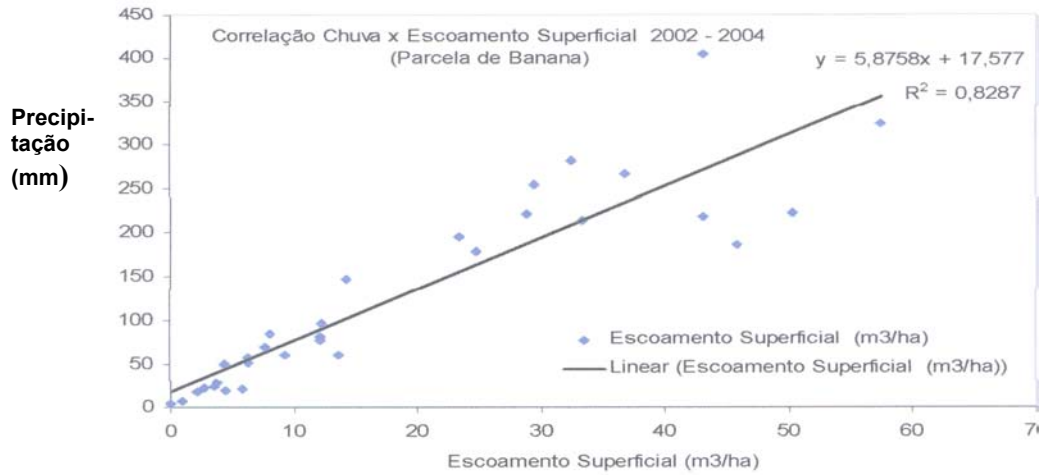
Segundo MENDES (2006) deve-se padronizar os métodos de mensuração de erosão e escoamento superficial, com a finalidade de padronizar os delineamentos do experimento, para se poder correlacionar os resultados com demais pesquisas. MENDES (2006) cita as dimensões de parcelas hidro-erosivas mais comumente utilizadas:

- 4 m de largura por 25 m de comprimento (100 m<sup>2</sup>) – USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos);
- 1,8 m de largura por 22 m de comprimento (40 m<sup>2</sup>) e;
- 2 m de largura por 5 m de comprimento (10 m<sup>2</sup>) – tipo Gerlach.

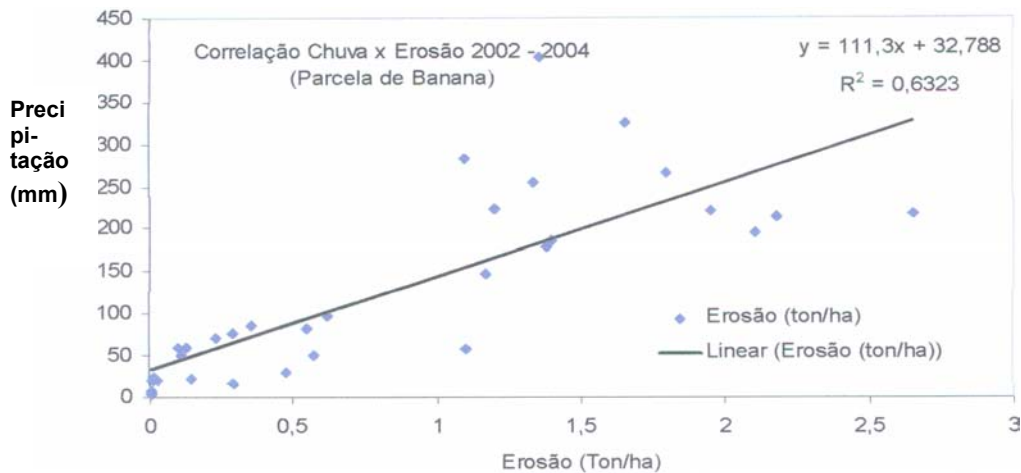
A análise dos resultados do experimento com parcelas hidro-erosivas de MENDES (2006) permite várias observações interessantes. MENDES (2006) comenta que existe uma relação direta entre a intensidade da precipitação com o volume do escoamento superficial (Figura 2. 10). No mesmo trabalho, MENDES (2006) observou uma baixa correlação ( $R^2 = 0,62$ ) entre precipitação e erosão (Figura 2. 11). O referido autor concluiu que a intensidade da chuva está mais estreitamente relacionada a produção de sedimentos do que com o volume total do evento pluviométrico. MENDES (2006) obteve produções de sedimentos elevados de 30 a 40 ton/ha.ano e escoamentos superficiais de 250 a 300 m<sup>3</sup>/ha.ano em uma parcela hidro-erosiva com olericultura, devido a pouca cobertura vegetal do solo neste tipo de cultivo. Os menores valores de produção de sedimentos foram em parcelas hidro-erosivas de pousio de um ano e meio (1,32 ton/ha em Jan/2003) e 3 anos de pousio (0,9 ton/ha em Mar/2004).

Segundo MENDES (2006), uma forma de produção agrícola sustentável na região montanhosa é o sistema agroflorestal de pousio. Após o desmatamento, a terra é cultivada durante 2 a 3 anos e, em seguida, fica em pousio (repouso) por 3 a 10 anos. Neste período de pousio há intensa produção de serrapilheira, que irá ser decomposta ao longo do tempo, com a consecutiva recuperação da fertilidade do solo. No entanto, leis conservacionistas ultrapassadas (i.e., Decreto n° 750 de fevereiro de 1993) (BRASIL, 1993) puseram em risco a sustentabilidade deste sistema de cultivo. Para não infringir a lei, o pousio não poderia passar de 3 anos, senão o desenvolvimento vegetal na área de pousio atingiria um nível tal que culminaria com a sua classificação como área de preservação ambiental. O Ministério do Meio Ambiente, de forma hábil e competente, revogou o Decreto n° 750 de 1993, através do

Decreto nº 6.660 de 21 de novembro de 2008 (BRASIL, 2008), que regulamenta a prática de pouso de forma coerente e sustentável.



**Figura 2. 10** – Correlações chuva versus escoamento superficial no período de 2002 a 2004 para parcela hidro-erosiva sob cultivo de banana (extraído de MENDES, 2006).



**Figura 2. 11** - Correlações chuva versus erosão no período de 2002 a 2004 para parcela hidro-erosiva sob cultivo de banana (extraído de MENDES, 2006).

### 2.1.7 – ENSAIO DE INDERBITZEN

Inderbitzen idealizou este ensaio em 1961. O ensaio simula um escoamento superficial com determinada vazão sob um corpo de prova, constituído por uma amostra de solo superficial indeformada, em dada inclinação, onde a perda de solo é quantificada em certo tempo. FÁCIO (1991) propôs uma vazão padronizada ao redor de 50 ml/s.

O ensaio é de baixo custo e utilizado em avaliações geotécnicas de erodibilidade. Vários pesquisadores utilizaram e aprovaram o ensaio de Inderbitzen para estudar e avaliar a erosão: REGO (1978), FÁCIO (1991), SANTOS (1997), LIMA (1999), MOTTA (2001) e MENDES (2006). O ensaio pioneiro no Brasil foi realizado por REGO (1978) em um estudo de erosão superficial em taludes no Rio de Janeiro.

A limitação deste ensaio consiste em não considerar o efeito da erosão por salpicamento. No entanto, para solos com uma eficiente cobertura vegetal, o efeito do impacto das gotas de chuva não é tão relevante, e a limitação supracitada não é significativa.

FÁCIO (1991) e MENDES (2006) constataram uma maior produção de sedimentos nos primeiros cinco minutos do ensaio. Segundo FÁCIO (1991) a produção de sedimentos aumenta com a declividade da rampa. MENDES (2006) cita uma boa correlação entre o experimento com parcelas hidro-erosivas e o ensaio de Inderbitzen na avaliação qualitativa da erodibilidade.

## **2.2 – SOLOS NÃO SATURADOS**

Os solos não saturados são caracterizados pela presença de ar. Com a entrada de ar no solo, as poro pressões do ar e da água no solo se modificam e, conseqüentemente, os princípios da mecânica dos solos saturados não podem ser aplicados na íntegra.

Segundo FREDLUND e MORGENSTERN (1977), os solos não saturados possuem 4 fases: sólida, líquida, gasosa e interface ar/água. A quarta fase consiste de uma interface entre ar e água, também denominada como membrana contrátil, que age como uma película elástica agregando as partículas do solo (FREDLUND e RAHARDJO, 1993). Quando a fase de ar é contínua (saturação do solo > 85%), a membrana contrátil interage com as partículas do solo e influencia no comportamento mecânico do solo. A sucção é devida a interação das partículas do solo com a membrana contrátil.

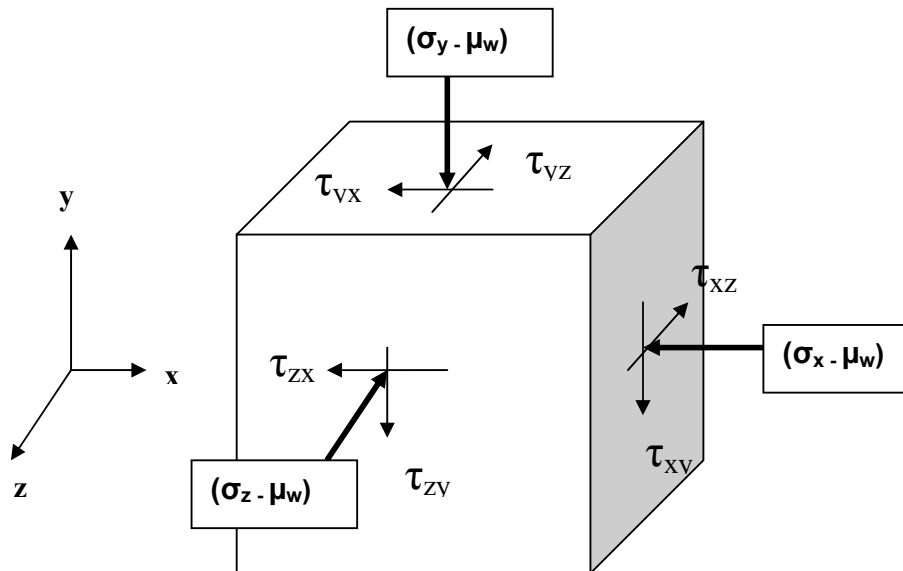
A sucção total do solo é composta por sucção matricial e osmótica. A sucção matricial é a poro pressão negativa do solo, e é definida como a poro pressão do ar subtraída da poro pressão da água ( $\Psi = \mu_a - \mu_w$ ). A sucção osmótica consiste na pressão exercida pela osmose dada pela diferença de concentração dos sais na água livre e na água intersticial.

O aumento da sucção matricial acarreta a formação de meniscos (membrana contrátil) que avançam com a dessaturação do solo. Estes meniscos atraem as partículas de solo aumentando as tensões efetivas e proporcionando um aumento da resistência ao cisalhamento (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

### 2.2.1 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DO SOLO

Segundo FREDLUND e RAHARDJO (1993) o comportamento mecânico de um solo (i.e., mudança volumétrica e resistência ao cisalhamento) pode ser descrito em termos do estado de tensões do solo, que consiste em determinadas combinações de variáveis de tensões (variáveis do estado de tensões).

A tensão normal efetiva ( $\sigma'$ ) é igual à tensão normal total ( $\sigma$ ) subtraída da poro pressão da água ( $\mu_w$ ) ( $\sigma' = \sigma - \mu_w$ ). A tensão efetiva é uma variável do estado de tensão, que pode ser usada para descrever o comportamento de um solo saturado. A mudança de volume e a resistência ao cisalhamento são controladas pela tensão efetiva. Qualquer mudança na tensão efetiva irá alterar o estado de equilíbrio de um solo saturado. Uma descrição mais complexa do estado de tensões se dá pela determinação das tensões efetivas para cada um dos três eixos ortogonais incluindo as tensões cisalhantes ( $\tau$ ) (Figura 2. 12).

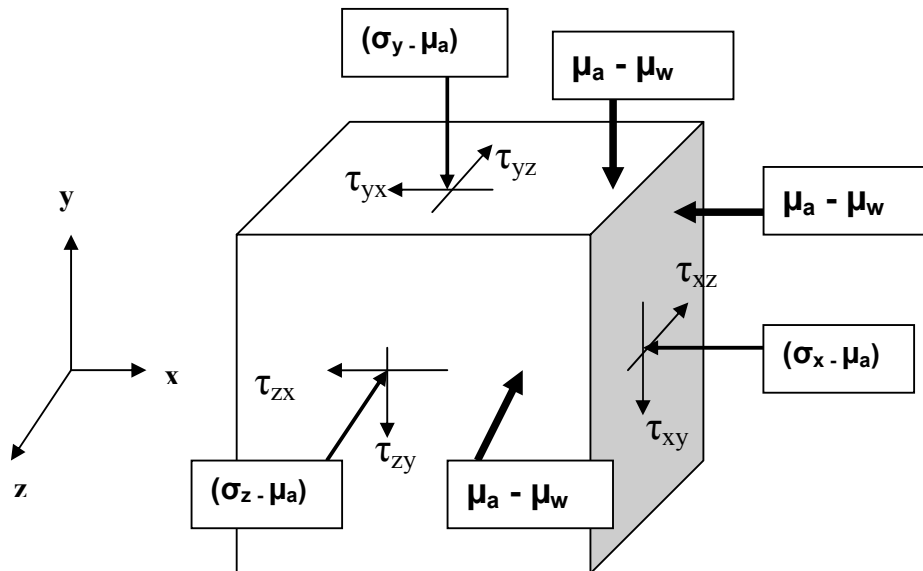


**Figura 2. 12** – Variáveis do estado de tensões para um solo saturado (*apud* FREDLUND e RAHARDJO,1993).

A condição de equilíbrio para um elemento de solo não saturado implica no equilíbrio das 4 fases do solo (i.e., ar, água, membrana contrátil e partículas do solo). FREDLUND e MORGENSTERN (1977) propuseram, devido a dificuldade em relacionar o conceito de tensões efetivas para a condição de solo não saturado, principalmente devido a interação da membrana contrátil, a utilização de variáveis de estado de tensões independentes expresso em termos de variáveis mensuráveis:  $(\sigma - \mu_a)$  e  $(\mu_a - \mu_w)$  (Figura 2. 13).

Onde, as variáveis mensuráveis são:

$\sigma$  = Tensão normal;  $\mu_a$  = Poro pressão do ar;  $\mu_w$  = Poro pressão da água.



**Figura 2. 13** - Variáveis do estado de tensões para um solo não saturado (apud FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

A expressão global que define o estado de tensão para um solo não saturado pode ser discriminado como dois tensores tensão independentes (Matrizes 2.1 e 2.2).

$$\begin{pmatrix} (\sigma_x - \mu_a) & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & (\sigma_y - \mu_a) & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & (\sigma_z - \mu_a) \end{pmatrix} \quad (\text{Matriz 2.1})$$

$$\begin{pmatrix} (\mu_a - \mu_w) & 0 & 0 \\ 0 & (\mu_a - \mu_w) & 0 \\ 0 & 0 & (\mu_a - \mu_w) \end{pmatrix} \quad (\text{Matriz 2.2})$$

FREDLUND *et al.* (1978) *apud* RIOS FILHO (2006) propuseram a seguinte equação de resistência ao cisalhamento (Eq.2.1):

$$\tau = c' + (\sigma - \mu_a) \operatorname{tg}\Phi' + (\mu_a - \mu_w) \operatorname{tg}\Phi^b \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Onde:

$c'$  — Coesão efetiva ou intercepto coesivo;

$\sigma$  — Tensão normal total;

$\mu_a$  — Poro pressão do ar;

$\Phi'$  - Ângulo de atrito efetivo;  $(\mu_a - \mu_w)$  — Sucção matricial;

$\mu_w$  — Poro pressão da água e;

$\Phi^b$  — Ângulo de atrito relacionado ao incremento de resistência pela sucção.

De acordo com a equação 2.1 de FREDLUND *et al.* (1978) um incremento na sucção corresponde a uma translação da envoltória de ruptura da condição saturada de um valor igual a  $(\mu_a - \mu_w) \operatorname{tg}\Phi^b$ .

## **CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 - INTRODUÇÃO**

A quantificação dos parâmetros que influenciam no processo erosivo exige o levantamento das características físico-químicas do solo e das condições hidrológicas envolvidas. O estudo da erosão requer um levantamento detalhado de solos, visto que cada classe de solo tende a apresentar uma erodibilidade específica. Deste modo, no presente trabalho foi realizada a descrição do perfil do solo para permitir classificá-lo e conhecer suas propriedades intrínsecas.

A partir disso, foram feitas coletas de amostras de solos para análises físico-químicas e, também ensaios laboratoriais hidrológicos e mecânicos. Os componentes minerais da fração argila foram determinados por difração de raios X, e a textura do solo e as curvas granulométricas foram obtidas pelos ensaios de caracterização (NBR 6459/84, NBR 7180/84 e NBR 7181/84). Tendo em vista que a granulometria é um fator preponderante de erodibilidade do solo, observa-se também que a sua permeabilidade afeta seu comportamento. A erosividade foi avaliada pela medição do escoamento superficial e produção de sedimentos mediante a instalação de 4 parcelas hidro-erosivas nas diversas áreas de cultivo (olericultura, pastagem, área de recuperação florestal e floresta). Em laboratório, foram realizados ensaios de Inderbitzen (INDERBITZEN, 1961) para mensurar a erosão e o escoamento superficial. Além disso, considerando que a estabilidade dos agregados dos solos está diretamente ligada a sua erodibilidade, foram feitos ensaios de desagregação. Sendo que a erodibilidade foi, também, correlacionada com a resistência ao cisalhamento foram realizados ensaios triaxiais CIU. Ensaios de permeabilidade (NBR 13292/95 e NBR 14545/00) foram conduzidos para avaliar a capacidade de infiltração dos solos das parcelas hidro-erosivas, que durante as chuvas podem também apresentar escoamento superficial e erosão.

Por outro lado, a sucção atua atraindo as partículas do solo e reduzindo a ação da erosão. A fim de avaliar esse efeito, ensaios laboratoriais e de campo com papel filtro e ensaios na câmara de pressão de Fredlund foram realizados para obter a curva característica (sucção versus umidade volumétrica) dos solos das parcelas hidro-erosivas. Já em campo, dois tensiômetros foram instalados na parcela hidro-erosiva da olericultura para a medição direta da sucção no solo.



### 3.2 – DESCRIÇÃO DO PERFIL DO SOLO

A descrição do perfil do solo foi realizada de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (EMBRAPA, 1999), levando em consideração a descrição dos horizontes, cor, estrutura, pegajosidade e plasticidade. Aproveitou-se uma trincheira aberta de 1,90 m de profundidade para a descrição do perfil do solo e coleta de 6 amostras deformadas para caracterização em laboratório. O local era próximo das parcelas hidro-erosivas da pastagem e área de recuperação florestal, que pela análise geomorfológica da área foi considerada como representativa dos solos destas parcelas.

Nesta trincheira foi feito inicialmente a delimitação dos principais horizontes, destacando-se as profundidades, os graus de distinção e a transição de contatos entre os horizontes (Figura 3. 1). Fez-se uma averiguação da mudança textural entre horizontes (abrupta, suave), com discriminação das cores (croma, matiz e valor) dos horizontes do solo utilizando a Carta de Munsell<sup>6</sup>. Para a descrição da estrutura do solo, foram consideradas a forma (granular, grumosa, blocos subangulares, blocos angulares, laminar ou prismática); a consistência dos agregados quando secos (solta, macia, ligeiramente dura, dura, muito dura ou extremamente dura); e a consistência dos agregados quando úmidos (solta, muito friável, friável, firme, muito firme ou extremamente firme). Também fez-se uma análise local da plasticidade (não plástica, plástica ou muito plástica); pegajosidade (não pegajosa, ligeiramente pegajosa, pegajosa ou muito pegajosa); e a verificação visual da porosidade e de feições pedológicas (revestimentos, concreções, pedotúbulos).



**Figura 3. 1** – Perfil do solo.

---

<sup>6</sup> Ferramenta utilizada na pedologia para identificação da cor de um solo, baseado no sistema de cores criado pelo Professor Albert H. Munsell em 1914.

### 3.3 – AMOSTRAGEM DE SOLO NAS PARCELAS HIDRO-EROSIVAS

Além das amostras coletadas no perfil mencionado anteriormente, foram coletadas, com um trado, 3 amostras deformadas em três profundidades (de 0 a 30 cm, de 30 a 60 cm e de 60 a 90 cm) ao redor de cada parcela hidro-erosiva (olericultura, pastagem, área de recuperação florestal e floresta) totalizando 36 amostras deformadas. As amostras serviram para realizar as análises granulométricas e químicas para melhor caracterizar os solos das parcelas do experimento.

Além das amostras deformadas, foram coletadas, com trado especial, duas amostras indeformadas nas profundidades de 30, 60 e 90 cm, ao redor das quatro parcelas hidro-erosivas (olericultura, pastagem, área de recuperação florestal e floresta), totalizando 24 amostras indeformadas para realização de ensaios de sucção por papel-filtro.

Primeiramente, era feita uma tradagem até atingir a profundidade desejada. O equipamento era cravado nesta profundidade para coletar o cilindro com a amostra indeformada (Figura 3. 2).



**Figura 3. 2** – Cravação do cilindro de amostragem.

O equipamento era retirado do furo feito pelo trado com o cilindro de amostragem. O cilindro era retirado e suas faces inferior e superior aplainadas com faca afiada, de forma cuidadosa para não abalar a estrutura da amostra de solo (Figura 3. 3 e Figura 3. 4). Após este procedimento, o cilindro com a amostra de solo é envolto com filme de plástico e papel alumínio de modo a preservar a umidade natural. As amostras foram levadas para o laboratório em uma caixa de isopor, acolchoadas, para evitar choques no transporte. No laboratório, foram guardadas na câmara úmida, para evitar perda de umidade, com indicação do sentido de retirada da amostra.



(a)

A amostra de solo não sofre deformação

O corte em bisel permite a cravação no solo



(b)

Haste com acoplamentos para coletar amostras até 1 m de profundidade

Anel com amostra de solo

**Figura 3. 3(a) e (b) - Detalhes do coletor de amostra indeformada.**



**Figura 3. 4- Detalhe do cilindro com amostra indeformada.**



Foram coletadas seis amostras indeformadas na parcela da olericultura através de anéis de PVC de 15 cm de diâmetro e 10 cm de altura, para realização do ensaio de Inderbitzen (item 3.9.4), de modo a impedir a alteração da estrutura física do solo.

Os anéis foram cuidadosamente cravados em seis pontos para se obter uma representação do solo da parcela. A cravação do anel foi de forma gradual para não abalar a estrutura do solo (Figura 3. 5). Em seguida, o anel foi desenterrado cuidadosamente de modo a garantir a integridade da parte superior e inferior da amostra (Figura 3. 6 e Figura 3. 7).



**Figura 3. 5** - Cravação do anel da amostra para ensaio de Inderbitzen.



**Figura 3. 6** – Preparação para retirar a amostra do solo.



**Figura 3. 7** - Rebarbas de solo sendo cuidadosamente cortadas com uma faca para preparar a amostra de solo para o ensaio de Inderbitzen.

Foram coletadas 4 amostras indeformadas para o ensaio triaxial (item 3.9.4) e 8 amostras para o ensaio de determinação da curva característica (item 3.9.2). Utilizou-se seções de tubos de amostradores tipo Shelby de 4" de diâmetro. As amostras foram coletadas com cuidado para não modificar a estrutura do solo (Figura 3. 8). As amostras foram condicionadas em uma caixa de isopor com serpilha, para não abalar a estrutura do solo por ocasião do transporte para o laboratório; e, posteriormente, guardadas na câmara úmida. Estas amostras foram utilizadas para moldar os corpos de prova para os ensaios citados acima.



**Figura 3. 8** – Amostrador tipo Shelby.

### 3.4 – PLUVIÔMETROS, TERMÔMETROS E TANQUE CLASSE A

Foram instalados dois pluviômetros manuais e um digital para mensurar a precipitação no local da área de estudo. As temperaturas foram lidas diariamente em um termômetro de máxima e mínima situado na parcela hidro-erosiva da floresta. As leituras foram feitas diariamente por pessoas do próprio local (Figura 3. 9). Um pluviômetro manual e digital foram postos próximos a parcela hidro-erosiva da olericultura, e outro pluviômetro manual perto da sede da fazenda aonde foram locadas as demais parcelas hidro-erosivas.

Os dados de evaporação, para se obter a precipitação efetiva, foram obtidos em tanque classe A, na estação meteorológica da Escola Agrícola José Lippi em Venda Nova (Latitude 22° 20' 64" S e Longitude 42° 51'58" W–15 km distante da área de estudo).



**Figura 3. 9** – Pluviômetro manual e digital.

### 3.5 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Foram realizados 24 ensaios de caracterização granulométrica para determinar a textura do solo e a densidade real dos grãos em suas diversas camadas (30 – 60 – 90 cm). Os limites de Atterberg foram determinados para avaliar as propriedades de plasticidade dos solos. Os limites de liquidez e plasticidade foram estabelecidos por meio dos índices de Atterberg determinados pelo método de Casagrande seguindo as normas NBR 6459/84 e NBR 7180/84. Os ensaios granulométricos foram realizados no Laboratório de Geotecnia da COPPE de acordo com a norma NBR 7181/84. Foram feitos 24 ensaios com o defloculante hexametáfosfato de sódio com pH entre 8 e 9 e seis ensaios sem defloculante.

### 3.6 – ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

As análises físico-químicas dos solos foram realizadas de acordo com a metodologia da EMBRAPA / SNLCS.

#### Discriminação das Metodologias das Análises Químicas de Solos

- **pH:** Medição realizada eletronicamente por meio de eletrodo combinado imerso em suspensão solo:líquido (H<sub>2</sub>O e KCl 1N) na proporção 1:2,5 (EMBRAPA, 1979);
- **Carbono orgânico:** Utilizou-se amostra seca ao ar e passada na peneira # 80. Determinado por oxidação com Dicromato de Potássio em meio sulfúrico a quente, usando Sulfato de Prata como catalisador, sendo o excesso de dicromato, após a oxidação, dosado por titulação com solução padrão de Sulfato Ferroso Amoniacal, utilizando difenilamina como indicador. O teor de matéria orgânica foi calculado multiplicando o resultado do carbono orgânico por 1,724 (EMBRAPA, 1997);
- **Complexo sortivo e saturação de bases:** Os cátions adsorvidos são removidos por soluções de cloreto de potássio, acetato de cálcio e ácido clorídrico e, posteriormente determinados por métodos volumétricos (Ca, Mg e acidez), espectrometria de absorção atômica (Al) e por fotometria de chama (Na e K) (EMBRAPA, 1997).

O grau de intemperismo do solo foi analisado pelo valor de Ki e Kr.

$$K_i = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (Eq.3. 1)$$

$$K_r = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (Eq.3. 2)$$

Utilizou-se a metodologia com ataque sulfúrico da EMBRAPA (1979) com modificações para obter Ki e Kr:

- **Perda ao fogo ( $\Delta P$ ):** Obtida pela diferença de peso do solo ao ser calcinado à 550°C em relação ao solo seco à 105°C;
- **Ataque sulfúrico:** A amostra calcinada foi tratada com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$  1:1) e no extrato obtido foi analisado o teor de ferro ( $Fe_2O_3$ ) e alumínio ( $Al_2O_3$ ). O resíduo foi tratado com hidróxido de sódio (NaOH 0,5 N) e no extrato assim obtido foi analisada a percentagem de sílica ( $SiO_2$ );
- **Resíduo:** O resíduo final foi calcinado a 1.000°C, calculando-se então a percentagem de material primário não atacado pelo tratamento (%Res.);
- **Determinação de  $Fe_2O_3$  (%):** Por complexometria pelo EDTA, utilizando o ácido salicílico como indicador;
- **Determinação de  $Al_2O_3$  (%):** Por complexometria pelo EDTA, após separação do ferro e titulando com  $ZnSO_4$  utilizando o xilenol orange como indicador;
- **Determinação de  $SiO_2$  (%):** por colorimetria com molibdato de amônio, desenvolvendo o composto amarelo que absorve no comprimento de onda de 410 nm. O aparelho usado foi o Espectrofotômetro Hach DR/2000.

### 3.7 – CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

A mineralogia dos argilo-minerais por difração de raios-X foi realizada no Núcleo de Catálise da UFRJ. Foram analisadas oito amostras de argila das quatro parcelas hidro-erosivas nas profundidades de 30 e 90 cm. Os resultados da difração de raios-X estão no capítulo 4 e no Anexo C.



Especificações do equipamento utilizado na difração de raios X:

- Aparelho Miniflex-Rigaku – MS ment – Método contínuo;
- Tubo de cobre;
- Ângulo inicial: 2°;
- Ângulo final: 80°;
- "Sampling": 0,05°;
- Velocidade de escaneamento: 2° / min;
- Eixo de escaneamento:  $\theta / 2\theta$ ;
- Unidade de contagem: cps;
- Divergência: variável;
- "Scattering": 4,2 deg.

A separação da argila foi realizada no Laboratório de Geotecnia da COPPE.

A metodologia aplicada está discriminada a seguir:

- Pesou-se 100g de solo seco ao ar, que foi passado na peneira #10;
- Adicionou-se 10 ml de NaOH 0,5M + 100 ml de H<sub>2</sub>O;
- Depois de um dia reagindo, o preparo ficou um minuto no ultrassom para dispersar a argila e quinze minutos no mixer;
- A mistura foi passada na peneira #270, e colocada em uma proveta completando com água destilada até o volume de 1000 ml;
- O preparo foi disperso durante 2 minutos com bastão perfurado, e deixou-se sedimentar por 24 horas;
- O silte sedimentou abaixo da marca de ml e, coletou-se a água com argila em suspensão acima desta marca com um sifão;
- A água com argila em suspensão foi colocada em uma estufa a 40°C;
- Os pedaços de argila foram macerados até virar um pó bem fino, na condição ideal para a difração de raios X.

### 3.8 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE

Os ensaios de permeabilidade foram realizados seguindo os princípios das normas da ABNT, NBR 13292/95 e NBR 14545/00. Realizaram-se 3 ensaios de permeabilidade com carga variável e 9 ensaios com carga constante. Os ensaios foram realizados em 12 amostras indeformadas, coletadas em cilindros de aço inoxidável com aproximadamente 50 mm de diâmetro e 53 mm de altura (Figura 3. 4). As amostras após serem coletadas, foram colocadas em permeômetros e levadas a embebição por um período mínimo de 72 horas para haver saturação. Em seguida as amostras foram submetidas a uma percolação com uma carga hidráulica correspondente a um gradiente hidráulico de 30, por período de no mínimo 6 horas.

#### 3.8.1 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE CARGA CONSTANTE

Estes ensaios foram realizados nas amostras das parcelas da pastagem, área de recuperação florestal e floresta devido à sua textura mais arenosa. Neste ensaio (ABNT-NBR 13292/95) a coluna d água (carga hidráulica “h”), que controla a vazão, é mantida constante. Para padronizar o ensaio foi utilizado um fator de correção “Rt” que é a relação entre a viscosidade da água na temperatura do ensaio com a viscosidade da água na temperatura de 20° C. Foram feitas várias medidas de vazão (variação de volume “V” com o tempo “t”) para se obter a permeabilidade (k), através da Eq.3.3.

$$k = (V \times L \times Rt) / (A \times h \times t) \quad (\text{Eq.3. 3})$$

Onde,

L = altura do corpo de prova cilíndrico e;

A = área do corpo de prova cilíndrico.

### 3.8.2 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE DE CARGA VARIÁVEL

Estes ensaios foram realizados nas amostras das parcelas da olericultura devido à textura do solo ser mais argilosa. Neste ensaio (ABNT-NBR 14545/00), a carga hidráulica varia com o tempo. Foram feitas várias medições de altura de coluna d água em certos intervalos de tempo. O cálculo da permeabilidade (k) foi determinado pela Eq.3.4.

$$k = [(a \times L \times Rt) / (A \times t)] \times \ln (hi / hf) \quad (\text{Eq.3. 4})$$

Onde,

a = seção transversal do tubo;

L = altura do corpo de prova cilíndrico;

Rt = fator de correção;

A = área do corpo de prova cilíndrico;

t = tempo decorrido entre hi e hf;

hi = altura inicial da coluna d água;

hf = altura final da coluna d água após a percolação.

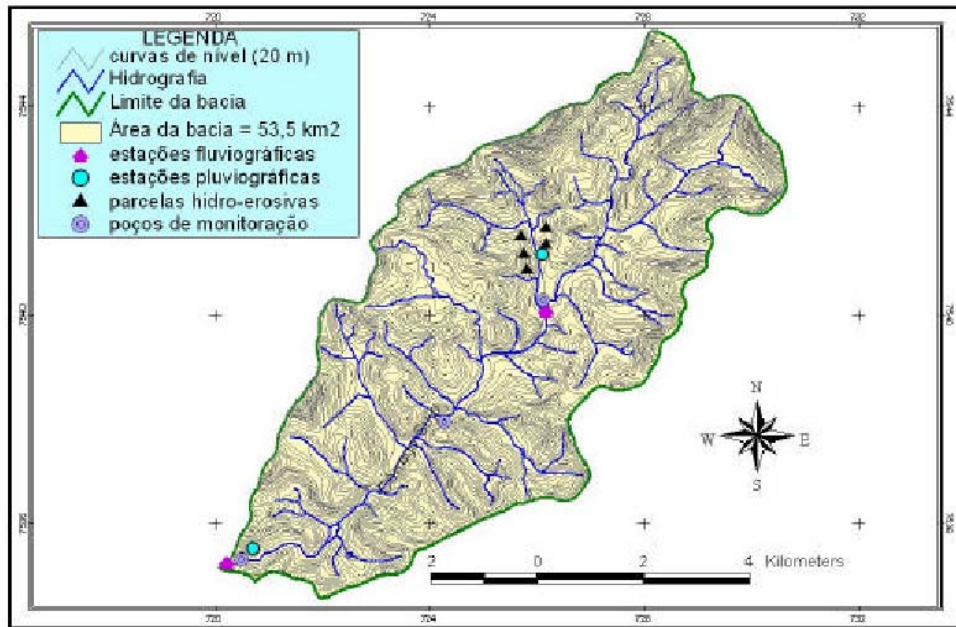
### 3.9 – EXPERIMENTOS E ENSAIOS DE CAMPO

Foram realizados dois experimentos de campo, sendo o primeiro uma avaliação do escoamento superficial e da produção de sedimentos através de parcelas hidro-erosivas; e o segundo uma análise de sucção por tensiômetros e técnica do papel filtro.

#### 3.9.1 – PARCELA HIDRO-EROSIVA

A parcela hidrológico-erosiva foi usada para mensurar o escoamento superficial e a produção de sedimentos. A localização das parcelas está mostrada na Figura 3. 10. Foram instaladas 4 parcelas hidro-erosivas tipo Gerlach com sistemas diversificados de manejo e uso do solo (olericultura convencional, pastagem, área de recuperação florestal e floresta). Desta forma foi possível comparar diferentes tipos de

manejo de solo e sua relação com a conservação do solo e sua capacidade de infiltração. Estes dados servem para estimar a erosividade, a erodibilidade dos solos e a capacidade de restabelecer os níveis do lençol freático na Bacia do Córrego Sujo.



**Figura 3. 10**– Localização das parcelas e instrumentação (*apud* BARRETO, 2005).

As dimensões da parcela hidro-erosiva tipo Gerlach são (5 m x 2 m = 10 m<sup>2</sup>), que facilita a correlação dos dados de escoamento superficial medida em litros para “mm”, que é a unidade de medida da precipitação. Divide-se o volume de água de escoamento superficial por dez para se obter a medida em “mm” (Eq. 3.5). A produção de sedimentos medida em “g /10 m<sup>2</sup>” pode ser convertida diretamente para “kg / ha”. O cálculo do escoamento superficial é dado pela Eq. 3.6 (Figura 3. 11). O escopo deste experimento se resumiu na medição do escoamento superficial e precipitação e na produção de sedimentos.

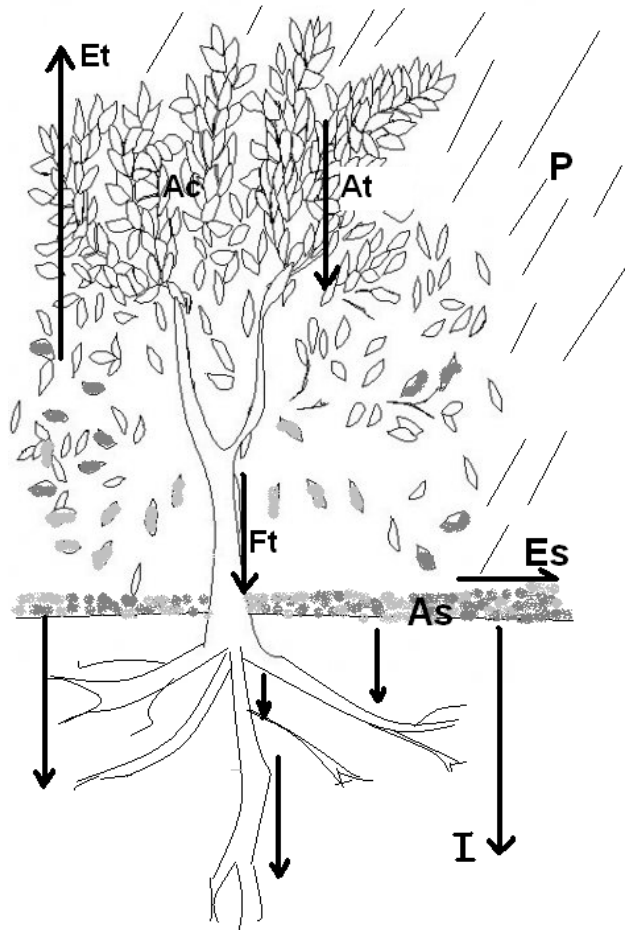
### Cálculo do Escoamento Superficial

$$Es \text{ (mm)} = Es \text{ (litros)} / 10 \quad (\text{Eq.3. 5})$$

$$Es = P + At + Ft - (I + Ac + As + Et) \quad (\text{Eq.3. 6})$$

Onde,

- Es – escoamento superficial;
- P – precipitação; At – atravessamento nas copas; Ft – fluxo de tronco;
- I – infiltração; Ac – armazenamento das copas;
- As – armazenamento pela serrapilheira; Et – evapotranspiração.



**Figura 3. 11** – Fluxos de água (modificado de COELHO NETTO, 1994).

### 3.9.1.1 – INSTALAÇÃO DA PARCELA HIDRO-EROSIVA

Utilizou-se 12 m de folha de flandres de 40 cm, que foi cravada a uma profundidade de 20 cm com o objetivo de reter a água da chuva dentro dos limites da parcela e, evitar que respingassem gotas de fora para dentro (Figura 3. 12).



**Figura 3. 12** – Folha de flandres sendo cravada no solo.

O escoamento superficial era recolhido em uma calha e conduzido por uma mangueira até um recipiente de 50 litros (Figura 3. 13 e Figura 3. 14). Um telhado foi utilizado para evitar que a chuva caísse diretamente na calha (Figura 3. 15).

Coletou-se 500 ml de água de escoamento superficial de cada evento de chuva de cada parcela hidro-erosiva. Desta amostra retirou-se 250 ml em recipientes com peso conhecido, que foram levados à estufa para evaporar a água. Pesava-se o recipiente com sedimentos e descontava a tara para obter o peso dos sedimentos. Este peso era multiplicado por quatro, visto que foram retirados 250 ml de água de escoamento, para se obter a produção de sedimentos em “g/l”.



**Figura 3. 13**– Detalhe da calha.





**Figura 3. 14** - Coleta da água de escoamento superficial.



**Figura 3. 15** – Parcela hidro-erosiva instalada com telhado sobre a calha.

### 3.9.1.2 – PARCELA HIDRO-EROSIVA DA OLERICULTURA

Esta parcela foi instalada em uma área de olericultura com declividade de 13° .

A olericultura convencional consiste em um sistema de produção, com:

- Irrigação por aspersão – Consumo de grande quantidade de água;
- Uso de grandes quantidades de fertilizantes químicos (NPK – 4-14-8) e esterco de frango;
- Calagem para corrigir a acidez do solo;
- Aplicação de agrotóxicos;
- Preparo do solo com aração sem respeitar as curvas de nível;
- Controle de ervas daninha de forma manual e utilizando herbicidas.

Diversas oleráceas foram cultivadas na parcela hidro-erosiva da olericultura (tomate, couve-flor,...) devido ao sistema de rotação de culturas (Figura 3. 16).



**Figura 3. 16** - Parcela hidro-erosiva da olericultura com cultura de tomate.



### 3.9.1.3 – PARCELA HIDRO-EROSIVA DA PASTAGEM

Esta parcela foi instalada em um pasto de *Brachiaria decumbens* com declividade de 14°. O rodízio de pasto é eficiente, principalmente, devido à desproporção do pequeno rebanho em relação à grande área de pastagem. Não é feita fertilização nem aplicação de agrotóxicos. O crescimento vegetativo varia com o pastoreio (Figura 3. 17 e Figura 3. 18).



**Figura 3. 17**– Parcela hidro-erosiva em época de recuperação da pastagem.



**Figura 3. 18**- Parcela hidro-erosiva em época de pastoreio.

#### 3.9.1.4 – PARCELA HIDRO-EROSIVA DA ÁREA DE RECUPERAÇÃO FLORESTAL

Esta parcela foi instalada em uma área de recuperação florestal com 18° de declividade. Esta área do experimento consiste na recuperação de uma área de citricultura, em que as práticas culturais de rotina (erradicação de ervas daninhas aplicando herbicidas ou através de capinas e roçadas; adubação; podas e; controle de pragas e doenças) não são realizadas. A natureza restabelece o seu domínio sobre a citricultura cultivada por métodos tradicionais (Figura 3. 19).



**Figura 3. 19 (a) (b) – Parcela hidro-erosiva da área de recuperação florestal.**



### 3.9.1.5 – PARCELA HIDRO-EROSIVA DA ÁREA DE FLORESTA

Esta parcela está inserida em uma área de Mata Atlântica secundária com 10° de declividade. A área de floresta é composta de um cenário de grande produção de serrapilheira promovendo uma cobertura vegetal eficaz (Figura 3. 20).



**Figura 3. 20**– Parcela hidro-erosiva da floresta.

### 3.9.2 – ANÁLISE DE SUCÇÃO POR TENSÍOMETROS

A sucção do solo pode ser medida por meio de um tensiômetro. Este equipamento consiste de uma pedra porosa, um transdutor e de um corpo acrílico. O tensiômetro (COPPE/UFRJ, 2004) foi confeccionado seguindo estudos de MAHLER *et al.* (2004), DIENE (2004), DIENE e MAHLER (2007) e RIDLEY e BURLAND (1993).

#### 3.9.2.1 – PEDRA CERÂMICA POROSA

A cerâmica utilizada no tensiômetro é de natureza porosa e hidrofílica. Os seus poros diminutos (0,16 µm) com superfície polarizada atraem as moléculas polares da água e promovem o seu transporte por capilaridade. A similaridade da natureza porosa do solo e da cerâmica proporciona uma afinidade entre eles. A pedra porosa serve de interface entre a água do solo e a água contida no recipiente do corpo acrílico do tensiômetro e, possibilita a medição da sucção do solo.

SITZ (1948) *apud* FREDLUND e RAHARDJO (1993) sugeriu que a água capilar fosse subdividida em água gravitacional e água capilar. A água gravitacional teria propriedades similares à água comum. A água molecular capilar teria, supostamente, propriedades singulares que suportariam altas tensões sem ocorrer cavitação ou borbulhamento.

A pedra cerâmica é especialmente manufaturada de tal forma que seus poros são interconectados e interligados, permitindo um fluxo contínuo de água (Figura 3. 21). A pedra utilizada era de elevado valor de pressão de entrada de ar (15 bar ou 1.500 kPa), que permite somente o fluxo de água até esta específica pressão, impedindo a entrada de ar e, evitando, assim, o fenômeno da cavitação (Tabela 3. 1).

