

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS – CCH  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PPGG**

**WELLINGTON BARBOSA DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO DA COBERTURA SUPERFICIAL EM ENCOSTA NA BACIA  
DO RIO DAS POMBAS, GUARAPUAVA – PR: BASES PARA ENTENDIMENTO  
DA GÊNESE EROSIVA EM TÚNEIS**

**FRANCISCO BELTRÃO  
2011**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS – CCH  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – PPGG**

**WELLINGTON BARBOSA DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO DA COBERTURA SUPERFICIAL EM ENCOSTA NA BACIA  
DO RIO DAS POMBAS, GUARAPUAVA – PR: BASES PARA ENTENDIMENTO  
DA GÊNESE EROSIVA EM TÚNEIS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ORIENTADORA: DRA. MARGA ELIZ PONTELLI**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PRODUÇÃO DO ESPAÇO E MEIO AMBIENTE  
LINHA DE PESQUISA: DINÂMICA, UTILIZAÇÃO E PRESERVAÇÃO DO MEIO  
AMBIENTE**

**FRANCISCO BELTRÃO  
2011**

Silva, Wellington Barbosa da

S586 Caracterização da cobertura superficial em encosta na Bacia do Rio das Pombas, Guarapuava – PR: bases para entendimento da gênese erosiva em túneis. / Wellington Barbosa da Silva. – Francisco Beltrão, 2011.

57 f.

**Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marga Eliz Pontelli.**

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Campus de Francisco Beltrão.

1. Rio das Pombas – Guarapuava - Paraná. 2. Erosão subsuperficial. 3. Túneis – Erosão. 4. Gibbsita - Minerais. I. Pontelli, Marga Eliz. II. Título.

CDD – 551.4098162

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS – CCH  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA – NÍVEL DE MESTRADO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CARACTERIZAÇÃO DA COBERTURA SUPERFICIAL EM ENCOSTA NA BACIA  
DO RIO DAS POMBAS, GUARAPUAVA – PR: BASES PARA ENTENDIMENTO DA  
GÊNESE EROSIVA EM TÚNEIS

**Autor:** Wellington Barbosa da Silva

**Orientadora:** Profa. Dra. Marga Eliz Pontelli

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação  
defendida por Wellington Barbosa da Silva e aprovada  
pela comissão julgadora.

Data: 08/07/2011

Assinatura:

Wellington Barbosa da Silva

Comissão Julgadora:

M. Pontelli  
Profa. Dra. Marga Eliz Pontelli (UNIOESTE – F.B)

J. Paisani  
Prof. Dr. Julio César Paisani (UNIOESTE – F.B)

G. Pietrobelli  
Profa. Dra. Gisele Pietrobelli (UNICENTRO - Guarapuava)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Jesus Cristo, meu único Senhor e suficiente Salvador.

A minha mãe e irmã, que sempre me ajudaram e apoiaram durante mais essa etapa da minha formação acadêmica e também a toda minha família.

A minha orientadora, Dra. Marga Eliz Pontelli, que aceitou me orientar e sempre me motivou.

A Andréia Zuchelli Cucchi e a todos que fazem parte do Programa de Pós Graduação da Unioeste.

Aos professores Mauricio Camargo Filho, Leandro Redin Vestena, Edivaldo Lopes Thomas, Julio Cesar Paisani, José Edézio Cunha, Luiz Gilberto Bertotti, Marcelo Marques Lopes Müller, e as professoras, Aline Marques Genú e Isis Caetano pelas conversas, pela motivação e pelo auxílio nos trabalhos de laboratório.

A professora Gisele Pietrobelli por ter me ajudado na elaboração do projeto, pelos conselhos, pela enorme paciência comigo e, principalmente, pela amizade desde a época que entrei para a graduação.

Ao professor Gilberto Franco de Souza, dono da chácara em que foi desenvolvida a pesquisa, pelo apoio e pela confiança. Ao sr. Adão e sra. Maria (*in memoriam*), ao sr. Pedro e a todos da chácara.

Agradeço muitíssimo ao seu Lauro, dona Lúcia, tia Filomena, Saul, Cleusa pela paciência de me agüentar todos os dias em sua casa e por ter me agregado a família. E a toda a família Holocheski e Iatsko, que de certa forma também se tornaram meus parentes.

Aos meus queridos amigos Cleverson Holocheski, Carlos Bronson, Leandro C. M. Santos, Andrey L. Binda, Rafael A. Castro, Leandro V. Mascarello, Diego M. Bazzotti, Ezequiel Metzger, Deyvis W. Silva, Everton C. Gomes, Marcelo H. Rabelo, Constantino E. Luz, Jairo Hansen, Vitor M. Zamarion e Dr. Vanderson R. Araújo e a mais algum que eu possa por ventura ter me esquecido de colocar nesta lista.

As minhas amigas Cristiane Spagnol, Martha Tussolini, Viviane de Godoy, Eliza B. Tratz (minha meio orientadora), Juliana Maluf, Maria I. Bassani, Ana C. Schwab, Cláudia C. Istadler, Marina P. Carmo, e a todas as meninas que eu possa ter por ventura me esquecido também.

A Dona Maria, que tratou a mim e ao meu amigo Cleverson como filhos em sua pensão.

A CAPES pelo apoio financeiro concedido durante a elaboração desse trabalho.

Ao Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (Lamir) do Departamento de Geologia, da Universidade Federal do Paraná pelas análises químicas realizadas.

Ao Laboratório de Geomorfologia Dinâmica e Aplicada da Universidade Estadual do Centro-Oeste pela execução da maior parte dos procedimentos laboratoriais.

A todos os meus amigos e irmãos da Igreja Presbiteriana do Brasil.

A todos e a todas, muito obrigado!

Dedico este trabalho a todos aqueles que me querem bem!

“Combati o bom combate, acabei a carreira, guardei a fé”.  
(2 Timóteo 4:7)



## SUMÁRIO

1. <b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
2. <b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	3
3. <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	6
3.1. <b>FORMAÇÕES SUPERFICIAIS</b> .....	6
3.1.1. Formações superficiais autóctones .....	6
3.1.2. Formações superficiais alóctones.....	7
3.2. <b>TRANSFORMAÇÕES PEDOGENÉTICAS DAS FORMAÇÕES SUPERFICIAIS</b> .....	8
3.3. <b>PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM ENCOSTAS</b> .....	9
3.4. <b>PROCESSOS HÍDRICOS DE EROÇÃO</b> .....	11
3.4.1. Processos erosivos subsuperficiais e a erosão em túneis.....	12
4. <b>METODOLOGIA</b> .....	16
4.1. <b>LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO</b> .....	16
4.2. <b>LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E MORFOMÉTRICO DA ENCOSTA</b> ..	16
4.3. <b>CONSTRUÇÃO DE TOPOSSEQUÊNCIAS</b> .....	17
4.4. <b>DETERMINAÇÃO DE ROTAS DE FLUXO SUBSUPERFICIAL CONCENTRADO</b> .....	17
4.5. <b>ABERTURA DE TRINCHEIRAS</b> .....	18
4.6. <b>ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS</b> .....	18
4.6.1. Análise granulométrica convencional por peneiramento e via úmida	18
4.6.2. Análise granulométrica por via úmida, com uso de ultrassom (sonificação) e agitador eletromagnético .....	20
4.7. <b>ANÁLISES DE DENSIDADE APARENTE, REAL E POROSIDADE TOTAL</b>	22
4.8. <b>ANÁLISE DE DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X (DRX)</b> .....	23
5. <b>RESULTADOS</b> .....	25
5.1. <b>ASPECTOS DA EROÇÃO EM TÚNEIS NA ENCOSTA DO RIO DAS POMBAS</b> .....	25
5.2. <b>CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA E GEOMÉTRICA DA ENCOSTA</b> .....	30
5.3. <b>RECONHECIMENTO E DISTRIBUIÇÃO DA COBERTURA SUPERFICIAL NA ENCOSTA DO RIO DAS POMBAS</b> .....	32
5.3.1. Setor de alta encosta.....	32
5.3.2. Setor de média encosta.....	35
5.3.3. Setor de baixa encosta .....	38