**Tabela 3. 1** – Especificação técnica da pedra cerâmica porosa, fornecida pelo fabricante (Soilmoisture Equipment Corp.).

Valor de pressão de entrada de ar (kPa)	Pressão de borbulhamento (kPa)	Porosidade aproximada (%vol)	Condutividade Hidráulica (cm/s)	Máximo tamanho de poros (µm)	Escoamento direto em placa ¼"	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)
<b>1.500</b>	<b>1.520</b>	<b>32</b>	<b>2,59 x 10<sup>-19</sup></b>	<b>0,16</b>	<b>0,015</b>	<b>15,85</b>	<b>7,55</b>



**Figura 3. 21**– Corpo acrílico e pedra cerâmica porosa de 15 bar.

A saturação das duas pedras porosas compreendeu os seguintes passos:

1. As pedras cerâmicas foram aderidas ao corpo acrílico com cola Araldite® ;
2. Aplicação de vácuo na câmara de calibração do conjunto corpo acrílico e pedra porosa por um dia;
3. Saturação das pedras com água deaerada e destilada por um período de dois dias na câmara de vácuo.

### 3.9.2.2 – CORPO ACRÍLICO

O corpo acrílico é responsável pela união entre o transdutor e a pedra porosa. Ele possui um recipiente que contém um pequeno volume de água destilada e deaerada entre a pedra porosa e o transdutor. O volume de água é diminuto para evitar a ocorrência de cavitação. Este recipiente possui um canal de comunicação com o transdutor (Figura 3. 22). Foi confeccionado um pequeno canal (Figura 3. 23) voltado para o exterior, para dissipar a pressão exercida pelo acoplamento do transdutor, no qual possui um parafuso para evitar a saída de água e o alívio gradual da pressão. O recipiente é liso para evitar a ocorrência de micro bolhas, que dificultariam a transmissão de pressão.



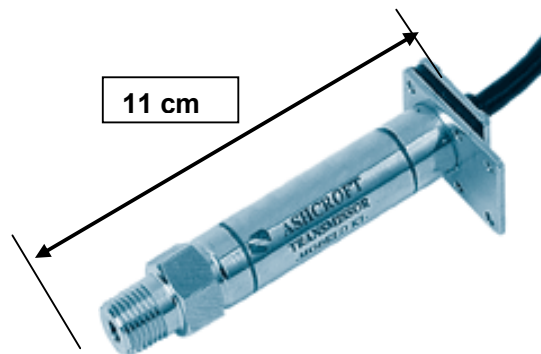
Figura 3. 22 - Corpo acrílico em detalhe.



Figura 3. 23 - Detalhe do canal e rosca

### 3.9.2.3 – TRANSDUTOR

O transdutor ou transmissor é um dispositivo que converte um fenômeno físico (e.g., mecânico), através de um elemento sensor, que o recebe e o transforma em um sinal elétrico. O elemento sensor é o componente que responde a estímulos físicos (e.g., sucção) e produz sinais elétricos correspondentes, que podem ser medidos e interpretados. O transdutor usado foi o modelo K1 da Ashcroft® (Figura 3. 24). As especificações do transdutor K1 da Ashcroft® estão no Anexo A.1.



**Figura 3. 24** – Transmissor K1 da Ashcroft®.

A sucção do solo será transmitida à água do recipiente do corpo acrílico que flexiona o diafragma do transmissor que, por sua vez, emite um sinal elétrico específico. A calibração do transdutor se faz necessária para poder correlacionar determinada sucção a uma específica corrente elétrica emitida (vide Anexo B – Tabelas B.1 e B.2).

Foram aplicados dois ciclos de pressões positivas com o aparelho de controle automático de pressão (Automatic Pressure Controller da Wykeman Farrance, modelo WF12468) e, as pressões foram correlacionadas com as corrente elétricas lidas com o multímetro 3478A da Hewlett/Packard.

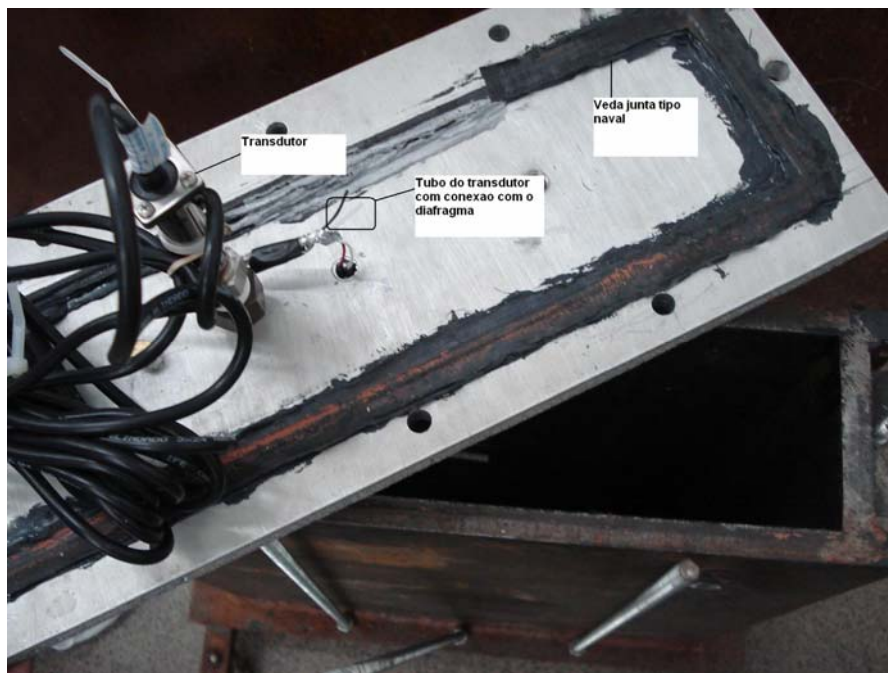
A calibração do transdutor modelo K1 da Ashcroft® para pressões negativas (sucção) só foi realizada após a verificação da inconsistência dos dados da tensiometria no campo. Primeiramente, confiou-se que bastaria fazer a calibração para valores positivos, e, depois, extrapolar a curva de calibração para pressões negativas. No entanto, quando foram simulados valores de sucção até 200 kPa, verificou-se que o transdutor modelo K1 da Ashcroft® só conseguiu transmitir sinais até uma sucção de 50 kPa. Acima deste valor, o sinal permanecia constante (Tabela 3. 2). A calibração para sucção foi realizada em uma câmara de pressão elaborada especificamente para



este propósito. A câmara consiste na junção de 6 placas de ferro com 16 mm de espessura capaz de suportar pressões elevadas de aproximadamente 1.000 kPa. O transdutor foi colocado dentro da câmara e o ar injetado sob pressão. A corrente elétrica transmitida pelo transdutor foi lida com o multímetro 3478A da Hewlett/Packard. O processo consistiu em posicionar o transdutor na câmara de pressão de modo invertido, para que o ar passasse sob pressão por um tubo do transdutor com conexão com o diafragma, e o flexionasse de modo similar ao efeito da sucção (Figura 3. 25 e Figura 3. 26).

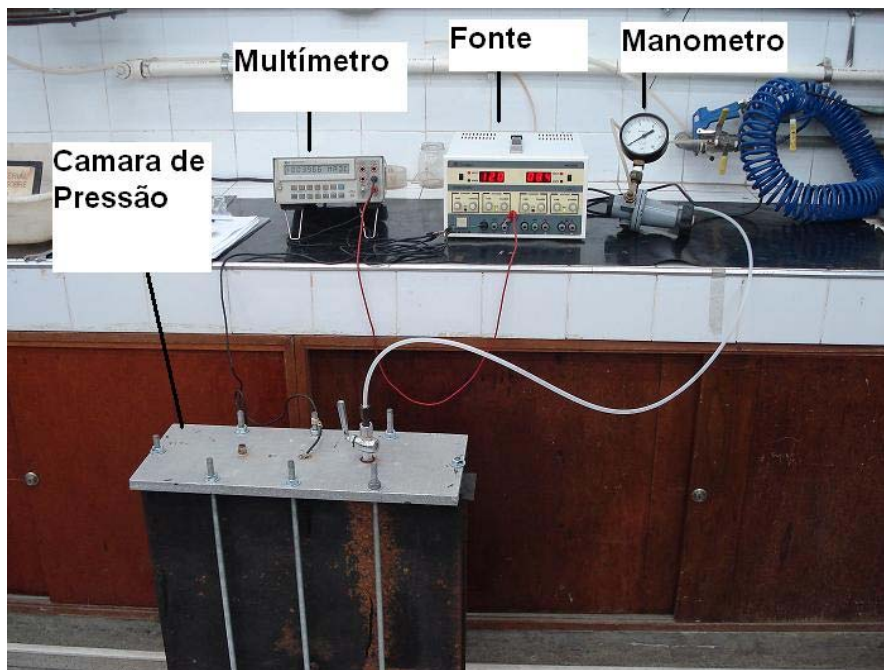
**Tabela 3. 2 – Calibração para valores de sucção.**

Sucção (kPa)	Corrente (mA)
0	3,96
50	3,71
100	3,71
200	3,71



**Figura 3. 25 – Acoplamento do transdutor na câmara de pressão.**





**Figura 3. 26** – Equipamentos necessários para a calibração.

#### **3.9.2.4 – DATA LOGGER**

O data logger é um aparelho eletrônico que detecta sinais elétricos provindos de um sensor, e armazena estes dados em uma memória interna não volátil, que serão posteriormente descarregados via porta USB para um computador portátil. O modelo usado foi o USB 504 (4 – 20 mA) Current Loop Data Logger® (Figura 3. 27). As especificações do USB 504® estão no Anexo A.2.



**Figura 3. 27-** Data logger USB 504®.

### 3.9.2.5 – MONTAGEM DO TENSÍÔMETRO

O procedimento de montagem do tensiômetro foi feito tomando-se certos cuidados técnicos:

1. O canal do transdutor era preenchido com água deaerada e destilada, com um pissete, de forma a haver uma continuidade de água com o recipiente de água do corpo acrílico;
2. O transdutor foi rosqueado ao corpo acrílico em uma bacia com água destilada e deaerada para que o conjunto estivesse repleto de água (Figura 3. 28). O recipiente de água do corpo acrílico possui um canal cônico com rosca até a metade, que era mantido aberto para evitar a sobre pressão causada pelo rosqueamento do transdutor, no qual poderia danificar ou até romper o diafragma;



**Figura 3. 28** – Bacia com água destilada e deaerada para efetuar o acoplamento do transdutor no corpo acrílico de forma submersa.

3. Um pequeno parafuso era, lentamente, rosqueado no canal cônico com o cuidado de não ultrapassar o limite de pressão do transdutor (Figura 3. 29). A pressão causada pelo rosqueamento era transmitida ao transdutor e o sinal elétrico era captado por um multímetro, no qual tomava-se o cuidado de não ultrapassar a medida de corrente de 20 mA (Figura 3. 30). Quando este limite chegava próximo, o processo de rosqueamento era interrompido para esperar dissipar a pressão através da pedra porosa.



**Figura 3. 29** – Detalhe do aperto do parafuso com chave Allen.



**Figura 3. 30** - Equipamento necessário para a montagem do tensiômetro.

### **3.9.2.6 – INSTALAÇÃO DO TENSIOÔMETRO NO CAMPO**

Foram instalados dois tensiômetros próximos à área da parcela hidro-erosiva da olericultura nas profundidades de 30 e 60 cm (Figura 3. 31). O equipamento para medição de sucção é constituído por: tensiômetro, eletroduto, caixa impermeável, “data logger” e bateria de 12 V – 1,3 A. O eletroduto serviu para conduzir a fiação elétrica dos transdutores até a caixa impermeável. Esta caixa abrigava os dois “data loggers” e a bateria protegendo-os da ação das intempéries (Figura 3. 32 e Figura 3. 33). Os tensiômetros foram transportados para o campo tomando-se cuidado para não ocorrer a desaturação das pedras porosas (Figura 3. 34).

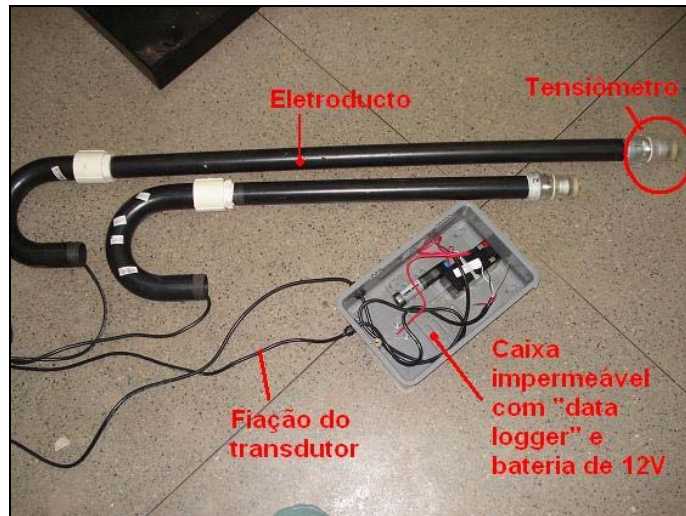


Figura 3. 31 - Equipamento completo para medição de sucção.



Figura 3. 32 - Caixa impermeável com "data logger" e bateria.

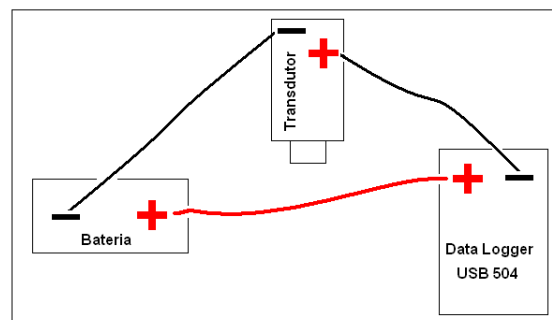


Figura 3. 33 - Esquema das conexões - bateria x data logger x transdutor.





**Figura 3. 34** - Preservativo com água deaerada para manter a pedra porosa saturada.

A parcela da olericultura foi escolhida por ter os maiores índices de escoamento superficial e produção de sedimentos (Figura 3. 35).



**Figura 3. 35-** Tensiômetro montado no campo.

A aquisição de dados foi feita retirando-se o data logger da caixa impermeável (Figura 3. 36) e conectando-o via porta USB a um computador portátil (Figura 3. 37).



**Figura 3. 36** – Data logger sendo retirado.



**Figura 3. 37** - Aquisição de dados.

### 3.9.3 – ENSAIO PAPEL FILTRO ‘IN SITU’

O ensaio de papel-filtro *in situ* é uma maneira simples e econômica de medir a sucção do solo (MAHLER e OLIVEIRA, 1997). A sucção medida foi a total, visto que não há contato direto do papel-filtro com o solo.

Confeccionou-se os tubos utilizados para alojar os papéis-filtro de forma que não houvesse contato do papel com as suas paredes e, portanto não possibilitar a absorção do vapor de água condensado ao seu redor. O tubo era composto de um pedaço de 15 cm de PVC soldável de 2” acoplado a um cap de 2” com um “O ring”, e com uma agulha descartável para seringa de 30 x 0,8 colada na base do cap (Figura 3. 38 e Figura 3. 39).



Figura 3. 38 – Cap e tubo acoplado.



Figura 3. 39 – Detalhe do cap com agulha.



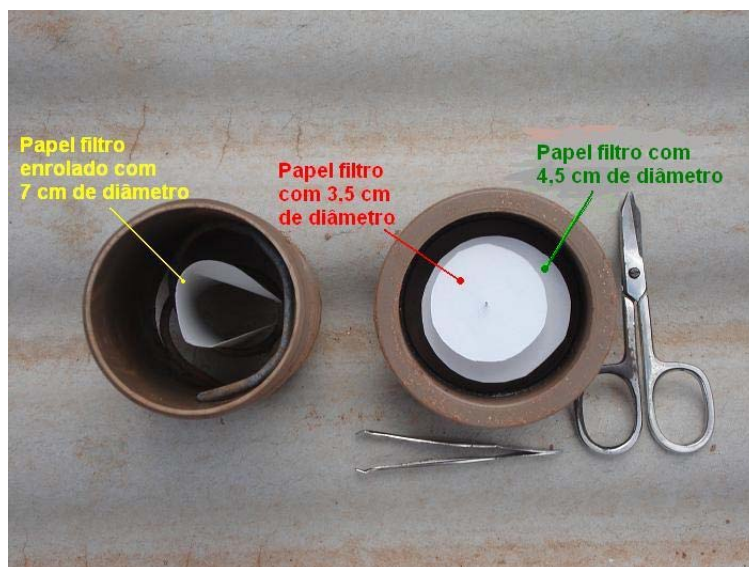
Primeiramente, cavou-se uma trincheira para a locação do tubo com papel-filtro na horizontal. No entanto, o procedimento tornou-se muito trabalhoso e impraticável na parcela da floresta, onde muitas raízes foram encontradas (Figura 3. 40). Optou-se por colocar os tubos na vertical, usando o trado até atingir as profundidades almejadas (15, 30 e 45 cm).



**Figura 3. 40** – Abertura de trincheira para colocação dos tubos na posição horizontal.

Os tubos foram colocados nas profundidades de 15, 30 e 45 cm, com o objetivo de se conhecer as sucções nas primeiras camadas do solo; por se tratar de uma pesquisa sobre erosão superficial.

O tamanho padrão do papel-filtro é de 7 cm (MAHLER e OLIVEIRA, 1997). Este tamanho de papel dificulta o ensaio, por requerer um aparato especial para evitar o contato do papel com a parede do tubo. Foi usado um arame grosso em espiral para conter o papel filtro. Com o intuito de facilitar o procedimento neste tipo de ensaio, pesquisou-se a influência do tamanho do papel-filtro na medição da sucção. Utilizaram-se três tamanhos de papel filtro – 3,5 cm, 4,5 cm e 7 cm (Figura 3. 41).



**Figura 3. 41** – Tubo com três papéis-filtro de tamanhos diferentes.



Os papéis-filtro eram levados para campo em sacos plásticos auto-selante (plásticos zipado) para evitar ganho de umidade (Figura 3. 42). Os papéis filtro eram retirados do plástico auto-selante e colocados nos tubos (Figura 3. 43 e Figura 3. 44).



**Figura 3. 42** – Plástico auto-selante com papel-filtro.



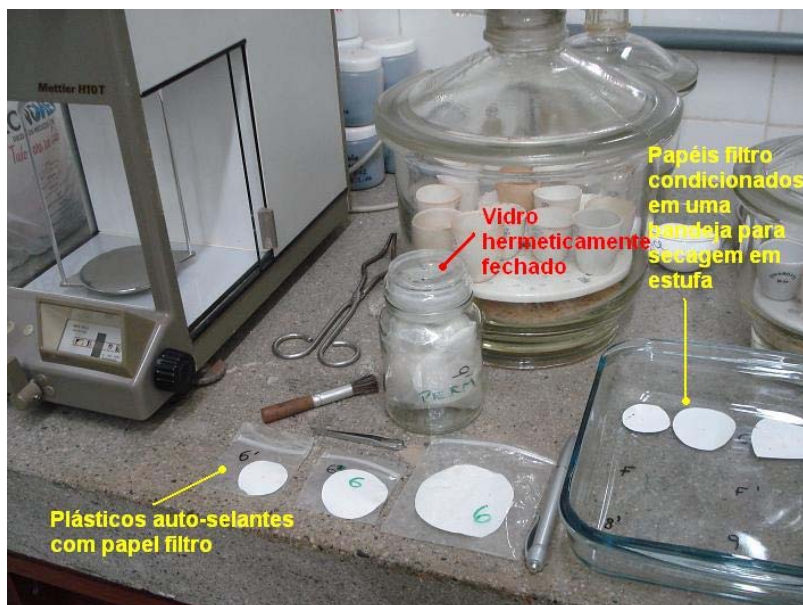
**Figura 3. 43 (a) (b)** – Colocação do papel-filtro de 4,5 cm no tubo.



**Figura 3. 44** - Colocação do papel filtro de 7 cm enrolado no arame espiralado dentro do tubo.

Encerrada esta bateria de ensaios, uma nova bateria de ensaios era realizada trocando-se os papéis úmidos, já equalizados com a umidade do solo, com novos

papéis-filtro. Os papéis-filtro condicionados no plástico auto-selante eram levados para o laboratório dentro de um recipiente de vidro hermeticamente fechado, para evitar perda de umidade (Figura 3. 45). A metodologia de pesagem do papel-filtro e a obtenção da sucção foram as mesmas descritas no ensaio de papel-filtro em laboratório (vide item 3.10.1.1).



**Figura 3. 45** – Papéis filtro condicionados em vidro hermeticamente fechado e em plástico auto-selante, prontos para serem pesados.

### 3.10 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Foram realizados os seguintes ensaios de laboratório: ensaio de papel filtro, ensaio de determinação da curva característica com câmara de pressão, ensaio de Inderbitzen e ensaio triaxial.

#### 3.10.1 – ENSAIO DE PAPEL FILTRO NO LABORATÓRIO

O ensaio de papel-filtro é estabelecido pela norma ASTM D 5298-03, sendo que alguns ajustes foram feitos. O papel-filtro não foi seco em estufa e nem tratado com fungicidas, para não alterar suas propriedades físico-químicas. Porém, houve desenvolvimento de fungos em diversos papéis-filtro, principalmente naqueles com tempo de equalização superior a 28 dias (Figura 3. 46). O papel-filtro utilizado foi o Whatman<sup>®</sup> n° 42.



**Figura 3. 46** – Papel-filtro contaminado por fungo.

As 24 amostras indeformadas das quatro parcelas do experimento foram saturadas e secas ao ar de forma gradual, com a realização dos ensaios a teores de umidade gradativamente menores. Foram feitos dois tipos de ensaios de papel-filtro: um ensaio com contato direto da amostra de solo com o papel-filtro, no qual se mediu a sucção matricial; e outro sem contato direto, no sentido de medir a sucção total.

### 3.10.1.1 – ENSAIO DE PAPEL FILTRO - SUCÇÃO MÁTRICA

O primeiro ensaio foi realizado no intuito de medir a sucção mátrica. Três papéis-filtro foram dispostos em cada lado da amostra em contato direto com a amostra de solo (Figura 3. 47). Somente o papel filtro do meio era pesado – os outros dois papéis serviam de proteção contra a impregnação de partículas do solo. O conjunto de papéis-filtro e o anel com a amostra de solo foram envoltos por três camadas de filme de PVC e duas de papel alumínio (Figura 3. 48, Figura 3. 49 e Figura 3. 50). O manuseio do papel-filtro foi com luvas cirúrgicas e pinças para evitar a contaminação do papel com a gordura das mãos.



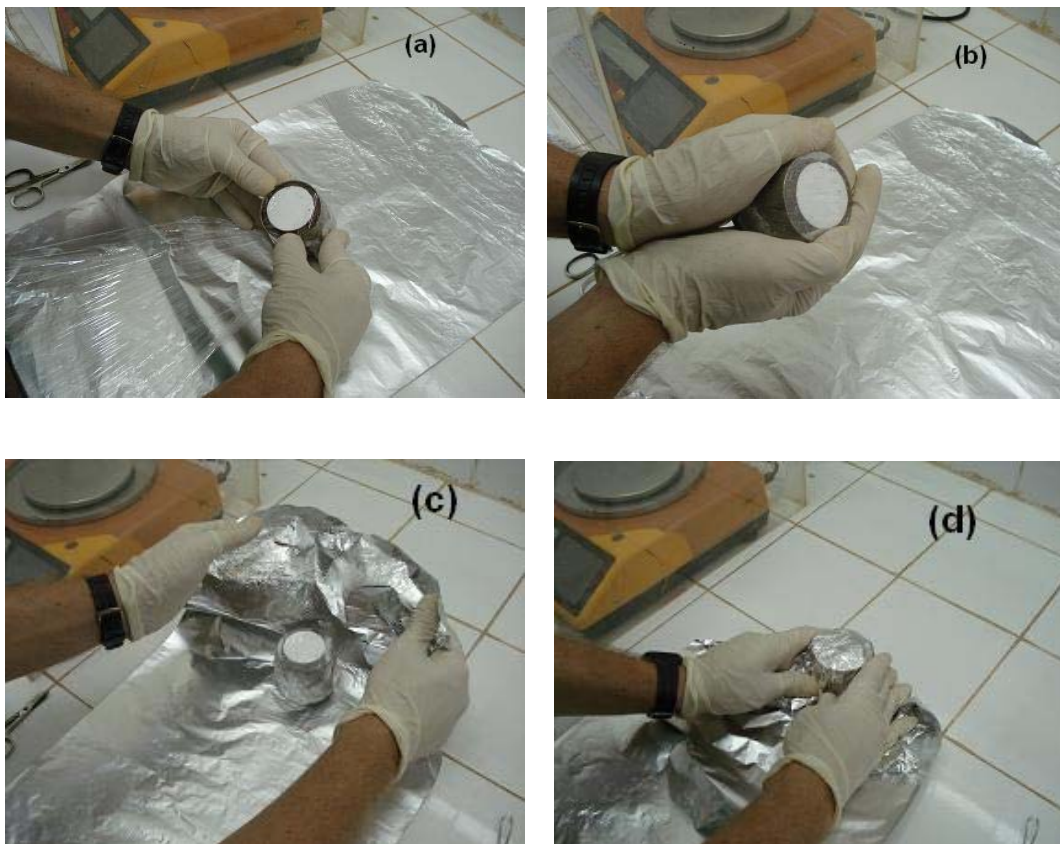
**Figura 3. 47**– Colocação do papel filtro na amostra indeformada de solo.

O invólucro com a amostra de solo devidamente selada e enumerada foi colocado em uma câmara úmida a 25°C por um período de 21 a 28 dias para que ocorresse a equalização da umidade do solo com o papel-filtro, sem a influência de mudanças de temperatura e umidade, conforme recomendação da norma ASTM D 5298-03.

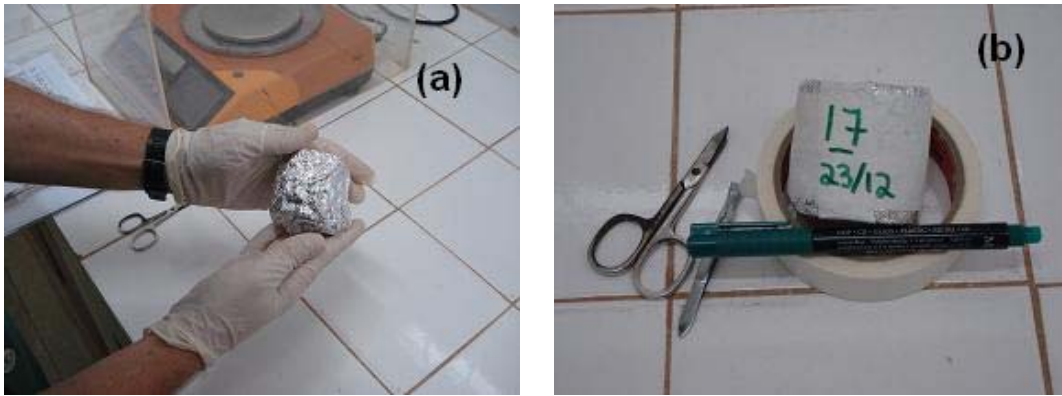




**Figura 3. 48** – Filme de PVC envolvendo a amostra com papel filtro para conter a umidade e permitir a equalização da água do solo e do papel filtro.



**Figura 3. 49** (a) (b) - Detalhes do envolvimento da amostra com o filme de PVC;  
(c) (d) - Recobrimento com papel alumínio.



**Figura 3. 50 (a)** - Invólucro com filme de PVC e papel alumínio; **(b)** - Invólucro revestido com fita crepe e devidamente classificado - pronto para o período de equalização na câmara úmida.

Após o período de equalização, as amostras eram retiradas da câmara úmida e o papel-filtro do meio, entre os três que foram postos de cada lado da amostra, era colocado rapidamente em um plástico zipado, para evitar perda de umidade, e pesado em uma balança (Mettler H10T) com precisão de 0,1 mg (Figura 3. 51). Eventuais impurezas contidas no papel filtro eram retiradas com um pincel (Figura 3. 52). O papel-filtro era retirado do plástico zipado e posto numa estufa para secagem a 105°C por um período de um dia. O plástico zipado era pesado para descontar a tara.



**Figura 3. 51** – Pesagem do papel filtro em balança de precisão de 0,1 mg.



**Figura 3. 52** – Retirada de impurezas do papel filtro.

O papel-filtro seco era retirado da estufa e colocado no mesmo instante em um plástico zipado, para que não absorvesse nenhuma umidade. O conjunto era pesado e o peso do plástico zipado descontado para se obter o peso do papel-filtro seco. Subtraindo o peso do papel-filtro úmido do seco obtinha-se o peso da água do papel-filtro e, dividindo este peso da água pelo peso do papel-filtro seco calculava-se a umidade do papel filtro.

CHANDLER *et al.* (1992) determinou a curva de calibração (sucção x umidade) para o papel filtro Whatman<sup>®</sup> n° 42, caracterizado pelas equações:

$$\Psi = 10^{(6,05 - 2,48 \log (w_p))} \quad \text{para } w_p > 47\% \quad (\text{Eq.3.7})$$

$$\Psi = 10^{(4,84 - 0,0622 w_p)} \quad \text{para } w_p \leq 47\% \quad (\text{Eq.3.8})$$

Onde:

$\Psi$  = sucção (kPa) e

$w_p$  = umidade do papel filtro (%)

### 3.10.1.2 – ENSAIO PAPEL FILTRO - SUCCÃO TOTAL

Este segundo tipo de ensaio de papel-filtro foi conduzido com o objetivo de se obter a sucção total. Neste caso, o papel-filtro não teve contato direto com a amostra de solo. Somente um papel-filtro foi colocado no topo e base do anel com a amostra de solo (Figura 3. 53 e Figura 3. 54). Uma placa esférica de plástico perfurada de 1,5 mm de espessura serviu de anteparo entre a amostra de solo e o papel-filtro (Figura 3. 55). A placa era perfurada de modo a permitir a troca de umidade entre a amostra de solo e o papel-filtro. Foi utilizada a mesma metodologia para a medida de sucção citada no item anterior (vide item 3.10.1.1).



**Figura 3. 53** – Ensaio de papel filtro para medir sucção total – pesagem do papel úmido após período de equalização.



**Figura 3. 54** - Colocação do papel filtro úmido no plástico zipado.



**Figura 3. 55** - Detalhe da placa perfurada.



### **3.10.1.3 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DO PAPEL FILTRO**

A estrutura do papel filtro foi analisada via microscopia eletrônica. Foram analisados 4 fragmentos de papel filtro em pares, sendo um par do mesmo lote de fabricação e o outro par de lotes diferentes.

O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi o “Scanning Electron Microscope” modelo JSM – 6460 LV da marca JEOL<sup>®</sup> com filamento de tungstênio, voltagem de aceleração de 20 kV e elétrons secundários.

As imagens foram processadas no Setor de Informática do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, obtendo-se a proporção das fibras maiores de amostras de papel filtro de lotes de fabricação diferentes e lotes de mesma fabricação. Um "plug in" (programa acessório que adiciona capacidade ao programa principal) do software Adobe Photoshop®, com ferramentas de filtragem especiais, foi utilizado para processar as imagens.

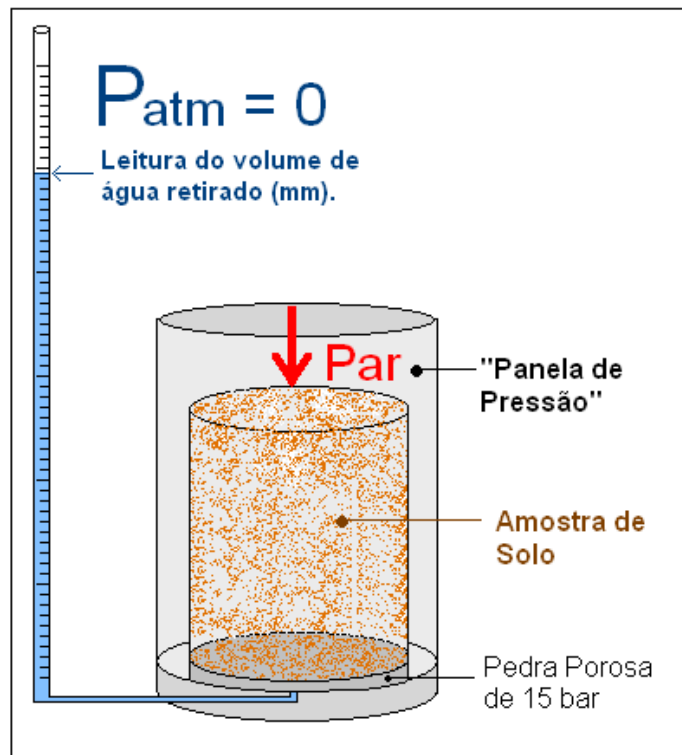
### 3.10.2– ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

O aparelho de determinação da curva característica de Fredlund utiliza o princípio da translação de eixos (Figura 3. 56). É um método simples que possibilita a determinação de pressões negativas altas (e.g., sucção do solo com baixo teor de umidade). A obtenção de pressões negativas elevadas (i.e., -1.000 kPa) é difícil, pois requer uma bomba de vácuo potente e onerosa (i.e., bomba de difusão). O equipamento de Fredlund retira a água do solo por pressão positiva, que pode chegar ao valor máximo de 1.500 kPa. Em termos agrônômicos, este valor é significativo, pois equivale ao ponto de murcha permanente (limite inferior de água disponível para a planta).



Figura 3. 56 – Aparelho de determinação da curva característica de Fredlund.

As amostras indeformadas de solo foram coletadas no campo com amostradores tipo Shelby, conforme descrito no item 3.3. Um anel próprio para o equipamento de Fredlund foi cravado na amostra indeformada de solo. A amostra é indeformada para manter a estrutura do solo e, sendo assim, representar fielmente as condições de campo. Após ser moldada, a amostra foi saturada por um período de 24 horas e colocada sobre uma pedra porosa de 15 bar na câmara de pressão. Em seguida, foi aplicada certa pressão positiva à câmara, que expulsou a água retida no solo até ser estabelecido o equilíbrio (Figura 3. 57).



**Figura 3. 57** – Princípio do funcionamento do aparelho de Fredlund.

$$\text{Sucção } (\Psi) = \text{Poro pressão do ar } (\mu_a) - \text{Poro pressão da água } (\mu_w)$$

Como a água, no tubo conectado à panela de pressão, está sob a pressão atmosférica, e:

$$P_{atm} = 0 \rightarrow \mu_w = 0$$

Sendo assim,

$$\Psi = \mu_a - 0 \rightarrow \Psi = \mu_a$$

Na condição de equilíbrio, a amostra de solo terá certa umidade volumétrica ( $\theta$ ) retida por uma específica sucção mátrica ( $\Psi_m$ ) que será equivalente à pressão do ar ( $Par$ ) aplicada à câmara ( $\Psi_m = Par$ ).

A umidade volumétrica, na condição de equilíbrio, é dada pela diferença entre o volume de água na condição saturada e o volume de água retirada pela pressão do ar (leitura no aparelho). Foram realizadas leituras diárias do volume de água expulso. O ponto de equilíbrio foi estabelecido quando a variação de volume em 24 horas não ultrapassava 1 unidade da escala de leitura. Neste momento, aumentava-se a pressão do ar para determinar outro ponto ( $\Psi_m, \theta$ ) da curva característica.

Para,

1.  $Par_1 = \Psi_{m1} \rightarrow \theta_1$ ;
2.  $Par_2 = \Psi_{m2} \rightarrow \theta_2$ ;
3.  $Par_3 = \Psi_{m3} \rightarrow \theta_3$ ;

E, assim por diante, até atingir o mínimo de oito pontos para se obter uma curva característica bem representativa. Optou-se pelas seguintes pressões de ar: 10, 20, 40, 60, 100, 200, 400, 600 e 800 kPa.

### 3.10.3 – ENSAIO DE INDERBITZEN

Verificou-se a erodibilidade do solo da parcela hidro-erosiva da olericultura com o equipamento idealizado por INDERBITZEN (1961). O ensaio de Inderbitzen consiste basicamente em infringir um escoamento superficial a uma amostra indeformada de solo e, avaliar a quantidade de sedimentos gerados, os volumes de escoamento e os de infiltração em determinados intervalos de tempo. A duração do ensaio é de aproximadamente uma hora e meia.

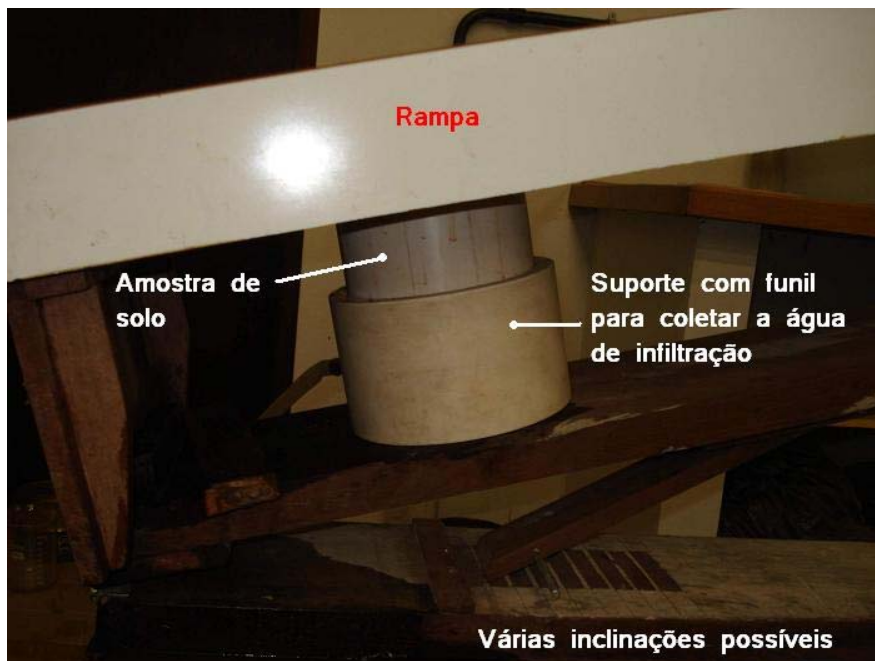
O equipamento utilizado no ensaio de Inderbitzen consiste de uma rampa inclinável coberta de fórmica com um furo para o encaixe da amostra de solo (Figura 3.58).



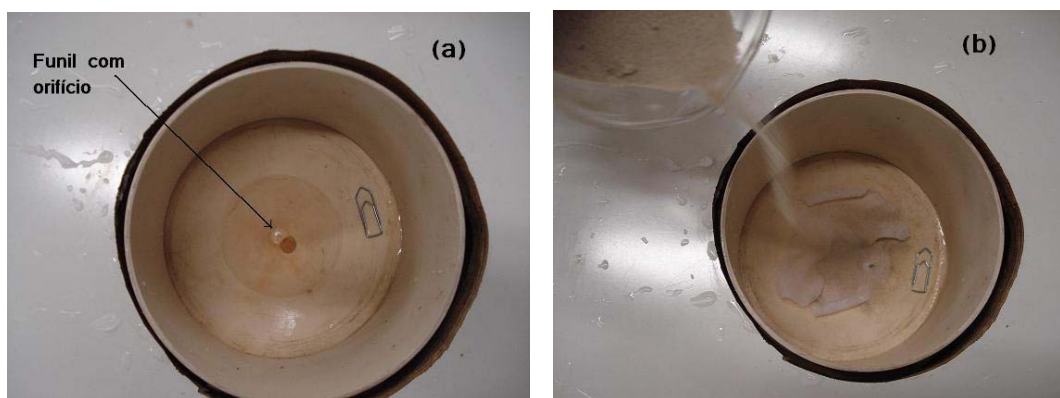
Figura 3. 58 - Equipamento para realização do ensaio de Inderbitzen.

Primeiramente, ajustou-se a inclinação da rampa. Foram realizados ensaios com duas inclinações (10° e 22°) (Figura 3. 59). Depois, posicionou-se a amostra de solo no orifício da rampa e, preencheram-se as lacunas com massa de calafetar.

A coleta de água de infiltração foi feita através de um funil de PVC maciço, que foi direcionado para uma proveta através de uma mangueira de ½". O funil foi preenchido com areia para servir de base, e um pano de talagarça (tecido de algodão) foi colocado no fundo para impedir o entupimento do orifício do funil (Figura 3. 60).



**Figura 3. 59** - Detalhe da inclinação da rampa.



**Figura 3. 60 (a)** – Detalhe do funil posicionado na rampa; **(b)** – Funil com tela sendo preenchido com areia.

A vazão do escoamento superficial foi mantida constante mediante a manutenção de certa altura de coluna d água (Figura 3. 61). A vazão utilizada no



ensaio de 47 ml/s está próximo ao valor de 50 ml/s proposto por FÁCIO (1991) com o intuito de padronizar o ensaio. Foi colocado um pano de talagarça (murim) sobre a rampa para homogeneizar o fluxo de água (Figura 3. 62).

Durante o ensaio, coletou-se o volume escoado e o volume infiltrado em seis etapas com intervalos de tempo de 5, 10, 15, 30, 45 e 60 minutos (Figura 3. 63). Os sedimentos gerados pelo escoamento superficial foram coletados nos mesmos intervalos de tempo em peneiras ABNT # 10 e 200. Utilizou-se um conjunto de peneiras #10 e 200 para cada uma das seis etapas do ensaio (Figura 3. 58). Os sedimentos retidos nas peneiras eram lavados para retirar as partículas de argila aderidas e, fluídas para um becher por meio de um pissete. O becher era tarado e levado à estufa para evaporar a água. O peso dos sedimentos foi estipulado descontando o peso da tara. Os sedimentos em suspensão foram mensurados com um densímetro.

Foram realizados oito ensaios com inclinações de 10° e 22° e dois teores de umidade diferentes em quatro amostras indeformadas de solo (vide item 3.3) da parcela hidro-erosiva da olericultura. Optou-se por realizar o ensaio de Inderbitzen somente com amostras da parcela da olericultura, por ser a única parcela com produção de sedimentos significativa.



Figura 3. 61 - Detalhe do controle de vazão.



**Figura 3. 62** - Detalhe da rampa com talagarça.



**Figura 3. 63** - Coleta da água de infiltração.



### 3.10.4 – ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO

Este ensaio avalia qualitativamente a desagregabilidade do solo frente a diferentes níveis de submersão. A desagregabilidade do solo está diretamente relacionada com a erodibilidade.

Foram realizados 8 ensaios com inundação parcial (4) e total (4), aproveitando-se os corpos de provas cilíndricos ( $\Phi = 49$  mm e  $H = 53$  mm) utilizados nos ensaios com papel filtro, referente aos solos das parcelas hidro-erosivas (Figura 3. 64). A inundação total consiste em submergir, instantaneamente, o corpo de prova totalmente em água. A metodologia utilizada nos ensaios foi a preconizada por SANTOS (1997) e SANTOS e CARVALHO (1998). Optou-se por utilizar água corrente por melhor representar as condições de campo. Cada corpo de prova foi ensaiado isoladamente para não haver interferência no fenômeno da desagregação. Este ensaio tem como característica avaliar o efeito da sucção do solo na desagregabilidade da amostra de solo. Neste caso, o ar ocluso não é expelido e a poro pressão do ar é significativa (sucção = poro pressão da água – poro pressão do ar).

No ensaio com inundação parcial, a amostra de solo foi colocada sob uma pedra porosa com água até a sua base por 30 minutos. Após este período, aumentou-se o nível d'água até 1/3 da altura do corpo de prova por um intervalo de tempo de 15 minutos. O nível d'água tornou a ser elevado, desta vez, até 2/3 da sua altura por mais 15 minutos. Após estes estágios, a amostra foi completamente imersa por um período de 24 horas, e a desagregação das amostras foram avaliadas. A sucção do solo não é avaliada neste ensaio, pois a poro pressão do ar não é significativa, visto que o ar é gradativamente expelido pela imersão gradativa.

A avaliação qualitativa da desagregação dos corpos de prova seguiu a seguinte classificação (HOLMGREN e FLANAGAN, 1977 *apud* SANTOS, 1997):

- **Sem resposta;**
- **Abatimento** – A amostra se desintegra, formando uma pilha de material desestruturado;
- **Fraturamento** – O corpo de prova se quebra em fragmentos mantendo a forma original das faces externas;
- **Dispersão** – As paredes dos corpos de prova se tornam difusas, e a água turva pela dispersão coloidal.



**Figura 3. 64** – Ensaio de desagregação.

### 3.10.5 - ENSAIO TRIAXIAL

O objetivo principal dos ensaios triaxiais foi a obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Foram realizados 4 ensaios triaxiais para poder traçar a envoltória de resistência segundo os critérios de Mohr. O ensaio consiste basicamente em um carregamento axial aplicado em um corpo de prova sob condições hidrostáticas.

O cilindro tipo Shelby com a amostra indeformada foi retirado da câmara úmida, e teve que ser serrado para liberar a amostra. O corpo de prova foi moldado a partir desta amostra (Figura 3. 65), e envolvido em uma membrana de látex (Figura 3. 66) e montado na câmara do ensaio triaxial (Figura 3. 67). A câmara foi preenchida com água, e a amostra foi saturada.

A ruptura do corpo de prova foi do tipo plástica com embarrigamento (Figura 3. 68).



**Figura 3. 65** – Moldagem do corpo de prova.



**Figura 3. 66** – Encamisamento do corpo de prova.



**Figura 3. 67** – Equipamento para o ensaio triaxial.



**Figura 3. 68** – Resultado do ensaio triaxial.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 – PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA DO AR

As precipitações mensais e as temperaturas máximas e mínimas mensais registradas na área de estudo estão listadas nas Figura 4. 1 e Figura 4. 2. Nota-se uma estação de baixa precipitação entre Abril e Setembro. A temperatura do ar é amena com uma acentuada amplitude térmica durante todo o ano, com uma estação de inverno bem definida de Maio a Julho.

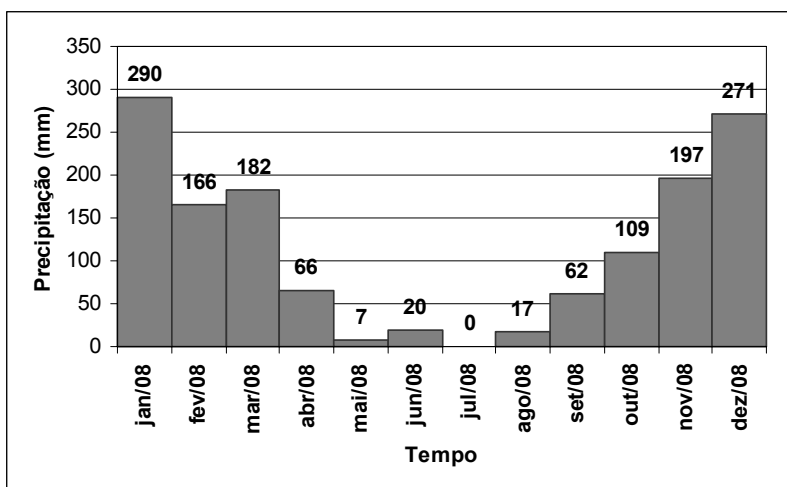


Figura 4. 1 – Médias das precipitações no ano de 2008.

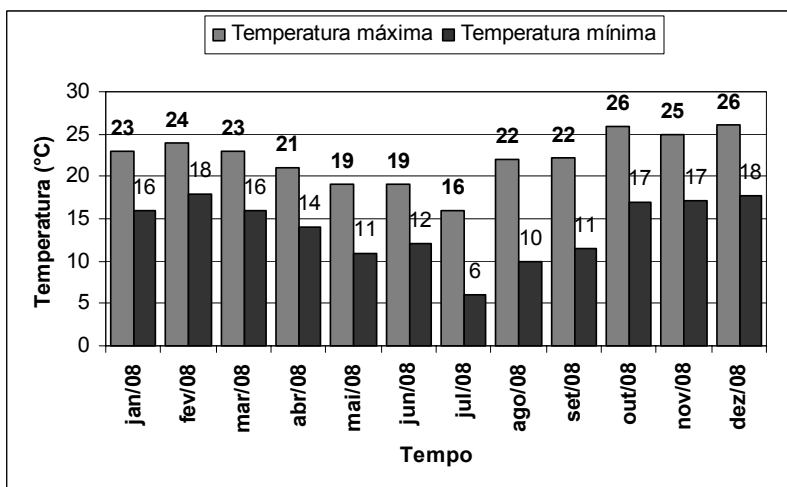


Figura 4. 2 – Médias das temperaturas máximas e mínimas para o ano de 2008.

## 4.2 – DESCRIÇÃO DO PERFIL DO SOLO

**PERFIL – 01**                      **Data:** 11/09/08

**Classificação:** LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, textura argilosa, A moderado, álico, fase floresta tropical perenifólia, relevo forte ondulado.

**Localização, município, estado e coordenadas:** Córrego Sujo, Teresópolis, Estado do Rio de Janeiro. Coordenadas 0725665 mN e 7541813 mE.

**Situação, declive e cobertura vegetal sobre o perfil:** perfil coletado em trincheira aberta em terço superior de encosta com aproximadamente 40% declive, sob cobertura de capim gordura.

**Cronologia:** Neoproterozóico.

**Formação geológica:** Unidade Serra dos Órgãos.

**Litologia:** Granitóides.

**Material originário:** Produto da alteração da litologia supracitada.

**Pedregosidade:** ausente.

**Rochosidade:** ausente.

**Relevo local:** forte ondulado.

**Relevo regional:** forte ondulado a montanhoso.

**Orientação da encosta:** sul/sudeste

**Plano de curvatura:** convexa

**Erosão:** laminar moderada.

**Drenagem:** bem drenado.

**Vegetação primária:** floresta tropical perenifólia.

**Uso atual:** pastagem.

**Descrito e coletado por:** César da Silva Chagas e Mario Nacinovic.

### Descrição Morfológica

<b>Ap</b>	0-18cm, vermelho-amarelado (5YR 4/6, úmida); franco-argilo-arenosa; moderada média e grande granular; firme, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
<b>A2</b>	18-34cm, vermelho-amarelado (5YR 4/6, úmida); franco-argilo-arenosa; fraca a moderada pequena e média blocos subangulares; firme, plástica e pegajosa; transição plana e clara.
<b>AB</b>	34-53cm, vermelho-amarelado (5YR 4,5/6, úmida); argila arenosa; fraca média e grande blocos subangulares; firme, plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
<b>BA</b>	53-74cm, bruno-avermelhado (5YR 5/4, úmida); argila arenosa; fraca média e grande blocos subangulares; friável a firme, plástica e pegajosa; transição plana e gradual.
<b>Bw1</b>	74-111cm, vermelho-amarelado (4YR 5/8, úmida); argila arenosa; fraca média e grande blocos subangulares; friável, plástica e pegajosa; transição plana e difusa.
<b>Bw2</b>	111-160cm, vermelho (3,5YR 5/8, úmida); argila arenosa; fraca média e grande blocos angulares e subangulares que se desfazem em forte muito pequena granular; friável, plástica e pegajosa.
<p><b>Observações:</b> perfil representativo das parcelas de erosão com pastagem e área de recuperação florestal.</p>	

<p><b>Poros:</b> muitos pequenos e médios no A, AB; comuns pequenos e médios no BA; comuns muito pequenos e pequenos no Bw1 e Bw2.</p>
<p><b>Raízes:</b> comuns finas no Ap; poucas finas no A2, AB e BA; poucas muito finas no Bw1 e Bw2.</p>

### 4.3 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA E LIMITES DE ATTERBERG

Os ensaios de caracterização granulométrica do perfil do solo estão resumidos na Tabela 4. 1 e; os das amostras das parcelas estão na Tabela 4. 2. A classe textural dos horizontes do perfil do solo determinada pela caracterização granulométrica é “argila”. As classes de textura dos solos das parcelas hidro-erosivas estão na Tabela 4. 3. O triângulo de classes de textura das amostras de solos do perfil do solo e das parcelas hidro-erosivas está na Figura 4. 3.

As curvas granulométricas das amostras dos horizontes do perfil do solo estão na Figura 4. 4 e Figura 4. 5.

As curvas granulométricas das amostras dos solos das parcelas hidro-erosivas estão na Figura 4. 6, Figura 4. 7, Figura 4. 8, Figura 4. 9, Figura 4. 10, Figura 4. 11, Figura 4. 12 e Figura 4. 13.

**Tabela 4. 1 – Caracterização granulométrica e limites de Atterberg dos horizontes do perfil do solo junto a área da pastagem.**

Horizonte	Profundidade (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)			Pedregulho (%)	Densidade Real	Umidade Higroscópica (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
				Fina	Média	Grossa						
<b>Ap</b>	0 - 18	41	15	8	14	17	5	2,616	1,850	52	21	31
<b>A2</b>	18 - 34	44	15	8	13	17	3	2,644	1,816	55	22	33
<b>AB</b>	34 - 53	50	12	8	11	16	3	2,659	1,720	54	20	34
<b>BA</b>	53 - 74	47	12	6	13	18	4	2,638	1,639	51	20	31
<b>Bw1</b>	74 - 111	52	12	7	9	16	4	2,659	1,079	67	25	42
<b>Bw2</b>	111 - 160	45	18	7	9	17	4	2,653	0,982	62	24	36



**Tabela 4. 2** - Caracterização granulométrica e limites de Atterberg das amostras de solo das parcelas hidro-erosivas.

Amostra	Tipo de Cultivo	Profundidade (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)			Pedregulho (%)	Densidade Real	Umidade Higroscópica (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
					Fina	Média	Grossa						
1.1	Olericultura	30	30	28	11	20	9	2	2,749	1,798	64,0	24,0	40,0
1.2	Olericultura	30	29	26	14	19	9	3	2,738				
2.1	Olericultura	60	17	26	12	30	13	2	2,744	1,691	63,0	22,0	41,0
2.2	Olericultura	60	27	29	13	19	9	3	2,746				
3.1	Olericultura	90	40	22	12	15	10	1	2,745	1,740	69,0	26,0	43,0
3.2	Olericultura	90	37	24	12	16	9	2	2,684				
4.1	Pastagem	30	48	10	6	15	20	1	2,581	2,084	54,8	21,2	33,6
4.2	Pastagem	30	46	12	7	14	19	2	2,588				
5.1	Pastagem	60	56	8	6	12	16	2	2,631	2,148	54,9	22,5	32,4
5.2	Pastagem	60	57	10	7	11	20	2	2,611				
6.1	Pastagem	90	53	7	6	11	19	4	2,661	1,697	55,2	23,4	31,8
6.2	Pastagem	90	51	7	9	11	20	4	2,641				
7	Rec. Florestal	30	53	14	6	12	13	2	2,608	2,669	57,7	22,6	35,1
8	Rec. Florestal	60	53	13	6	12	14	2	2,639	3,115	54,8	21,6	33,2
9	Rec. Florestal	90	54	12	6	11	14	3	2,659	2,333	58,5	23,9	34,6
10	Floresta	30	16	23	8	20	30	3	2,481	3,625	NP	NP	NP
11	Floresta	60	17	22	8	21	24	8	2,512	2,134	NP	NP	NP
12	Floresta	90	22	17	10	19	26	6	2,521	2,562	NP	NP	NP

**Tabela 4. 3** – Classes de textura dos solos das parcelas hidro-erosivas.

Amostra	Tipo de Cultivo	Prof. (cm)	Classe de Textura	Amostra	Tipo de Cultivo	Prof. (cm)	Classe de Textura
1.1	Olericultura	30	franco-argilosa	5.2	Pastagem	60	argila
1.2	Olericultura	30	franco-argilosa	6.1	Pastagem	90	argila
2.1	Olericultura	60	franco-arenosa	6.2	Pastagem	90	argila
2.2	Olericultura	60	franca	7	Rec.Florestal	30	argila
3.1	Olericultura	90	franco-argilosa	8	Rec.Florestal	60	argila
3.2	Olericultura	90	franco-argilosa	9	Rec.Florestal	90	argila
4.1	Pastagem	30	argila	10	Floresta	30	franco-arenosa
4.2	Pastagem	30	argila	11	Floresta	60	franco-arenosa
5.1	Pastagem	60	argila	12	Floresta	90	franco-argilo-arenosa

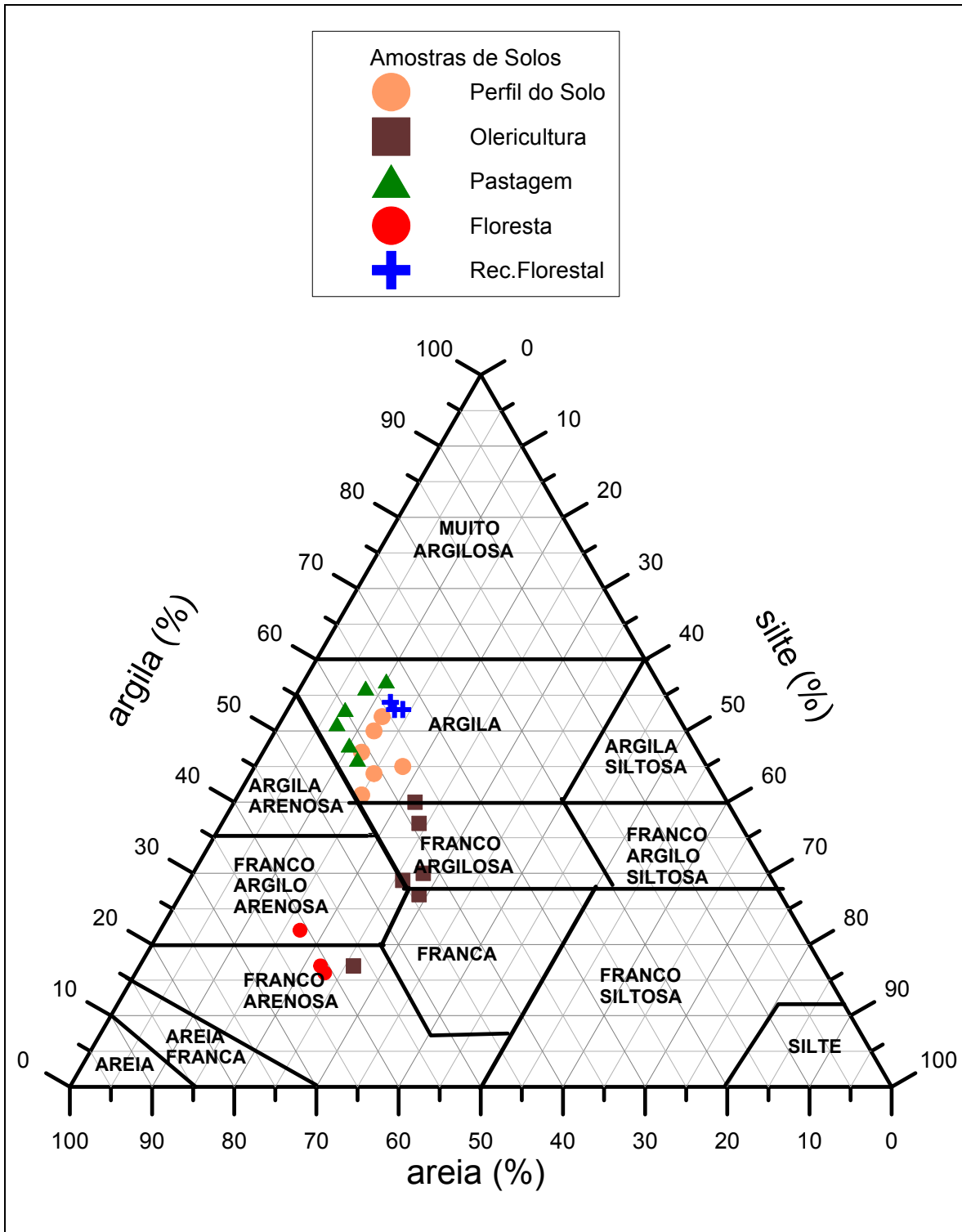
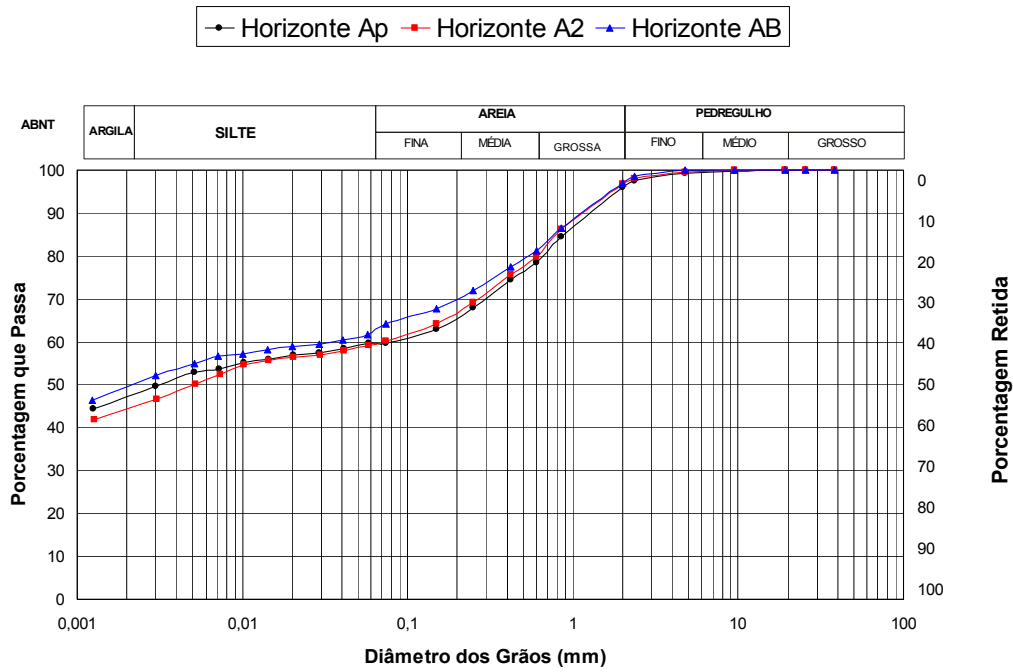
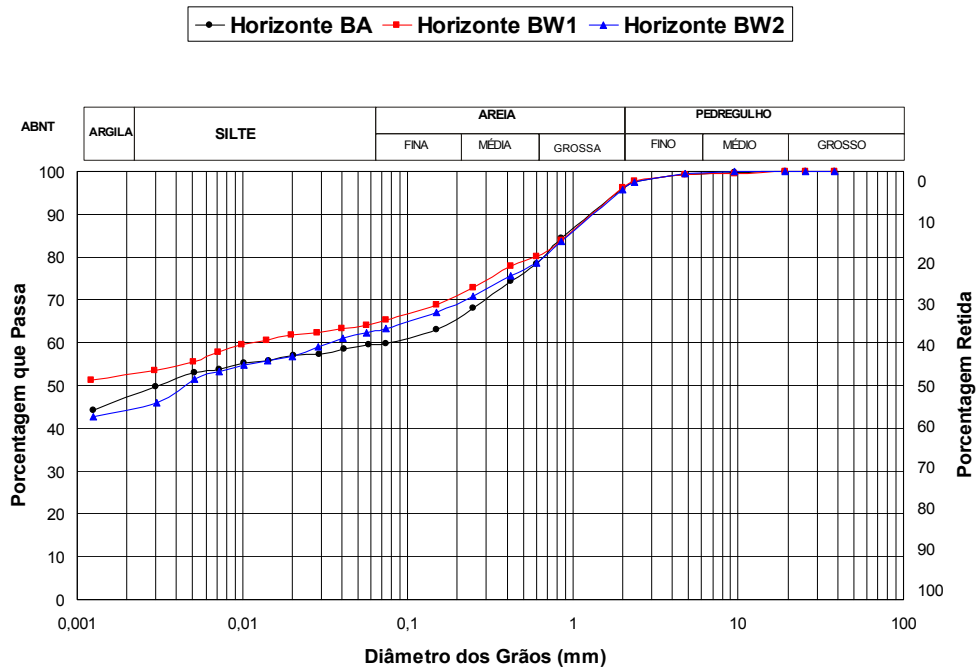


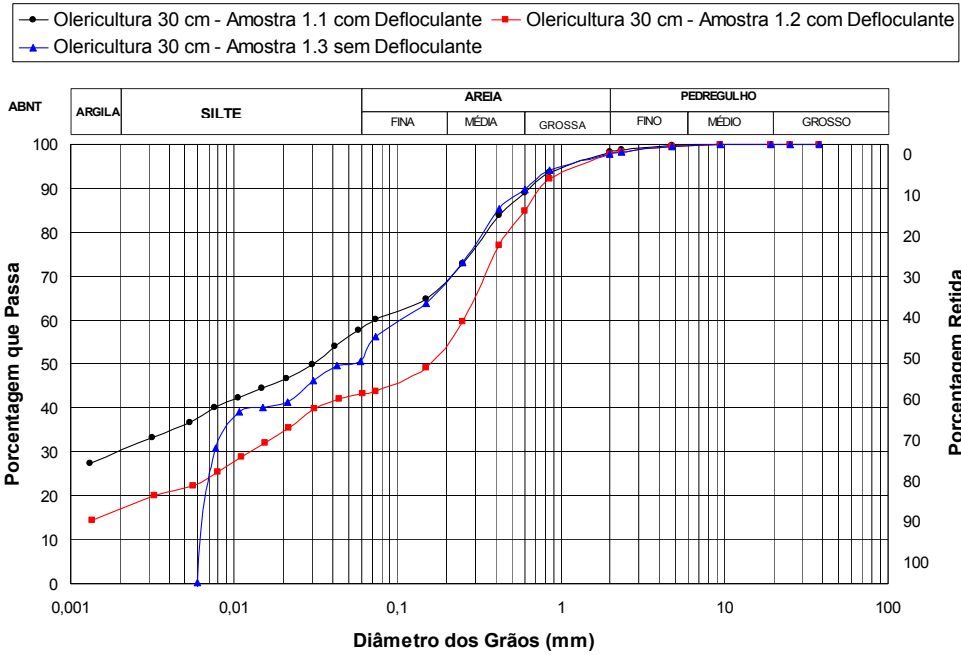
Figura 4. 3 – Triângulo de classes de textura preconizada pela EMBRAPA (1979).



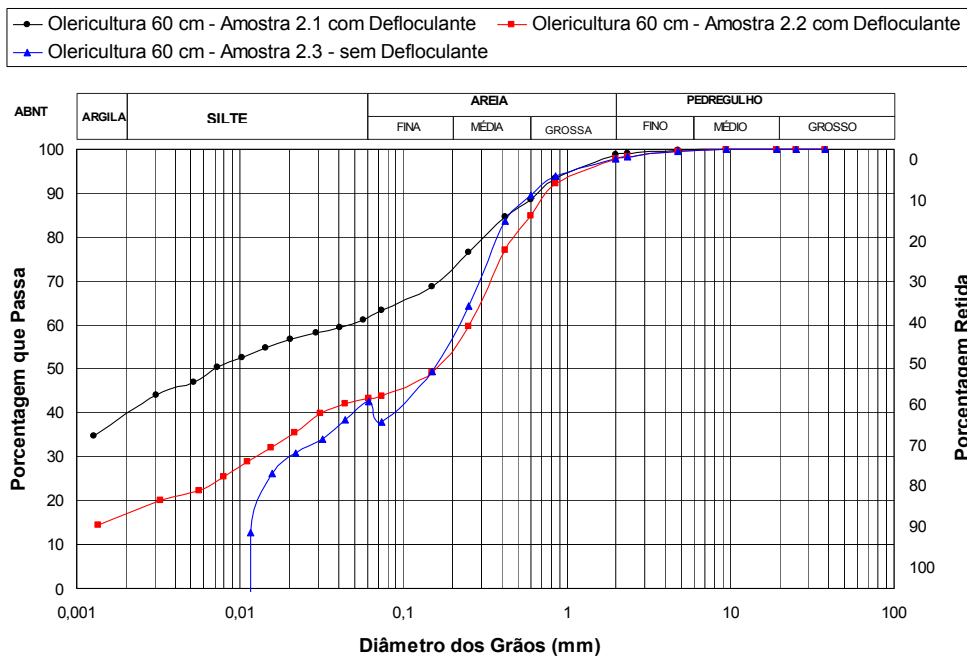
**Figura 4. 4** - Curvas granulométricas dos horizontes AP, A<sub>2</sub> e AB.



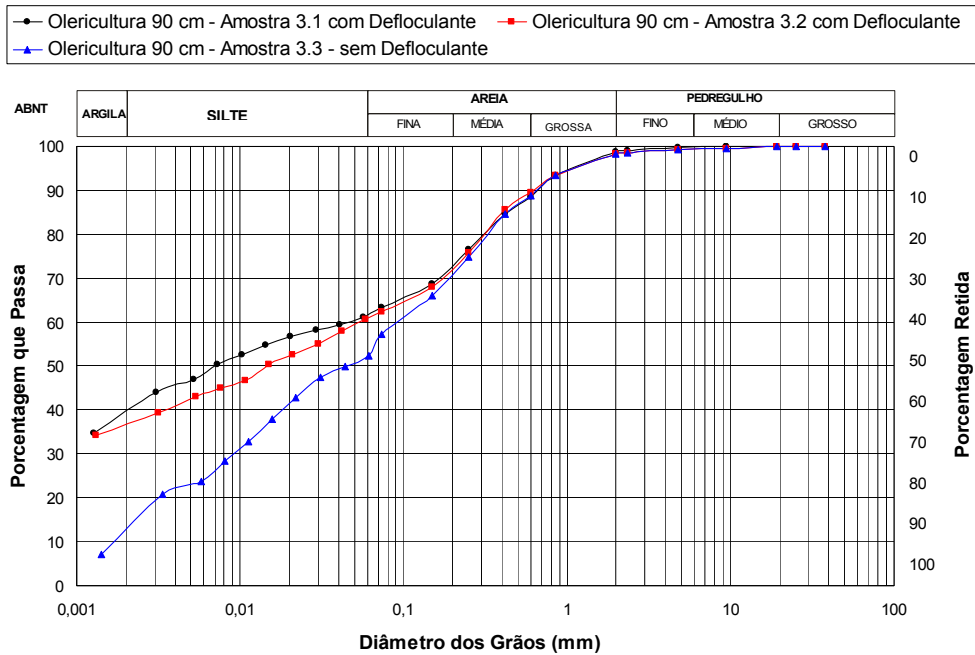
**Figura 4. 5** - Curvas granulométricas dos horizontes BA, Bw<sub>1</sub> e Bw<sub>2</sub>.



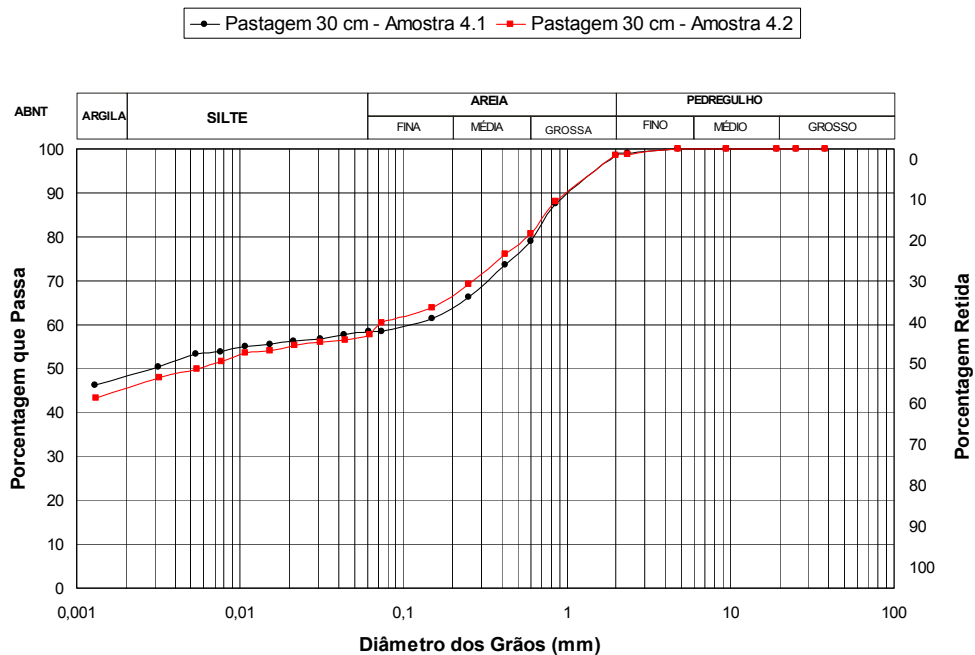
**Figura 4. 6** – Curvas granulométricas das amostras 1.1, 1.2 e 1.3 da parcela da olericultura (30 cm).



**Figura 4. 7** – Curvas granulométricas das amostras 2.1, 2.2 e 2.3 da parcela da olericultura (60 cm).

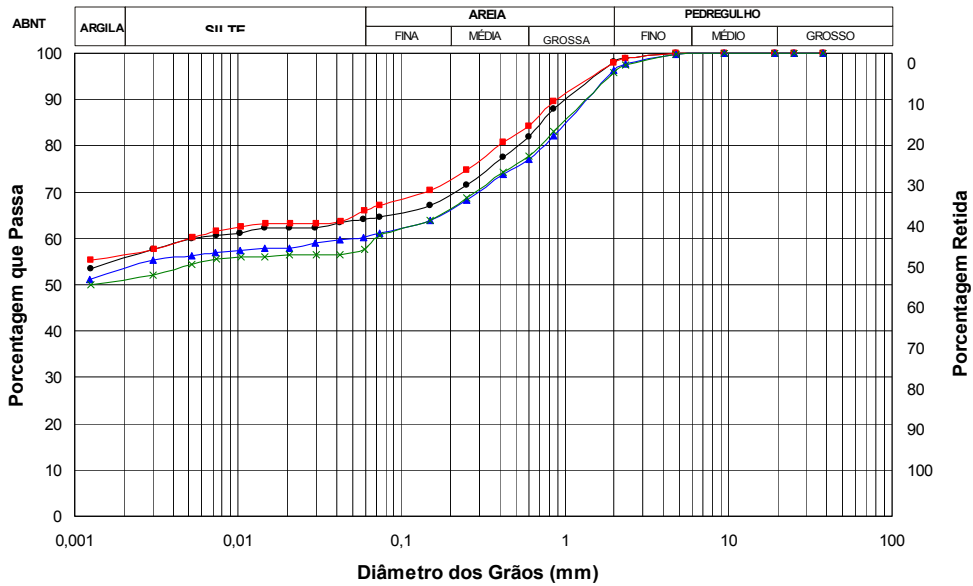


**Figura 4. 8** – Curvas granulométricas das amostras 3.1, 3.2 e 3.3 da parcela da olericultura (90 cm).



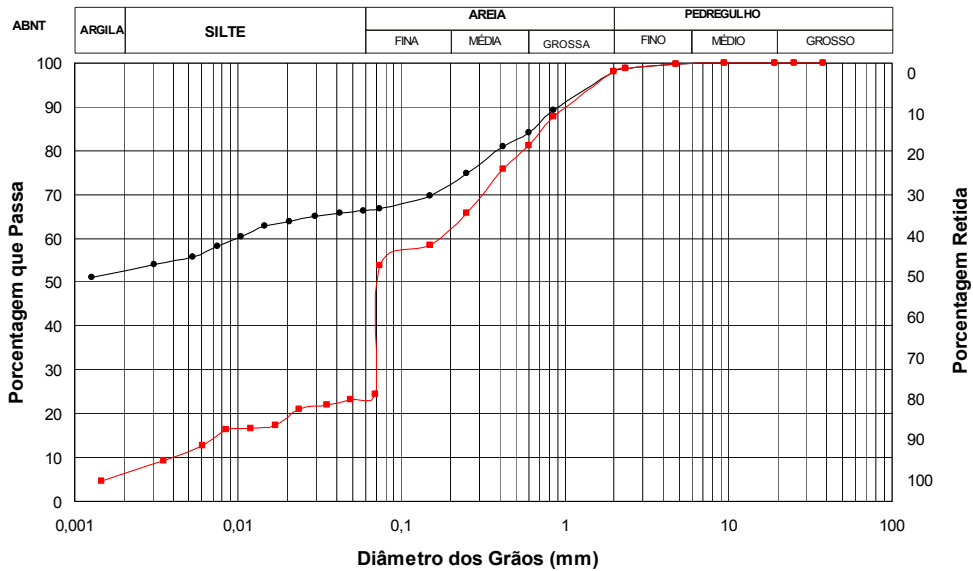
**Figura 4. 9** – Curvas granulométricas das amostras 4.1 e 4.2 da parcela da pastagem (30 cm).

—●— Pastagem 60 cm - Amostra 5.1 —■— Pastagem 60 cm - Amostra 5.2 —▲— Pastagem 90 cm - Amostra 6.1 —×— Pastagem 90 cm - Amostra 6.2



**Figura 4. 10** – Curvas granulométricas das amostras 5.1, 5.2, 6.1 e 6.2 da parcela da pastagem (60 e 90 cm).

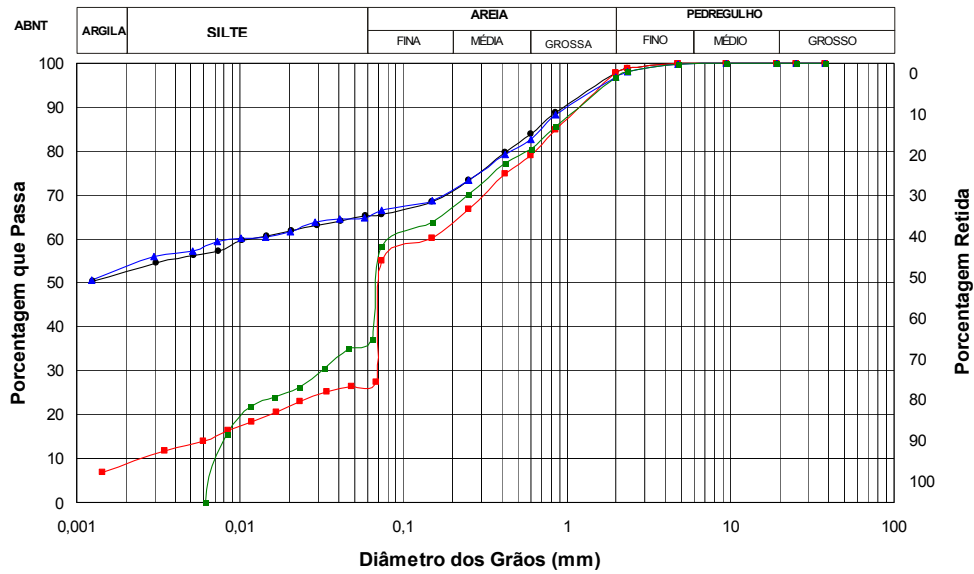
—●— Rec. Florestal 30 cm - Amostra 7.1- com Defloculante —■— Rec. Florestal 30 cm - Amostra 7.2 - sem Defloculante



**Figura 4. 11** – Curvas granulométricas das amostras 7.1 e 7.2 da parcela da recuperação florestal (30 cm).

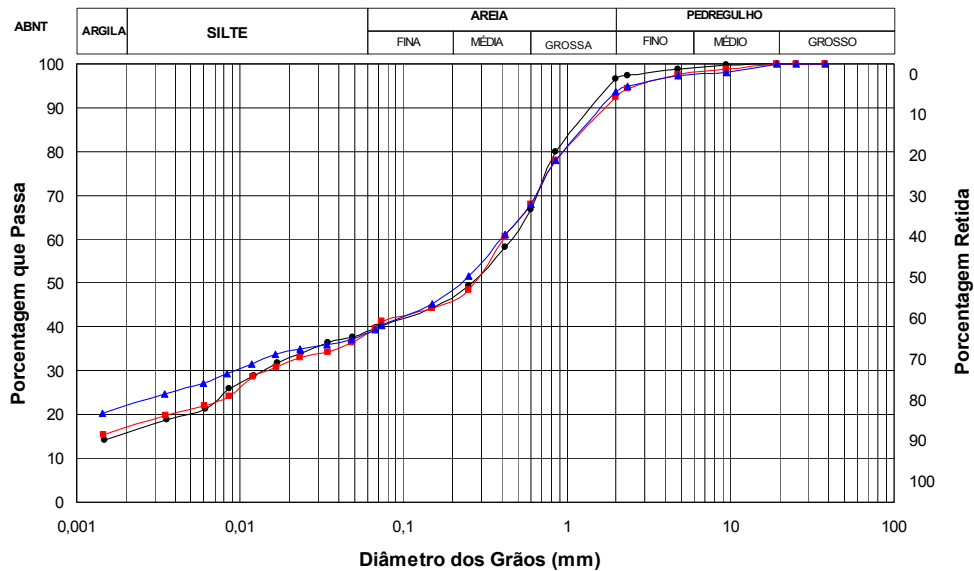


—●— Rec. Florestal 60 cm - Amostra 8.1 - com Defloculante    —■— Rec. Florestal 60 cm - Amostra 8.2 - sem Defloculante  
 —▲— Rec. Florestal 90 cm - Amostra 9.1- com Defloculante    —■— Rec. Florestal 90 cm - Amostra 9.2 - sem Defloculante



**Figura 4. 12** – Curvas granulométricas das amostras 8.1, 8.2, 9.1 e 9.2 da parcela da recuperação florestal (60 e 90 cm).

—●— Floresta 30 cm - Amostra 10    —■— Floresta 60 cm - Amostra 11    —▲— Floresta 90 cm - Amostra 12



**Figura 4. 13** – Curvas granulométricas das amostras 10, 11 e 12 da parcela da floresta (30, 60 e 90 cm).

#### 4.3.1 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

As curvas granulométricas dos horizontes do perfil do solo têm praticamente o mesmo comportamento o que significa que os horizontes têm pouca diferença granulométrica o que é característico de um latossolo. O horizonte  $BW_1$  possui um acréscimo de 5% de argila em relação ao horizonte superior BA assinalando uma zona de iluviação de argila, que não é significativo a ponto de diagnosticar um B textural.

As curvas granulométricas das amostras do perfil do solo são parecidas com as das parcelas hidro-erosivas da pastagem e da área de recuperação florestal. O perfil do solo (Figura 3. 1) é representativo destas duas parcelas. Sendo assim, a descrição morfológica do perfil do solo será a mesma para os solos destas parcelas.

As curvas granulométricas da pastagem, área de recuperação florestal e floresta diferem pouco com a profundidade (30, 60 e 90 cm) caracterizando uma mudança textural suave própria dos latossolos.

Comparando as curvas granulométricas com e sem defloculante nota-se a presença marcante de macro e microagregados nos solos das parcelas da olericultura e recuperação florestal devida às quedas abruptas das curvas para todas as profundidades (Figura 4. 6, Figura 4. 7, Figura 4. 8, Figura 4. 11 e Figura 4. 12). A formação de agregados no solo da parcela hidro-erosiva da olericultura deve-se, provavelmente, a ação cimentante do carbonato de cálcio, proveniente da calagem rotineira. A agregação não é tão notória aos 90 cm de profundidade, devido à diminuição do teor de carbonato de cálcio, pelo fato da calagem ser feita superficialmente. Os agregados do solo da parcela da área de recuperação florestal se devem a ação cimentante da matéria orgânica. Pode-se admitir que os solos da pastagem e floresta tenham boa agregação devido aos seus altos teores de matéria orgânica (Tabela 4. 4).

Segundo CHANDLER *et al.* (1992) deve-se tomar cuidado com a transição de horizontes na coleta de amostras. Uma amostra coletada nesta zona de transição não irá ser representativa de nenhum destes horizontes. A amostra de solos das parcelas hidro-erosivas da pastagem e área de recuperação florestal coletadas a 30 cm não representam o horizonte A2 (18 – 34 cm) e nem o horizonte AB (34 – 53 cm), pelo fato

de terem sido extraídas de uma zona de transição plana e clara de horizontes. Já no caso das amostras de solos, destas mesmas parcelas hidro-erosivas, coletadas a 60 e 90 cm, ficou clara a representatividade dos horizontes BA (53 – 74 cm) e BW1 (74 – 111 cm) respectivamente, característico destas parcelas pela descrição do perfil do solo, visto que foram coletadas fora da zona de transição; e pelo fato da transição ser plana e gradual para o BA e plana e difusa para o BW1. Pode-se afirmar que as amostras de solos do perfil do solo são representativas destes horizontes para as áreas das parcelas da pastagem e área de recuperação florestal, visto que os solos destas parcelas possuem uma transição plana. As amostras de solos a 30, 60 e 90 cm da parcela da floresta também foram representativas dos solos desta parcela, pois a transição entre horizontes é plana e gradual. A tendência e proximidade das curvas granulométricas das amostras de solos destas parcelas certificam este fato (Figura 4. 9, Figura 4. 10, Figura 4. 11, Figura 4. 12 e Figura 4. 13).

As amostras dos solos da parcela hidro-erosiva da olericultura não foram representativas dos horizontes superiores de uma camada de latossolo típica. As curvas granulométricas das amostras de solos da parcela da olericultura possuem traçados diferenciados caracterizando classes texturais distintas (Figura 4. 6, Figura 4. 7 e Figura 4. 8). Do mesmo modo, o triângulo de classe de textura sinaliza o mesmo fato, pois apresenta uma dispersão de pontos para as amostras da parcela da olericultura (Figura 4. 3). A sistematização do terreno na implantação da irrigação expôs o horizonte C, caracterizado por um saprolito de gnaiss. O solo é constituído por uma miscelânea de horizonte C, onde há influência de bandas diferenciadas de solos típicos do intemperismo de gnaiss, que são rochas metamórficas com composição mineralógica em níveis e foliação (xistosidade).

A textura mais siltosa dos solos da parcela da olericultura o torna mais susceptível à erosão em relação aos outros solos estudados.

O limite de plasticidade foi obtido com amostras seca ao ar, para manter a capacidade de hidratação dos solos, em vista aos teores elevados de matéria orgânica. O limite de plasticidade deve ser usado com restrições tendo em vista que a estrutura do solo é desfeita por ocasião dos ensaios. Todavia, serve como indicação do grau de coesão do solo, pois a plasticidade de um solo provém da interação entre as partículas da fração argila (YONG e WARKENTIN, 1975).

#### 4.4 – ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DE SOLOS

Os resultados da análise físico-química dos solos são apresentados na Tabela 4. 4 e Tabela 4. 5.

**Tabela 4. 4 – Resultados da análise físico-química das amostras de solos das parcelas hidro-erosivas.**

Tipo de Cultivo	Profundidade (cm)	Amostra	pH		$\Delta$ pH	M.O (g/kg)	ATAQUE SULFÚRICO						
			H <sub>2</sub> O	KCl 1M			$\Delta$ P (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Ki	Kr	Res. (%)
Olericultura	30	1.1	7,97	6,92	-1,05	5,41	9,98	32,2	21,4	15,8	2,56	1,74	15,85
		1.2	6,33	6,27	-0,06	7,90	8,42	32,4	18,1	13,4	3,04	2,06	28,42
	60	2.1	7,42	6,07	-1,35	2,66	7,77	34,7	17,5	13,6	3,37	2,25	30,94
		2.2	6,11	6,07	-0,04	5,91	8,67	33,5	19,2	13,3	2,97	2,06	25,07
	90	3.1	7,23	6,44	-0,79	6,04	8,05	34,6	13,4	13,9	4,39	2,64	25,45
		3.2	5,63	5,59	-0,04	23,31	8,92	28,8	16,1	7,1	3,04	2,38	34,76
Pastagem	30	4.1	4,80	4,02	-0,78	56,91	13,44	24,0	18,7	8,6	2,19	1,69	35,85
		4.2	3,77	4,06	0,29	62,21	11,49	22,2	17,2	7,2	2,19	1,73	41,67
	60	5.1	4,86	4,08	-0,78	39,01	13,07	25,3	21,6	9,2	1,99	1,56	34,01
		5.2	3,96	4,14	0,18	42,90	12,12	23,5	21,3	8,3	1,88	1,51	30,37
	90	6.1	4,93	4,16	-0,77	23,60	11,77	26,4	22,2	10,6	2,02	1,55	34,16
		6.2	4,11	4,22	0,11	29,10	11,22	25,4	21,8	8,7	1,98	1,58	29,04
Rec.Florestal	30	7.1	5,10	4,38	-0,72	63,70	12,57	24,9	20,0	8,8	2,12	1,66	37,12
	60	8.1	4,76	4,25	-0,51	50,70	14,63	27,0	23,2	12,7	1,98	1,47	31,82
	90	9.1	4,92	4,39	-0,53	35,50	10,35	25,6	22,2	11,2	1,96	1,48	37,73
Floresta	30	10.1	4,75	4,24	-0,51	142,00	13,51	13,1	15,1	5,8	1,48	1,19	54,22
	60	11.1	4,69	4,10	-0,59	70,10	7,64	17,5	12,8	4,7	2,31	1,88	60,45
	90	12.1	4,58	4,09	-0,49	69,30	12,24	19,1	9,2	3,2	3,52	2,88	62,64

$\Delta$ P (%) = perda ao fogo à 550°C

Res. (%) = material primário não atacado

**Tabela 4. 5** – Resultados da análise química do complexo sortivo e saturação de bases dos solos das parcelas hidro-erosivas.