5.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MINERALÓGICAS DO SETOR DE BAIXA ENCOSTA DO RIO DAS POMBAS .....	44
5.4.1. Composição granulométrica dos materiais na baixa encosta.....	44
5.5. DENSIDADE APARENTE, REAL E POROSIDADE TOTAL.....	48
5.6. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (MINERALOGIA DE ARGILAS).....	49
6. <b>CONCLUSÃO</b> .....	55
7. <b>REFERÊNCIAS</b> .....	57

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo concentrado em subsuperfície visível por estrutura de abatimento...	1
Figura 2 - Estrutura de abatimento associada com subsidência do solo.....	2
Figura 3 - Localização da área de estudo. ....	3
Figura 4 - Basalto exposto na média encosta com amídalas preenchidas por quartzo. .....	4
Figura 5 - Laje do setor baixo da encosta do Rio das Pombas.....	5
Figura 7 - Caminhos da água na encosta segundo Dunne (1980, modificado).....	10
Figura 8 - Túnel na cabeceira da voçoroca no município de Lapa, Paraná. ....	13
Figura 9 - Terraços abandonados afetados por piping (Murcia, Espanha).....	14
Figura 10 - Distribuição das estruturas de abatimento e trincheiras abertas na encosta.....	26
Figura 11 - Estrutura de abatimento exposta lateralmente devido a subsidência do teto do túnel.....	27
Figura 12 - Convergências de fluxos subsuperficiais até a exfiltração na encosta....	28
Figura 13 - Ravinas localizadas no final dos sistemas de túneis.....	29
Figura 14 - Túnel na cabeceira de voçoroca em Lapa (PR).....	29
Figura 15 - Erosão em túneis em latossolo (Gouveia , MG).....	30
Figura 16 - Vista do Setor médio para o setor alto da encosta do Rio das Pombas.	30
Figura 17 - Vista do topo e do setor de alta encosta. ....	32
Figura 18 - Topossequência do setor alto da encosta.....	34
Figura 19 - Afloramento de laje no setor médio da encosta e presença de blocos rochosos.....	35
Figura 20 - Topossequência do setor de média encosta.....	37
Figura 20 - Início do setor de baixa encosta com presença de mata secundária.....	38
Figura 21 - Material com estrutura lamelar encontrado no contato com a rocha.....	41
Figura 22 - Topossequência do setor de baixa encosta no sentido longitudinal. ....	42

Figura 24 - Topossequência do setor de baixa encosta no sentido transversal.....	43
Figura 25 - Desenho e fotografia da trincheira 1. ....	44
Figura 26 - Desenho e fotografia da trincheira 2. ....	45
Figura 27 - Gráficos de DRX da trincheira 1.....	51
Figura 28 - Gráficos de DRX da trincheira 2.....	53

## QUADROS

Quadro 1 - Classes de declividade da encosta. ....	31
Quadro 2 - Resultado das análises granulométricas, pelo método convencional, do setor de alta encosta. ....	33
Quadro 3 - Resultado das análises granulométricas, pelo método convencional, do setor médio da encosta. ....	36
Quadro 4 - Resultado das análises granulométricas, pelo método convencional, do setor baixo da encosta. ....	39
Quadro 5 - Ensaios convencionais de granulometria dos materiais retirados de dentro das trincheiras. ....	45
Quadro 6 - Ensaios de granulometria dos materiais retirados de dentro das trincheiras com o uso de sonificação. ....	46
Quadro 7 - Resultados dos ensaios para densidade aparente, real e porosidade total pelo método do anel volumétrico. ....	48
Quadro 8 - Relação entre porosidade, índice de vazios e sua denominação. ....	49
Quadro 9 - Os argilominerais identificados na trincheira 1. ....	50
Quadro 10 - Os argilominerais identificados na trincheira 2. ....	52

## GRÁFICOS

Gráfico 1 - Sondagem T1 .....	34
Gráfico 2 - Sondagem T13. ....	34
Gráfico 3 - Sondagem T3 .....	36
Gráfico 4 - Sondagem T11 .....	40
Gráfico 5 - Sondagem T10 .....	40
Gráfico 6 - Sondagem T4 .....	40
Gráfico 7 - Sondagem T9 .....	40
Gráfico 8 - Sondagem T6 .....	40
Gráfico 9 - Granulometria das amostras da Trincheira 1.....	46
Gráfico 10 - Granulometria das amostras da Trincheira 2.....	46
Gráfico 12 - Granulometria com sonificação das amostras da Trincheira 1.....	47
Gráfico 11 - Granulometria com sonificação das amostras da Trincheira 2.....	47

## CARACTERIZAÇÃO DA COBERTURA SUPERFICIAL EM ENCOSTA NA BACIA DO RIO DAS POMBAS, GUARAPUAVA – PR: BASES PARA ENTENDIMENTO DA GÊNESE EROSIVA EM TÚNEIS

No Planalto de Guarapuava/Palmas, em encosta de baixa declividade e cobertura superficial de origem basáltica, à margem direita do Rio das Pombas em Guarapuava (Paraná), foram identificados processos de erosão em túneis (*pipes*). Trata-se de processos subsuperficiais de erosão que apresentam feições típicas, tais como, subsidência do teto do túnel e estruturas de abatimento, que tendem a evoluir para feições superficiais. A instalação desse processo erosivo depende de um conjunto de fatores, destacando-se como condicionantes, as propriedades da cobertura superficial como: textura, macroporosidade, composição granulométrica, densidade, porosidade e constituintes químicos dos materiais, e aqueles relativos às condições hidrológicas e à topografia da encosta. Buscando-se reconhecer e caracterizar a cobertura superficial do setor de baixa encosta, foram realizadas análises granulométricas, de densidade aparente, real e porosidade total, construção de topossequências e análises químicas de difração de raios-X. Os resultados indicaram que o material que recobre o setor de baixa encosta, onde aparecem os túneis, apresenta textura arenosa devido às propriedades de microagregação gerada pelo argilomineral gibbsita, deixando o material com porosidade alta, favorecendo assim a circulação de água em subsuperfície. Os fluxos gerados tendem a ser exfiltrados para uma superfície de exposição, o que provoca a remoção de pequenas partículas de material (*seepage*). Com a abertura de pequenos canais em subsuperfície, os fluxos tendem a se concentrar (*tunnel scour*) e conseqüentemente ampliar os canais subsuperficiais pela ação mecânica da água. Numa sequência de fatores que possam ser postos para análise da geração do processo, têm-se: alteração da rocha basáltica, microagregação do material, macroporosidade e aumento da circulação de água em subsuperfície. Assume-se que as condições hidrológicas da encosta propiciaram a instalação de mecanismos de erosão em subsuperfície, evolução do processo erosivo, formação de feições erosivas subsuperficiais e, por fim, instalação de feições erosivas superficiais. Essas características físicas e químicas encontradas na área de estudo, demonstram que a cobertura superficial é determinante para a instalação da erosão subsuperficial em túneis na encosta.