Tipo de Cultivo	Profundidade (cm)	Amostra	Complexo Sortivo (cmol <sub>c</sub> /kg)								Valor V (sat. por bases) %
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Valor S (soma de bases trocáveis)	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	Valor T (CTC*)	
Olericultura	30	1.1	2,3	0,7	0,31	0,65	4,0	0	2,9	6,9	58
		1.2	2,0	0,9	0,07	0,28	3,3	0	1,6	4,9	67
	60	2.1	1,9	0,8	0,07	0,15	2,9	0	2,4	5,3	54
		2.2	1,8	0,7	0,20	0,09	2,8	0	1,7	4,4	62
	90	3.1	1,6	0,4	0,06	0,08	2,1	0	5,5	7,6	28
		3.2	3,2	0,8	0,23	0,19	4,4	0	4,1	8,5	52
Pastagem	30	4.1	0,0	0,3	0,38	0,17	0,9	1,6	16,8	19,3	4
		4.2	0,2	0,1	0,36	0,12	0,7	1,7	12,8	15,2	5
	60	5.1	0,1	0,0	0,26	0,03	0,4	1,3	15,2	16,8	2
		5.2	0,1	0,0	0,26	0,03	0,4	1,4	11,2	13,0	3
	90	6.1	0,1	0,0	0,00	0,00	0,1	0,7	10,3	11,1	1
		6.2	0,0	0,0	0,19	0,04	0,2	0,7	8,8	9,8	3
Rec.Florestal	30	7.1	1,4	0,4	0,31	0,13	2,2	0,2	12,9	15,3	14
	60	8.1	0,3	0,2	0,29	0,05	0,8	0,7	12,3	13,8	5
	90	9.1	0,3	0,2	0,27	0,01	0,7	0	8,9	9,6	7
Floresta	30	10.1	0,8	0,4	0,27	0,13	1,6	0,8	17,4	19,7	8
	60	11.1	0,3	0,2	0,26	0,03	0,8	0,5	10,0	11,3	7
	90	12.1	0,4	0,3	0,30	0,16	1,2	0,3	12,1	13,5	9

\*CTC – Capacidade de troca catiônica.

#### 4.4.1 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DE SOLOS

Os valores altos de saturação de bases nas amostras da olericultura, verificados na Tabela 4. 5, são devidos a adubação freqüente destes solos para aumentar a produtividade. Em geral, os valores de saturação de bases são baixos, que caracteriza os solos como distróficos (baixa fertilidade).

As gramíneas promovem uma pequena reciclagem de nutrientes para o horizonte superficial do solo (CAMARGO FILHO, 1999).

A análise físico-química da amostra da parcela da floresta (90 cm), situada próxima ao riacho, possui valores altos de  $K_i = 3,52$  e  $K_r = 2,88$ , que caracteriza um horizonte de solo menos intemperizado. Isto evidencia um processo erosivo natural na cabeceira de drenagem, tornando menos espesso o LATOSSOLO, característico da área do experimento, ao longo do riacho. Este processo morfológico acarreta mudanças no solo que, por suas características pedogenéticas, seria classificado como LATOSSOLO fase profunda. Porém, a análise geomorfológica caracteriza este solo como LATOSSOLO fase rasa. O perfil do solo não pode ser interpretado como um elemento isolado, pois ele faz parte de um contexto tridimensional da cobertura pedológica ao longo das vertentes (QUEIROZ NETO *et al.*, 1981, LUCAS *et al.*, 1984 *apud* QUEIROZ NETO, 2000). LEPSCH *et al.* (1977a, 1977b) *apud* QUEIROZ NETO (2000) interpretaram a sequência de solos ao longo das vertentes, como relacionadas à gênese das formas por processos erosivos. As formas de relevo não representam um processo geomorfológico único, mas podem ser dissociadas em superfícies geomórficas que se sucedem ao longo das vertentes (QUEIROZ NETO, 2000).

A sistematização do terreno na ocasião da instalação do sistema de irrigação alterou o solo do local desta parcela. A descrição do perfil do solo não foi possível devido à retirada da camada superficial do solo, alterando a ordem natural dos horizontes do solo e, descaracterizando-o como um LATOSSOLO típico da área em estudo. As análises físico-químicas das camadas superficiais do solo diagnosticaram-nos como horizonte C.

## 4.5 – ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

Os resultados dos ensaios de permeabilidade são apresentados na Tabela 4. 6.

**Tabela 4. 6** – Características dos corpos de prova e resultados dos ensaios de permeabilidade.

Amostra	Cultivo	Profundidade (cm)	Wi (%)	$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e_0$	n (%)	Wf (%)	k (cm/s)
19	Olericultura	30	24,14	15,76	13,55	1,06	51,45	34,92	$3,68 \times 10^{-6}$
20	Olericultura	60	26,26	17,12	13,56	1,02	50,60	34,74	$2,72 \times 10^{-7}$
17	Olericultura	90	17,32	13,31	11,35	1,42	58,67	42,59	$1,35 \times 10^{-3}$
24	Pastagem	30	33,98	11,99	8,95	1,88	65,32	64,61	$2,66 \times 10^{-3}$
34	Pastagem	60	26,38	14,04	11,11	1,37	57,76	44,03	$8,69 \times 10^{-5}$
14	Pastagem	90	30,25	13,37	10,26	1,59	61,43	47,41	$1,07 \times 10^{-3}$
22	Rec.Florestal	30	25,19	12,53	10,01	1,61	61,62	51,58	$1,29 \times 10^{-3}$
48	Rec.Florestal	60	25,03	11,94	9,55	1,76	63,81	55,68	$3,67 \times 10^{-3}$
42	Rec.Florestal	90	21,25	12,84	10,59	1,51	60,18	46,92	$2,52 \times 10^{-3}$
18	Floresta	30	20,94	12,71	10,51	1,36	57,64	50,13	$9,34 \times 10^{-4}$
5	Floresta	60	21,23	13,69	11,31	1,22	55,03	46,18	$5,48 \times 10^{-4}$
33	Floresta	90	27,03	13,14	10,34	1,44	58,98	53,35	$1,41 \times 10^{-3}$

### 4.5.1 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

Apesar da formação de agregados nos solos da parcela hidro-erosiva da olericultura, constatada nos ensaios de caracterização com e sem defloculante (Figura 4. 6 e Figura 4. 7), a permeabilidade deste solo nas profundidades de 30 e 60 cm foi baixa. A aração com pás rotativas desestruturaram o solo desencadeando uma estrutura dispersa, com uma baixa microporosidade, que acarreta uma baixa permeabilidade. HOLDEN (2009) comenta que a aração influencia na redução da interconexão dos macroporos na superfície do terreno devido à quebra da estrutura do solo. A permeabilidade alta do corpo de prova da olericultura (90 cm) se deve ao desenvolvimento de um caminho preferencial por ocasião do processo de secagem/umedecimento da amostra. Nos solos das demais parcelas, a permeabilidade



é elevada, caracterizando uma estrutura floculada, com uma macro e microporosidade bem desenvolvida, confirmada pelos valores mais altos da porosidade “n” e do índice de vazios “e” (Tabela 4. 6).

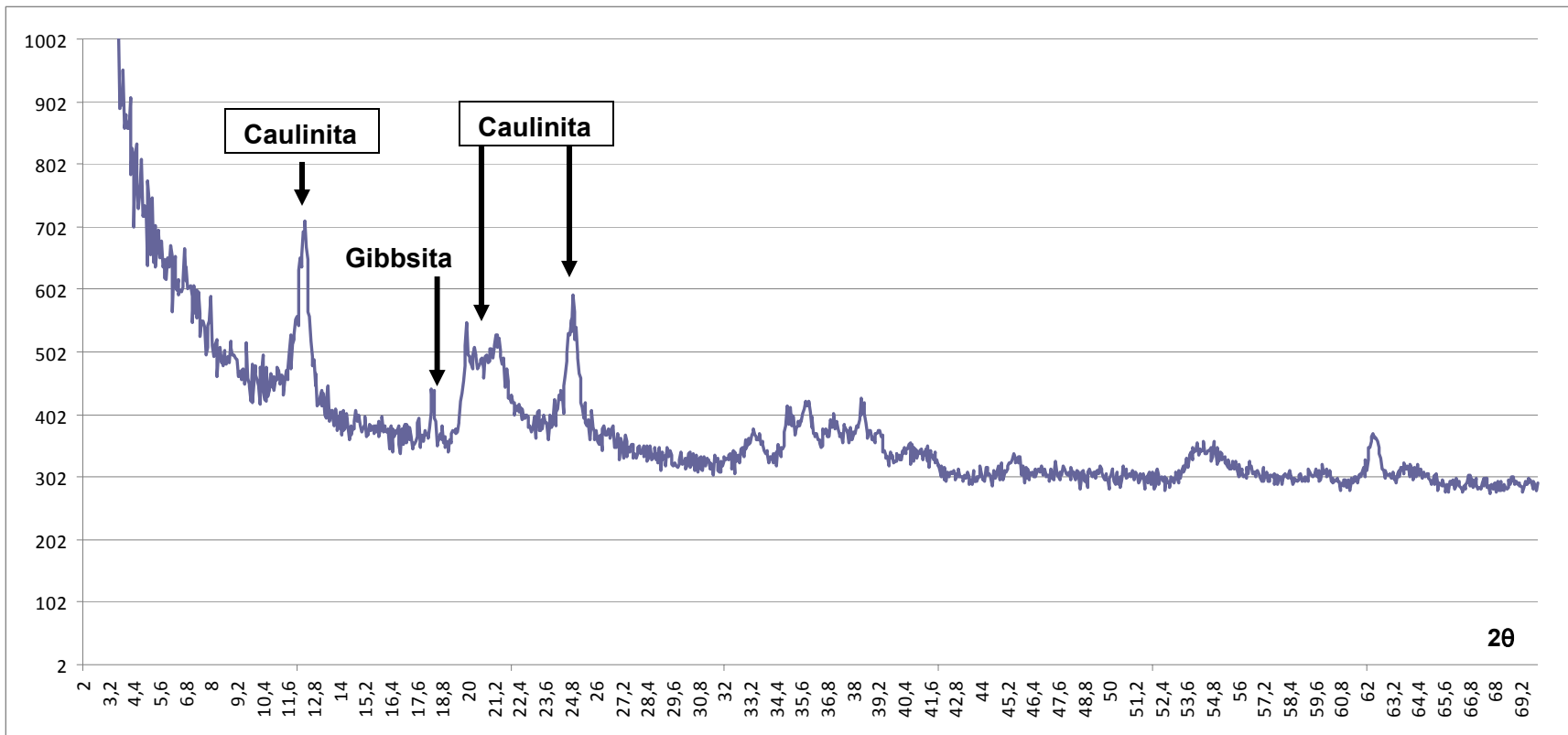
Apesar dos solos das parcelas da pastagem e área de recuperação florestal terem teores de argila maiores do que a da floresta (Tabela 4. 2), os seus coeficientes de permeabilidade (Tabela 4. 6) são equivalentes, devido a formação de agregados, que conferem uma textura semelhante ao solo da parcela da floresta. A estrutura dos solos das parcelas da pastagem e área de recuperação florestal com formação de agregados dita o comportamento destes solos.

#### **4.6 – CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA**

Detectaram-se os seguintes minerais secundários: caulinita, gibbsita e goetita. A caulinita é um argilo-mineral, com estrutura de camada 1:1, formada por uma camada tetraédrica de Si e uma octaédrica de Al ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ). A estrutura é pouco expansiva, pois não há separação entre as camadas, que permita a entrada de água entre as camadas. A goetita ( $FeO \cdot OH$ ) e a gibbsita [ $Al_2(OH)_6$ ] são óxi-hidróxidos de ferro e alumínio, que são agentes cimentantes. Estes minerais caracterizam os solos como lateríticos e bem intemperizados. Os solos lateríticos, em geral, possuem boa agregação, elevada permeabilidade e baixa expansibilidade. O resultado da difração de raios X da argila da amostra da parcela da olericultura (30 cm) está na Figura 4. 14. Os demais resultados das argilas das amostras das parcelas da olericultura (90 cm), pastagem, área de recuperação florestal e floresta estão no Anexo C.

#### **4.7 – PARCELAS HIDRO-EROSIVAS**

Os resultados de escoamento superficial e produção de sedimentos estão listados na **Tabela 4. 7**. A referida tabela, também, fornece a relação de escoamento superficial por precipitação, dada por “Es/P” em “%” e; o potencial de arraste de sedimentos dos respectivos escoamentos superficiais, dado por “PAS” em “kg/ha/mm”.

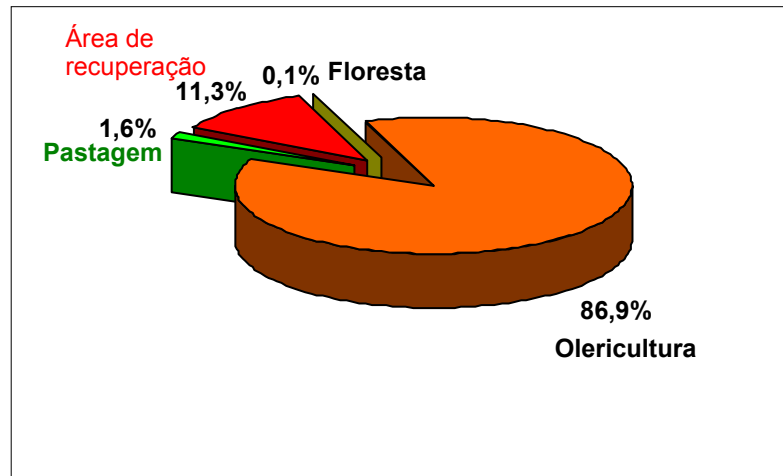


**Figura 4. 14** - Difração de raios X da argila da amostra da parcela da olericultura (30 cm).

**Tabela 4. 7–** Precipitação, escoamento superficial e produção de sedimentos nas quatro áreas mensuradas.

Data	Precipitação (mm)	Escoamento Superficial								Produção de Sedimentos							
		Olericultura (mm)	Es/P (%)	Pastagem (mm)	Es/P (%)	Rec. Florestal (mm)	Es/P (%)	Floresta (mm)	Es/P (%)	Olericultura (kg/ha)	PAS (kg/ha/mm)	Pastagem (kg/ha)	PAS (kg/ha/mm)	Rec. Florestal (kg/ha)	PAS (kg/ha/mm)	Floresta (kg/ha)	PAS (kg/ha/mm)
mar-08	22,7	2,25	9,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	265	117,7	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
abr/08	66,3	5,12	7,72	0,16	0,24	0,00	0,00	0,000	0,000	975	190,5	0,52	3,3	0,00	0,0	0,00	0,0
mai/08	6,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49	7,54	0,000	0,000	0,0	0,0	0,00	0,0	0,67	1,4	0,00	0,0
jun/08	20,3	0,06	0,28	0,00	0,00	0,32	1,58	0,000	0,000	1,4	24,4	0,00	0,0	0,95	3,0	0,00	0,0
jul/08	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,0	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0	0,00	0,0
ago/08	17,4	0,05	0,29	0,00	0,00	0,40	2,30	0,000	0,000	0,6	12,6	0,00	0,0	1,49	3,7	0,00	0,0
set/08	61,9	4,77	7,71	0,05	0,08	1,18	1,91	0,024	0,039	642	134,6	0,14	2,8	1,89	1,6	0,06	2,6
out/08	108,6	9,92	9,13	0,22	0,20	1,72	1,59	0,002	0,002	2.542	256,2	0,55	2,6	2,15	1,2	0,00	0,0
nov/08	197,0	18,15	9,21	0,02	0,01	2,47	1,25	0,050	0,025	1.554	85,6	0,00	0,0	6,41	2,6	0,04	0,9
dez/08	270,5	18,12	6,70	0,04	0,01	2,56	0,95	0,004	0,001	558	30,8	0,37	9,2	4,07	1,6	0,03	7,5
jan/09	327,0	49,50	15,14	1,52	0,47	4,30	1,31	0,087	0,027	8.240	166,5	2,97	2,0	7,39	1,7	0,47	5,4
<b>Média</b>	<b>99,8</b>	<b>9,81</b>	<b>6,01</b>	<b>0,18</b>	<b>0,09</b>	<b>1,22</b>	<b>1,67</b>	<b>0,015</b>	<b>0,009</b>	<b>1.343</b>	<b>92,6</b>	<b>0,41</b>	<b>1,8</b>	<b>2,27</b>	<b>1,5</b>	<b>0,06</b>	<b>1,5</b>
<b>Cv (%)</b>	<b>114</b>	<b>151</b>	<b>85</b>	<b>247</b>	<b>164</b>	<b>115</b>	<b>125</b>	<b>188</b>	<b>168</b>	<b>180</b>	<b>94</b>	<b>212</b>	<b>156</b>	<b>114</b>	<b>81</b>	<b>253</b>	<b>176</b>
<b>Total</b>	<b>1.098</b>	<b>107,9</b>		<b>2,01</b>		<b>13,44</b>		<b>0,167</b>		<b>14.777</b>		<b>4,55</b>		<b>25,01</b>		<b>0,61</b>	

A figura abaixo fornece uma visão global da ocorrência do escoamento superficial nas quatro parcelas hidro-erosivas (Figura 4. 15).



**Figura 4. 15** - Gráfico da contribuição de cada parcela relativo ao escoamento superficial.

Os gráficos apresentados nas Figura 4. 16, Figura 4. 17, Figura 4. 18, Figura 4. 19, Figura 4. 20, Figura 4. 21, Figura 4. 22, Figura 4. 23, Figura 4. 24, Figura 4. 25 e Figura 4. 26 são decorrentes da coleta de dados de campo nas parcelas hidro-erosivas.

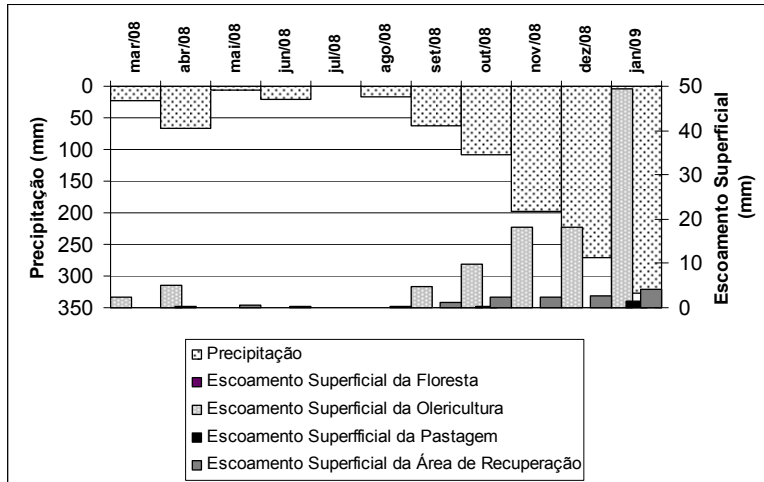


Figura 4. 16 – Relação entre escoamento superficial e precipitações mensais nas quatro áreas mensuradas.

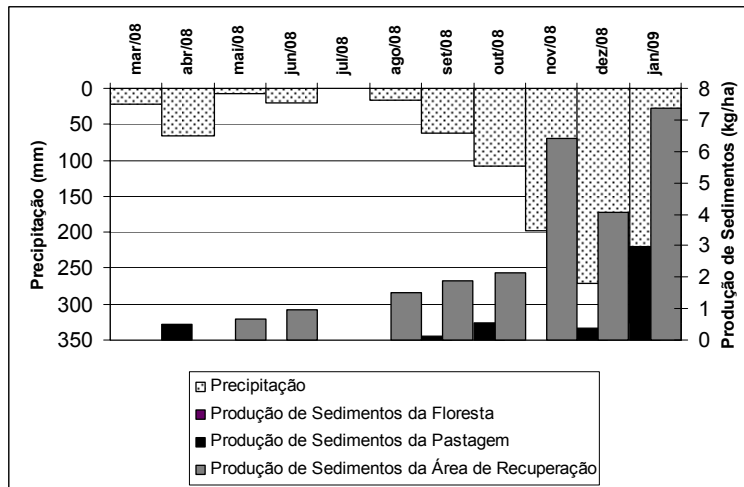


Figura 4. 17 - Relação entre produção de sedimentos e precipitações mensais nas áreas da floresta, pastagem e recuperação florestal.

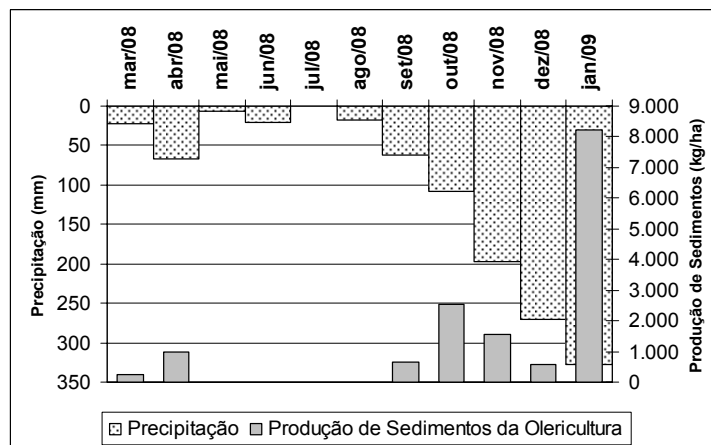


Figura 4. 18 - Relação entre a produção de sedimentos e precipitações mensais na área da olericultura.

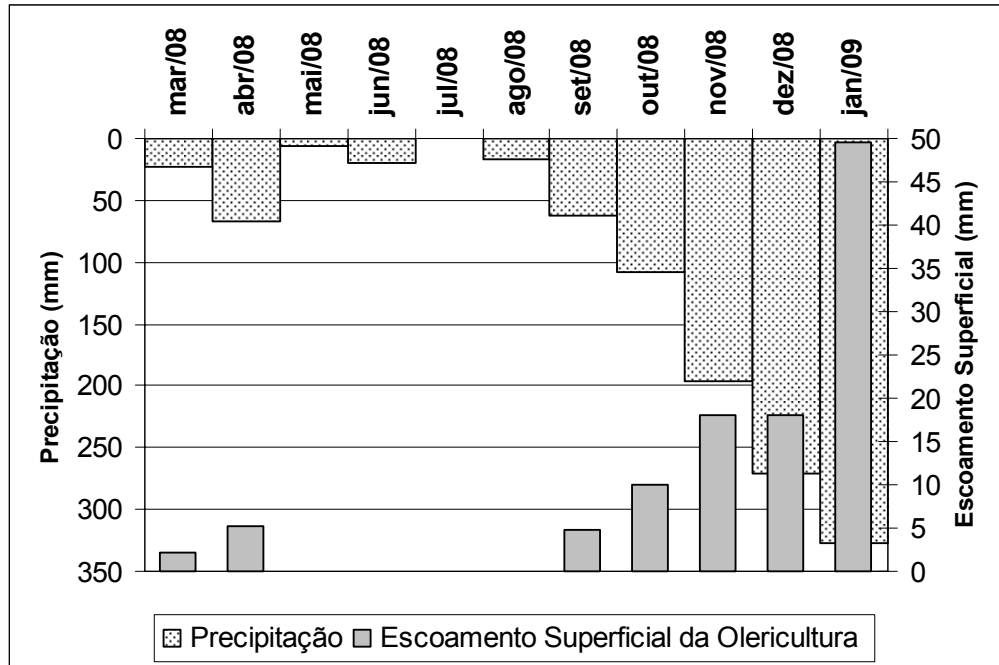


Figura 4. 19 – Relação entre escoamento superficial e precipitações mensais na área da olericultura.

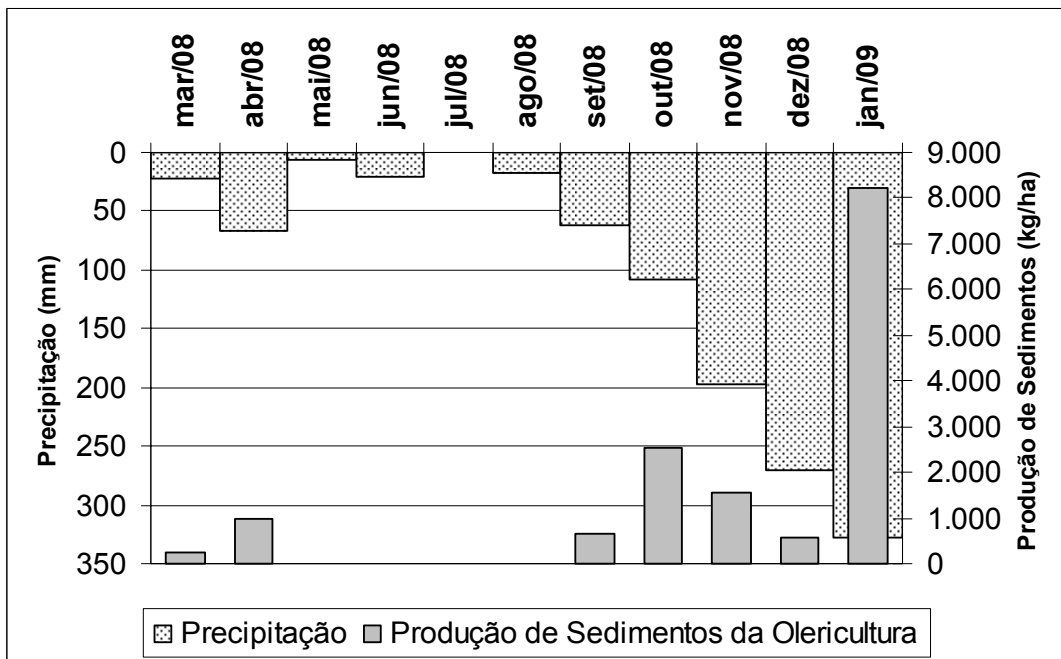


Figura 4. 20 - Relação entre produção de sedimentos e precipitações mensais na área da olericultura.

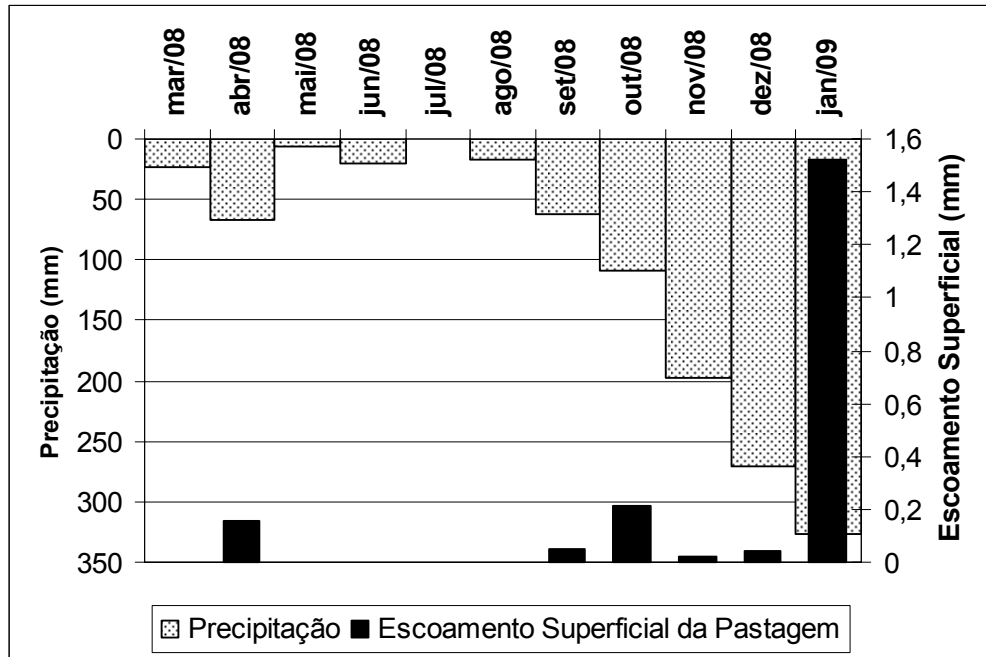


Figura 4. 21 - Relação entre escoamento superficial e precipitações mensais na área da pastagem.

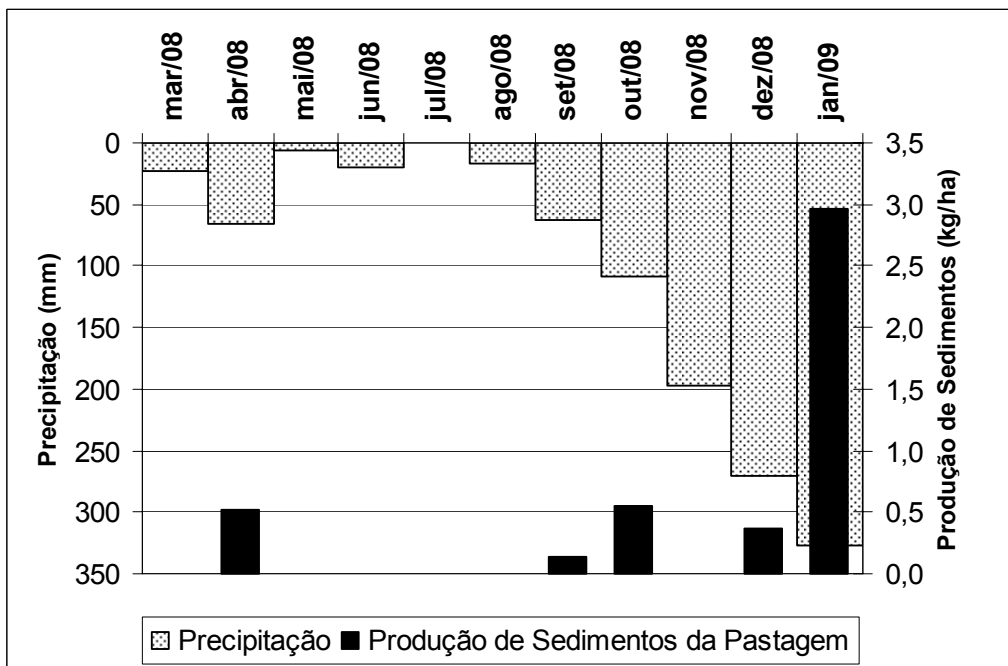


Figura 4. 22 - Relação entre produção de sedimentos e precipitações mensais na área da pastagem.



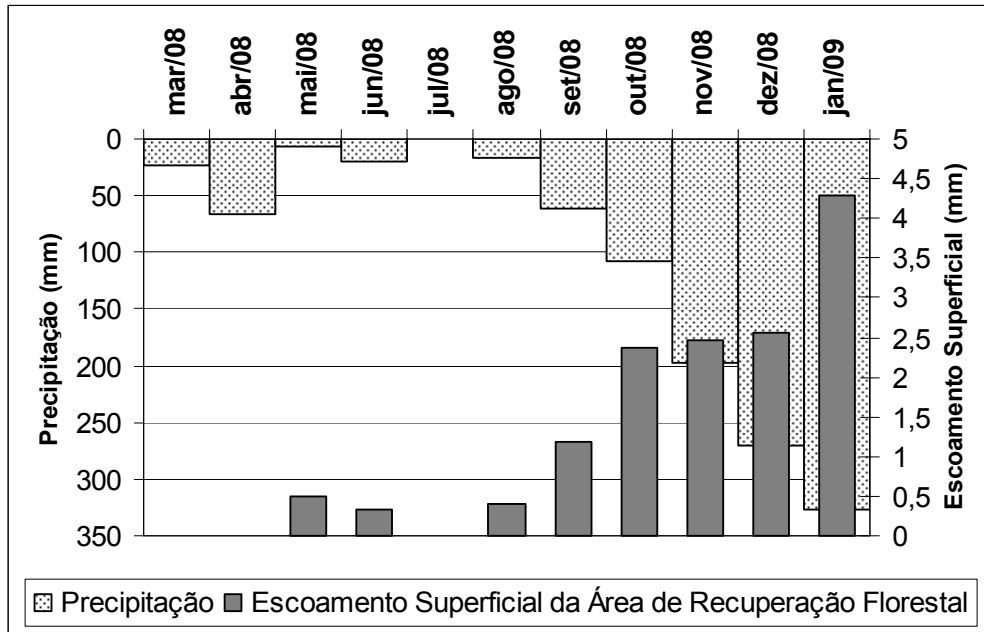


Figura 4. 23 - Relação entre escoamento superficial e precipitações mensais na área de recuperação florestal.

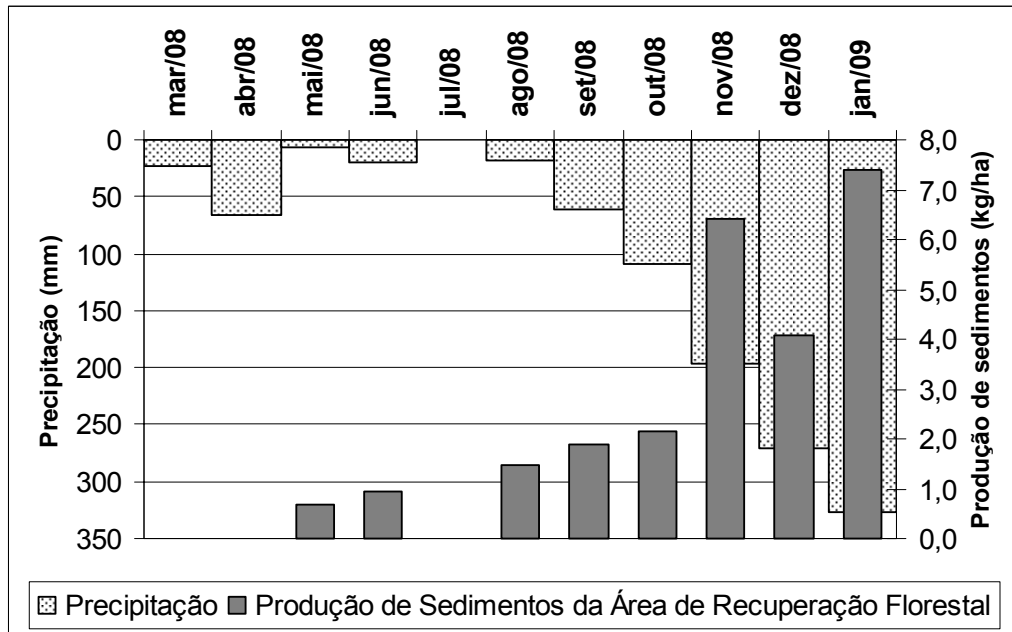


Figura 4. 24 - Relação entre produção de sedimentos e precipitações mensais na área de recuperação florestal.

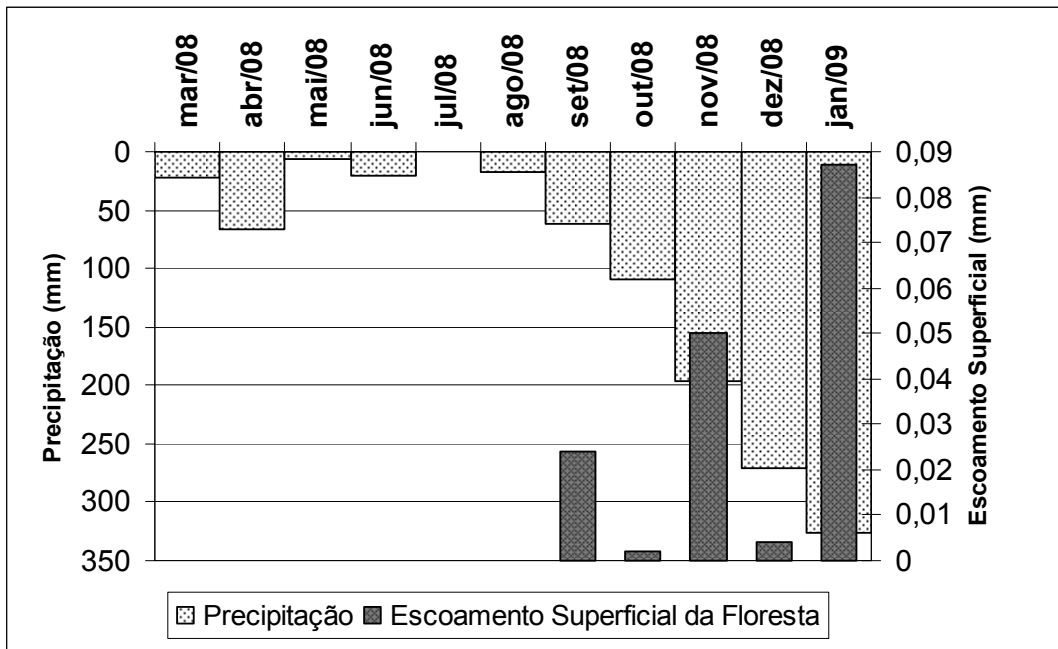


Figura 4. 25 – Relação entre escoamento superficial e precipitações mensais na área da floresta.

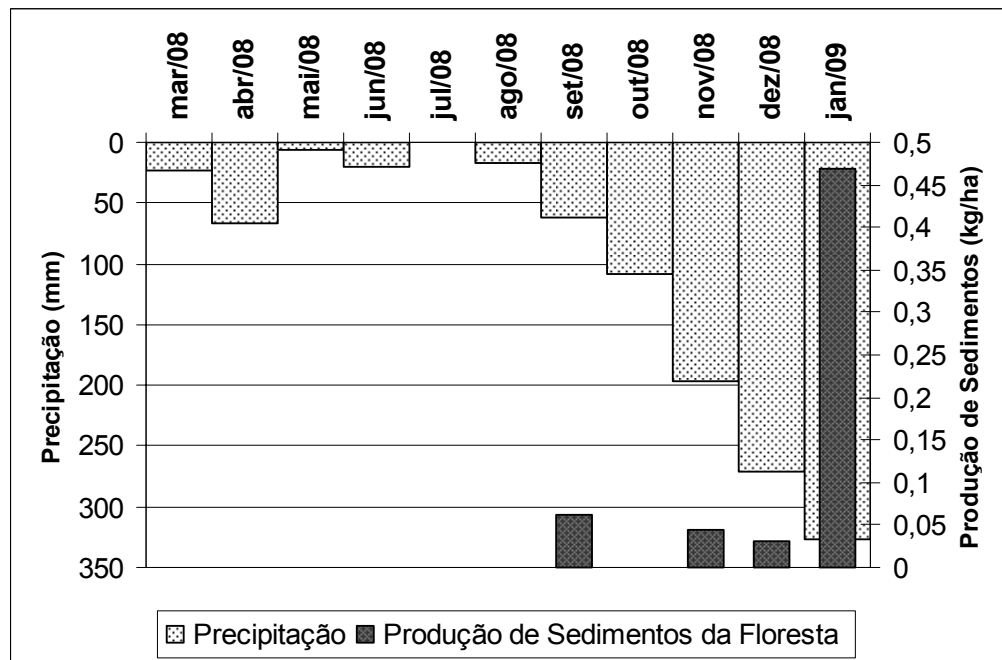


Figura 4. 26 - Relação entre produção de sedimentos e precipitações mensais na área da floresta.

#### 4.7.1 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DO EXPERIMENTO NAS PARCELAS HIDRO-EROSIVAS

A erosão mensurada na parcela hidro-erosiva da olericultura foi acima dos limites admissíveis. Segundo o boletim da FAO (1967) a perda de solo admissível para solos profundos e permeáveis e bem drenados é de 12,5 t/ha/ano. A produção de sedimentos de Mar/08 a Jan/09 foi de 14,8 t/ha ultrapassa este limite de 12,5 t/ha/ano. A maior parte do escoamento superficial e da produção de sedimentos ocorreu na parcela da olericultura. O processo de dessecação da área da parcela da olericultura culminou na exposição do horizonte “C”, que o torna mais suscetível à erosão, pelo fato da textura deste horizonte ser mais siltosa e possuir estrutura maciça. A olericultura não propicia uma cobertura de solo eficaz, que contribui para acelerar os processos erosivos (Figura 4. 27).



**Figura 4. 27** – Solo descoberto entre as linhas de cultivo do tomate na parcela hidro-erosiva da olericultura.

As parcelas hidro-erosivas da pastagem, da área de recuperação florestal e da floresta tiveram um escoamento superficial e uma produção de sedimentos bem inferior a da olericultura. A maior presença de raízes nos solos destas parcelas hidro-erosivas torna a camada superficial do solo mais porosa propiciando uma melhor capacidade de infiltração de água e, conseqüentemente, um menor escoamento superficial do que na parcela da olericultura. Estas parcelas possuem uma boa cobertura vegetal, que protege a superfície do solo do impacto direto das gotas de chuva.

A parcela da floresta teve os melhores resultados de escoamento superficial e erosão. As copas das árvores interceptam a chuva e, a espessa serrapilheira amortece o impacto das gotas de chuva (Figura 4. 28). A serrapilheira também atua

como uma barreira física, diminuindo a velocidade de escoamento superficial e, assim, acarretando um menor arraste de partículas do solo. A serrapilheira da parcela da floresta tem uma maior quantidade de massa seca do que a da parcela da área de recuperação florestal e, conseqüentemente, tem uma maior capacidade de retenção de água (SATO *et al.*, 2004). A dispersão da água da chuva na serrapilheira da parcela da área de recuperação florestal não é tão eficiente quanto à da floresta. Sendo assim, a serrapilheira da parcela da floresta possui uma maior interceptação e dispersão da água da chuva do que a da parcela de recuperação florestal, acarretando uma maior taxa de infiltração e uma menor taxa de escoamento superficial.

A evapotranspiração da densa e bem desenvolvida vegetação da floresta extrai a umidade do solo, o que resulta no aumento da sucção do solo e melhora a estabilidade dos agregados dando maior resistência à erosão. Segundo CHANDLER *et al.* (1992) a absorção de água pelas raízes promove uma zona de dessaturação, onde a sucção aumenta e a poro pressão da água diminui e, conseqüentemente, as tensões efetivas do solo aumentam.

As raízes fasciculadas<sup>7</sup> da pastagem aumentam a resistência do solo superficial pelo efeito mecânico de maior agregação das partículas. BERTONI e LOMBARDI NETO (1990) comentam que a densidade das hastes das gramíneas e o seu sistema radicular formam pequenas rugosidades no terreno diminuindo o escoamento superficial.



**Figura 4. 28** – Cobertura vegetal na parcela hidro-erosiva da floresta.

Segundo HEATHWAITE *et al.* (1990) o processo de infiltração é dinâmico, variando ao longo do ano. Dependendo do tipo de uso do solo, a densidade aparente será afetada o que modificará a porosidade. Isso é verificado especialmente em áreas

---

<sup>7</sup> Caracterizadas por uma massa de raízes fibrosas que emergem da base do caule e se ramificam.

de pastagem onde o gado compacta a superfície do terreno. Na parcela da pastagem, ocorreu um caso que ilustra o efeito da compactação do pisoteio do gado. A parcela da pastagem tinha sido cercada com arame farpado, e o crescimento vegetativo do pasto alcançou uma altura de 50 cm. Nesta ocasião, não tinha sido verificado nenhum escoamento superficial significativo. O gado, atraído pelo pasto viçoso, rompeu a cerca, invadiu e pisoteou a parcela; sem, contudo, danificar a estrutura de coleta de água. Na semana seguinte ao ocorrido, houve a primeira anotação de escoamento superficial na parcela de pastagem. O pisoteio do gado, também, alterou a estabilidade dos agregados gerando a primeira evidência de erosão na parcela da pastagem. O resultado de escoamento superficial no mês de Abril de 2008 (Figura 4. 21) e, a produção de sedimentos no mesmo período (Figura 4. 22) certificam esta constatação. O gado voltou ao pasto em Outubro de 2008 e, depois em Janeiro de 2009 resultando em maiores índices de escoamento e erosão. Mesmo assim, os resultados de escoamento superficial e erosão da parcela hidro-erosiva da pastagem foram baixos. Entretanto, SPAROVEK *et al.* (2007) cita que as práticas de cultivo por ocasião da renovação da pastagem (aração, calagem, adubação e semeadura) causam impactos erosivos.

A produção de sedimentos está diretamente relacionada com a intensidade das chuvas. Nota-se que a precipitação de 66,3 mm de Abril/08 acarretou uma erosão de 975 kg/ha na parcela hidro-erosiva da olericultura, que foi maior do que a produção de sedimentos de 558 kg/ha em Dezembro/08, apesar da ocorrência de uma maior precipitação de 270,5 mm (Tabela 4. 7). As gotas das chuvas mais intensas possuem uma maior energia cinética causando um maior impacto dando uma maior erosividade.

#### 4.8 – CURVAS CARACTERÍSTICAS

As curvas características foram obtidas pela equação de VAN GENUCHTEN (1980) tendo como base os valores do ensaio com papel filtro (Figura 4. 29, Figura 4. 30, Figura 4. 31, Figura 4. 32, Figura 4. 33, Figura 4. 34, Figura 4. 35, Figura 4. 36, Figura 4. 37, Figura 4. 38, Figura 4. 39, Figura 4. 40, Figura 4. 41, Figura 4. 42, Figura 4. 43, Figura 4. 44 e Figura 4. 45). Os parâmetros de VAN GENUCHTEN (1980) utilizados para a obtenção das curvas características estão listados na Tabela 4. 8. Os dados de sucção mátrica versus umidade volumétrica obtidos pela câmara de pressão de Fredlund estão na Tabela 4. 9. Os resultados dos ensaios de papel filtro estão na Tabela 4. 10, Tabela 4. 11, Tabela 4. 12 e Tabela 4. 13.

**Tabela 4. 8 – Parâmetros de VAN GENUCHTEN.**

Amostra	Cultivo	Profundidade (cm)	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	n	m
19 e 27	Olericultura	30	0,410	0,010	0,0048	1,44	0,31
16 e 20	Olericultura	60	0,472	0,020	0,0058	1,32	0,24
11 e 17	Olericultura	90	0,472	0,030	0,0030	1,31	0,24
23 e 24	Pastagem	30	0,573	0,040	0,0094	1,31	0,24
34 e 36	Pastagem	60	0,490	0,001	0,0650	1,14	0,12
1 e 14	Pastagem	90	0,475	0,070	0,0250	1,30	0,23
9 e 22	Rec.Florestal	30	0,510	0,170	0,4000	1,34	0,25
30 e 48	Rec.Florestal	60	0,530	0,180	0,4600	1,31	0,24
10 e 42	Rec.Florestal	90	0,490	0,130	0,4500	1,28	0,22
18	Floresta	30	0,530	0,080	0,2600	1,27	0,21
5	Floresta	60	0,530	0,080	0,2200	1,23	0,19
12 e 33	Floresta	90	0,550	0,080	0,2600	1,28	0,22

**Tabela 4. 9 – Dados de sucção mátrica da amostra da parcela da olericultura (30 cm) pela câmara de pressão de Fredlund.**

Sucção Mátrica (kPa)	$\Theta$ (%)
10	39,83
20	37,09
40	34,78
60	33,14
100	31,27
200	26,49
400	21,99
600	15,30
800	11,29

**Tabela 4. 10** – Dados de sucção da parcela da olericultura pelo método do papel filtro.

Amostra	Profundidade (cm)	Sucção Mátrica (kPa)	Sucção Total (kPa)	Umidade Volumétrica (%)	Amostra	Profundidade (cm)	Sucção Mátrica (kPa)	Sucção Total (kPa)	Umidade Volumétrica (%)
19	30	12,3		40,08	27	30	40		38,74
		1.381		21,00			1.070		25,91
			1.146	20,83				604	25,67
		1.868		18,45			1.390		23,27
			1.775	18,33				1.442	23,08
		9.097		9,36			8.065		12,12
			8.194	9,22				7.519	11,97
		11.159		6,49			8.260		9,53
	10.913	6,47		8.226	9,40				
16	60	20,0		47,40	20	60	4.186		35,60
		80		38,73			2.561		31,59
			118	38,43				3.409	31,47
		168		35,64			5.517		24,73
			199	35,48				5.382	24,42
		5.384		20,08			12.781		11,77
			5.849	19,88				11.270	11,54
		7.302		14,45					
	7.140	14,32							
11	90	23,0		44,42	17	90	23,3		37,17
		420		37,84				36,5	37,13
			619	37,53			2.489		27,83
		1.364		34,92				2.094	27,14
			1.271	34,71			5.998		19,65
		10.189		21,20					
			9.678	20,91					
		11.370		14,69					
	10.479	14,37							



**Tabela 4. 11** - Dados de sucção da parcela da pastagem pelo método do papel filtro.

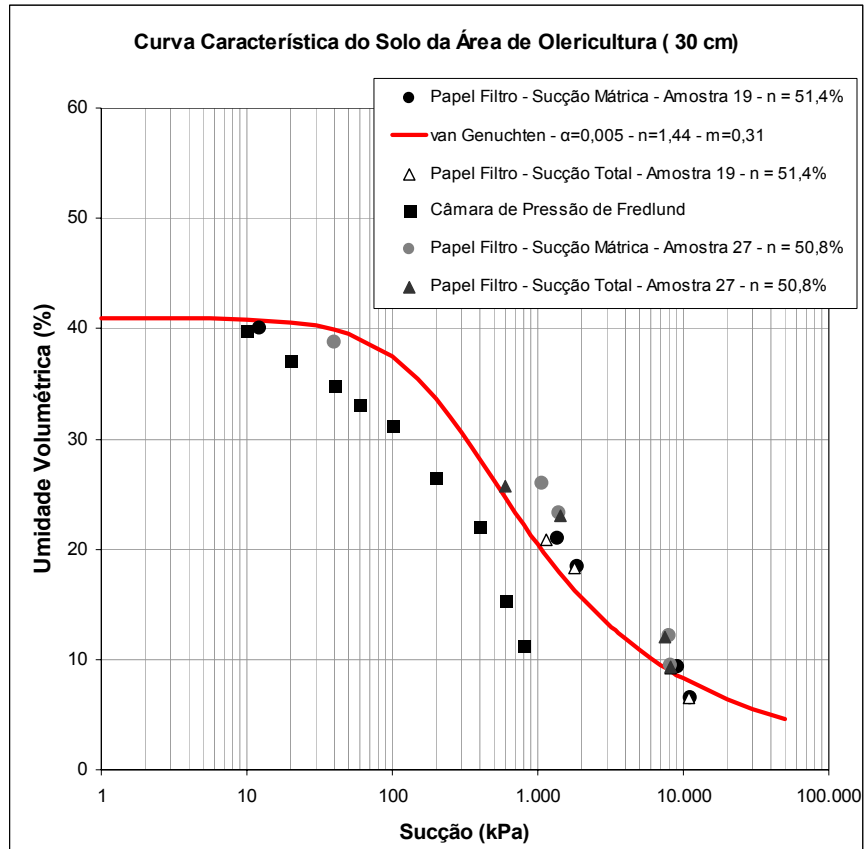
Amostra	Profundidade (cm)	Sucção Mátrica (kPa)	Sucção Total (kPa)	Umidade Volumétrica (%)	Amostra	Profundidade (cm)	Sucção Mátrica (kPa)	Sucção Total (kPa)	Umidade Volumétrica (%)
23	30	675		34,38	24	30	5,0		55,18
		613		30,87			44		33,59
			486	30,80				41	33,42
		7.772		21,40			4.125		23,71
			9.766	20,75				4.474	23,16
		9.507		17,25			12.936		12,41
			10.567	16,96				11.869	10,43
34	60	6,0		44,95	36	60	124		34,41
			6,9	44,58			1.834		27,39
		44		33,67				2.747	27,10
			42	32,80			8.589		21,02
		10.706		16,60				8.226	20,26
			9.313	15,75			15.860		10,49
								13.014	10,04
1	90	74		31,64	14	90	6		44,08
		68		29,86				12	43,66
			69,5	29,47			230		30,15
		8.785		18,13				93	29,35
			9.002	16,55			10.482		15,25
		16.539		7,82				8.398	14,92
			13.042	6,85					

**Tabela 4. 12** - Dados de sucção da parcela da recuperação florestal pelo método do papel filtro.

Amostra	Profundidade (cm)	Sucção Mátrica (kPa)	Sucção Total (kPa)	Umidade Volumétrica (%)	Amostra	Profundidade (cm)	Sucção Mátrica (kPa)	Sucção Total (kPa)	Umidade Volumétrica (%)
<b>9</b>	30	5,9		33,46	<b>22</b>	30	5,0		40,64
			7,4	33,05			6,3		37,68
		28,0		30,03				15	37,28
			25,6	29,45			1.372		24,97
		1.156		25,27				2.702	24,74
		2.851		21,79			15.079		18,52
			1.604	21,54					
		8.146		15,80					
<b>30</b>	60	5,6		42,44	<b>48</b>	60	7,0		40,74
			6,3	42,24			5,0		36,60
		6,2		39,23				18,0	36,10
			7,9	38,78			1.430		23,61
		1.199		26,64				2.507	23,29
		3.165		23,53			3.969		17,26
			3.746	22,99					
		6.169		20,69					
	5.645	20,45							
<b>10</b>	90	6,0		29,04	<b>42</b>	90	2,0		44,37
			19,6	28,50			9,2		33,98
		6.734		19,22				19,1	32,71
			9.614	18,62			9.936		16,56
		9.977		13,88				8.227	15,87
			9.482	13,48					

**Tabela 4. 13** - Dados de sucção da parcela da floresta pelo método do papel filtro.

Amostra	Profundidade (cm)	Sucção Mátrica (kPa)	Sucção Total (kPa)	Umidade Volumétrica (%)
18	30	4,0		48,67
		11,6		39,67
			13,5	47,56
			17,4	39,35
		40,7		30,95
		314		22,01
		3.060		13,92
5	60		5,6	48,63
		5,9		49,74
			12,9	40,48
		15,9		41,17
		61,1		31,27
		683		23,98
		3.684		14,51
12	90	33,2		33,90
			34,8	33,80
			809	24,96
		950		25,77
		10.541		8,05
33	90	4,0		47,96
		4,7		44,11
			6,8	46,30
			16,3	43,23
		1.343		19,00



**Figura 4. 29** - Curva Característica do solo da parcela da olericultura (30 cm).

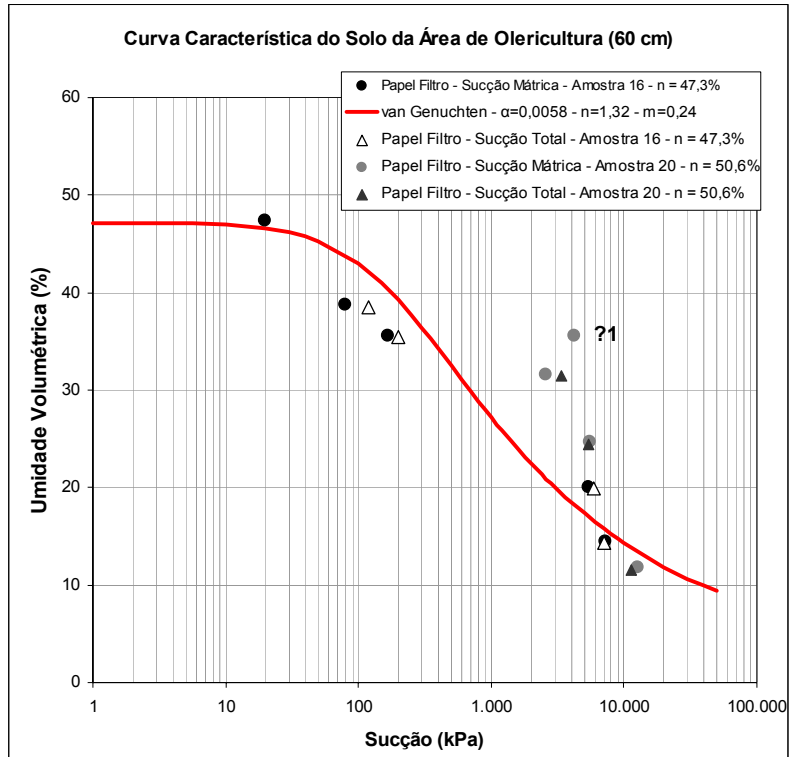


Figura 4. 30 – Curva Característica do solo da parcela da olericultura (60 cm).

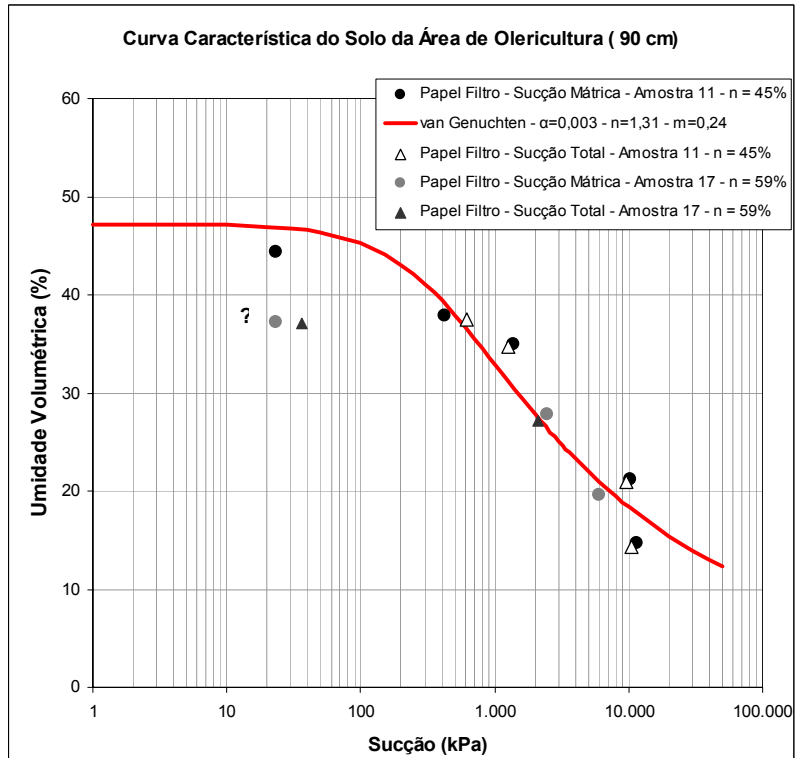
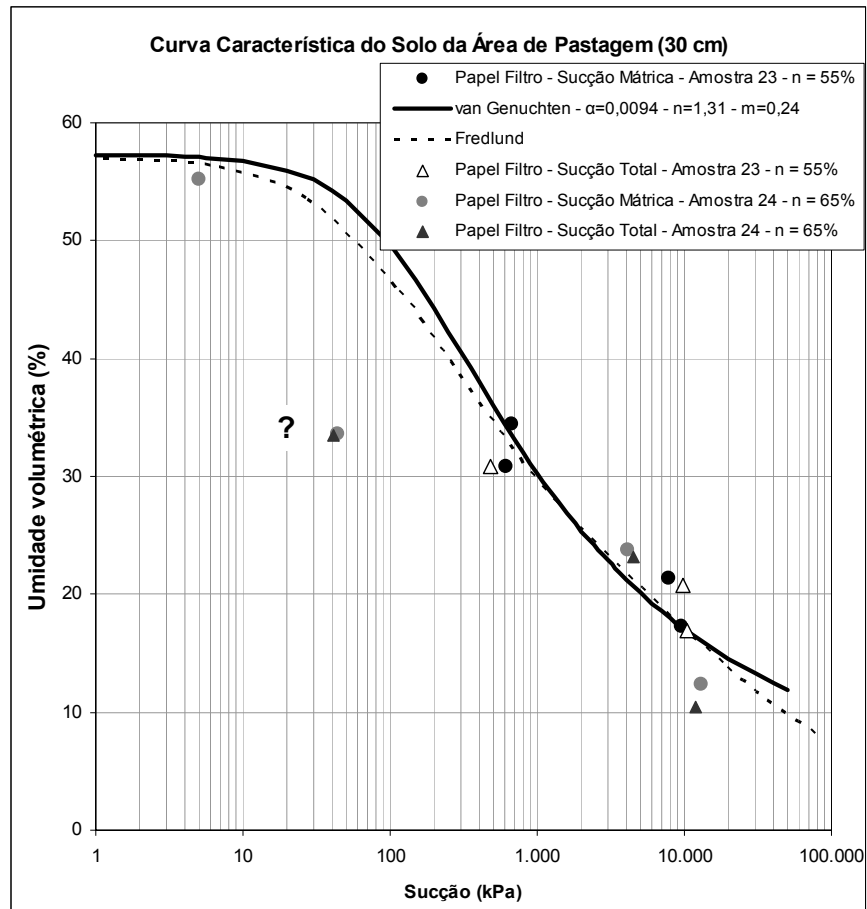


Figura 4. 31 – Curva Característica do solo da parcela da olericultura (90 cm).

A curva característica do solo da pastagem (30 cm) teve uma boa correlação dos dados do ensaio de papel filtro, tanto com a equação de VAN GENUCHTEN (1980), quanto com a de FREDLUND e XING (1994). O ajuste da equação de VAN GENUCHTEN (1980) é mais prático do que o ajuste com a equação de FREDLUND e XING (1994). Foi necessária a utilização do programa GEOSLOPE para ajustar a curva característica pela equação de FREDLUND e XING (1994) (Figura 4. 32).



**Figura 4. 32** – Curva característica do solo da parcela da pastagem (30 cm).

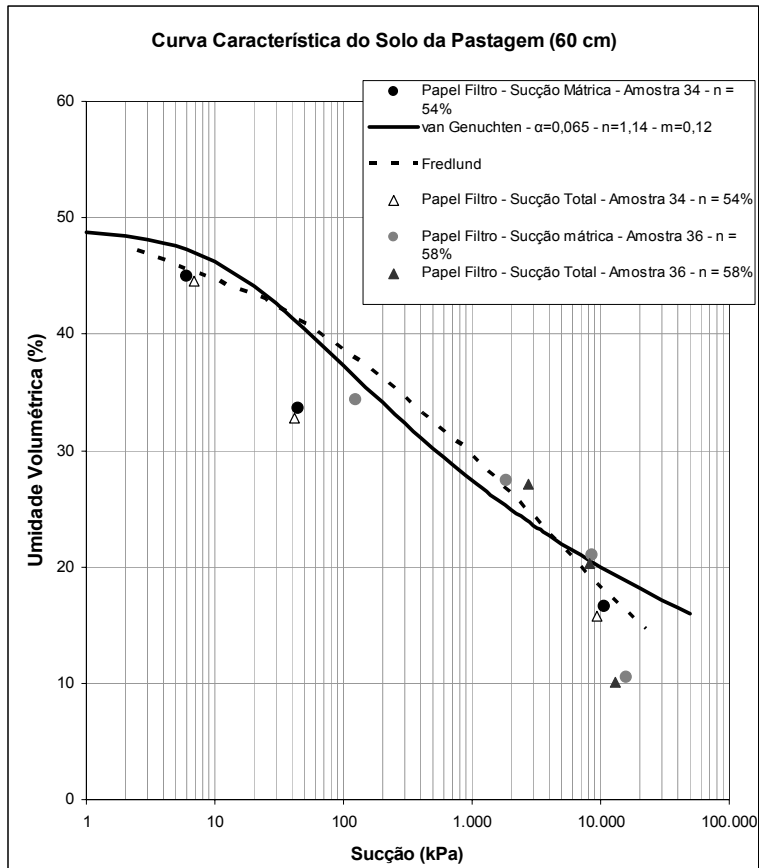


Figura 4. 33 – Curva Característica do solo da parcela da pastagem (60 cm).

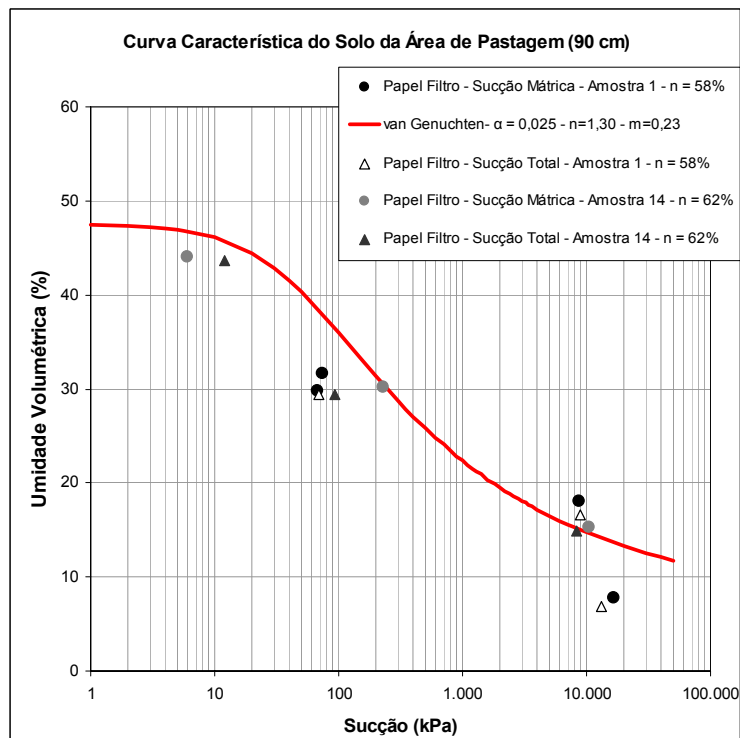
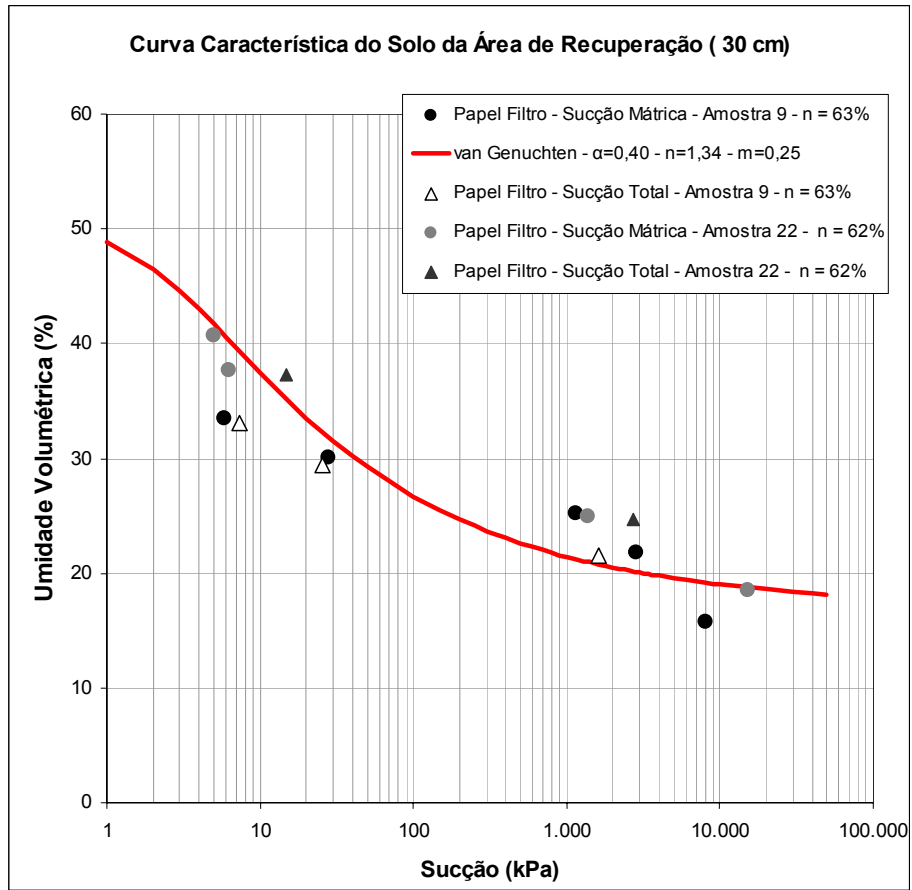


Figura 4. 34 – Curva Característica do solo da parcela da pastagem (90 cm).





**Figura 4. 35** – Curva Característica do solo da parcela da área de recuperação florestal (30 cm).

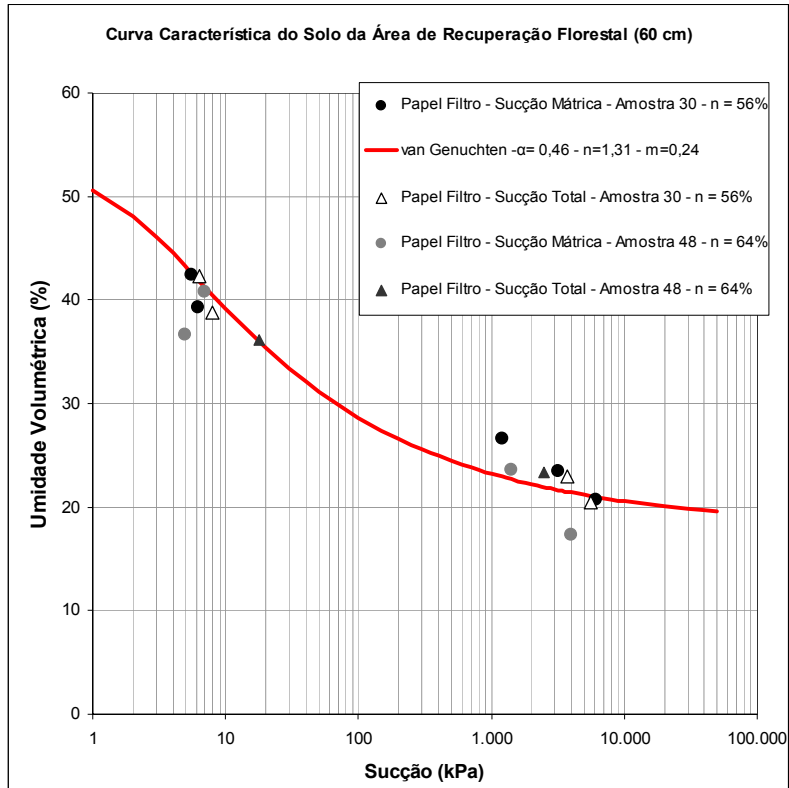


Figura 4. 36 – Curva Característica do solo da parcela da área de recuperação florestal (60 cm).

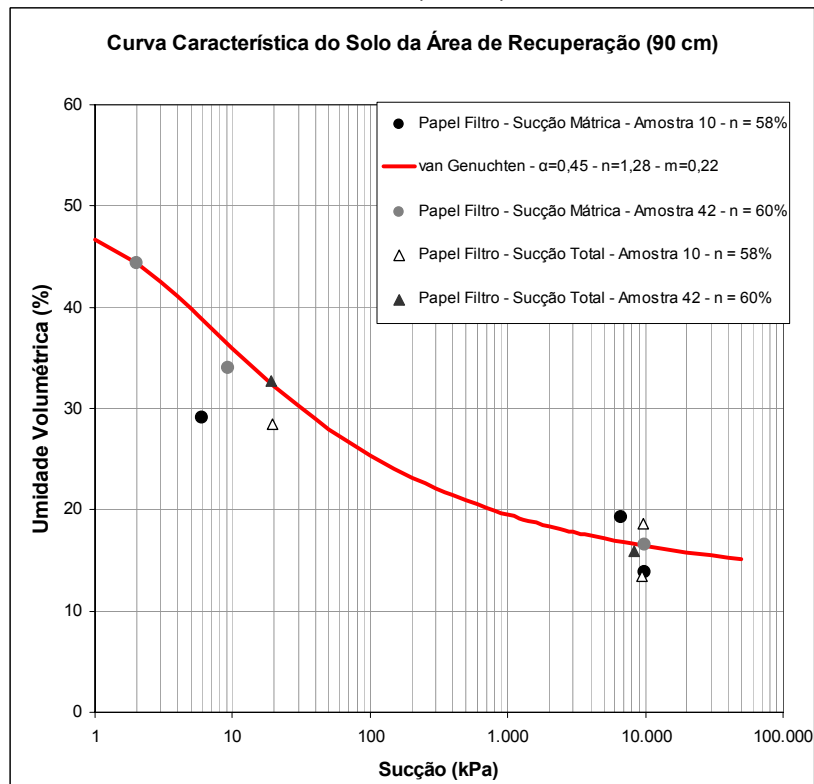
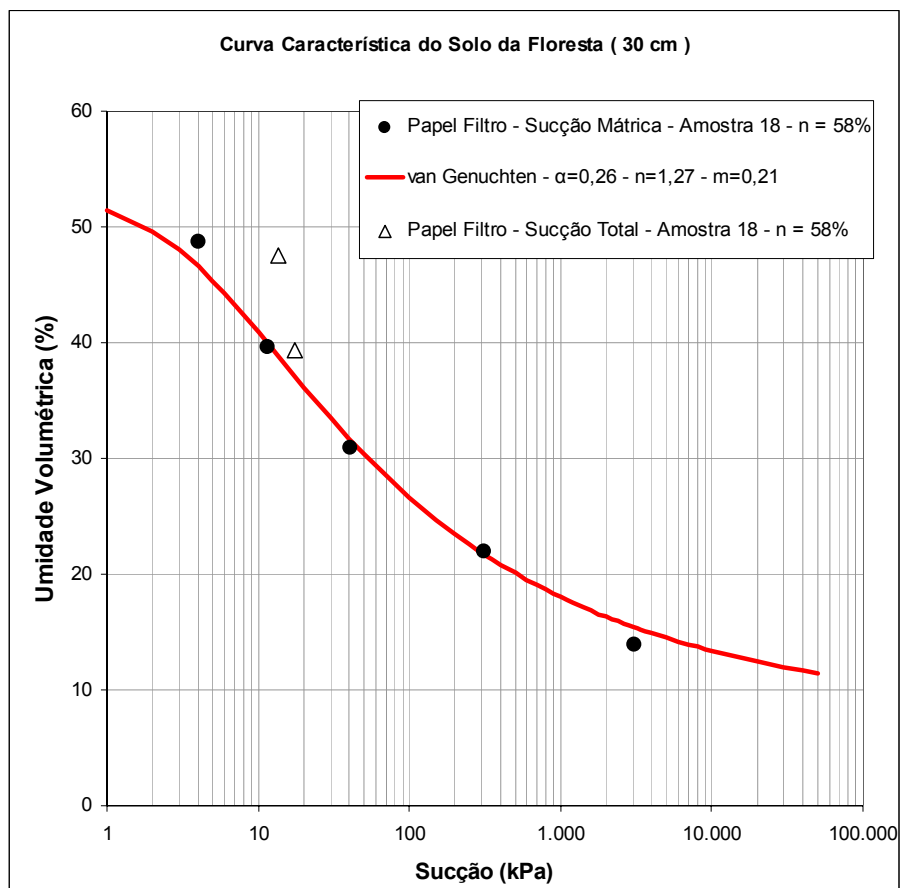


Figura 4. 37 - Curva Característica do solo da parcela da área de recuperação florestal (90 cm).



**Figura 4. 38** - Curva Característica do solo da parcela da floresta (30 cm).

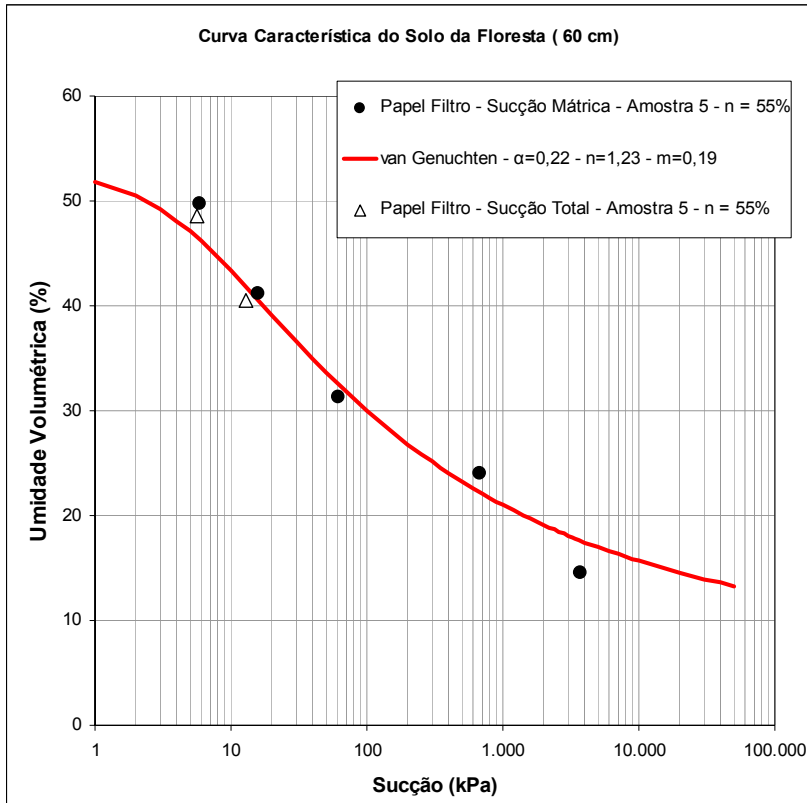


Figura 4. 39 - Curva Característica do solo da parcela da floresta (60 cm).

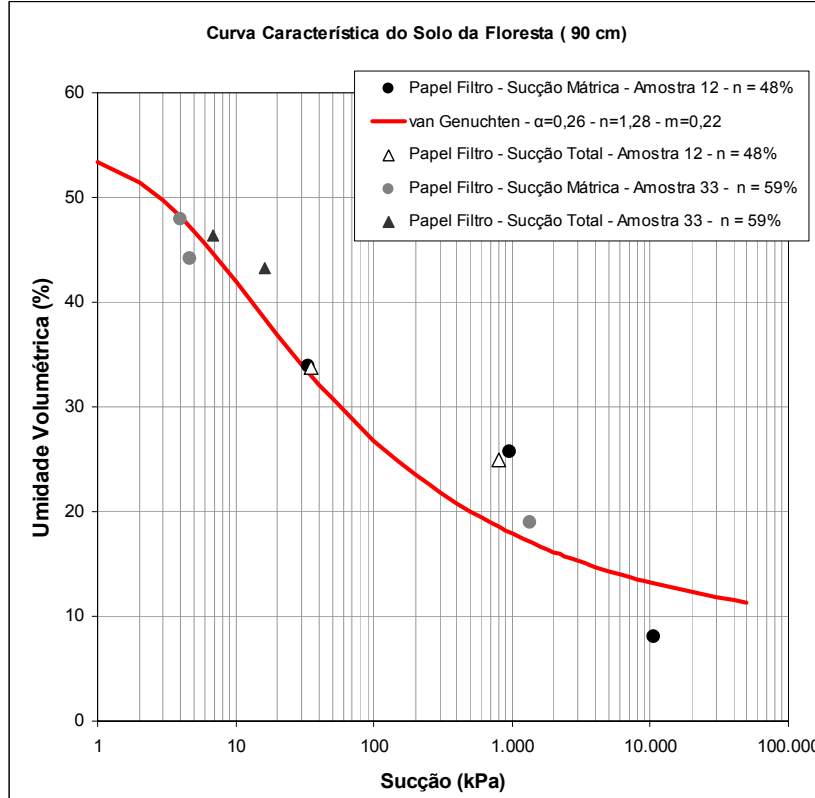
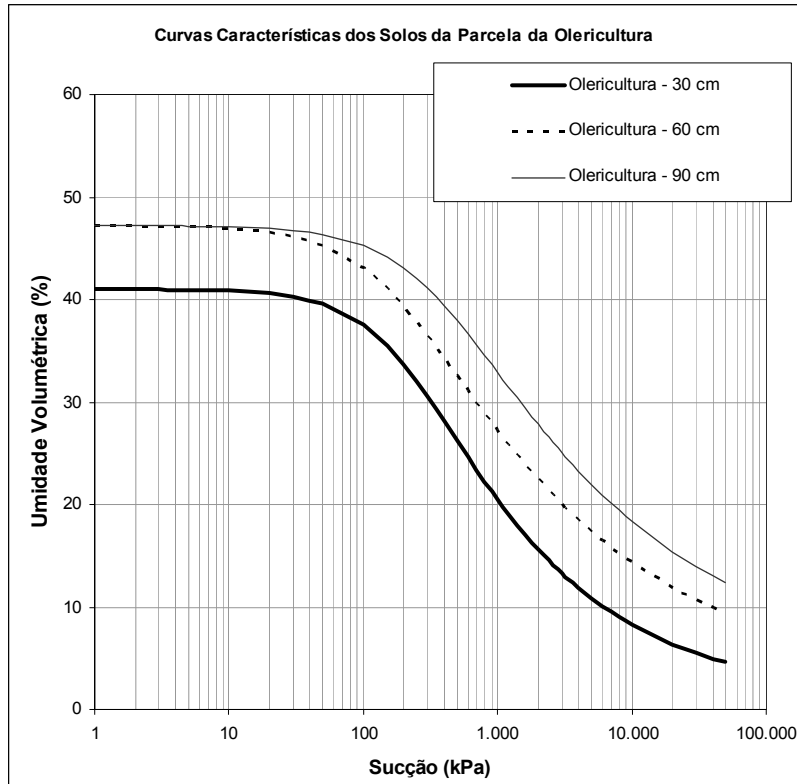
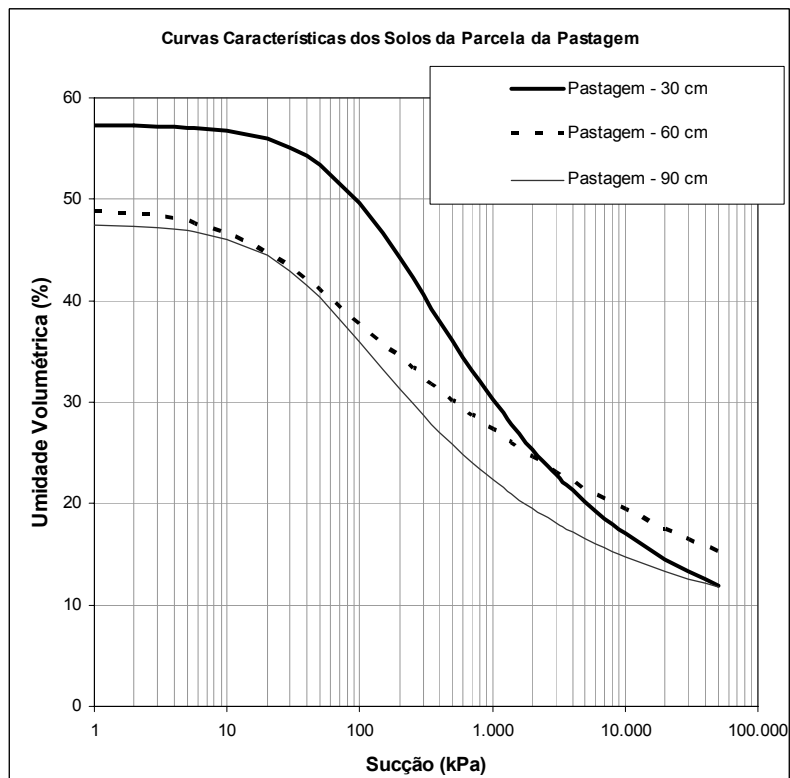


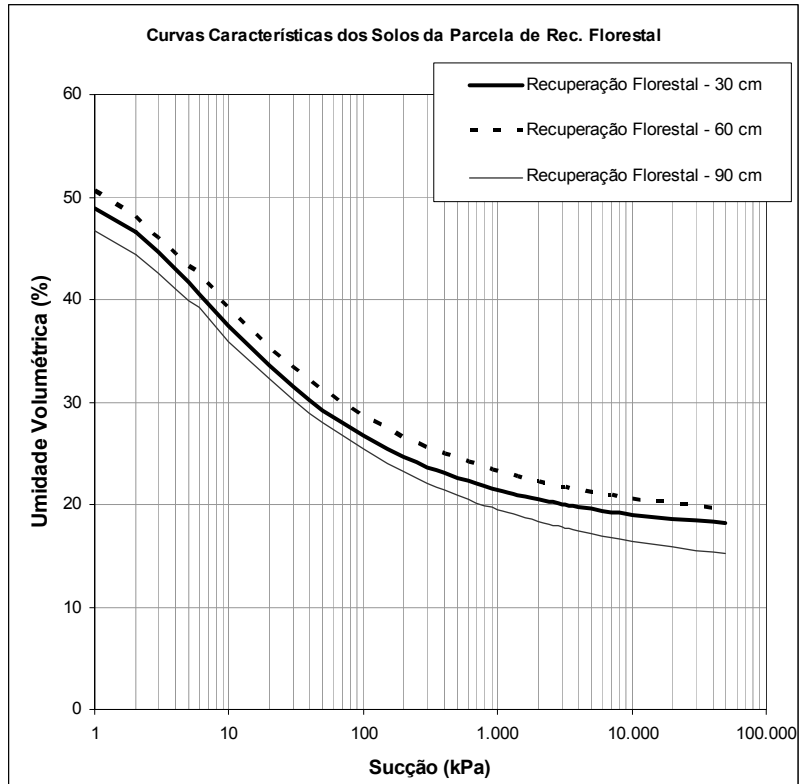
Figura 4. 40 - Curva Característica do solo da parcela da floresta (90 cm).



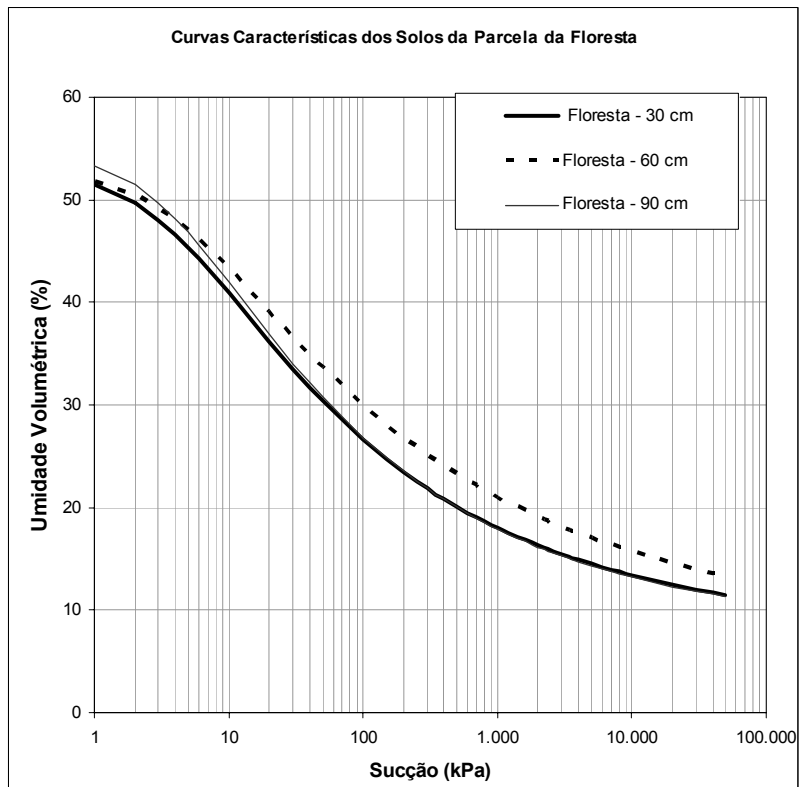
**Figura 4. 41** – Curvas características da parcela da olericultura.