**Palavras chave:** erosão subsuperficial, túneis, macroporosidade, gibbsita, cobertura superficial.

## CHARACTERIZATION OF HILLSIDE SUPERFICIAL COVERING AT THE BASIN OF RIO DAS POMBAS, GUARAPUAVA, PARANÁ STATE: BASIS FOR UNDERSTANDING OF TUNNEL EROSION GENESIS

On the Guarapuava Plateau/Palmas, in a low slope hillside of superficial covering from basaltic origins, on the right bank of the Rio das Pombas, Paraná state, processes of tunnel erosion (pipes) were identified. These are subsuperficial erosion processes with typical features, such as subsidence of the tunnel roof and rebate structures, which tend to evolve to superficial features. The emerging of this erosive process depends on a set of factors, being the main one, the properties of the superficial covering, such as: texture, macroporosity, granulometric composition (chemical matter make-up), density, porosity e chemical elements that make up the matter, those concerning the hydrological conditions and the topography of the hillside. In order to recognize and characterize the superficial covering in the sector of low hillside, sieve analysis was used, as well as real and apparent density, total porosity verified; toposequences were made and X-ray scattering techniques performed. The results showed that the matter which covers the low hillside sector, where the tunnels are, have a sandy texture due to the properties of microaggregation generated by clay mineral, gibbsite; leaving the matter with a high porosity level, thus favoring the flowing of water through subsurfaces. The generated flows tend to be exfiltrated to a *ditch wall-like* surface, which causes the removal of small particles of matter (*seepage*). With the opening of small gullies through subsurface, the flow tend to become concentrated (*tunnel scour*) and consequently enlarge the subsuperficial channels by the mechanical action of the water. In a sequence of factors that can be used for the analysis of the process generation, which causes: alteration in basalt rocks, microaggregation of the matter, macroporosity and increase of water flow through subsurface. Therefore, the hydrology conditions in the hillside contributed for erosion mechanisms to emerge in subsurface, development of erosion process, formation of subsuperficial erosion and, ultimately, superficial erosion process development. These both chemical and physical features found in such field of study, show that the superficial covering is a determining factor for the subsuperficial tunnel erosion to originate in the hillside.

**Key words:** subsuperficial, erosion, tunnels, macroporosity, gibbsite, superficial covering



## 1. INTRODUÇÃO

Morfoestruturalmente, o Terceiro Planalto Paranaense pode ser interpretado como resultante de vários setores chamados por Santos *et. al.* (2006) de subunidades esculturais. A subunidade Planalto de Guarapuava/Palmas se caracteriza, na região de Guarapuava, por apresentar morfologia de platôs com setores de blocos planálticos dissecados pela drenagem (TRATZ, 2009).

No setor correspondente ao Planalto de Dissecação, foi verificada numa encosta vegetada, margem direita do Rio das Pombas, feições erosivas tipo túneis (*pipes*). Os túneis podem se formar pelo carreamento de pequenos grãos do solo, partículas de argila e colóides, ou mesmo pela remoção dos componentes do solo por solução (AUGUSTIM & ARANHA, 2006).

Com a retirada de materiais, seja por processos mecânicos ou químicos, constituem-se rotas preferenciais de fluxos de água em subsuperfície (Figura 1), responsáveis por diversos mecanismos de erosão.



Figura 1 - Fluxo concentrado em subsuperfície visível por estrutura de abatimento.  
Foto: Andrey L. Binda, encosta do Rio das Pombas, 09/05/2007.

Um sistema de túneis e suas várias feições dão ao relevo, em escala reduzida, uma característica pseudocárstica (ZACHAR, 1982). Oliveira e Camargo (1996) propuseram que as depressões topográficas estão relacionadas à subsidência do terreno (Figura 2), sendo este, um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, ou

seja, redução do nível do terreno devido à remoção de suporte subterrâneo (SANTOS, 2005).

Esse fenômeno também pode ser reconhecido em subsuperfície conforme indica Camargo *et. al.* (2007). Quando o túnel sofre ação direta da corrosão de suas paredes e principalmente do material em seu teto, surgem em superfície aberturas circulares chamadas de estruturas de abatimento por Rodrigues (1984).



Figura 2 - Estrutura de abatimento associada com subsidência do solo.  
Foto: Autor, encosta do Rio das Pombas, 09/05/2007.

Sendo assim, o objetivo geral desta pesquisa consiste em reconhecer e caracterizar a cobertura superficial do setor de baixa encosta que apresenta processo erosivo em túneis na bacia do Rio das Pombas dentro da Bacia do Rio das Pedras na região de Guarapuava, Paraná, como base para entendimento da gênese erosiva de túneis em cobertura superficial resultante da alteração de basalto.

Especificamente, busca-se estabelecer a distribuição da cobertura superficial na área de estudo, determinar a composição granulométrica dos materiais presentes na encosta, identificar os argilominerais predominantes nos materiais presentes no setor de baixa encosta, verificar a relação das características mineralógicas com as propriedades físicas encontradas na cobertura superficial do setor de baixa encosta.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde ao setor baixo de uma encosta em forma de rampa longa que apresenta processo de erosão em túneis, localizada na margem direita do Rio das Pombas (Figura 3), bacia do Rio das Pedras, Guarapuava (PR).



Figura 3 - Localização da área de estudo.

Org: autor



Está inserida no Terceiro Planalto Paranaense ou Planalto de Guarapuava, cuja morfologia é localmente marcada por blocos planálticos dissecados pela drenagem, bem como por áreas altas e planas. Essas constituem os chamados platôs de Guarapuava, Entre Rios e Três Pinheiros (TRATZ, 2009).

A bacia do Rio das Pedras, de acordo com Tratz (2009), está geologicamente situada dentro da unidade litoestratigráfica de basalto tabular maciço e geomorfologicamente, na unidade de planalto dissecado, apresentando grande densidade de falhas e fraturas, que são aproveitadas pela rede de drenagem configurando vales em forma de “v”.

Geologicamente, na região, afloram rochas vulcânicas ácidas e básicas da Formação Serra Geral (Figura 4). No domínio das ácidas ocorrem desde os tipos dacitos, latitos, quartzo-latitos, riodacitos e riolitos. Entre as básicas são relacionados os basaltos tabulares maciços, basalto lobados, basaltos hipovítreos e basaltos fácies Campo Erê (TRATZ, 2009).