**Figura 4. 42** - Curvas características da parcela da pastagem.



**Figura 4. 43** - Curvas características da parcela da área de recuperação florestal.



**Figura 4. 44** - Curvas características da parcela da floresta.

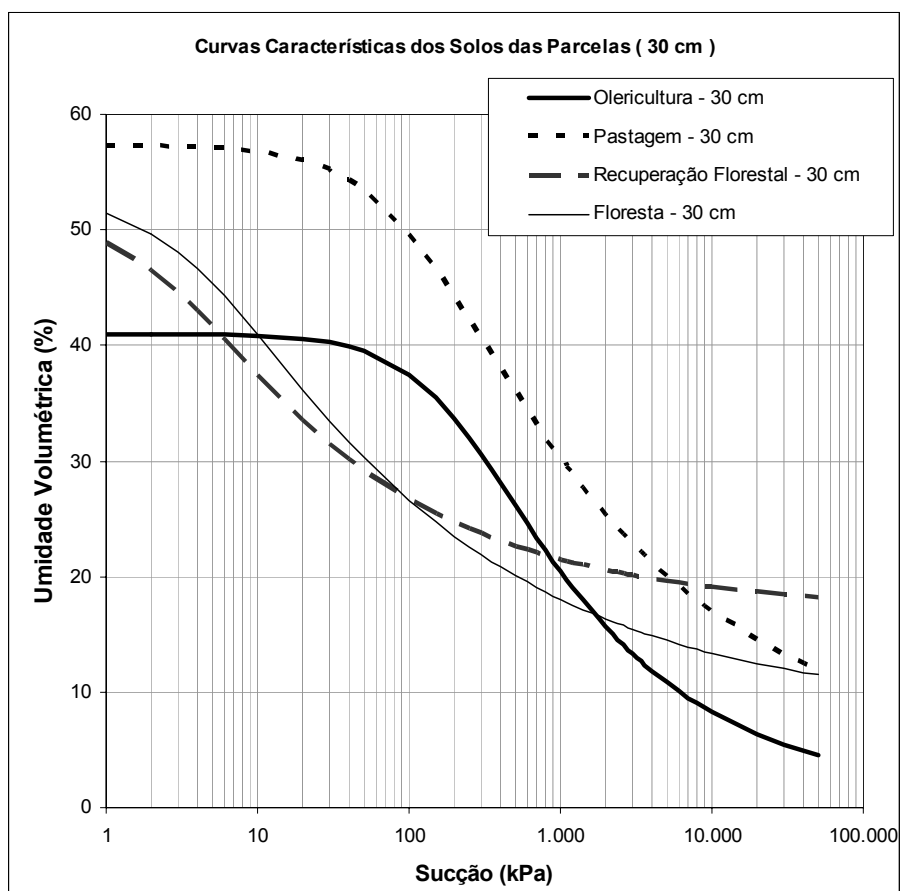


Figura 4. 45 – Curvas características dos solos das parcelas (30 cm).

#### 4.8.1 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

A curva característica da amostra de solo a 30 cm de profundidade da parcela hidro-erosiva da pastagem possui um maior valor de sucção do que as demais curvas de retenção de água nas profundidades de 60 e 90 cm (Figura 4. 42). Este fato é devido, provavelmente, à compactação do pisoteio do gado, ocasionando a diminuição do tamanho dos poros e sua distribuição. Em geral, quanto mais diminuto as dimensões dos poros, maior será a capacidade de retenção de água e, maior será o valor da sucção que permite a entrada de ar e o avanço da interface ar/água (membrana contrátil). Segundo GERSCOVICH (1994) *apud* RIOS FILHO (2006) a compactação altera a função de distribuição de volume de vazios, que modifica o trecho da curva correspondente a baixos valores de sucção.

A curva característica da amostra de solo a 30 cm de profundidade da parcela hidro-erosiva da olericultura possui um menor valor de sucção do que as demais curvas de retenção de água nas profundidades de 60 e 90 cm (Figura 4. 41). Este comportamento pode ser devido à maior concentração de carbonato de cálcio na amostra a 30 cm, conferindo um maior efeito agregador, e acarretando uma maior porosidade e uma melhor capacidade de infiltração.

SCHAAP *et al.* (1998) consideram a umidade residual “ $\theta_r$ ” como, meramente, um parâmetro de ajuste empírico, por causa da extrapolação do conteúdo de água, pelo fato da secagem da amostra ser infinita. LEIJ *et al.* (1996) *apud* SCHAAP *et al.* (1998) extrapolam o valor de “ $\theta_r$ ” como próximo de zero, durante a otimização dos dados de retenção de água.

Baseado nos resultados obtidos é possível obter a curva característica de um solo com 5 resultados de ensaios com papel filtro, desde que estes pontos (sucção versus umidade volumétrica) estejam uniformemente distribuídos (Figura 4. 38 e Figura 4. 39).

O método do papel filtro foi eficiente na obtenção das curvas características para os solos das parcelas em estudo, conforme ficou constatado pela semelhança das curvas características da amostra de solo da parcela da olericultura obtidas pelo ensaio de papel filtro e pela câmara de pressão de Fredlund (Figura 4. 29).



#### 4.9 – SUCCÃO “IN SITU”

Os resultados dos ensaios de papel filtro in situ estão apresentados na Tabela 4. 14, Tabela 4. 15, Tabela 4. 16, Tabela 4. 17, Tabela 4. 18, Tabela 4. 19, Figura 4. 46 , Figura 4. 47, Figura 4. 48, Figura 4. 49, Figura 4. 50, Figura 4. 51, Figura 4. 52, Figura 4. 53, Figura 4. 54, Figura 4. 55, Figura 4. 56, Figura 4. 57, Figura 4. 58, Figura 4. 59 e Figura 4. 60.

**Tabela 4. 14** - Dados de sucção dos ensaios 1 e 2 pelo método do papel filtro in situ.

Ensaio n.º	Data do Ensaio	Tipo de Cultivo	Profundidade (cm)	Sucção - Papel Filtro Menor (kPa)	Ensaio n.º	Data do Ensaio	Tipo de Cultivo	Profundidade (cm)	Sucção - Papel Filtro Menor (kPa)	Sucção - Papel Filtro Interdiário (kPa)
1	18/7/2008 a 18/8/2008	Oleri - cultura	30	19	2	18/8/2008 a 19/9/2008	Oleri - cultura	30	1.411	1.452
			60	4.676				60	1.644	1.785
			90	3.765				90	2.153	3.063
		Pasta - gem	30	3.415			Pasta - gem	30	1.072	940
			60	3.231				60	1.053	847
			90	1.321				90	481	805
		Recupe - ração Florestal	30	2.949			Recupe - ração Floresta I	30	1.018	840
			60	3.080				60	741	1.494
			90					90	6.182	7.573
		Floresta	30	78			Floresta	30	244	110
			60	260				60	306	243
			90	227				90	373	161

**Tabela 4. 15** - Dados de sucção do ensaio 3 pelo método do papel filtro in situ.

Ensaio n.º	Data do Ensaio	Tipo de Cultivo	Profundidade (cm)	Sucção - Papel Filtro Menor (kPa)	Sucção - Papel Filtro Interdiário (kPa)	Sucção - Papel Filtro Maior (kPa)
3	19/9/2008 a 28/10/2008	Olericultura	15	1.250	1.016	11
			30	2.115	1.693	7
			45	7	474	7
		Pastagem	15	1.216	1.361	130
			30	2.859	5.153	1.054
			45	3.150	2.643	27
		Recuperação Florestal	15	2.308	2.494	1.742
			30	4.019	3.959	2.423
			45	5.001	9.150	6.051
		Floresta	15	970	1.384	19
			30	1.520	1.797	1.509
			45	1.315	1.677	1.454

**Tabela 4. 16** - Dados de sucção do ensaio 4 pelo método do papel filtro in situ.

Ensaio n.º	Data do Ensaio	Tipo de Cultivo	Profundidade (cm)	Sucção - Papel Filtro Menor (kPa)	Sucção - Papel Filtro Interme - diário (kPa)	Sucção - Papel Filtro Maior (kPa)
4	28/10/2008 a 18/12/2008	Olericultura	15	75	76	6
			30	98	760	49
			45	354	75	5
		Pastagem	15	1.205	1.052	41
			30	573	975	19
			45	461	786	30
		Recuperação Florestal	15	794	818	149
			30	1.480	1.481	673
			45	1.751	1.494	934
		Floresta	15	59	167	12
			30	879	1.078	76
			45	32	452	10

**Tabela 4. 17** - Dados de sucção do ensaio 5 pelo método do papel filtro in situ.

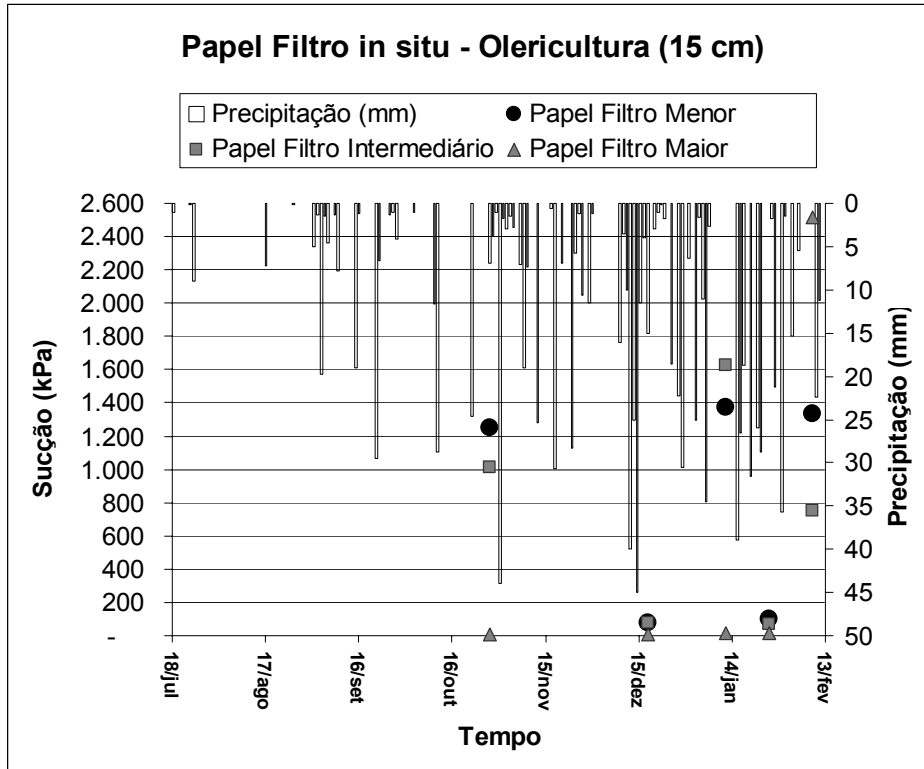
Ensaio n.º	Data do Ensaio	Tipo de Cultivo	Profundi- dade (cm)	Sucção - Papel Filtro Menor (kPa)	Sucção - Papel Filtro Interme - diário (kPa)	Sucção - Papel Filtro Maior (kPa)
5	18/12/2008 a 12/1/2009	Olericultura	15	1.372	1.624	17
			30	3.339	2.861	8
			45	388	2.754	2.063
		Pastagem	15	6.222	9.205	
			30	3.867	3.815	2.822
			45	5.543	5.898	4.410
		Recuperação Florestal	15	4.072	4.786	3.019
			30	4.230	3.880	3.475
			45	5.026	3.413	3.479
		Floresta	15	366	584	13
			30	1.819	1.706	10
			45	2.065	1.833	14

**Tabela 4. 18** - Dados de sucção do ensaio 6 pelo método do papel filtro in situ.

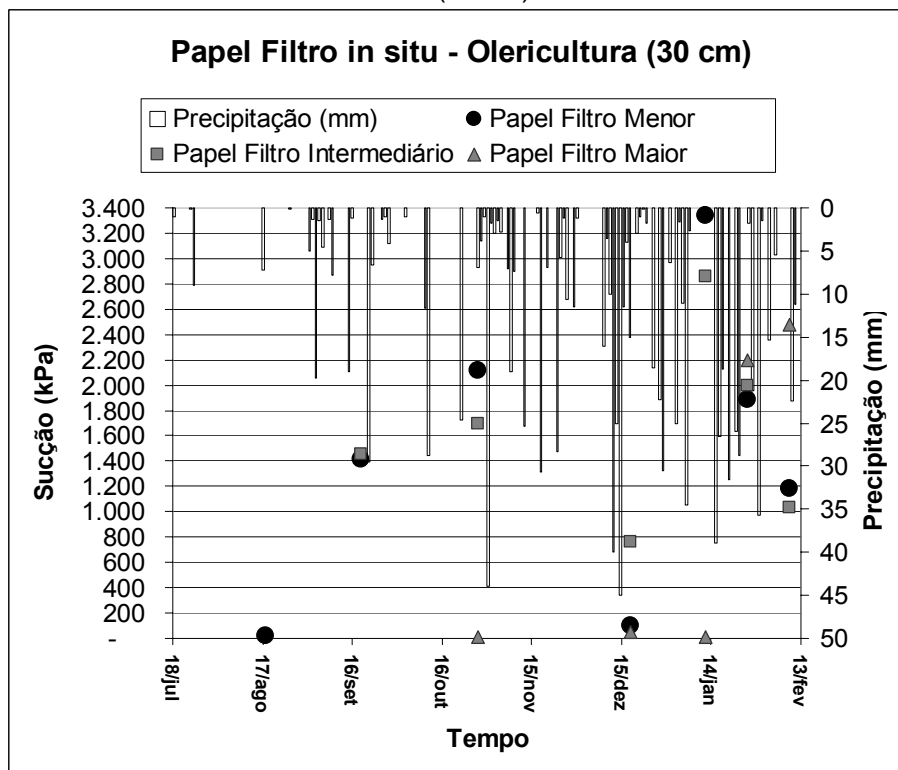
Ensaio n.º	Data do Ensaio	Tipo de Cultivo	Profundidade (cm)	Sucção - Papel Filtro Menor (kPa)	Sucção - Papel Filtro Interme - diário (kPa)	Sucção - Papel Filtro Maior (kPa)
6	12/1/2009 a 26/1/2009	Olericultura	15	102	68	12
			30	1.887	1.993	2.201
			45	2.016	2.596	1.254
		Pastagem	15	675	1.144	7
			30	1.137	970	7
			45	1.662	1.841	7
		Recuperação Florestal	15	1.019	819	1.198
			30	2.097	1.997	1.831
			45	1.837	1.770	1.222
		Floresta	15	415	420	105
			30	75	550	18
			45	267	976	31

**Tabela 4. 19** - Dados de sucção do ensaio 7 pelo método do papel filtro in situ.

Ensaio n.º	Data do Ensaio	Tipo de Cultivo	Profundidade (cm)	Sucção - Papel Filtro Menor (kPa)	Sucção - Papel Filtro Interme - diário (kPa)	Sucção - Papel Filtro Maior (kPa)
7	26/1/2009 a 9/2/2009	Olericultura	15	1.337	753	2.514
			30	1.188	1.032	2.480
			45	3	43	6
		Pastagem	15	3.621	4.614	1.058
			30	1.149	1.409	75
			45	3.159	2.894	2.098
		Recuperação Florestal	15	1.640	2.629	1.339
			30	3.503	3.404	2.192
			45	3.282	3.240	2.125
		Floresta	15	1.008	1.694	1.218
			30	2.775	2.619	2.164
			45	1.234	1.599	32



**Figura 4. 46** – Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da olericultura (15 cm).



**Figura 4. 47** - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da olericultura (30 cm).

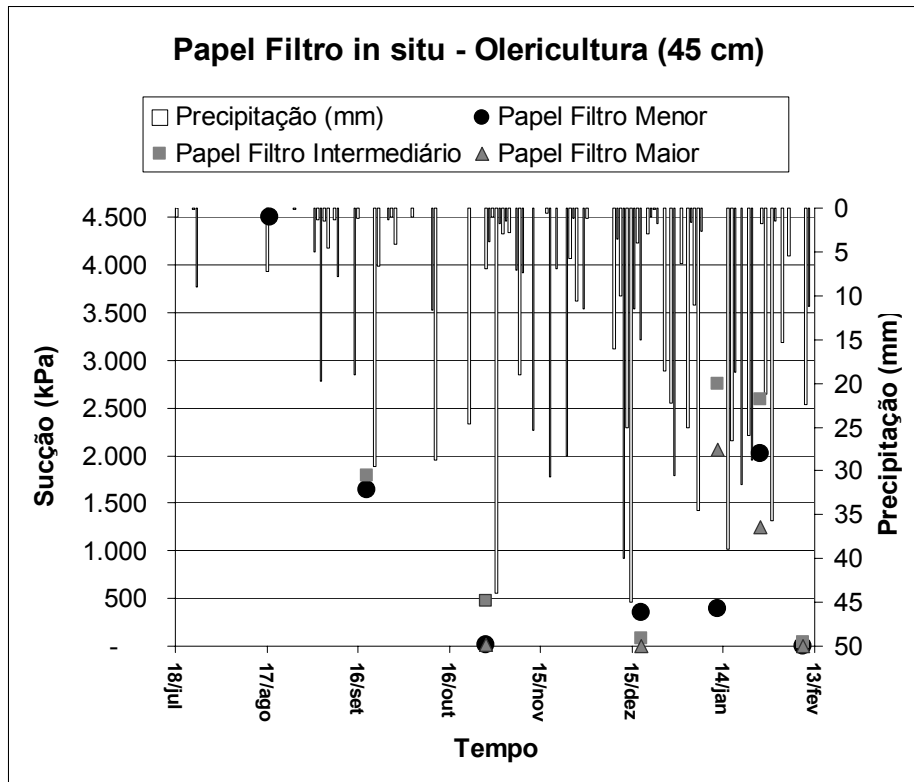


Figura 4. 48 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da olericultura (45 cm).

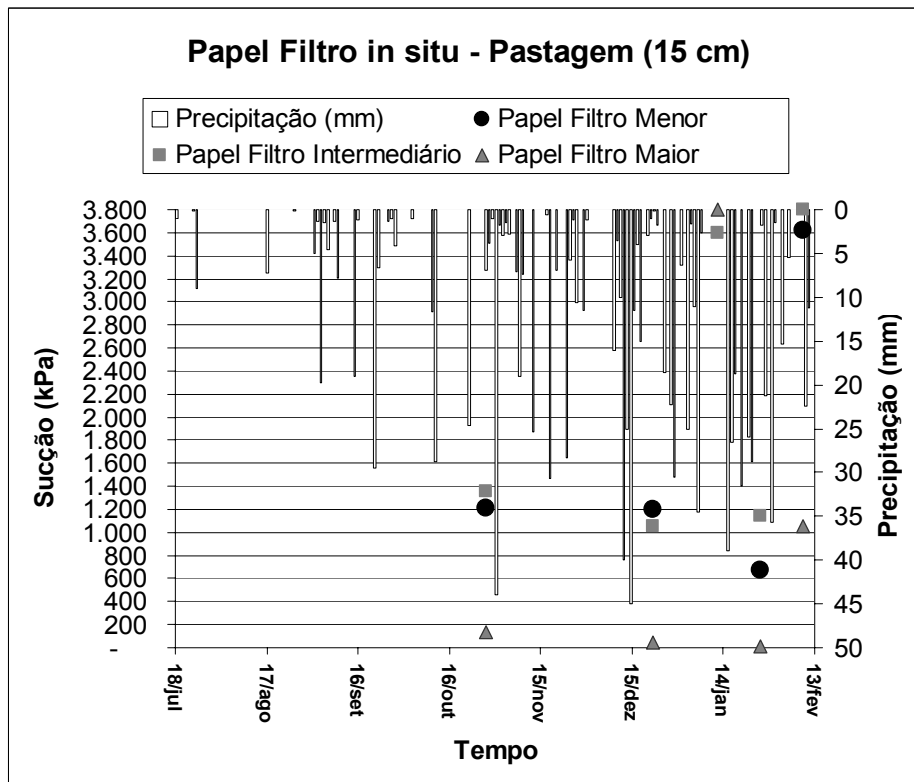


Figura 4. 49 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da pastagem (15 cm).

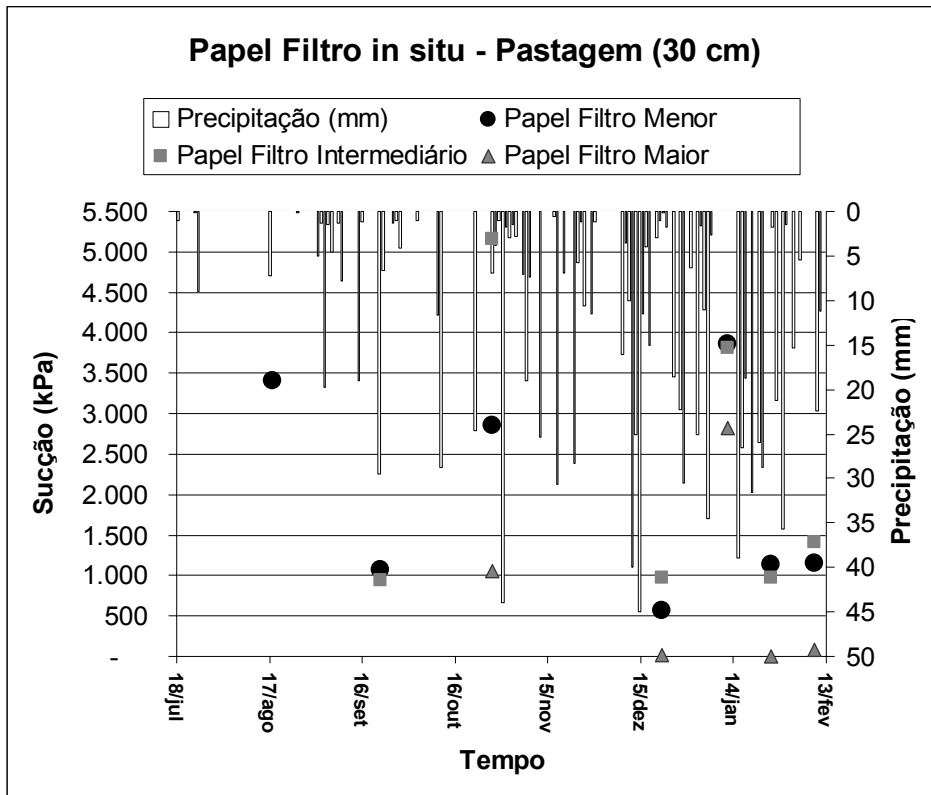


Figura 4. 50 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da pastagem (30 cm).

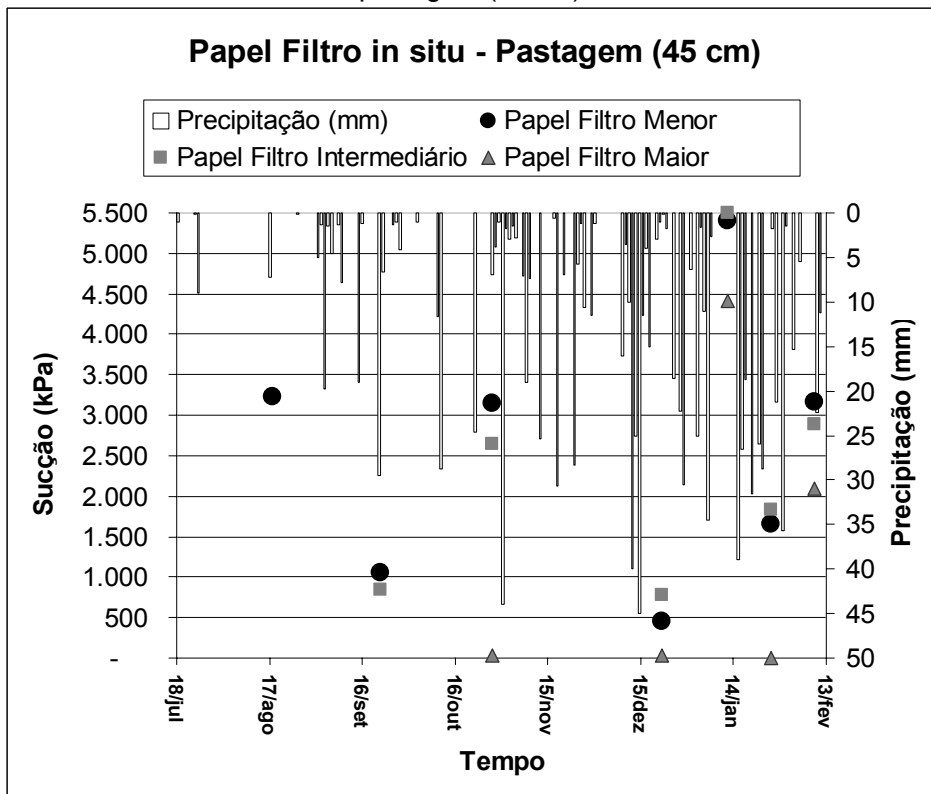


Figura 4. 51 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da pastagem (45 cm).

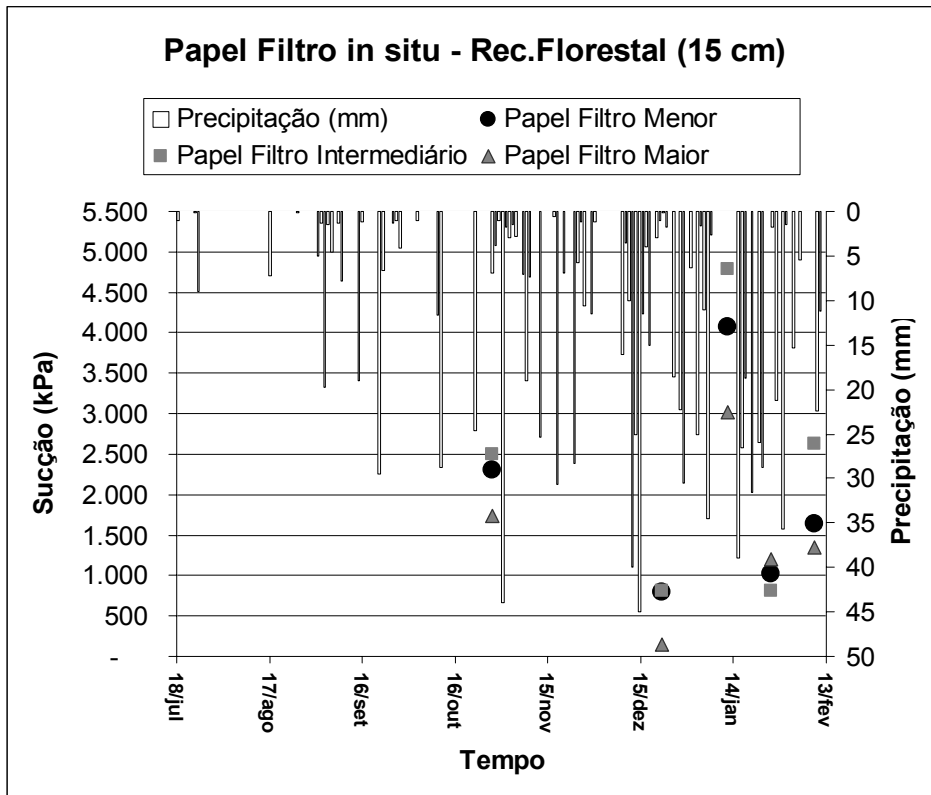


Figura 4. 52 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da recuperação florestal (15 cm).

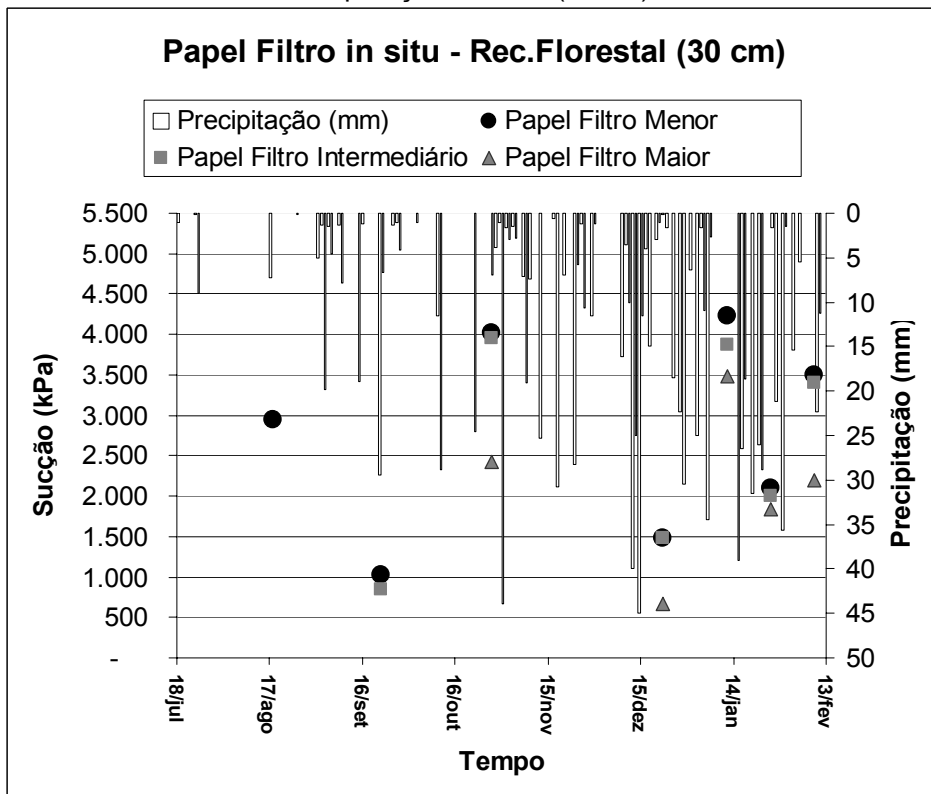


Figura 4. 53 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da recuperação florestal (30 cm).

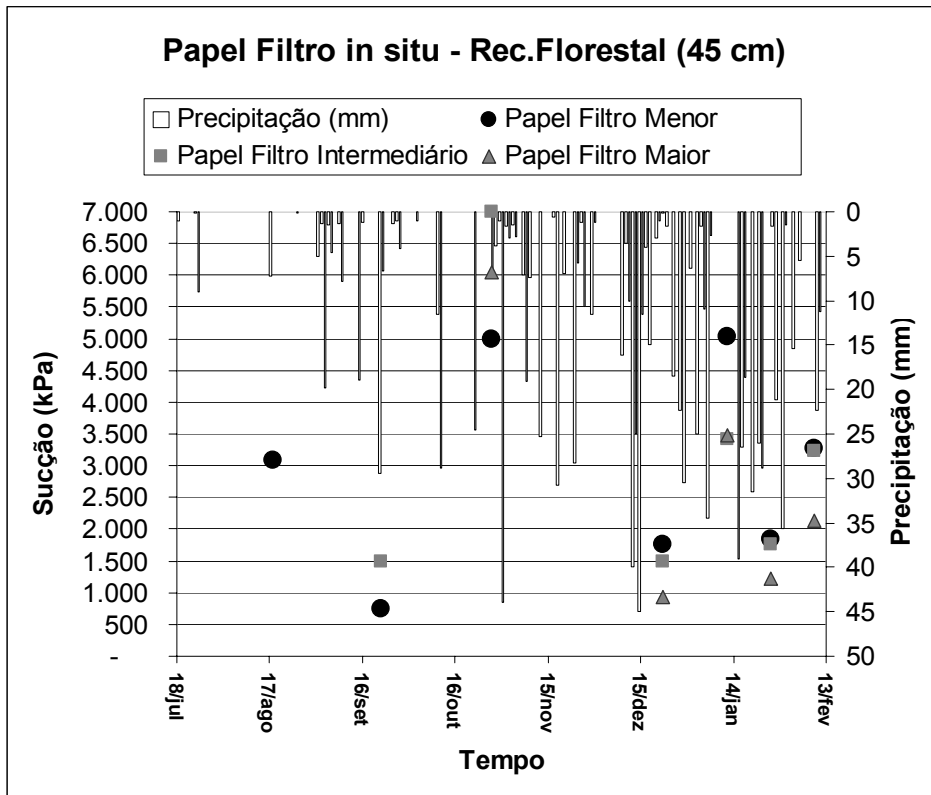


Figura 4. 54 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da recuperação florestal (45 cm).

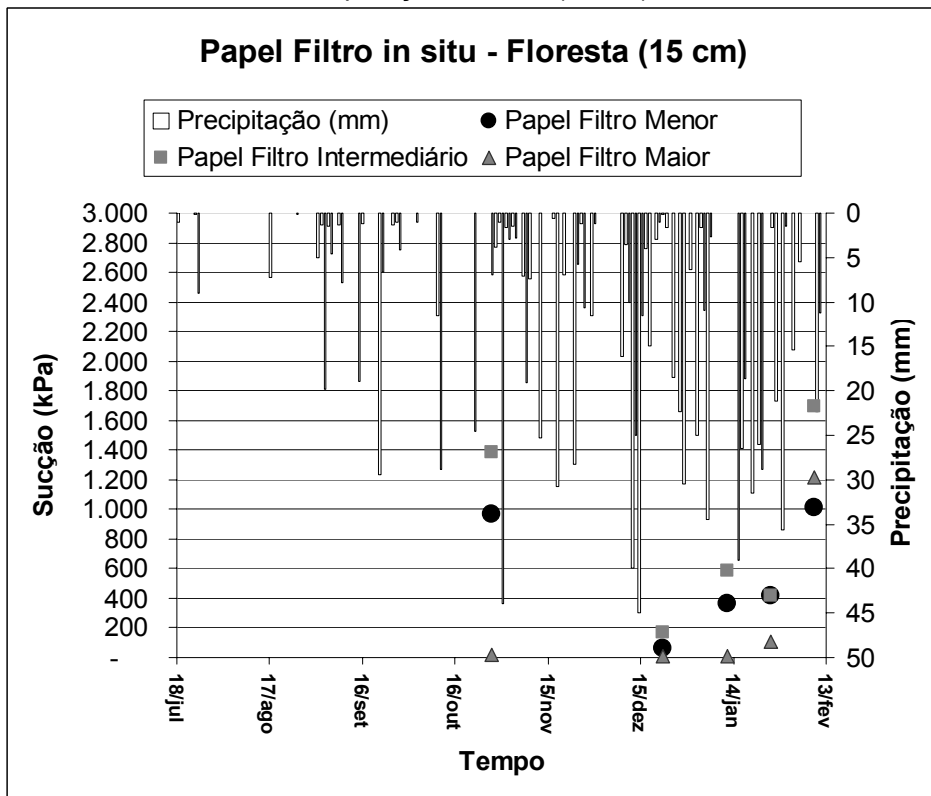


Figura 4. 55 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da floresta (15 cm).



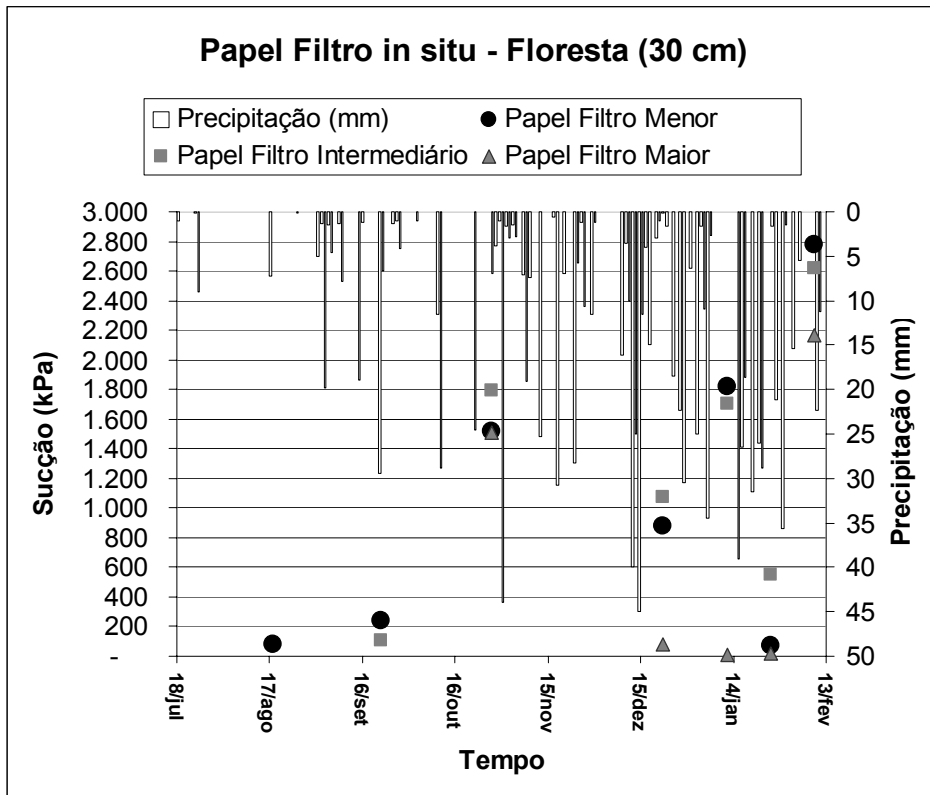


Figura 4. 56 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da floresta (30 cm).

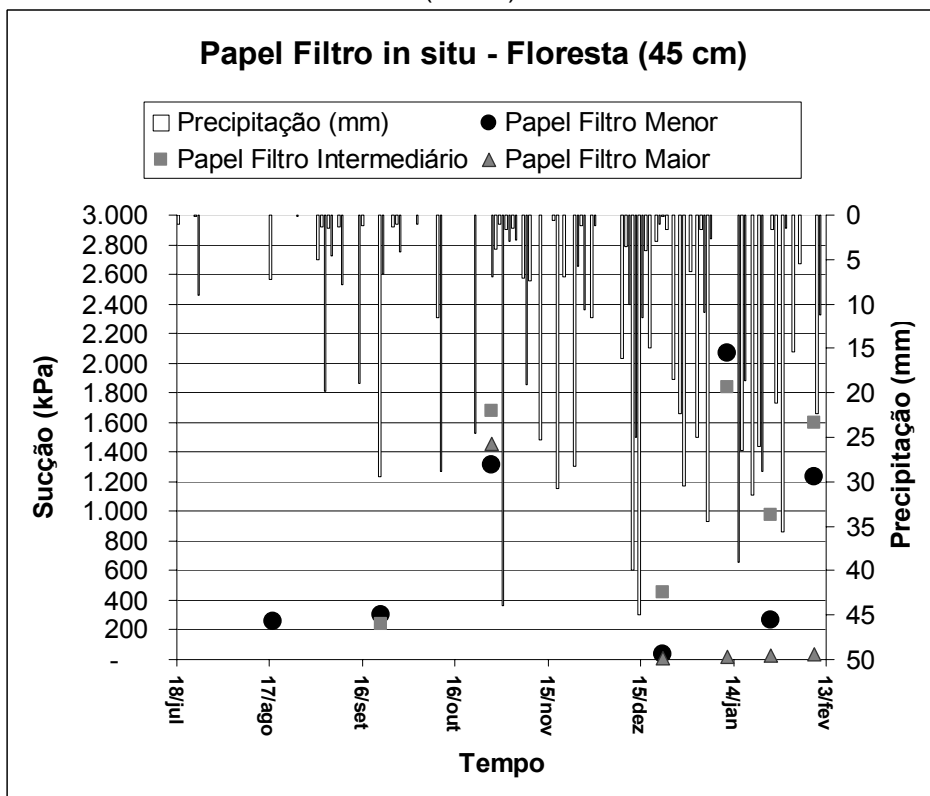


Figura 4. 57 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação – parcela da floresta (45 cm).

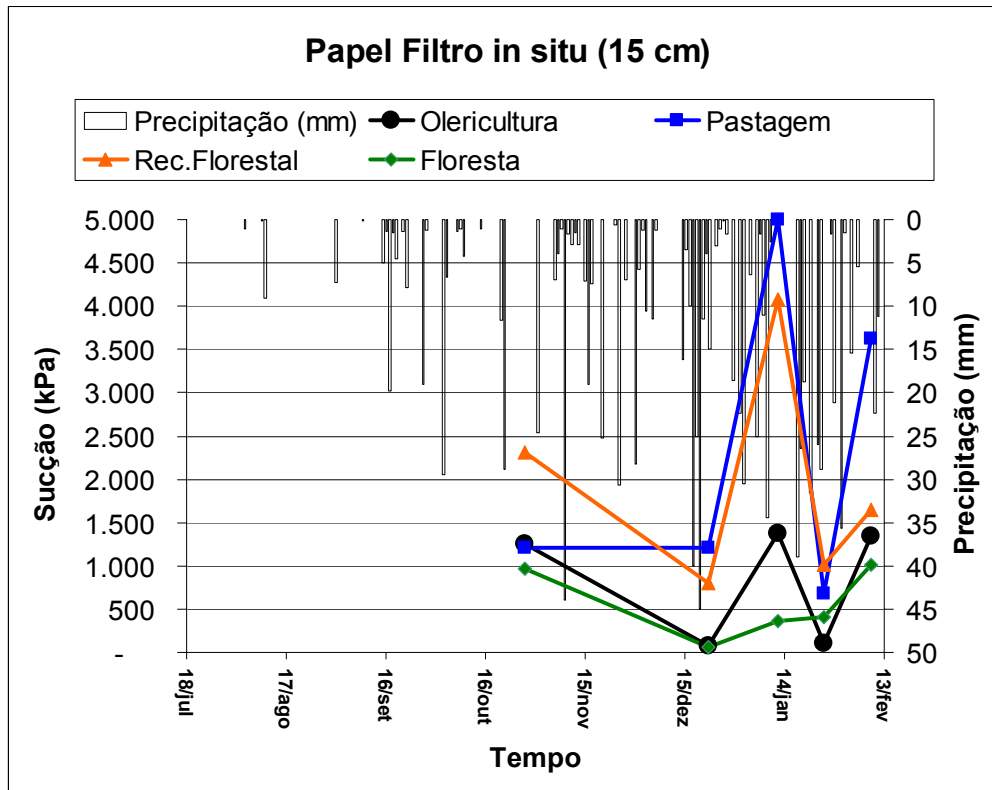


Figura 4. 58 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação dos solos das 4 parcelas a uma profundidade de 15 cm.

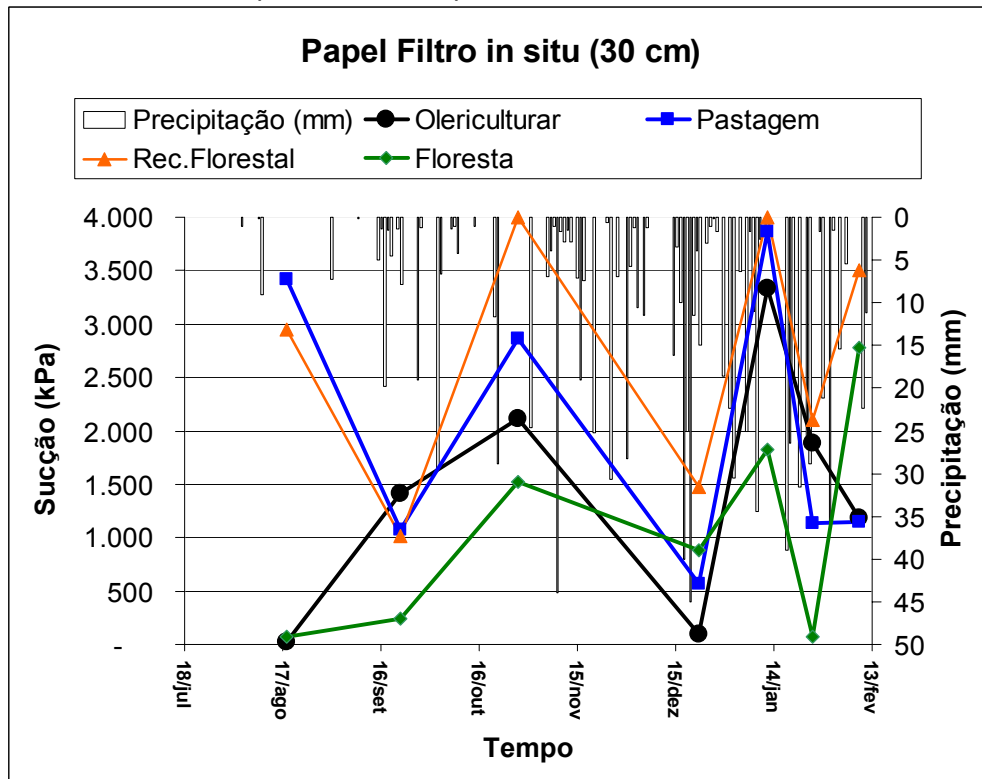


Figura 4. 59 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação dos solos das 4 parcelas a uma profundidade de 30 cm.

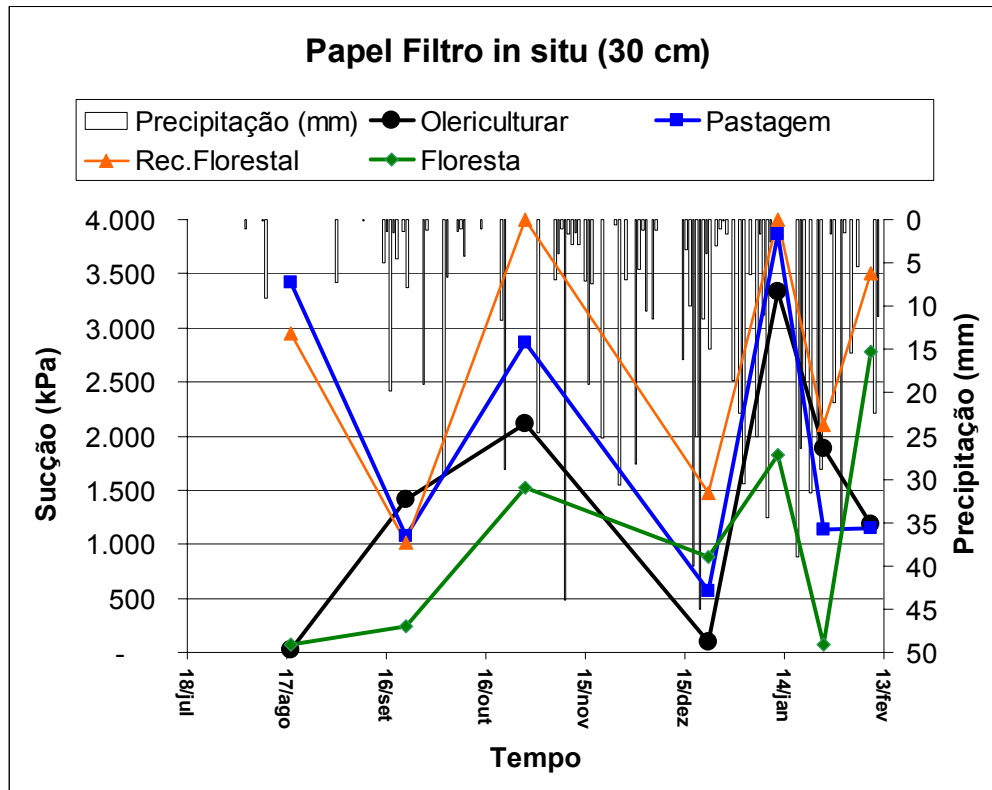


Figura 4. 60 - Gráfico sucção versus tempo versus precipitação dos solos das 4 parcelas a uma profundidade de 45 cm.

#### 4.9.1 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DA SUCÇÃO “IN SITU”

Os menores valores de sucção foram dos solos da parcela da floresta, provavelmente, devido à maior capacidade de retenção de água acarretada pelo maior teor de matéria orgânica nestes solos.

As medidas de sucção do solo da parcela hidro-erosiva da olericultura foram, quase sempre, menores do que às dos solos das parcelas da pastagem e recuperação florestal. Este fato é decorrente da constante irrigação da área da olericultura, que mantém o solo com certa quantidade de umidade durante o período de cultivo. Pode-se notar que os valores de sucção na área da olericultura são menores do que dos solos das parcelas da pastagem e recuperação florestal a partir dos períodos de irrigação (18/8, 28/10 e 22/12).

Os valores de sucção dos solos das parcelas da pastagem e recuperação florestal são maiores do que aos da olericultura e floresta, devido, principalmente, a textura mais argilosa destes solos. As partículas de argila têm uma maior capacidade de retenção de água do que a areia e silte, resultando em maiores valores de sucção.

Os solos das parcelas da pastagem e recuperação florestal apresentaram respostas de variação de sucção mais rápidas frente aos eventos pluviométricos, apesar de serem mais argilosos e reterem mais fortemente a água, devido à elevada permeabilidade destes solos.

As alterações de sucção do solo da parcela da olericultura frente as precipitações são mais lentas do que os solos das demais parcelas hidro-erosivas devido a baixa permeabilidade deste solo, que pode ser notado nos dados de sucção do dia 9/2 na Figura 4. 59 e Figura 4. 60.

Os solos das parcelas da pastagem e recuperação florestal tiveram comportamentos parecidos frente a sucção, por serem solos do mesmo tipo e mesma classe textural.

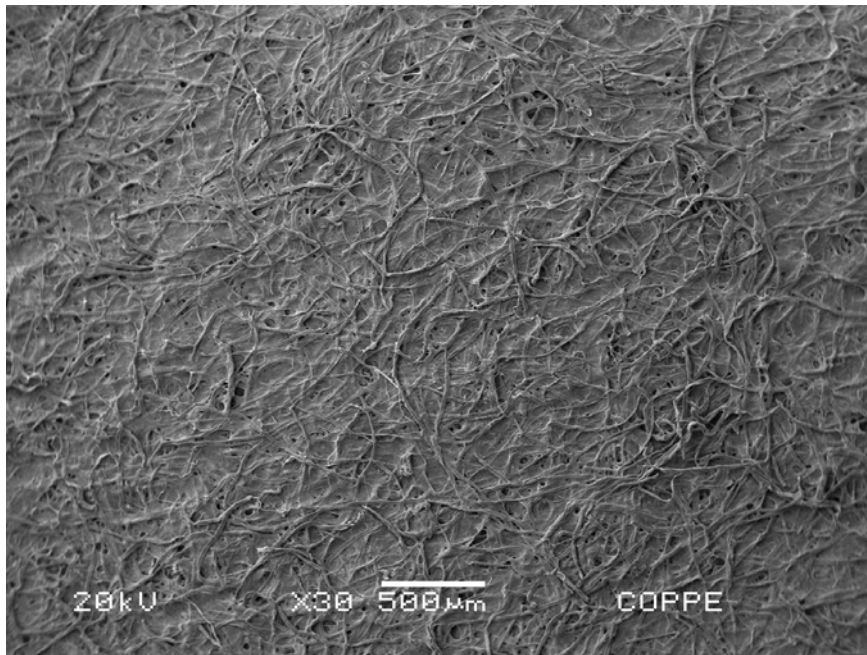
#### 4.10 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DO PAPEL FILTRO

As fotos da microscopia eletrônica estão na Figura 4. 61 e Figura 4. 62. Os resultados do processamento das imagens da microscopia eletrônica referente a filtragem das fibras maiores estão apresentados na Tabela 4. 20.

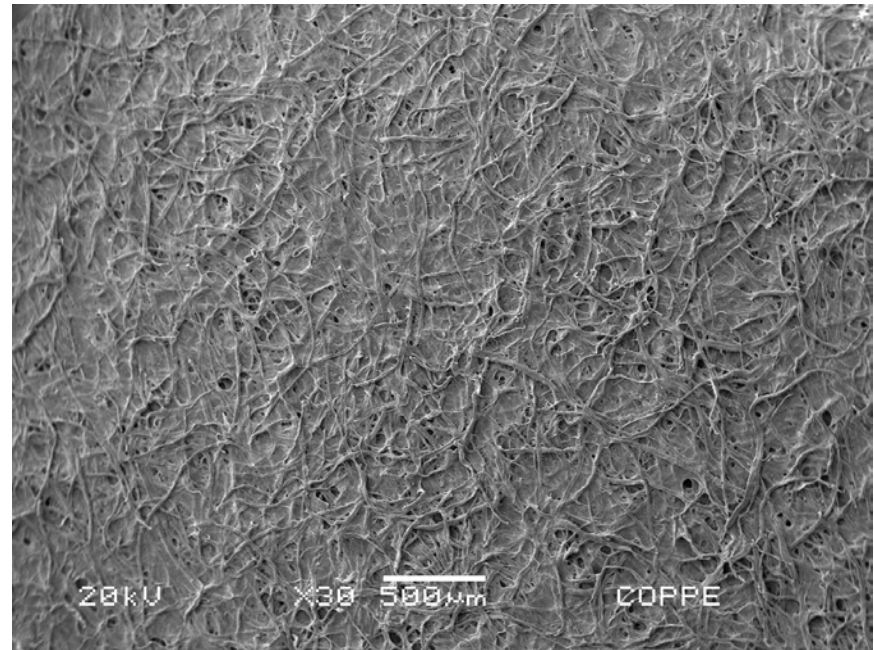
O processamento das imagens permite perceber que tanto os papéis filtro de um mesmo lote quanto de lotes diferentes possuem diferenças na composição da trama de suas fibras (Tabela 4. 20). Constatou-se que para as amostras de papel filtro observadas, as características são únicas e específicas, independente de serem do mesmo lote de fabricação ou não.

**Tabela 4. 20 – Resultados do processamento**

<b>Amostra</b>	<b>Nº de Pixels Observados</b>	<b>%</b>
<b>A</b>	101.418	8,3
<b>B</b>	149.153	12,1
<b>Diferença entre A e B (mesmo lote)</b>	47.735	<b>3,8</b>
<b> </b>		
<b>C</b>	88.832	7,2
<b>D</b>	149.121	12,1
<b>Diferença entre C e D (lotes diferentes)</b>	60.289	<b>4,9</b>

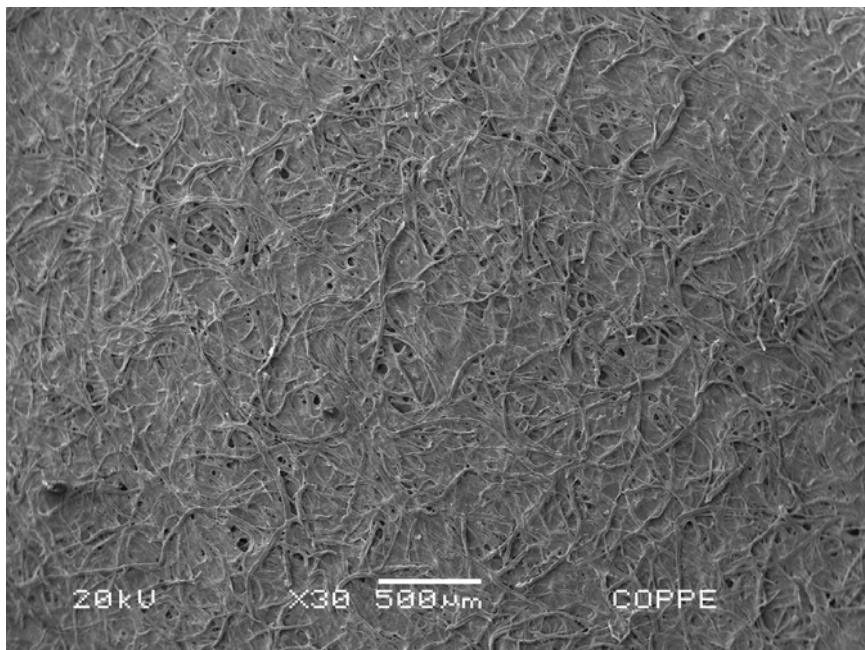


**Amostra A**

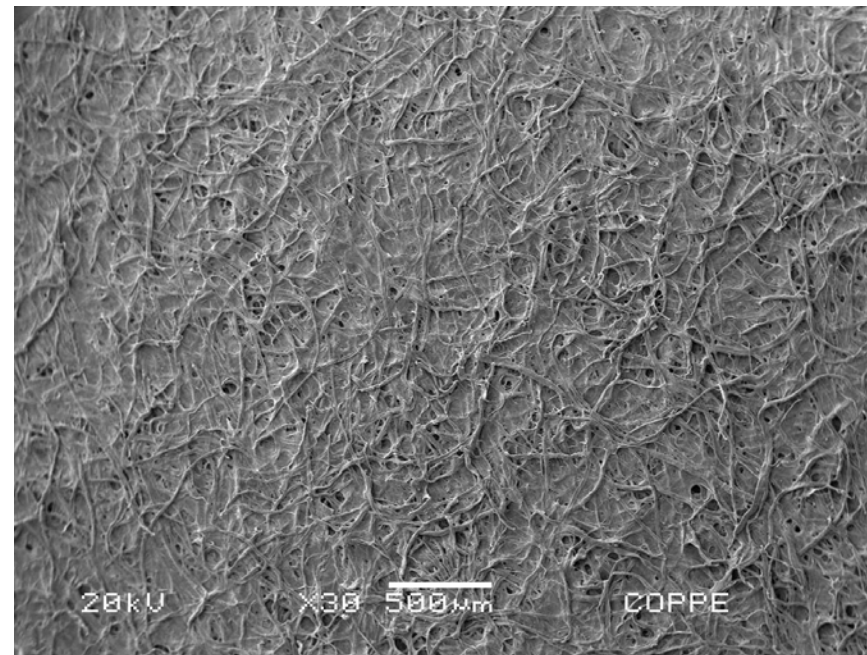


**Amostra B**

**Figura 4. 61** – Comparação de duas imagens de microscopia eletrônica de varredura do mesmo lote de papel filtro.



**Amostra C**



**Amostra D**

**Figura 4. 62** - Comparação de duas imagens de microscopia eletrônica de varredura de lotes diferentes de papel filtro.

#### 4.11 – ENSAIO DE INDERBITZEIN

Os resultados dos ensaios de Inderbitzen das 3 amostras de solos indeformadas da parcela hidro-erosiva da olericultura estão listados na Tabela 4. 21, Tabela 4. 22, Tabela 4. 23, Tabela 4. 24, Tabela 4. 25 e Tabela 4. 26 e ilustrados na Figura 4. 63, Figura 4. 64 e Figura 4. 65.

**Tabela 4. 21** – Ensaio de Inderbitzen com declividade de 10° - amostra 1 do solo da parcela hidro-erosiva da olericultura.

Etapa	Tempo (min)	Volume Escoado (l)	Volume infiltrado (ml)	Peso Areia Grossa (g)	Peso Areia Fina e Média (g)	Erosão (kg/ha)	Peso Silte + Argila (g/l)
1	0 a 5	14,2	29	0	0,237	140,2	0
2	5 a 10	16,9	93	0	0,038	22,5	0
3	10 a 15	13,1	60	0	0,008	4,7	0
4	15 a 30	41,8	200	0	0,040	23,7	0
5	30 a 45	42,5	190	0	0,175	103,6	0
6	45 a 60	42,7	180	0	0,254	150,3	0

**Tabela 4. 22** – Ensaio de Inderbitzen com declividade de 22° - amostra 1 do solo da parcela hidro-erosiva da olericultura.

Etapa	Tempo (min)	Volume Escoado (l)	Volume infiltrado (ml)	Peso Areia Grossa (g)	Peso Areia Fina e Média (g)	Erosão (kg/ha)	Peso Silte + Argila (g/l)
1	0 a 5	11	8	0,010	0,661	391,1	1,5
2	5 a 10	11,5	18	0	0,083	49,1	0
3	10 a 15	10	14	0	0,074	43,8	0
4	15 a 30	31,4	44	0	0,458	271,0	0
5	30 a 45	33,7	42	0	0,405	239,6	0
6	45 a 60	33,7	45	0	0,711	420,7	0,2

**Tabela 4. 23** - Ensaio de Inderbitzen com declividade de 10° - amostra 2 do solo da parcela hidro-erosiva da olericultura.

Etapa	Tempo (min)	Volume Escoado (l)	Volume infiltrado (ml)	Peso Areia Grossa (g)	Peso Areia Fina e Média (g)	Erosão (kg/ha)	Peso Silte + Argila (g/l)
1	0 a 5	13,5	0	0,025	0,681	403,0	0
2	5 a 10	14,4	0	0	0,078	46,2	0
3	10 a 15	14,3	0	0	0,132	78,1	0
4	15 a 30	43,1	12	0,014	0,345	204,1	0
5	30 a 45	43,2	14	0,000	0,453	268,0	0
6	45 a 60	46,2	17	0,009	0,317	187,6	0

**Tabela 4. 24** - Ensaio de Inderbitzen com declividade de 22° - amostra 2 do solo da parcela hidro-erosiva da olericultura.

Etapa	Tempo (min)	Volume Escoado (l)	Volume infiltrado (ml)	Peso Areia Grossa (g)	Peso Areia Fina e Média (g)	Erosão (kg/ha)	Peso Silte + Argila (g/l)
1	0 a 5	10	2	0	1,193	705,9	0,5
2	5 a 10	12	2	0	0,220	130,2	0,5
3	10 a 15	8,2	3	0	0,649	384,0	0,4
4	15 a 30	42,3	5	0	0,064	37,9	0,3
5	30 a 45	37,3	4	0	0,160	94,7	0,2
6	45 a 60	41,5	5	0	0,139	82,2	0

**Tabela 4. 25** - Ensaio de Inderbitzen com declividade de 10° - amostra 3 do solo da parcela hidro-erosiva da olericultura.

Etapa	Tempo (min)	Volume Escoado (l)	Volume infiltrado (ml)	Peso Areia Grossa (g)	Peso Areia Fina e Média (g)	Erosão (kg/ha)	Peso Silte + Argila (g/l)
1	0 a 5	13	0	0	0,051	30,2	0,5
2	5 a 10	14,1	0	0	0,017	10,1	0,1
3	10 a 15	14	0	0	0,007	4,1	0
4	15 a 30	42,1	0	0	0,054	32,0	0
5	30 a 45	42,5	0	0	0,032	18,9	0
6	45 a 60	43	0	0	0,017	10,1	0,1

**Tabela 4. 26** - Ensaio de Inderbitzen com declividade de 22° - amostra 3 do solo da parcela hidro-erosiva da olericultura.

Etapa	Tempo (min)	Volume Escoado (l)	Volume infiltrado (ml)	Peso Areia Grossa (g)	Peso Areia Fina e Média (g)	Erosão (kg/ha)	Peso Silte + Argila (g/l)
1	0 a 5	13	0	0	0,090	53,3	0
2	5 a 10	12,2	0	0	0,026	15,4	0
3	10 a 15	12,3	0	0	0,015	8,9	0
4	15 a 30	38	0	0	0,030	17,8	0
5	30 a 45	38,5	0	0	0,036	21,3	0
6	45 a 60	38,7	0	0	0,034	20,1	0



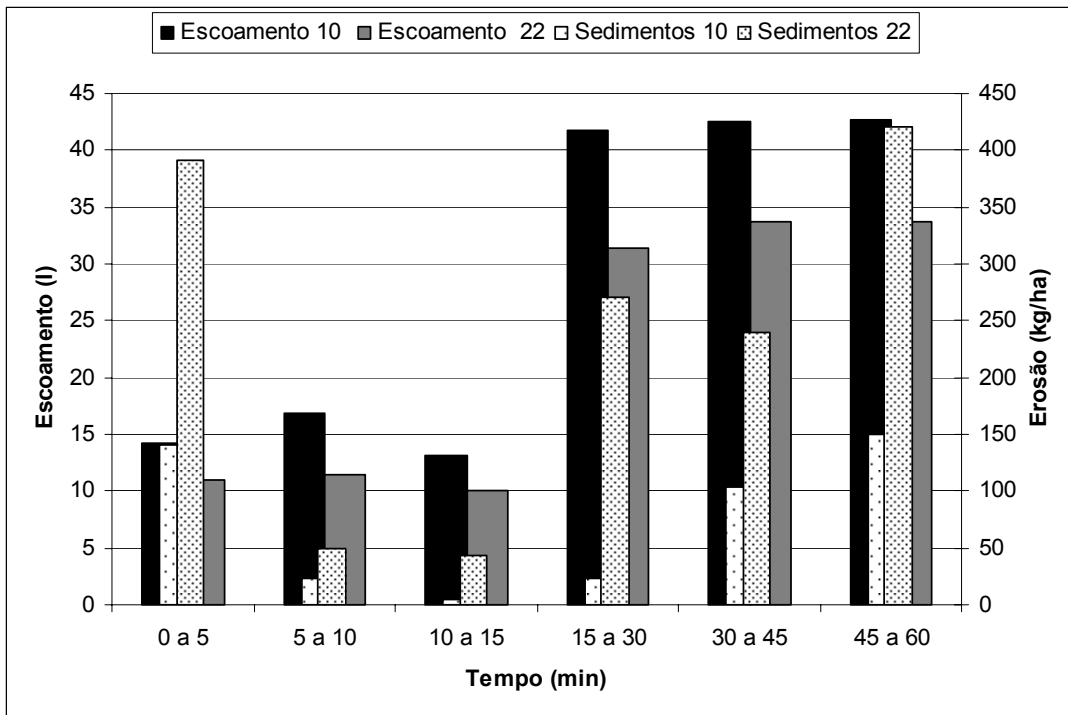


Figura 4. 63 - Ensaio de Inderbitzen com declividade de 10° e 22° - amostra 1 do solo da parcela hidro-erosiva da olericultura.

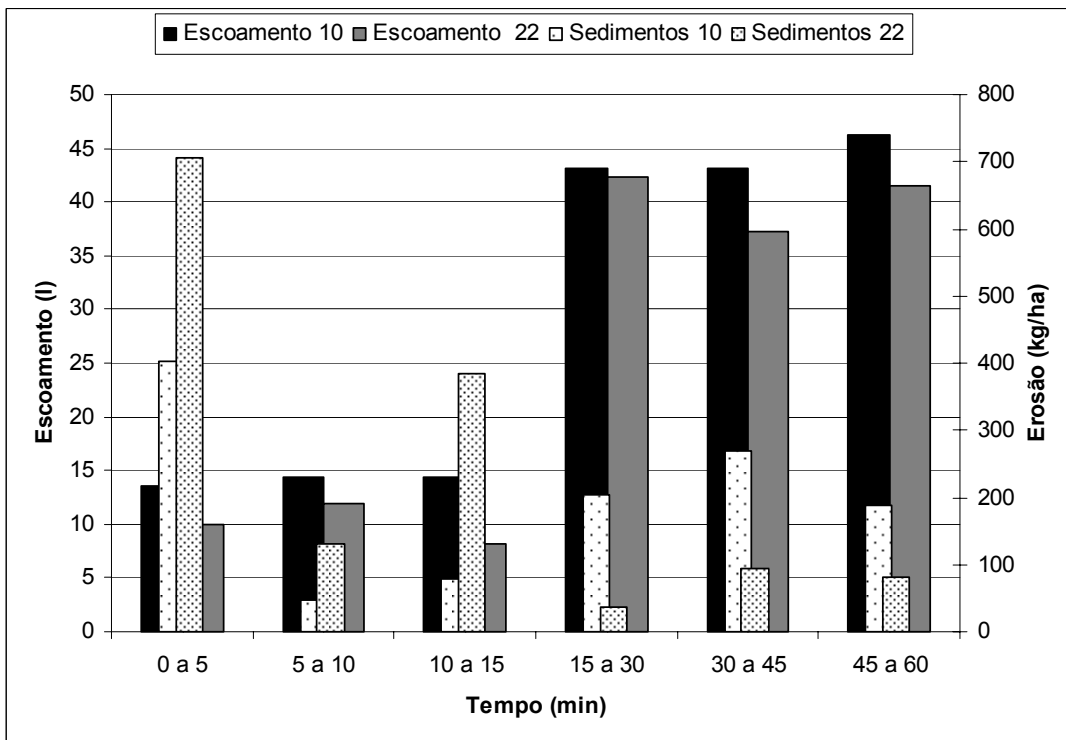
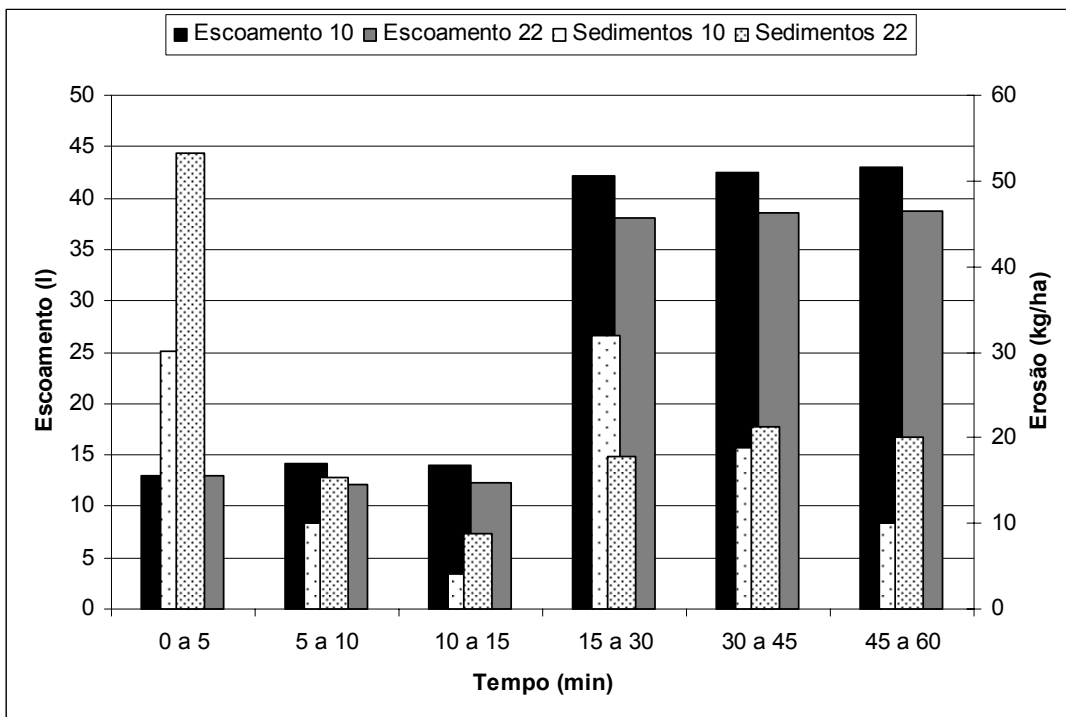


Figura 4. 64 - Ensaio de Inderbitzen com declividade de 10° e 22° - amostra 2 do solo da parcela hidro-erosiva da olericultura.



**Figura 4. 65** - Ensaio de Inderbitzen com declividade de 10° e 22° - amostra 3 do solo da parcela hidro-erosiva da olericultura.

#### 4.11.1 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE INDERBITZEIN

O ensaio de Inderbitzen não leva em consideração o potencial erosivo do impacto das gotas de chuva, conseqüentemente a produção de sedimentos está subestimada. BERTONI e LOMBARDI NETO (1990) comentam que a energia cinética da chuva é 256 vezes maior do que a do escoamento superficial.

Os valores de produção de sedimentos dos ensaios de Inderbitzen são acentuados, conforme foi visto no experimento de campo na parcela hidro-erosiva da olericultura, que constata uma erodibilidade elevada conforme o resultado de produção de sedimentos no período de Março/2008 a Janeiro/2009 de 14.777 kg/ha (Tabela 4. 7) para os solos desta parcela.

Nota-se uma maior proporção de produção de sedimentos nos primeiros 5 minutos dos ensaios. Após os instantes iniciais de precipitação, o grau de saturação do solo aumenta gradativamente. A frente de umidade da chuva inicial comprime o ar ocluso nos poros do solo, que atua separando as partículas do solo, sendo assim a erosão é mais intensa nos instantes iniciais com redução gradativa ao longo do tempo. Os resultados de produção de sedimentos da maioria dos ensaios constataam uma erosão mais acentuada na maior declividade de 22° . Conforme constatado por FÁCIO

(1991) e MENDES (2006) a produção de sedimentos aumenta com a declividade da rampa e, é maior nos primeiros 5 minutos.

O escoamento superficial em todos os ensaios com declividade de  $22^{\circ}$  foram os menores observados, contrariando as expectativas, uma vez que, para um mesmo grau de saturação, quanto maior a inclinação, maior o escoamento superficial. No entanto, os valores de escoamento observados para a inclinação de  $10^{\circ}$  podem não ser representativos, porquanto as amostras não ficaram acondicionadas adequadamente, o que pode ter ocasionado uma perda de umidade do material.

A amostra 3 foi mal condicionada na câmara úmida e estava compactada, o que ocasionou nenhum valor de infiltração.

## 4.12 – ENSAIO DE DESAGREGAÇÃO

Os resultados dos ensaios de desagregação estão na Tabela 4. 27.

**Tabela 4. 27** – Resultados dos ensaios de desagregação.

Amostra	Cultivo	Prof. (cm)	Imersão	15 min	30 min	24 horas
20	Olericultura	60	Total	Fraturamento	Fraturamento avançado	Abatimento
16	Olericultura	60	Parcial	Fraturamento parcial	Abatimento	-
24	Pastagem	30	Total	Fraturamento avançado	Fraturamento bem avançado	Fraturamento bem avançado
23	Pastagem	30	Parcial	Sem resposta	Fraturamento pequeno	Fraturamento pequeno
30	Recup. Florestal	60	Total	Abatimento	-	-
22	Recup. Florestal	30	Parcial	Fraturamento parcial	Fraturamento avançado	Abatimento
12	Floresta	90	Total	Sem resposta	Sem resposta	Sem resposta
5	Floresta	60	Parcial	Sem resposta	Fraturamento parcial	Fraturamento parcial

### 4.12.1 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESAGREGAÇÃO

O resultado do ensaio constatou que o solo da olericultura possui alta desagregabilidade, provavelmente, devido à baixa coesão dos seus agregados.

A amostra 23 da pastagem estava mais compactada (porosidade “n” = 55%) em relação à amostra 24 (n = 65%) e, conseqüentemente, as partículas de solo da amostra 23 estavam mais coesas havendo uma menor desagregação.

As amostras dos solos da floresta apesar de terem uma textura mais arenosa e, aparentemente uma menor coesão entre as suas partículas - apresentaram as

melhores respostas frente à desagregabilidade. De acordo com as análises químicas (Tabela 4. 4), os solos da parcela hidro-erosiva da floresta possuem os maiores teores de matéria orgânica, que pela sua propriedade cimentante, mantém os agregados fortemente unidos.

#### 4.13 – ENSAIO TRIAXIAL

Os resultados do ensaio triaxial da amostra de solo da parcela hidro-erosiva da olericultura estão na Figura 4. 66, Figura 4. 67, Figura 4. 68 e Figura 4. 69.

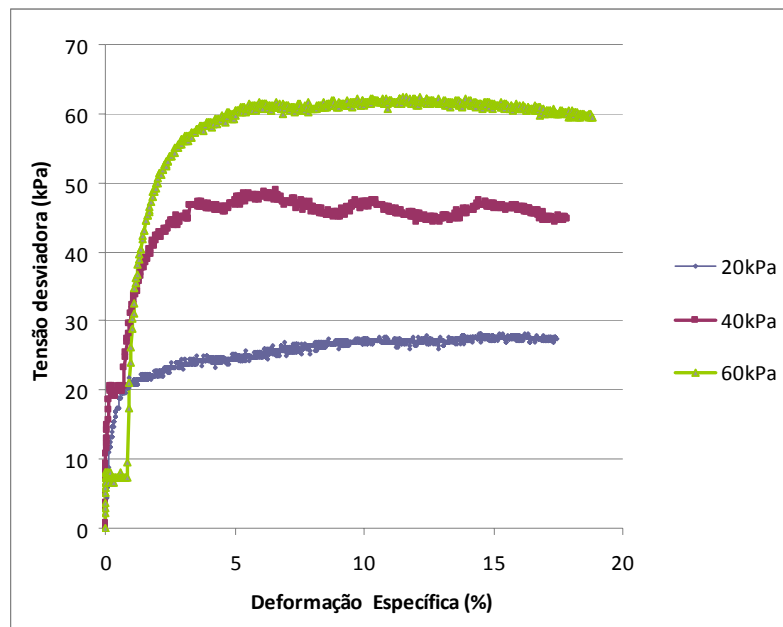


Figura 4. 66 – Gráfico mostrando a ruptura.

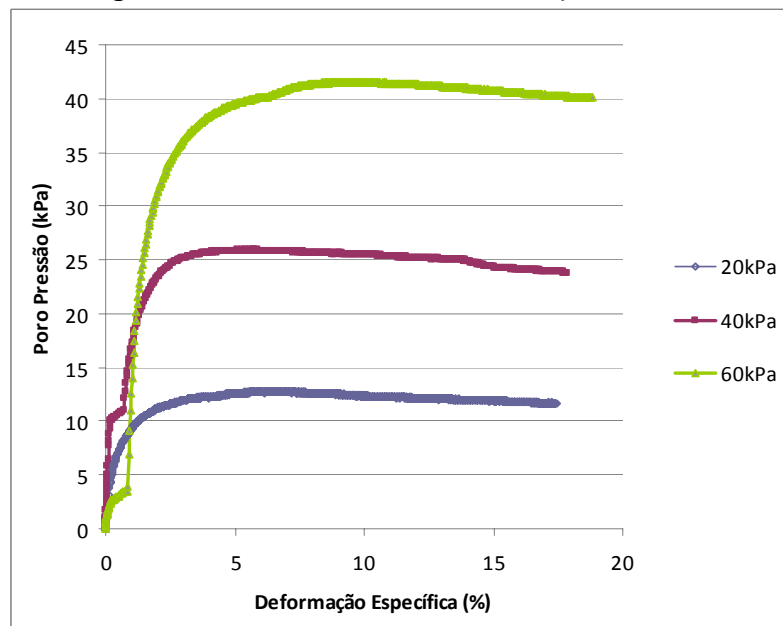


Figura 4. 67 – Resultado da deformação específica versus poro pressão.

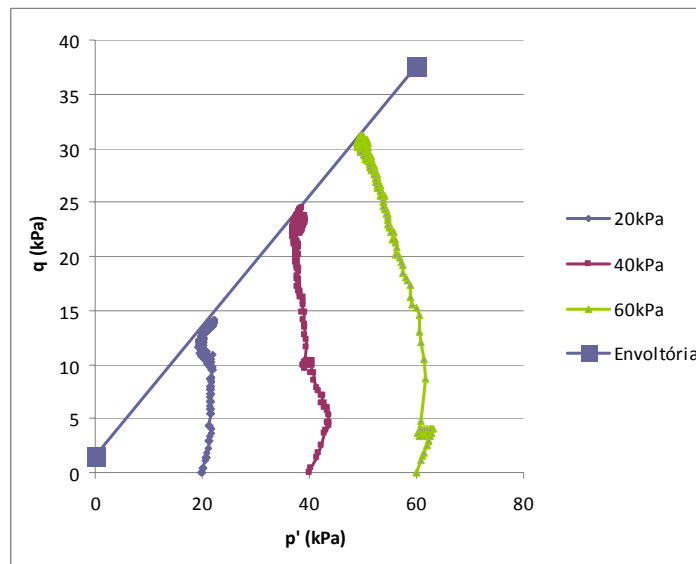


Figura 4. 68 – Gráfico p versus q.

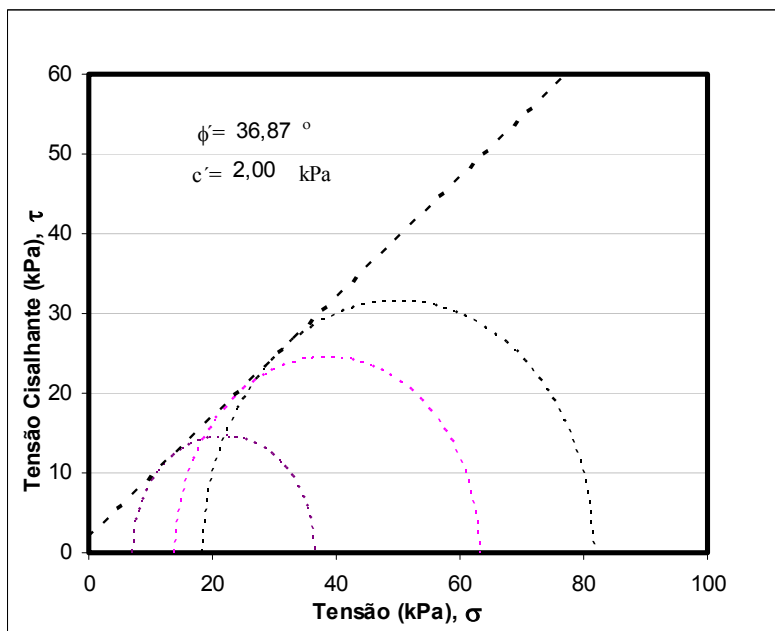


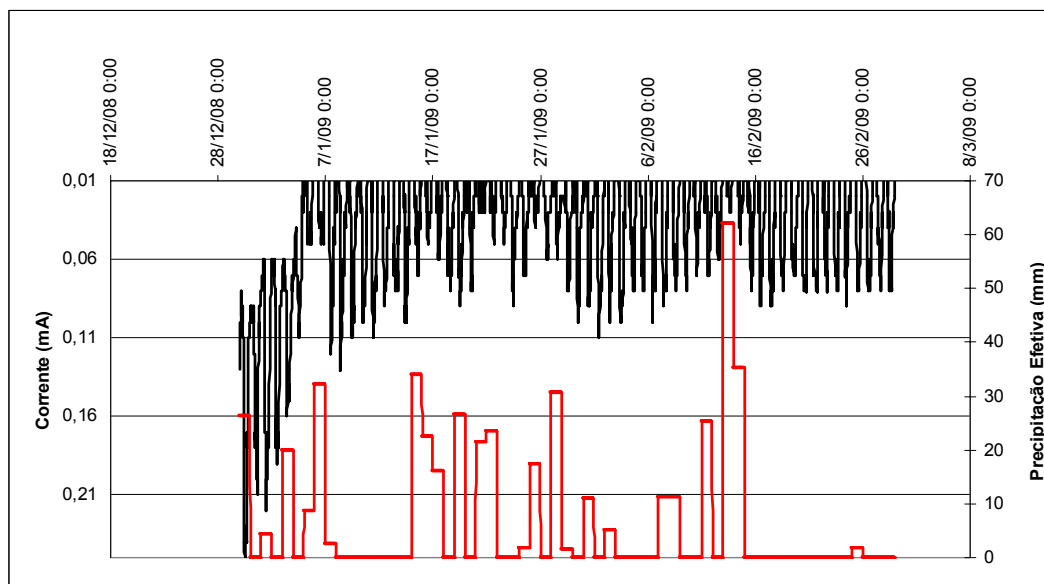
Figura 4. 69 – Círculo de Mohr.

#### 4.13.1 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS

A determinação do parâmetro de coesão efetiva foi importante para o entendimento do processo erosivo na parcela hidro-erosiva da olericultura. Entretanto, acredita-se que o ensaio de compressão diametral seja mais adequado, visto que o processo erosivo relaciona-se mais estreitamente com forças de tração. O baixo valor de coesão efetiva corrobora com a alta desagregabilidade do solo constatado no ensaio de desagregação e na elevada erodibilidade do solo da parcela da olericultura. Para uma melhor conclusão, ensaios triaxiais deveriam ter sido feitos para cada solo estudado, e assim correlacionar coesão com erodibilidade.

#### 4.14 – TENSIOMETRIA

As medições dos tensiômetros estão na Figura 4. 70.



**Figura 4. 70** – Valor medido pelo tensiômetro em corrente (mA) versus precipitação versus tempo a uma profundidade de 30 cm na parcela da olericultura.

##### 4.14.1 – DISCUSSÕES DOS RESULTADOS DA TENSIOMETRIA

Nota-se certa sensibilidade do equipamento em resposta aos eventos pluviométricos. Entretanto, não se teve total confiança no transdutor, pois não foi possível realizar a calibração para sucções acima de 50 kPa. Tendo em vista que não houve elucidação do problema do equipamento, acredita-se que se trata de algum travamento no flexionamento do diafragma do transdutor modelo K1, quando na presença de pressões negativas que representam a sucção no solo.

## **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

### **5.1 - CONCLUSÕES**

O solo da parcela da olericultura é pouco coesivo e de fácil desagregação conforme foi constatado nos ensaios de desagregação e no ensaio triaxial.

Os ensaios de Inderbitzen e o experimento de campo na parcela hidro-erosiva permitiram constatar, pelos resultados de produção de sedimentos e escoamento superficial, que o solo da parcela da olericultura possui alta erodibilidade.

A área da parcela hidro-erosiva da olericultura representa uma área degradada, segundo a norma ABNT-NBR 10703. O uso de cobertura morta no período entre os cultivos das olerícolas é primordial para proteger o solo contra o impacto da gota de chuva, e a sua incorporação melhora a estruturação do solo e a capacidade de infiltração do solo. Com esta simples prática de cultivo, o escoamento superficial e a produção de sedimentos podem ser minimizados e a fertilidade do solo vai ser lentamente restabelecida.

A erodibilidade dos solos não pode ser baseada na análise isolada das características físico-químicas e mineralógicas do solo. Todos estes dados devem ser analisados e discutidos levando-se em consideração a geomorfologia, o meio físico biótico e antrópico, para se ter uma avaliação global do processo erosivo.

Na área de estudo o efeito da aração excessiva é significativo para o processo erosivo. A enxada rotativa do micro trator (máquina utilizada em larga escala na região serrana para arar a terra) desestrutura o solo diminuindo a sua capacidade de infiltração, aumentando a erodibilidade em relação às outras áreas. A prática de cultivo mínimo, que envolve um menor revolvimento do solo, deveria ser adotada na região.

O manejo de rodízio do rebanho tem sido uma prática eficiente de pastoreio e de conservação de solo, conforme ressaltam os valores baixos de escoamento superficial e produção de sedimentos na parcela da pastagem. Sistemas de cultivo com manejo adequado do solo propiciam menores taxas de erosão e escoamento superficial. A compactação do solo causada pelo pastoreio não acelerou, significativamente, o processo erosivo. O eficiente rodízio do gado propiciou a renovação do sistema radicular, que atenuou a compactação decorrente do pisoteio animal.



A curva característica de um solo pode ser obtida com apenas 5 ensaios de papel filtro, desde que a amostra de solo tenha sido ensaiada a umidades volumétricas bem distribuídas.

O uso de lotes diferentes de papel filtro não descaracterizou os ensaios. Não houve necessidade de calibrar cada lote de papel filtro para a obtenção das curvas características. A curva de calibração do papel filtro proposta por CHANDLER *et al.* (1992) foi satisfatória, e os dados de sucção versus umidade volumétrica foram condizentes.

O método do papel filtro foi eficiente na obtenção das curvas características para os solos das parcelas em estudo.

Os tensiômetros confeccionados neste trabalho não foram eficientes. O problema incidiu no transdutor modelo K1 da Ashcroft®, que não é adequado para medir sucções acima de 0,5 atm por ter um limitador para medir pressões negativas.

A floresta apresentou menores resultados de escoamento superficial e erosão mediante a manutenção de um sistema em equilíbrio com farta produção de serrapilheira, vasto e protetor dossel e bem desenvolvida rizosfera; propiciando a interceptação da chuva, proteção do impacto das gotas de chuva, dispersão da água da chuva, gerando uma maior infiltração e menores perdas de água por escoamento superficial e, enfim, uma menor erosão.

O uso das terras na região agrícola serrana deve ser reavaliado quanto ao plantio de culturas que requerem manejo de solos não condizentes com a suscetibilidade à erosão.

## 5.2 - SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Instalação de tensiômetros em parcelas hidro-erosivas possibilitando correlacionar a sucção com diversos manejos de solos.

Instalação de parcelas hidro-erosivas com diversas práticas de conservação de solos para avaliar suas eficácias.

Correlacionar os dados de produção de sedimentos e escoamento superficial para outras bacias hidrográficas adjacentes através de geoprocessamento e rede de neurais.