Figura 4 - Basalto exposto na média encosta com amídalas preenchidas por quartzo.  
Foto: autor

No setor do Rio das Pombas afloram basaltos tabulares maciços (JKSG-2). Esses se caracterizam por apresentarem textura equigranular fina com coloração que varia do cinza ao cinza escura. Mineralogicamente são compostos, em média, por 45% de plagioclásio (hábito tabular), 45% de clinopiroxênio (cristais prismáticos), 5% de óxidos de ferro e 5% de clorita como mineral secundário (TRATZ, 2009). Em campo observa-se predomínio de estrutura amidolaidal nos afloramentos rochosos da alta e média encosta.

Na baixa encosta não se observa essa característica, uma vez que, os afloramentos mostram-se com características de textura maciça (Figura 5).



Figura 5 - Laje do setor baixo da encosta do Rio das Pombas.

Foto: autor

Na região predomina, segundo classificação de Köppen, um clima do tipo Cfb, subtropical mesotérmico – úmido sem estação seca, com verões frescos e inverno moderado. A pluviosidade apresenta-se bem distribuída ao longo do ano, com precipitações médias anuais em torno de 1961 mm, apresentando variações extremas consideráveis. A temperatura média anual fica em torno de 16 a 17,5°C (THOMAZ & VESTENA, 2003).

A cobertura pedológica na bacia do Rio das Pedras é marcada pela presença de cambissolos húmicos alumínicos (CHa 6) e hálpicos distróficos (Cxbd 30), neossolos litólicos distro-úmbricos (RLdh) e regolíticos húmicos (RRh 1), bem como nitossolos (Nbd 2) e latossolos (LBd 2), ambos distróficos (SANTOS *et. al.*, 2006), predominando, segundo Müller & Pott (2004), as classes dos latossolos e nitossolos.

A vegetação natural da região corresponde a Floresta Ombrófila Mista (SILVA, 2004). Atualmente na área, o setor médio da encosta apresenta-se desmatado, sendo ocupado por pastagem para animais de pequeno e médio porte.

No setor de baixa encosta, onde aparecem os túneis, há presença de mata secundária composta por árvores de médio porte, com troncos finos e tortuosos, forrada por gramíneas e por plantas rasteiras adaptadas a solos com umidade constante.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. FORMAÇÕES SUPERFICIAIS

As formações superficiais constituem o material que recobre parcialmente ou completamente o substrato rochoso, sendo em geral, fracamente consolidado, com espessuras variando de poucos decímetros a dezenas de metros (CAMPY & MACAIRE, 1989). Recobrem a parte emersa da crosta, provenientes da alteração das rochas, podendo ser remanejadas e/ou retrabalhadas sobre as vertentes, superfícies de erosão, planície fluviais etc (DEWOLF, 1983).

Sua caracterização morfológica possibilita o reconhecimento e a interpretação dos materiais friáveis, intemperizados, e os processos pedogenéticos que nelas se instalam (CAMPY & MACAIRE, 1989). Destes materiais é importante estabelecer a diferenciação quanto a sua gênese e evolução, distinguindo-os quanto ao caráter de autoctonia e aloctonia (MENEZES *et. al.*, 2006).

##### 3.1.1. Formações superficiais autóctones

O processo de intemperismo ao qual a rocha é submetida, através de alterações físicas e químicas, tem como resultado um manto de material detrítico de espessura variada, que constitui a estrutura subsuperficial da paisagem (BIGARELLA *et. al.*, 1994).

Segundo Thomas (1994) a parte superior do perfil de intemperismo pode ser interpretada como uma zona onde a fábrica da rocha é completamente destruída, acima da qual, o material transportado e a camada superficial do solo são encontrados.

O elúvio ou *eluvium* é o material de alteração, formado *in situ* pelo intemperismo da rocha subjacente que, apesar de constituir manto muito decomposto quimicamente, ainda mantém a estrutura original da rocha (GUERRA & GUERRA, 2001).

Suguio (1998) apresenta como sinônimo de elúvio o termo *alterita*, cuja designação é atribuída ao produto de alteração de quaisquer rochas que ainda preservam a estrutura original. Seu principal fator limitante de desenvolvimento é a ocorrência de transporte intermitente de material, sendo que, esses remobilizam a fácies eluvial transformando-a em coluvial (CORRÊA, 2001).

### 3.1.2. Formações superficiais alóctones

As formações superficiais alóctones englobam tanto aquelas, em geral depositadas ao longo de uma vertente, chamados colúvios, quanto as que têm sua gênese relacionada a um curso d'água canalizado, os alúvios.

Na literatura geomorfológica podem ser encontradas várias definições para o termo colúvio ou *colluvium*, nas quais estão embutidas características descritivas e/ou genéticas que diferem de autor para autor (CRUZ, 2006).

Fairbridge (1968) define o termo como a parte superior do regolito, o manto superficial de detritos, de rocha e solo, da superfície da Terra, constituído especificamente de materiais heterogêneos de diversas granulometrias.

Moura & Meis (1986) referem-se aos colúvios como materiais movimentados na superfície das encostas por força de gravidade, pelas águas de escoamento superficial ou por movimentos de massa. Campy & Macaire (1989) sugerem que o termo é uma denominação generalizada para os depósitos de vertentes. Bigarella *et. al.*(1994), se referem a ele como material que sofreu deslocamento na vertente. Thomas (1994) considera o termo impreciso, podendo se referir tanto ao material quanto ao processo de formação.

Thomas (1994) explica que os colúvios recobrem mais da metade das superfícies úmidas, sub-úmidas e secas dos trópicos. Eles são formados em resposta às mudanças na cobertura vegetal ao longo das encostas, formando depósitos mal estratificados e, por vezes, não se diferenciam dos regolitos locais (PLAISANCE & CAILLEUX, 1958). Esses depósitos são derivados primordialmente do fluxo laminar não concentrado ao longo das encostas (*slope wash*) e rastejamento do solo por sobre as encostas adjacentes a um vale (SCHUMM, 1977).

O material coluvial aparece comumente nas porções inferior e média das vertentes, sendo menos espesso quando encontrado nas porções superiores das vertentes (THOMAS, 1994). Em geral, são materiais compostos por areia, silte e argila, com discretos alinhamentos de grânulos e infreqüentes linhas de seixo (MOURA & MEIS, 1986). São pouco estratificados ou não apresentam qualquer tipo de estratificação (MOUSINHO & BIGARELLA, 1965; SELBY, 1994).

Já o alúvio ou *alluvium* é o termo que compreende os sedimentos selecionados ou materiais detríticos inconsolidados depositados em períodos geológicos recentes por um rio ou corpo d'água corrente, em leito de rio, planícies de inundação, delta, cone ou leque, ou ainda, na base de encostas com maior declividade (BATES & JACKSON, 1997 *apud* CAMARGO, 2005).

O material que compõe o alúvio, muitas vezes, tem sua origem no material coluvial, dentre outros materiais que, alcançando o curso d'água são retrabalhados e depositados, de acordo com a dinâmica fluvial (CORRÊA & MENDES, 2002).