Monitoramento e análise do uso consuntivo da água na região agrícola em estudo. Uso de tensiômetros no campo para aperfeiçoar o sistema de irrigação por aspersão diminuindo o turno de rega.

Monitoramento da sedimentologia nos afluentes no intuito de se conhecer as conseqüências do processo erosivo à jusante, para serem tomadas medidas eficazes de conservação de solos e prevenção de assoreamento dos cursos d'água.

Instalação de lisímetros no campo para pesquisar o balanço hídrico em um perfil de solo (uso consuntivo da água pelas culturas, evapotranspiração e infiltração). O lisímetro serviria, também, para estudar o transporte de contaminantes (i.e., agrotóxicos, herbicidas) no solo.

## Referências Bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6459**, Determinação do Limite de Liquidez, Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7180**, Determinação do Limite de Plasticidade, Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7181**, Solo – Análise Granulométrica, Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10703**, Degradação do Solo, Rio de Janeiro, 1989.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13292**, Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Granulares à Carga Constante, Rio de Janeiro, 1995.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14545**, Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos à Carga Variável, Rio de Janeiro, 2000.
- ASTM Standards. **D5298-03**, Standard Test method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper, West Conshohocken, USA, 2003.
- BARRETO, A. C. M., 2005, **Caracterização Hidrológica e dos Diferentes Usos do Solo da Bacia do Córrego Sujo – Município de Teresópolis – RJ**, Monografia, UFRJ, IGEO, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BERTONI, J. e LOMBARDI NETO, F., 1990, **Conservação do Solo**. 3 ed..cap.1-7, 9-11 , São Paulo, Ícone.
- BRASIL. Decreto nº 750, de 10 de fevereiro de 1993. Dispõe sobre o corte, a exploração e a supressão de vegetação primária ou nos estágios avançado e médio de regeneração da Mata Atlântica. Revogado pelo Decreto nº 6.660, de 21 de novembro de 2008. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1990-1994/D750.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/D750.htm), Acesso em: 20 maio 2009.

- BRASIL. Decreto nº 6.660, de 21 de novembro de 2008. Regulamenta a prática de pousio, através do capítulo VI, artigos 22 a 25. Revoga o Decreto nº 750, de 10 de fevereiro de 1993. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ Ato2007-2010/2008/Decreto/D6660.htm#art51](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ Ato2007-2010/2008/Decreto/D6660.htm#art51), Acesso em: 22 maio 2009.
- CALLE, C. J. A., 2000, **Análise de Ruptura de Talude em Solo Não Saturado**. Dissertação de M.Sc., USP – Escola de Engenharia de São Carlos, SP, Brasil.
- CAMARGO FILHO, S. T., 1999, **Recuperação de Áreas Degradadas no Município de Paty do Alferes pela Introdução de Gramíneas Forrageiras e Leguminosas Arbóreas**. Tese D.Sc., UFRRJ / Instituto de Zootecnia, Seropédica, RJ, Brasil.
- CARVALHO, J. C., SALES, M. M., SOUZA, N. M., MELO, M. T. S., 2006, **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. 1 ed. Brasília, FINATEC.
- CHANDLER, R. J., CRILLY, M. S., MONTGOMERY-SMITH, G., 1992. "A Low Cost Method of Assessing Clay Desiccation for Low-Rise Buildings". **Proceedings of the Institute of Civil Engineering**, n.2, pp. 82-89.
- COELHO NETTO, A. L., 1994, "Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia". In: GUERRA, A. J. T., CUNHA, S. B. (eds), **Geomorfologia Uma Atualização de Bases e Conceitos**, 1 ed., cap.3, Rio de Janeiro, Bertrand Brasil S.A..
- COPPE/UFRJ, Coordenação dos Programas de Pós Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Cláudio Fernando Mahler e Hélcio Gonçalves de Souza, **Tensiômetro para Medições de Sucções Elevadas**. BR n. PI 0403670-0, 01 Set. 2004.
- DIENE, A. A., 2004, **Desenvolvimento de Tensiômetros para Sucção Elevada Ensaiaados em Lisímetros de Laboratório**. Dissertação de M. SC., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DIENE, A. A. e MAHLER, C. F., 2007 "Um instrumento para medida de potencial matricial nos solos sem ocorrência de cavitação", **Rev. Brás. Ciênc. Solo**, v. 31, n.6(Nov/Dec), pp.1262-1270.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias, 1979, **Manual de Análise de Solo**, Serviço Nacional de Levantamentos e Conservação de Solos, RJ.

- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias, 1997, **Manual de Métodos de Análise de Solo**, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 212p., RJ, EMBRAPA/CNPS.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias, 1999, **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 412p., Brasília, DF, EMBRAPA Produção de Informação.
- FÁCIO, J. A., 1991, **Proposição de uma Metodologia de Estudo da Erodibilidade dos Solos do Distrito Federal**, Dissertação de M.Sc., Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
- FAO, Food and Agriculture Organization, 1967, *La Erosion del Suelo por el Agua: Algunas Medidas para Combartila em las Tierras de Cultivo*, Roma, 207 p..
- FAO, Food and Agriculture Organization, 2001, "Conventional Ploughing Erodes the Soil – Zero Tillage Is an Environmentally-Friendly Alternative". In: **International Conference on Conservation Agriculture**, pp.1-5, Madrid, Out.
- FARRES, P., 1978, "The Role of Time and Aggregate Size in the Crusting Process", **Earth Surface Processes**, v.3, pp. 243-254.
- FREDLUND, D. G. e MORGENSTERN, N. R., 1977. "Stress Variable for Unsaturated Soils". **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, v.103, n.GT5, pp. 447-446.
- FREDLUND, D. G. e RAHARDJO, H., 1993, **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**, New York, USA, John Willey e Sons, Inc..
- FREDLUND, D. G. e XING, A., 1994. "Equation for Soil-Water Characteristic Curve". **Canadian Geotechnical Journal**. n.37, pp. 521-532.
- FUNDAÇÃO CIDE, 1997, Informações do território – posição e extensão. Disponível em: <[http://www.cide.rj.gov.br/cide/território\\_extensao.php](http://www.cide.rj.gov.br/cide/território_extensao.php)> , Acesso em 10 Jan. 2009.
- GARÓFALO, M. A., 1981, "A Desertificação Compromete a Agricultura", **Agricultura de Hoje**, 74 (9), pp. 18-21.
- GUERRA, A. J. T., 1994, "Processos Erosivos nas Encostas". In: GUERRA, A. J. T., CUNHA, S. B. (eds), **Geomorfologia Uma Atualização de Bases e Conceitos**, 1 ed., cap.4, Rio de Janeiro, Bertrand Brasil S.A..

- GUERRA, A. J. T., 1999, "O Início do Processo Erosivo". In: GUERRA, A. J. T., SILVA, A. S., BOTELHO, R. G. M. (eds), **Erosão e Conservação dos Solos**, 1 ed., cap.1, Rio de Janeiro, Bertrand Brasil S.A..
- HEATHWAITE, A. L., BURT, T. P., TRUDGIL, S. T., 1990. "Land Use Controls on Sediment Production in a Lowland Catchment, Southwest England". In: BOARDMAN, J., FOSTER, I. D. L. e DEARING, J. A., **Soil Erosion on Agricultural Land**, pp. 69-86.
- HOLDEN, J., 2009, "Topographic Controls upon Soil Macropore Flow", **Earth Surface Processes and Landforms**, v.34, pp.345-351.
- INDERBITZEN, A. L., 1961, "An Erosion Test for Soil", **Materials Research and Standards**, v.1, n.7 (Jul), technical note.
- LIMA, M.C., 1999. **Contribuição ao Estudo do Processo Erosivo de Voçorocas na Área Urbana de Manaus**, Dissertação de M.Sc., Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
- LIMA, M.C., 2003. **Degradação Físico-Química e Mineralógica de Maciços Junto às Voçorocas**. Tese de D.Sc., Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
- MAHLER, C. F. e OLIVEIRA, L. C. D., 1997, "Determinação da Sucção Total in situ de Solo Poroso de São Paulo Através do Método do Papel Filtro", In: **3º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, pp. 551-556, Rio de Janeiro, RJ.
- MAHLER, C. F., PACHECO, A. C. C. DOS S., GONÇALVES, H., 2004, "Desenvolvimento de um Tensiômetro para Medições de Sucções Elevadas", In: **5º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados**, v.1, pp. 69-72, São Carlos, RJ.
- MARINHO, F. A. M. e OLIVEIRA, O. M., 2006, "The Filter Paper Method Revisited", **Geotechnical Testing Journal**, v.29, n.3 (Fev ), pp. 250-258.
- MENDES, C. A. R., 2006, **Erosão Superficial em Encosta Íngreme sob Cultivo Perene e com Pousio no Município de Bom Jardim**. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MOTTA, N. O., 2001, **Caracterização Geotécnica dos Processos Erosivos na Cidade de Campo Grande – MS**, Dissertação de M. Sc., Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.

- PARK, E. e SMUCKER, A. J. M., 2005, "Erosive Strengths on Concentric Regions Within Soil Microaggregates", **Soil Science Society of American Journal**, v.69, n.6, pp. 1912 – 1921.
- QUEIROZ NETO, J. P., 2000, "Geomorfologia e Pedologia". **Rev. Brasileira de Geomorfologia**, v.1, n.1, pp. 59 – 67.
- REGO, J. J. V., 1978, **Erosão Superficial em Taludes de Corte em Solo Residual de Gnaisse**. Dissertação de M. Sc, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- RIDLEY, A. M. e BURLAND, J. B., 1993, "A New instrument for the measurement of soil moisture suction", **Géotechnique**, v.43, n.2 (Out), pp.321-324.
- RIOS FILHO, M. G., 2006, **Comportamento de um Aterro Compactado em Campo e Laboratório**. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ROSS, J. L. S., 1992, "O Registro Cartográfico dos Fatos Geomórficos e a Questão da Taxonomia do Relevo". In: **Revista do Departamento de Geografia**, USP, n.6, São Paulo, pp. 63-74.
- ROSS, J. L. S., 1996, "Geomorfologia Aplicada aos EIAs-RIMAs". In: GUERRA, A. J. T., CUNHA, S. B. (eds), **Geomorfologia e Meio Ambiente**, pp. 291-336, Rio de Janeiro, Bertrand Brasil S.A..
- SANTOS, R. M. M., 1997, **Caracterização Geotécnica e Análise do Processo das Erosões no Município de Goiânia**, Dissertação de M. Sc., Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil.
- SANTOS, R. M. M. e CARVALHO, J. C., 1998, "Ensaio de Erodibilidade em Voçorocas do Município de Goiânia". In: **11º Congresso Brasileiro de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica**, v.1, ABMS, Brasília, DF, pp. 581-588.
- SATO, Y., KUMAGAI, T., KUME, A., OTSUKI, K., OGAWA, S., 2004, "Experimental Analysis of Moisture Dynamics of Litter Layers – the Effects of Rainfall Conditions and Leaf Shapes". **Hydrological Processes**, v.18, pp. 3007 – 3018.
- SCHAAP, M.G., LEIJ, F.J., VAN GENUCHTEN, M. Th., 1998. "Neural network analysis for hierarchical prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity". **Soil Science Society of American Journal**, V.62, pp.847-855.

- SILVA, F. C., 1980, "A Harmonia com a Natureza". **Revista Brasileira de Extensão Rural**, v.1, n.3, pp.8-19.
- SOUZA, A. P., 2003, **Monitoramento da Erosão de Solos Durante Eventos Pluviométricos: Subsídios à Compreensão dos Processos Erosivos em Ambiente Agrícola Serrano**. Dissertação M.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SOUZA, C. K., MARQUES JÚNIOR, J., MARTINS, M. V., 2003, "Influência do Relevo e Erosão na Variabilidade Espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP)". **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.6 (Nov./Dez.), pp. 1068-1074
- SPAROVEK, G., CORRECHEL, V., BARRETTO, A. G.O. P., 2007, "The risk of erosion in Brazilian cultivated pastures". **Sci. Agric**, vol.64, n.1, pp. 77-82 .
- TENGBERG, A., STOCKING, M., DECHEN, S. C. F., 1997, "The Impact of Erosion on Soil Productivity- An Experimental Design Applied in São Paulo State, Brasil", **Geogr. Ann.**, v.79A, n.1-2, pp.95-107.
- VAN GENUCHTEN, M. Th., 1980, "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", **Soil Science Society of American Journal**, v.44, pp. 892-898.
- VIEIRA, V. T., CUNHA, S. B., 2008, "Mudanças na Morfologia dos Canais Urbanos – Alto Curso do Rio Paquequer, Teresópolis, RJ (1997/98 – 2001) ", **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.9, n.1, pp.3-22.
- YONG, R. N. e WARKENTIN, B. P., 1975, **Soil Properties and Behaviour**, 1 ed., Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company.



## **ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS**

### **A.1 – ESPECIFICAÇÃO DO TRANSDUTOR**

Especificações do transmissor de pressão modelo K1 fabricado pela Ashcroft:

- Sistema sensor: Strain gauge, película fina de polissilício. Diafragma em inox;
- Sinal de saída: 4 a 20 mA ou 1 a 5 Vcc;
- Tensão de alimentação: 10 a 30 Vcc;
- Faixas de pressão: 0 a 150 psi;
- Exatidão: 0,5%;
- Tempo de resposta: < 5ms.

### **A.2 – ESPECIFICAÇÃO DO DATA LOGGER**

Especificações do data logger USB 504:

- Interface: porta USB;
- Faixa de leitura: 4 a 20 mA;
- Resolução interna: +- 0,05 mA;
- Acurácia: +- 1%;
- Intervalo mínimo de leitura: 10 segundos;
- Intervalo máximo de leitura: 12 horas;
- Bateria: lítio – ½ AA – 3,6 V;
- Vida útil da bateria: 1 ano;
- Potencial de armazenamento de dados: 32.000 ciclos.

## ANEXO B – CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES

Tabela B.1 – Calibração do transdutor 1.

Pressão (kPa)	Corrente (mA)
0	4,125
0	4,127
50	4,930
100	5,715
100	5,715
150	6,495
200	7,282
200	7,283
250	8,058
300	8,850
300	8,845
350	9,630
400	10,410
400	10,410
500	11,970
500	11,980
600	13,540
600	13,550

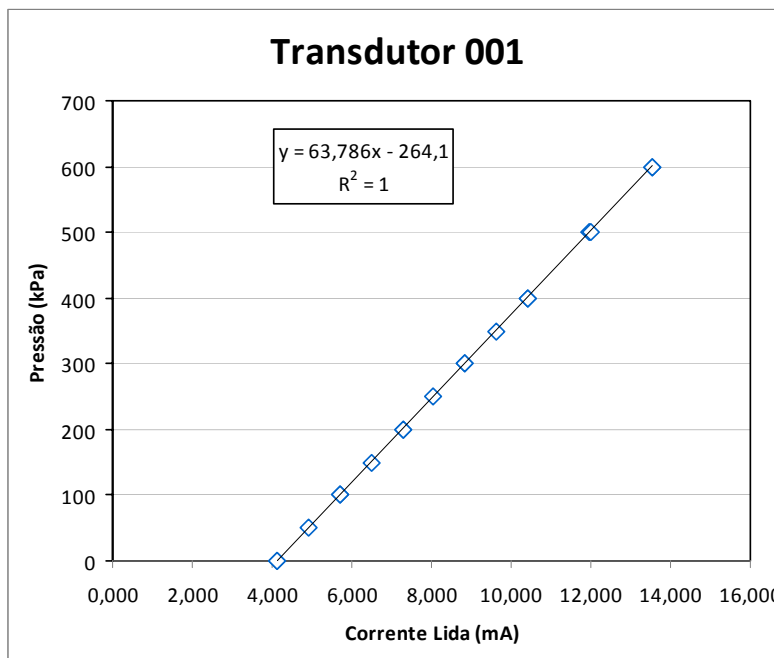
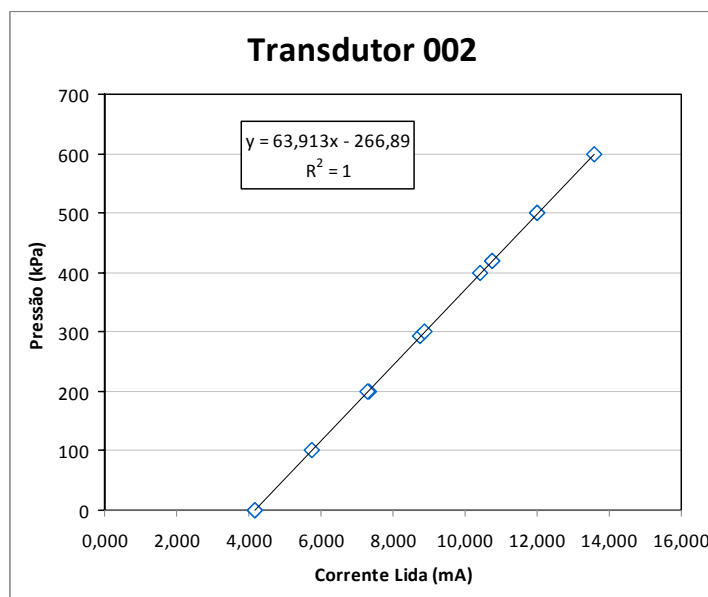


Tabela B.2 – Calibração do transdutor 2.

Pressão (kPa)	Corrente (mA)
0	4,165
0	4,159
100	5,763
200	7,321
200	7,305
292	8,755
300	8,865
400	10,425
420	10,752
420	10,741
500	11,997
500	11,995
600	13,564



## ANEXO C – DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Resultados da difração de raios X das amostras de solos (fração argila) das parcelas hidro-erosivas (Figura D. 1, Figura D. 2, Figura D. 3, Figura D. 4, Figura D. 5, Figura D. 6 e Figura D. 7).

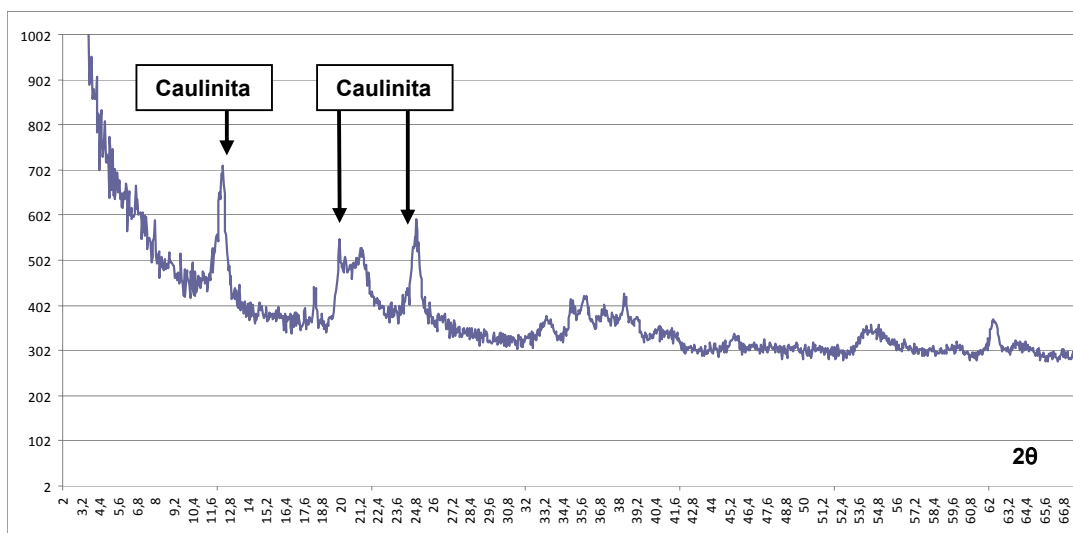


Figura D. 1 - Difração de raios X da argila da amostra da parcela da olericultura (90 cm).

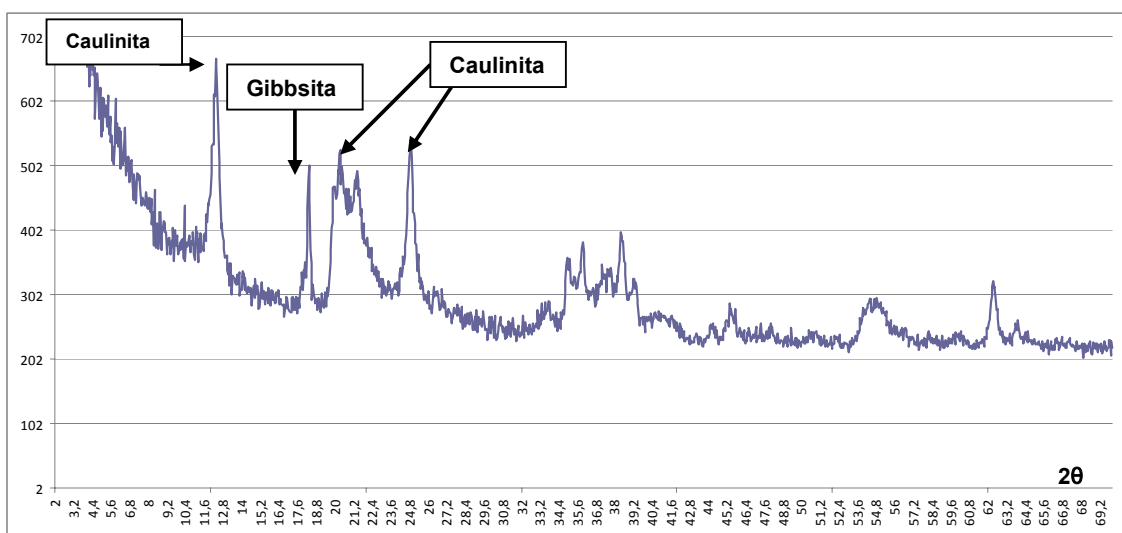
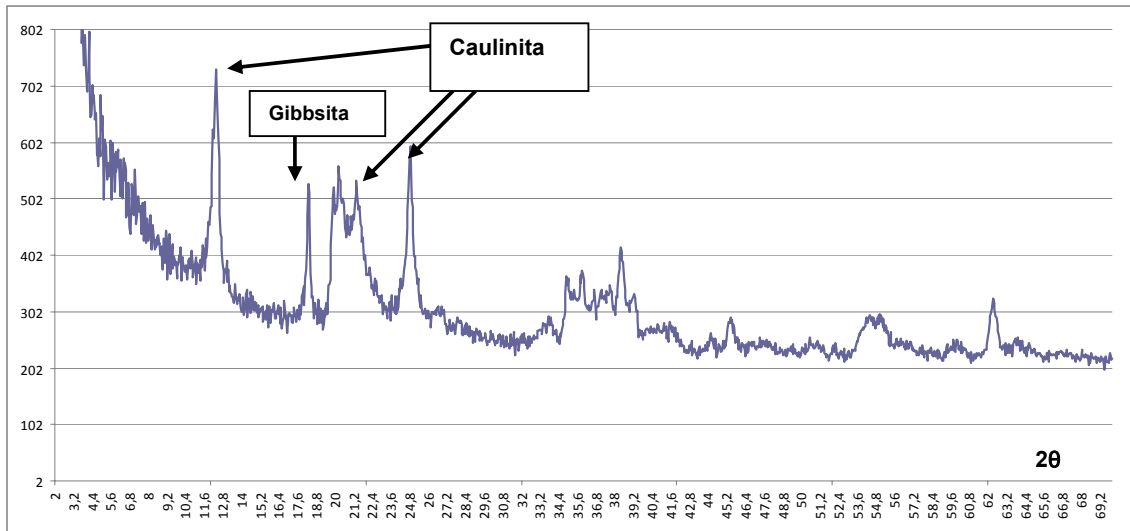
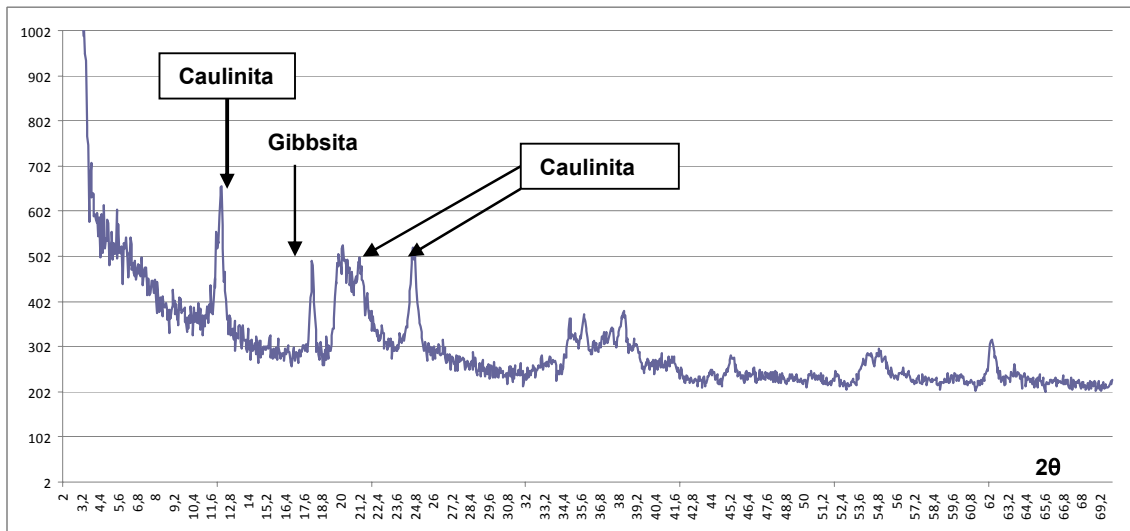


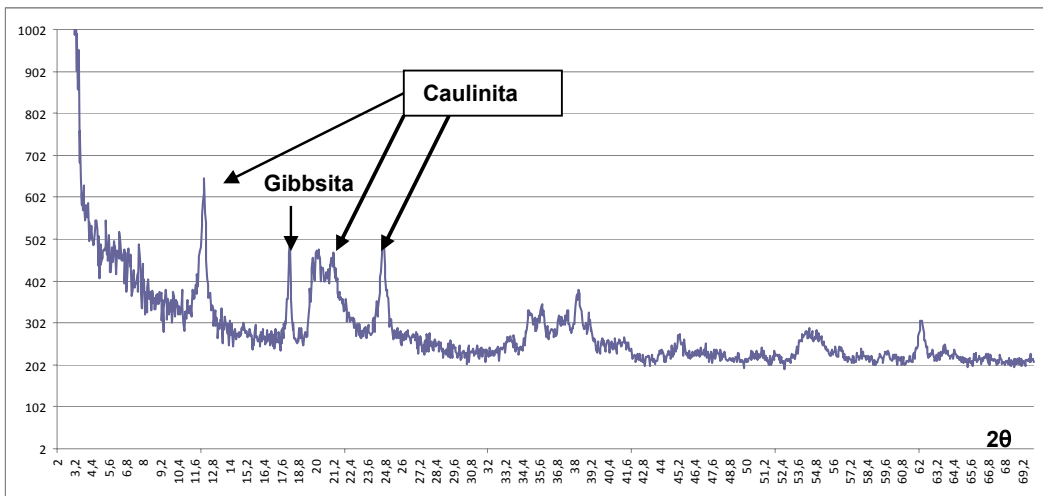
Figura D. 2 - Difração de raios X da argila da amostra da parcela da pastagem (30 cm).



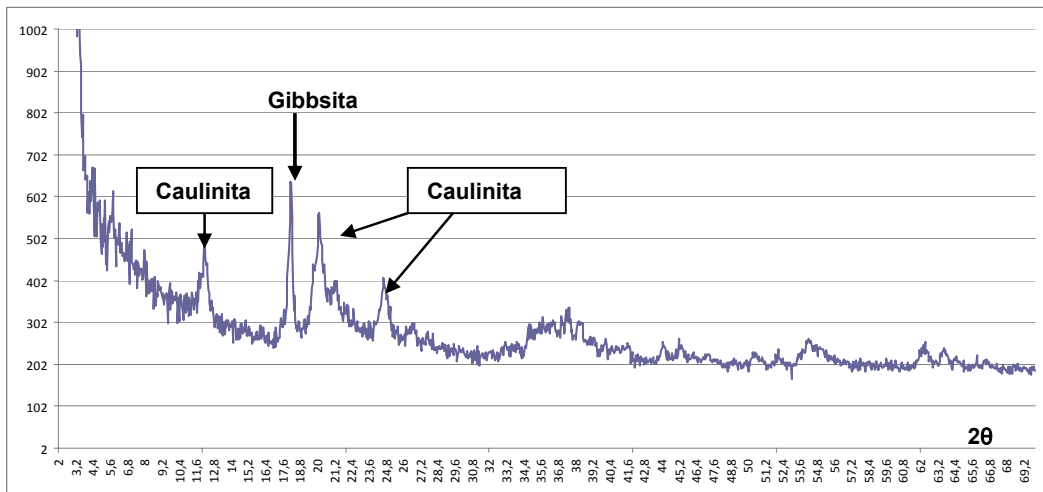
**Figura D. 3** - Difração de raios X da argila da amostra da parcela da pastagem (90 cm).



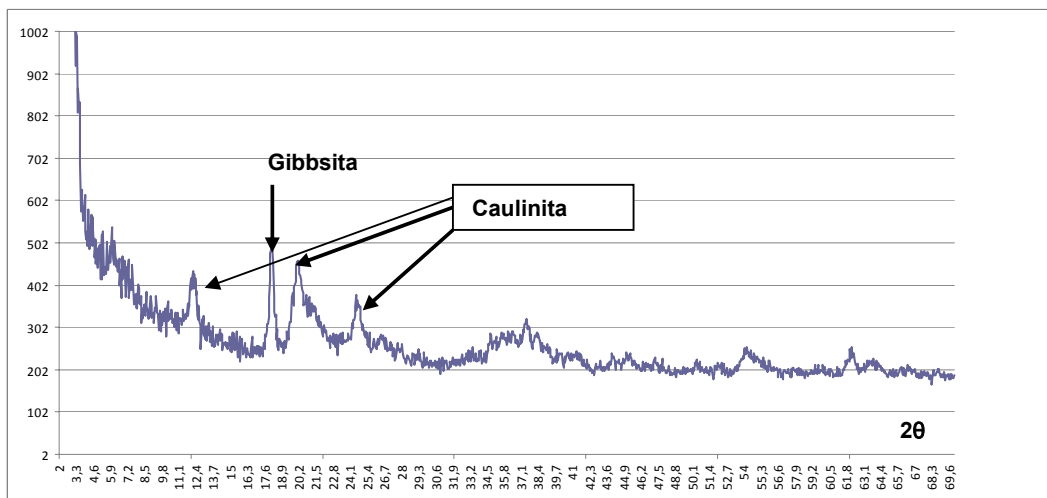
**Figura D. 4** - Difração de raios X da argila da amostra da parcela da área de recuperação florestal (30 cm).



**Figura D. 5** - Difração de raios X da argila da amostra da área de rec. floresta (90 cm).



**Figura D. 6** - Difração de raios X da argila da amostra da parcela da floresta (30 cm).



**Figura D. 7** - Difração de raios X da argila da amostra da parcela da floresta (90 cm).

## ANEXO D – ENSAIO DE PAPEL FILTRO

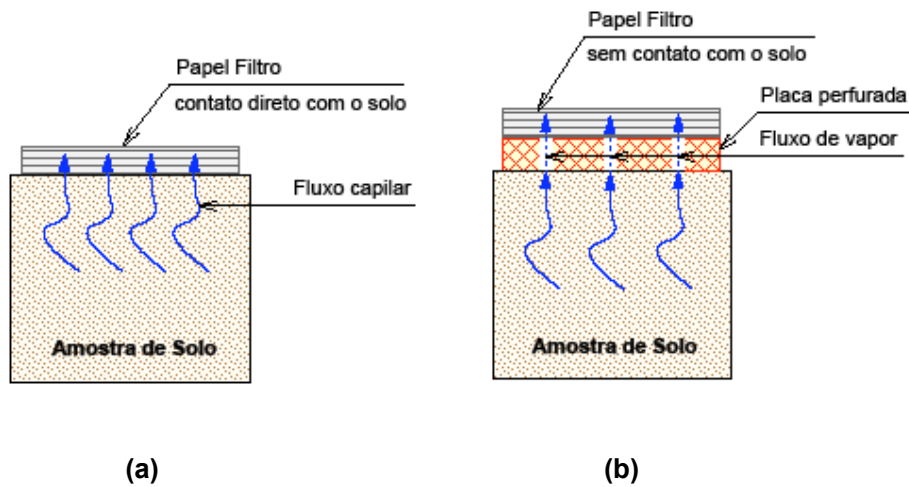
SHULL (1916) *apud* MARINHO e OLIVEIRA (2006) foi, provavelmente, o primeiro pesquisador a usar o fenômeno de absorção para medir sucção. O citado pesquisador usou o ponto de equilíbrio entre a água contida em sementes e no solo, para a medição de sucção. Após a equalização, as sementes eram pesadas e o conteúdo de água era determinado. Este valor era relacionado a uma específica sucção, estabelecido por uma curva de calibração estimada.

Nesta mesma linha de pesquisa, HANSEN (1926) *apud* MARINHO e OLIVEIRA (2006) usou o papel filtro para medir a sucção do solo. Os papéis filtro eram saturados com uma solução de açúcar com certa pressão de vapor. O papel filtro era pesado no ponto de equilíbrio entre o solo e o papel, e a sucção do solo era comparada com a respectiva pressão de vapor da solução de açúcar.

GARDNER (1937) *apud* MARINHO e OLIVEIRA (2006) usou o papel filtro diretamente no solo, sem nenhuma solução embebida no papel, para a medida de sucção.

A metodologia é simples, mas requer cuidados especiais no manuseio do papel filtro. O papel filtro utilizado neste trabalho foi o Whatman nº 42. O conteúdo inicial de água neste papel é de aproximadamente 6 %, que permite medir sucções de 0 a 29 MPa.

A sucção medida pode ser total (sucção osmótica + sucção mátrica) ou somente a sucção mátrica, dependendo do tipo de contato do papel filtro com a água do solo. Quando colocamos algum anteparo (e.g., um disco de PVC perfurado) entre a água do solo e o papel filtro, a transferência de água será via vapor e, sendo assim, mediremos a sucção total (Figura C. 1 b). No caso do contato direto da água do solo com o papel filtro, a sucção mensurada será a matricial (Figura C. 1a).



**Figura C. 1** (a) Ensaio com o papel filtro em contato direto com a amostra de solo para medir a sucção matricial; (b) Ensaio em que o papel filtro não entra em contato com a amostra de solo, com o propósito de medir a sucção total.

O método do papel filtro se baseia no princípio de que, quando um solo úmido entra em contato com um material poroso (e.g., papel filtro), a água passará do solo para o material poroso até se chegar ao equilíbrio. Neste método, há uma troca de água entre o solo e o papel filtro que, normalmente, absorve água através de um fluxo de vapor (Figura 2.3 b) ou por um fluxo contínuo de água (Figura 2.3 a). As moléculas de água precisam superar a sucção mátrica do solo e, no caso da presença de sais dissolvidos, também superar a sucção osmótica para haver fluxo de vapor. A camada de ar entre o solo e o papel filtro funciona como uma barreira para os sais, permitindo somente o fluxo de vapor d'água.

A água no solo passa ininterruptamente por capilaridade até o papel filtro formando um fluxo contínuo de água após ser superada a sucção mátrica. A sucção osmótica não atua, pois não há barreira entre os sais e a água do solo, visto que os sais estão dissolvidos na água.

É essencial a obtenção da curva de calibração para o papel filtro, onde se relaciona a sucção com o conteúdo de água no papel filtro. O estado de equilíbrio dará a mesma sucção para o papel filtro e solo, porém em conteúdos de água diferentes.

## ANEXO E – EQUACOES PARA A CURVA CARACTERÍSTICA

A curva característica relaciona a água nos poros com a sucção. A quantidade de água no solo pode ser representada pela Eq.E.1, Eq.E.2 e Eq.E.3:

$$\text{Umidade volumétrica } (\theta) = V_w (100) / V \quad (\text{Eq.E.1})$$

$$\text{Umidade gravimétrica } (w) = M_w (100) / M_s \quad (\text{Eq.E.2})$$

$$\text{Grau de saturação } (S) = V_w (100) / V_v \quad (\text{Eq.E.3})$$

Onde:

$V_w$  – volume de água;       $V_v$  – volume de vazios;       $V$  – volume total;

$M_w$  – massa de água      e       $M_s$  – massa de sólidos.

A curva característica ou curva de retenção de água, normalmente, relaciona umidade volumétrica versus sucção, que é representada em um gráfico semilog devido aos elevados valores de sucção (RIOS FILHO, 2006).

As curvas características podem ser obtidas por equações matemáticas usando-se valores de sucção versus umidade volumétrica obtidos por ensaios em laboratório. A modelagem das curvas características depende do tipo de solo e da geometria dos poros.

Equação de VAN GENUCHTEN (1980) (Eq.E.4 e Eq.E.5 e Eq.E.6)

$$\Theta = [1 / (1 + \alpha^n \Psi^n)]^m \quad (\text{Eq.E.4})$$

$$\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (\text{Eq.E.5})$$

Onde:

$\Psi$  – sucção;       $\theta$  – umidade volumétrica;

$\theta_r$  – umidade volumétrica residual;



$\theta_s$  – umidade volumétrica em condição saturada.

$\alpha$  ,  $m$  e  $n$  – parâmetros de VAN GENUCHTEN;

$$m = 1 - (1 / n) \quad (\text{Eq.E.6})$$

Equação de FREDLUND e XING (1994) (Eq.E.7 e Eq.E.8)

$$\theta = \theta_s [ 1 / ( \ln ( e + (\Psi / a)^n ) ]^m \quad (\text{Eq.E.7})$$

Como  $\theta / \theta_s = S$  , então:

$$S = [ 1 / ( \ln ( e + (\Psi / a)^n ) ]^m \quad (\text{Eq.E.8})$$

Onde:

$\ln$  – logaritmo neperiano;  $e = 2,71828$ ;

$S$  - grau de saturação;  $\theta$  – umidade volumétrica;

FREDLUND (1964) *apud* FREDLUND e RAHARDJO (1993) estimou um valor de sucção na ordem de 620 a 980 kPa para uma umidade volumétrica próxima de zero. FREDLUND e XING (1994) *apud* RIOS FILHO (2006) acrescentaram o termo  $C(\Psi)$  (Eq.E.9) para que a curva característica apresentasse valores de sucção de  $10^6$  kPa para valores de umidade próximo de zero, bastando multiplicar este termo pela Eq.E.7 e Eq.E.8.

$$C(\Psi) = 1 - \{ [ \ln ( 1 + \Psi / \Psi_r ) ] / \ln [ 1 + ( 10^6 / \Psi_r ) ] \} \quad \text{Eq.E.9}$$

Onde:

$\Psi_r$  - valor da sucção relativa à umidade residual.

Os parâmetros  $a$ ,  $m$  e  $n$  podem ser obtidos graficamente (Figura E. 1) pela curva ajustada, de forma preliminar, em relação aos pontos obtidos nos ensaios de laboratório, sendo estimados pelas seguintes equações (Eq.E.10, E.11, E.12 e E.13):

$$a = \Psi_i$$

$$m = 3,67 \ln [\theta_s C(\Psi_i) / \theta_i] \quad (\text{Eq.E.10})$$

$$n = 3,72 S_1 [ 1,31^{m+1} / m C(\Psi_i)] \quad (\text{Eq.E.11})$$

$$S_1 = (S / \theta) - [\Psi_i / 1,31^m (\Psi_i + \Psi_r) \ln (1 + (10^6 / \Psi_r))] \quad (\text{Eq.E.12})$$

$$S = \theta_i / \ln (\Psi_p / \Psi_i) \quad (\text{Eq.E.13})$$

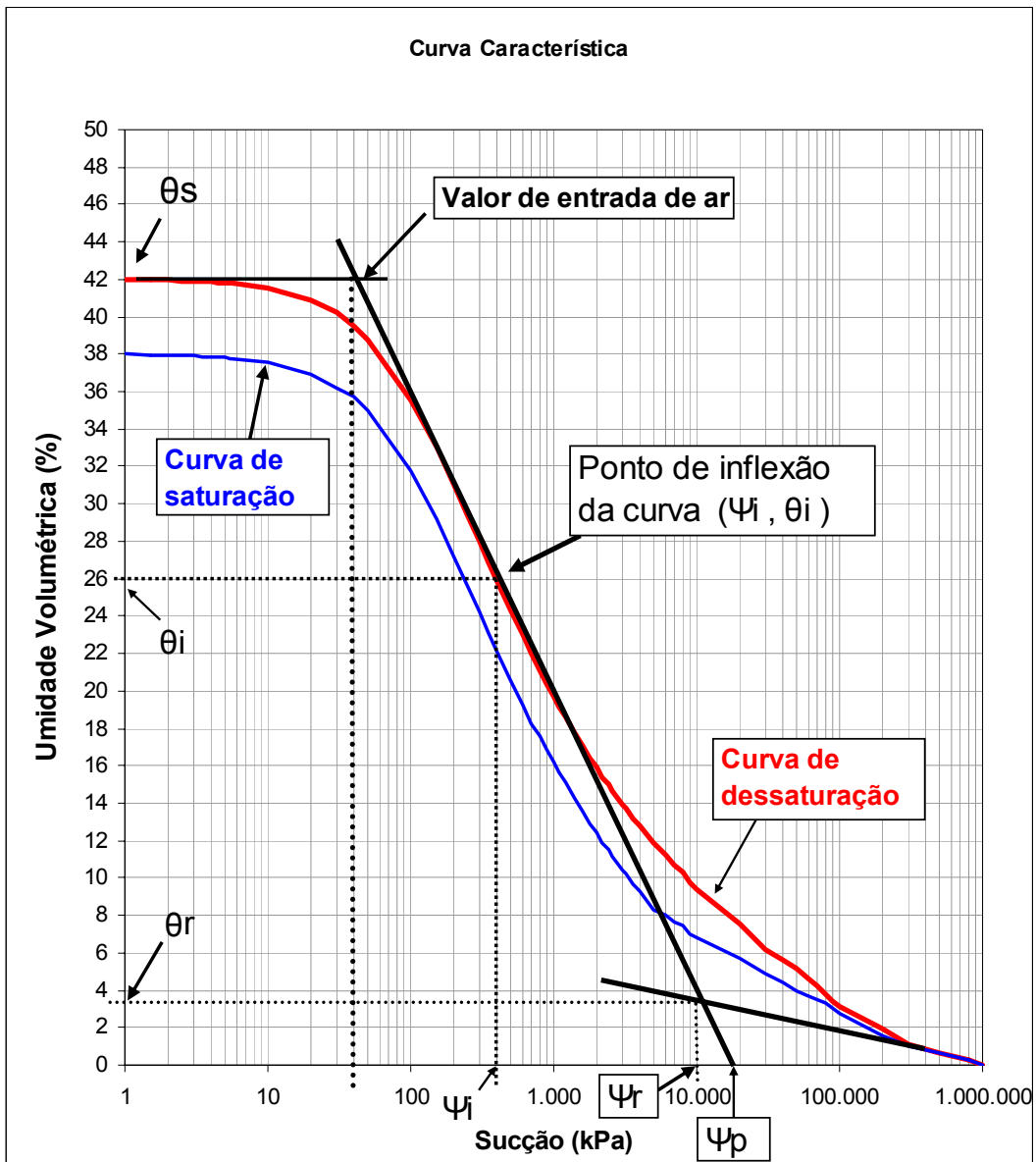
Onde:

$\Psi_i$  – valor de sucção relativo ao ponto de inflexão da curva característica;

$\theta_i$  - valor de umidade volumétrica correspondente ao ponto de inflexão;

$\Psi_p$  - valor de sucção relativo à interseção da reta tangente no ponto de inflexão com o eixo das abscissas.

Os valores de  $\Psi_r$  e  $\theta_r$  são empíricos e correspondem ao ponto onde a curva característica tende a decrescer linearmente até  $10^6$  kPa.



**Figura E. 1** – Representação da curva característica.

A curva característica é histerética – a curva de saturação não percorre o mesmo caminho do que a curva de dessaturação.