### 3.2. TRANSFORMAÇÕES PEDOGENÉTICAS DAS FORMAÇÕES SUPERFICIAIS

O solo é entendido como a delgada camada mais superficial da litosfera que é responsável pela maior parte das formas de vida de nosso planeta (VIDAL-TORRADO *et. al.* 2005). É formado por um conjunto de corpos naturais tridimensionais, resultante da ação integrada do clima e organismos sobre o material de origem, condicionado pelo relevo em diferentes períodos de tempo (PALMIERI & LARACH, 2000).

É um sistema dinâmico, respondendo a adições, subtrações, translocações e transformações de matéria e energia. Sua morfologia é variável de acordo com perturbações causadas por umidade, temperatura, vegetais, animais e, particularmente, pela ação do homem (CASTRO *et.al.*, 2000).

A estruturação do solo é um meio dinâmico e em evolução, que responde às mudanças introduzidas no ambiente através de transferências verticais e laterais de matéria, líquidos, gases e de mudanças na circulação hídrica (RUELLAN, 1984 *apud* LUIZ, 2003). Ela condiciona a existência de poros maiores entre unidades



fundamentais (os agregados) e poros menores no interior delas, sendo que estes últimos são função da distribuição textural (KNAPP, 1978 *apud* LUIZ, 2003). Esses agregados do solo podem ser definidos como uma união natural ou grupo de partículas nos quais as forças que mantêm os colóides juntos são muito mais expressivas que entre agregados adjacentes (MARTIN *et al.*, 1955 *apud* CORTEZ *et al.*, 2009).

Segundo Camargo Filho (1997) a origem dos agregados nem sempre pode ser determinada. Os formados por processos pedológicos são conhecidos como agregados (*peds*), enquanto os constituídos a partir do rompimento de torrões, por destorroamento ou processos similares, são considerados fragmentos. Entretanto, existem inúmeros casos em que os grandes agregados são quebrados em agregados menores por processos essencialmente pedológicos (FITZPATRICK, 1984 *apud* CAMARGO FILHO, 1997).

### 3.3. PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM ENCOSTAS

A vertente se comporta como sistema em cascata, pois nela ocorre transferência de energia e matéria, sendo essa transferência comandada principalmente por forças gravitacionais, hidráulicas e químicas (THOMAZ & ROSS, 2006).

A transferência de água, sedimentos e elementos químicos na vertente ocorre por meio de diferentes fluxos, que variam no tempo e no espaço, ao longo do sistema vertente, podendo ser superficiais e subsuperficiais (THOMAZ & ROSS, 2006).

Dunne (1978; 1990 *apud* PAISANI, 1998) demonstra que a água se movimenta na encosta por quatro caminhos preferenciais (Figura 6), sendo eles: o escoamento superficial ou hortoniano (*horton overland flow*), escoamento superficial saturado (*saturation overland flow*), escoamento subsuperficial (*subsurface flow or throughflow*) e o fluxo de base (*baseflow*).

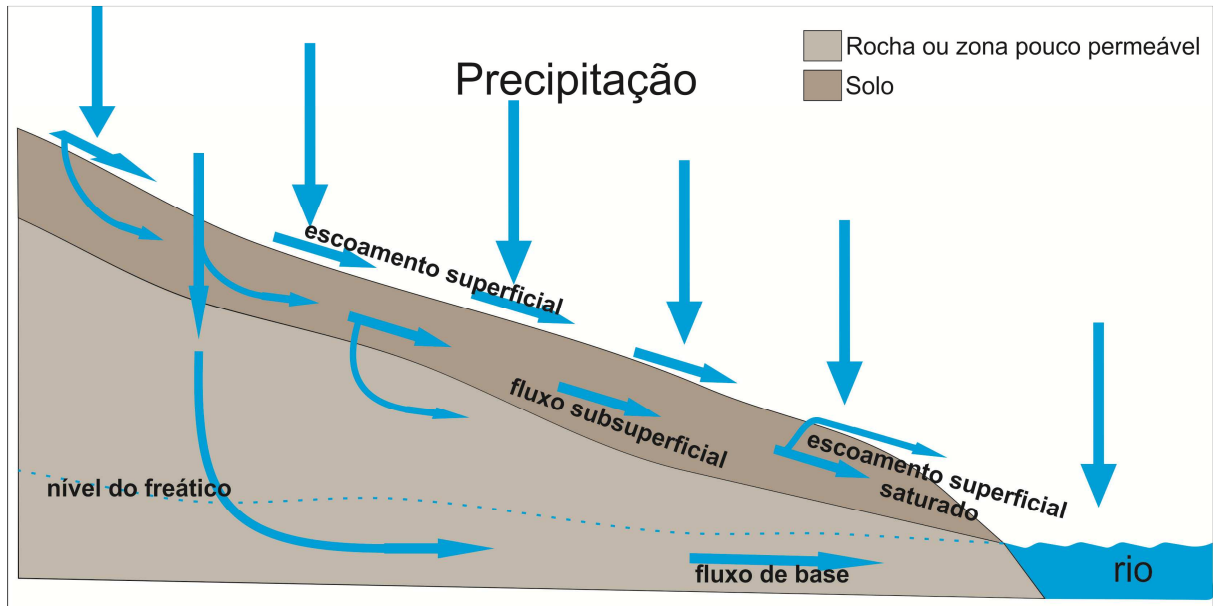


Figura 6 - Caminhos da água na encosta segundo Dunne (1980, modificado).  
Org.: autor

O escoamento superficial ou fluxo hortoniano tem início quando a intensidade da chuva excede a capacidade de infiltração dos solos, sendo colocado na categoria de mecanismo primário de erosão por Oliveira *et. al.* (1995). O fluxo se origina primariamente nas microdepressões do terreno que estão repletas de água e transbordam (CAMARGO *et. al.*, 2004). Esse tipo de fluxo não ocorrerá somente se a capacidade de infiltração do solo for maior que a precipitação.

Já o escoamento superficial saturado é produzido pela precipitação direta sobre as áreas saturadas e também pela contribuição subterrânea do escoamento de retorno, resultante do afloramento da superfície freática (LUIZ, 2003).

Ocorre quando a transmissividade ou gradiente diminui a jusante e para o fundo ou onde ocorre uma convergência topográfica (CAMARGO, 1998), que favorece o posicionamento do lençol relativamente próximo à superfície (HORNBERGER *et. al.*, 1998 *apud* LUIZ, 2003). Neste caso a água infiltrada no solo, que altera a posição da superfície freática, pode fazer a mesma coincidir com a superfície do terreno, atingindo assim a saturação em toda extensão vertical (LUIZ, 2003).

Paisani (1998) também chama a atenção para o fluxo subsuperficial, porque este atua tanto na regulação da expansão da zona de saturação, quanto na geração

do fluxo superficial saturado, que pode depender das características do ambiente e das propriedades do solo.

A migração de água no interior do solo é controlada pelo volume e intensidade de precipitação, pelas propriedades (físicas, químicas e hidráulicas) do solo, pela natureza da cobertura vegetal e pelas características de declividade e morfológicas das encostas (FERNANDES, 1990).

Com relação à sua gênese, pode ser compreendida através das variações na condutividade hidráulica, sendo esta, propriedade do meio poroso que descreve sua capacidade em transmitir água (PAISANI, 1998). Vários fatores colaboram para que a condutividade hidráulica seja maior em pequenas profundidades e na direção horizontal, caracterizando o solo como um meio anisotrópico e heterogêneo (SANTOS, 2009). Ela varia com o conteúdo de umidade do solo, assumindo valores máximos quando o solo tem seus poros completamente preenchidos por água (LUIZ, 2003).

O escoamento subsuperficial também pode contribuir diretamente para o incremento rápido da vazão em canais por caminhos preferenciais de escoamento, como túneis e macroporos (SANTOS, 2009). De acordo com Luiz (2003) é possível que macroporos ou dutos possam ser formados ou aumentados, pela própria atuação do fluxo subsuperficial. Esse fenômeno é denominado por Dunne (1990) de escoamento em túnel (*tunnel scour*).

Nas regiões úmidas, a vegetação exuberante e os solos mais permeáveis aumentariam a capacidade de infiltração, de modo que grande parte da chuva seria absorvida e alimentaria o lençol, que por sua vez seria responsável pela recarga contínua de alguns rios (PAISANI, 1998). Esse tipo de fluxo é conhecido como fluxo de base.

#### 3.4. PROCESSOS HÍDRICOS DE EROÇÃO

O processo de erosão constitui uma seqüência de estados de transformação de um dado sistema ao longo do tempo (OLIVEIRA *et. al.*, 1995). É um conjunto de fenômenos naturais envolvendo a remoção e o transporte de materiais detríticos

provenientes da decomposição e desagregação das rochas e do solo (NUNES & ROMÃO, 2008). Condições climáticas e geológicas, a cobertura vegetal e a interrelação entre todos esses fatores, são as características mais importantes (SELBY, 1982).

O escoamento superficial pode ocorrer de forma laminar, retirando e transportando grande volume de matéria da superfície dos solos em toda a extensão da vertente ou de maneira concentrada, gerando feições do tipo sulcos, ravinas e voçorocas (GALETI, 1973; AMARAL, 1984).

#### 3.4.1. Processos erosivos subsuperficiais e a erosão em túneis

Processos erosivos em subsuperfície diferem-se dos processos erosivos superficiais pela sua difícil detecção, mas ainda sim, existem peculiaridades entre os mecanismos de erosão subsuperficial e os de erosão superficial, sendo a principal delas, os fluxos concentrados. Esses fluxos concentrados podem dar origem a canais preferenciais de escoamento subsuperficial, dando origem a túneis pela ação de desagregação mecânica do material de origem gerada pela água.

A erosão em túneis é uma forma específica de erosão subsuperficial, que foi descrita pela primeira vez por Richthofen, em 1872, na China (ZACHAR, 1982). Esse processo erosivo foi observado em paisagens naturais e antropogênicas, em diferentes climas, litologias e depósitos, bem como em diferentes usos do solo e coberturas vegetais (ROMERO DÍAZ *et. al.*, 2007).

Essa forma de erosão resulta da exfiltração de água, gerando uma força associada a um gradiente de potencial hidráulico que atua sobre um grão ou sobre um grande volume de rocha/solo (FERNANDES, 1990).

Thomas (1994) buscou entender como se dá o início dos processos erosivos em subsuperfície, mas não há ainda consenso sobre o assunto, mesmo porque, existem muitas variáveis que podem dar origem a esses processos.

Para Selby (1982) os fatores possíveis para o surgimento da erosão em túneis são: oscilações na precipitação; solo propenso ao surgimento de gretas de

contração em períodos de seca; redução na cobertura vegetal; camada relativamente impermeável no perfil; existência de gradiente hidráulico e camada dispersiva no solo.

Os túneis podem ser importantes vias de circulação de água em subsuperfície e podem entrar em colapso gerando sulcos no solo (SELBY, 1982), sendo o colapso do teto do túnel e o posterior voçorocamento do solo o estágio final da erosão em túneis (ZACHAR, 1982).

Estudos realizados por Camargo (1998) no Segundo Planalto Paranaense confirmam essa afirmação, indicando que os túneis encontrados na região passam a constituir rotas preferenciais do fluxo de água e são responsáveis por diversos mecanismos de erosão que eventualmente evoluem para canais em superfície (Figura 7).



Figura 7 - Túnel na cabeceira da voçoroca no município de Lapa, Paraná.  
Foto: autor

Essa forma de erosão também pode ser atribuída a fluxos concentrados através de macroporos no solo, fendas de dissecação ou fraturas nas rochas (ROMERO DÍAZ *et. al.*, 2007). É considerado como um processo limitado a determinados tipos de materiais, particularmente em regiões áridas (BRYAN & JONES, 1997), tendo uma maior ocorrência em solos arenosos e argilosos (RICHLEY, 2000).

Faulkner (2007) estudando o alto da bacia do ribeirão Alkali, localizado dentro da Floresta Nacional de 'White River' no Planalto de Colorado, Estados Unidos da América, também identificou o erosão em túneis como sendo um processo gerado pelo comportamento dispersivo da translocação do sódio ou esmectita de forma vertical no solo. Romero Díaz *et. al.* (2007) também discutem a presença de sódio, potássio e magnésio em solos da região próxima ao rio Mula na província de Murcia, sudeste da Espanha (Figura 8).



Figura 8 - Terraços abandonados afetados por *piping* (Murcia, Espanha).  
Foto: Romero Díaz *et. al.* (2007)

A ocorrência de erosão em túneis é usualmente associada com alterações nas condições hidrológicas do solo, que resultam numa freqüente saturação de argilas (RICHLEY, 2000). Altos valores de sódio no solo, somados a níveis muito altos de carbonatos de cálcio, facilitam a dispersão de argilas pelo sódio e o transporte de material em suspensão (ROMERO DÍAZ *et. al.*, 2007). O efeito de dispersão dos solos é a defloculação da fração argila, quando a água é adicionada,

enfraquecendo as ligações químicas entre as partículas por troca iônica ou por lixiviação (SELBY, 1982).

Gutiérrez *et. al.* (1997) estudando o noroeste da Espanha, na bacia do Rio Ebro, constatou que os solos da área têm argilas compostas de illita, que apresentam altas concentrações de sódio, provocando desse modo a quebra das estruturas do solo e a dispersão da argila. Higgins e Schoner (1997) indicam que o sódio trocável é um indicador eficaz de dispersividade de argila, sendo o sódio um agente dispersor no solo, alterando a estabilidade dos agregados.

Gutiérrez *et. al.* (1997) explicam ainda que a quebra do solo possa ser explicada pela pressão osmótica produzida quando a concentração de íons, principalmente de sódio, no solo são maiores do que na solução de água. Isso faria com que a água se movimentasse no solo para reduzir a diferença de concentração dos íons, aumentando assim a concentração de água no solo e, conseqüentemente, ampliando os canais gerados pelos pontos onde houve a quebra.

Estudos efetuados por Toniolo *et. al.* (2009) em Caribou-Poker, Alaska, Estados Unidos da América, demonstram que o processo de erosão em túneis também pode ser provocado pelo rápido descongelamento dos solos (*permafrosts*). Segundo os autores, o rápido derretimento do gelo confinado no solo gera fluxos capazes de mobilizar grande quantidade de sedimentos, ocasionando subsidências nos solos antes congelados. Essas subsidências são geradas ao longo dos canais subsuperficiais até pontos do terreno com declives mais suaves, tendo seus canais rapidamente entulhados por sedimentos.

Outra forma de erosão é dada pela água de exfiltração, que carrega o solo ou rocha, de acordo com o fluxo constante e emergente em meio poroso, sendo ainda denominado de *seepage erosion* ou erosão por vazamento (COELHO NETTO, 1998). Para o surgimento da erosão em túneis e seu desenvolvimento, o solo deve ser coeso o suficiente para manter as paredes do túnel, mas suscetível ao processo erosivo em si (DUNNE, 1990). Bryan e Jones (1997) simplificam o assunto explicando que em cada caso específico, a erosão em túneis reflete a interação crítica entre as condições climáticas, características do solo/regolito e características locais dos gradientes hidráulicos.

## 4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da pesquisa foram realizados trabalhos de campo para obtenção de dados topográficos e morfométricos da encosta e para coleta de materiais para análises laboratoriais. Dentre as análises que puderam ser aplicadas na pesquisa, as granulométricas são as que classificaram os tipos de materiais quanto a suas frações (RICHLEY, 2000), as de densidade real, aparente e porosidade total que foram utilizadas para o caso da erosão estar sendo influenciada pela percolação de água (CAMARGO, 2005; FAULKNER, 2007) e a de difratometria de raios-X (DRX) para a identificação de argilominerais presentes nos materiais (CAMARGO, 2005; FAULKNER, 2007; ROMERO DÍAZ *et. al.*, 2007; GUTIÉRREZ *et. al.*, 1997).

### 4.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O levantamento bibliográfico se deu de forma contínua durante todo o período de desenvolvimento da pesquisa. Essa busca teve o objetivo de encontrar trabalhos que abordassem o processo de erosão em túneis, principalmente, trabalhos internacionais.

Os trabalhos internacionais foram utilizados com o intuito de compreender como o processo de erosão em túneis ocorre em condições climáticas, geológicas, geomorfológicas e de uso e exploração do solo diferente dos que ocorrem/ocorreu na área de estudo.

### 4.2. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO E MORFOMÉTRICO DA ENCOSTA

Os levantamentos, topográfico e morfométrico da encosta, foram efetuados com a utilização de aerofotos, com auxílio de estereoscópio de espelhos e nível ótico, marca Leica NA-820. Esta etapa do trabalho buscou determinar a forma da encosta e a classe de declividade em que ela se encontra. O levantamento planialtimétrico foi feito através de irradiação de pontos com utilização de estação total Leica TPS 400, GPS Pro-XR e *software CORELDRAW X5*, carta topográfica em escala de 1:50.000.



### 4.3. CONSTRUÇÃO DE TOPOSSEQUÊNCIAS

O trabalho de construção de topossequências foi efetuado, primeiramente, a partir dos trabalhos de campo para a determinação dos pontos que deveriam ser perfurados na encosta com o uso de trado e dos trabalhos de levantamento topográfico. Concluída esta etapa, foram feitas sondagens com trado tipo holandês para retirada e descrição das amostras em campo. Essas descrições buscaram indicar quais as condições presentes no material no momento da sondagem, sendo anotadas as características texturais, de cor, de plasticidade, umidade e observações gerais, tais como, presença de raízes nas amostras, presença de carvão, mosqueamento etc.

Conforme as amostras foram sendo retiradas, anotaram-se também as profundidades até que o trado alcançasse a rocha. Todo o trabalho concluiu-se com os resultados obtidos em laboratório após serem feitas as análises granulométricas. A partir desse ponto começa a construção dos desenhos em programa gráfico apropriado. Neste trabalho foi utilizado o Programa Gráfico *Corel Draw X5*.

O resultado final foi a construção de quatro topossequências para caracterizar longitudinalmente, os setores de alta, média e baixa encosta e transversalmente a baixa encosta, onde aparecem os túneis.

### 4.4. DETERMINAÇÃO DE ROTAS DE FLUXO SUBSUPERFICIAL CONCENTRADO

A determinação de fluxos subsuperficiais concentrados foi realizada com o uso de corante azul de metileno. Esse corante é utilizado por ter coloração contrastante com as cores dos materiais encontrados a região e por se dispersar muito facilmente em água.

Sua aplicação consiste em tão somente lançá-lo através de uma abertura na cobertura superficial que apresente fluxo subsuperficial concentrado e observar a sua dispersão em algum outro ponto com o mesmo tipo de fluxo aparente. Seu uso não contamina ou degrada a água, nem põe em risco a vida de inseto ou animais. Essa técnica foi utilizada na baixa encosta para verificar se há ligação entre os túneis.

#### 4.5. ABERTURA DE TRINCHEIRAS

A abertura de trincheiras teve o intuito de expor o interior da cobertura superficial e a interação dela com as raízes da vegetação, constituindo parte importante dos trabalhos feitos em campo. Foram abertas duas trincheiras, uma na parte final do sistema de túneis, denominada trincheira 1 e uma dentro de uma área de subsidência no início do sistema, denominada de trincheira 2.

A visualização do interior da cobertura superficial através de uma seção aberta possibilitou a extração de amostras para diferentes tipos de análises laboratoriais. Dessa forma, utilizou-se enxada e cortadeira para a abertura das trincheiras e facão para a limpeza das seções abertas.

#### 4.6. ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS

As análises granulométricas ou análises mecânicas dos sedimentos visam quantificar as diversas frações dos sedimentos em um perfil específico de solo (SUGUIO, 1973). As análises granulométricas feitas dos materiais retirados com o uso do trado holandês e das paredes das trincheiras totalizaram 46 amostras. Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Geomorfologia Dinâmica e Aplicada da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO).

Optou-se por fazer dois tipos diferentes de ensaios granulométricos baseados na rotina proposta por EMBRAPA (1997). O primeiro ensaio foi realizado da maneira convencional. O segundo ensaio foi realizado com o uso de aparelho de ultrassom e agitador eletromagnético, com o intuito de se dispersar completamente possíveis agregados de finos contidos nos materiais. A análise granulométrica com o uso de ultrassom é chamada de sonificação, sendo utilizada para tirar dúvidas relativas a real fração dos materiais analisados.

##### 4.6.1. Análise granulométrica convencional por peneiramento e via úmida

O ensaio de análises granulométricas proposto pelo manual da EMBRAPA (1997) determina que as amostras sejam secas a temperatura de 65°C por durante

24h, sendo posteriormente desagregadas em graal de porcelana e pistilo envolto de borracha.

Após a moagem de todo o volume de material, retira-se 50g de amostra para peneiramento sobre um conjunto de peneiras sobrepostas de 2,0mm, 1,0mm, 0,50mm, 0,250mm e 0,125mm e agitadas em agitador eletromecânico por 1 minuto ou agitador manual por 30 minutos.

O material que fica retido em cada peneira é devidamente pesado e reservado. Os finos (areia muito fina, silte e argila) que passam pela malha de 0,125mm são depositados em recipiente de plástico. Neste é adicionado solução de 25ml de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) a um volume de 10% para a queima de material orgânico, presente na amostra, por pelo menos 24h.

Após a queima pelo peróxido de hidrogênio, é adicionado 25ml de dispersante hidróxido de sódio (NaOH), a um volume de 5%, e mais 25ml de água destilada, permanecendo em repouso por 16 horas.

O material previamente preparado é passado em uma peneira com abertura de 0,053mm (areia muito fina) para a lavagem com água destilada até que se complete o volume de 1l de amostra + água destilada em uma proveta com capacidade de 1,3l. O material retido na peneira é colhido em placa de Petri, previamente pesada e levada à estufa para secagem em temperatura de 65°C.

Esse processo de separação de amostras de partículas finas é chamado de 'via úmida' e visa tão somente à separação de frações mais finas do solo (areia muito fina, silte e argila). Com o material disperso, começa-se a regulação da temperatura da água contida nas provetas, que devem estar a 20°C, com uma variação de no máximo 0,5°C, acima ou abaixo.

Seguindo a Lei de Stokes, da velocidade de decantação, é efetuado o cálculo do tempo necessário para coleta de partículas na fração silte após o agitação do líquido das provetas por um minuto, sendo: 58s para silte grossa, 3min e 52s para silte média, 7min e 44s para silte fina, 31min para silte muito fina.

Todo esse material é coletado em pipeta graduada de 50ml e depositado em béqueres previamente pesados, que são posteriormente levados a estufa para secagem. A altura em que a pipeta deve ser inserida a partir da lâmina d'água da proveta é de 20cm para a primeira amostra e de 10cm para as outras três amostras.

Após a secagem das amostras em placa de Petri e béqueres, as amostras são pesadas e os valores anotados em formulário próprio. Esses dados são transferidos para uma planilha elaborada no *software Microsoft Office Excel*, previamente programado para efetuar tratamento estatístico dos resultados granulométricos.

#### 4.6.2. Análise granulométrica por via úmida, com uso de ultrassom (sonificação) e agitador eletromagnético

Observações feitas em campo indicavam que o material que estava sendo coletado, apresentava textura arenosa, distoando do que se encontra comumente na região. A partir dessas observações e outras feitas em laboratório com auxílio de lupa, considerou-se então na aplicação de sonificação, onde a destruição de possíveis agregados de finos apontaria a composição granulométrica real dos materiais.

O diferencial dessa técnica é a aplicação de energia ultrassônica no material já previamente preparado para a granulometria, tanto que, parte da rotina utilizada foi feita com base no método sugerido pela EMBRAPA (1997) e a outra parte foi baseada no método utilizado por Carolino de Sá *et. al.*(1999).

Este ensaio de análises granulométricas determina que as amostras sejam secas a temperatura de 65°C por durante 24h, sendo parcialmente destorroadas em graal de porcelana e pistilo envolto de borracha.

Após essa primeira moagem de todo o volume de material, retira-se 50g de amostra que é então separada e recebe uma solução de 25ml de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), com volume de 10%, e 25ml de água destilada por durante 24h. Após essa etapa é adicionado uma solução de 25ml de hidróxido de sódio (NaOH) ao material, deixando-o descansar por pelo menos 16h.

Com o material orgânico contido na amostra já queimado pelo peróxido de hidrogênio e disperso pelo hidróxido de sódio, aplica-se a energia ultrassônica por pelo menos 30min. A sonificação visa quebrar todos os agregados mais resistentes ao dispersante, sem quebrar os fragmentos de rochas e minerais contidos na amostra.

Todo o material é colocado em agitação em agitador eletromagnético com uma ou duas barras eletromagnéticas (peixinho) por pelo menos 1h, para que seja misturado de maneira homogênea e para que o dispersante seja totalmente incorporado por algum agregado que, por ventura, não tenha sido desfeito pela sonificação.

O material previamente preparado é lavado com água destilada em uma peneira de 0,125mm (areia fina) sobreposta a uma outra peneira com abertura de 0,053mm (areia muito fina) até que se complete o volume de 1l de amostra + água em uma proveta com capacidade de 1,3l.

O material retido na peneira (areia muito fina) é colhido em placa de Petri previamente pesada e levada à estufa para secagem em temperatura de 65°C. Se não existirem grânulos ou seixos entre as amostras, podem ser consideradas apenas três classes de sedimentos, as de argilas (argila ultrafina, fina, média e grossa), siltes (silte muito fino, silte fino, médio e grosso) e areias (areia muito fina, fina, média e grossa).

O material que ficou disperso na proveta deve então ser colocado em uma bancada fixa para que seja feita então a regulação da temperatura ambiente até que a temperatura das provetas esteja a 20°C, com uma variação de no máximo 0,5°C, acima ou abaixo.

Com a temperatura regulada e seguindo a Lei de Stokes, da velocidade de decantação, é efetuado o cálculo do tempo necessário para coleta de partículas na fração silte após o agitação do líquido das provetas por um minuto, sendo: 58s para silte grossa, 3min e 52s para silte média, 7min e 44s para silte fina, 31min para silte muito fina.

Todo esse material é coletado em pipeta graduada de 50ml e depositado em béqueres previamente pesados, que são posteriormente levados a estufa para secagem. A altura em que a pipeta deve ser inserida, a partir da lâmina d'água da proveta, é de 20cm para a primeira amostra e de 10cm para as outras três amostras.

Após a secagem das amostras em placa de Petri e béqueres, as amostras são pesadas e os valores anotados em formulário próprio. Esses dados são transferidos para uma planilha elaborada no *software Microsoft Office Excel*, previamente programado para efetuar tratamento estatístico dos resultados granulométricos.

#### 4.7. ANÁLISES DE DENSIDADE APARENTE, REAL E POROSIDADE TOTAL

Para as análises de densidade aparente ( $D_a$ ), densidade real ( $D_r$ ) e porosidade total, o método utilizado fundamentou-se na rotina proposta no manual EMBRAPA (1997) que se fundamenta no uso de um anel de aço com bordos cortantes (anéis de *Kopeck*), com capacidade interna conhecida. Esses ensaios buscaram reconhecer, principalmente, qual a porosidade do material encontrado na baixa encosta. Para tanto, foram retiradas um total de oito amostras, quatro da trincheira 1 e quatro da 2.

A densidade aparente ( $D_a$ ) pode ser definida como a relação entre a massa da amostra de solo seca a 105°C durante 48h (Terra Fina Seca ao Ar) e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e poros (volume do anel utilizado). A fórmula geral para obtenção da densidade aparente dos solos é:

$$D_a = m/v$$

$D_a$  = densidade aparente

$m$  = massa do solo

$v$  = volume (poros+terra)

A densidade real ( $D_r$ ) é a relação existente entre a massa de uma amostra e o volume ocupado pelas suas partículas sólidas. Para a determinação é necessário obter-se o valor da massa da amostra e depois o volume dos sólidos presentes. A

massa dos sólidos é obtida por simples pesagens, enquanto que o volume dos sólidos é determinado pelo método do balão volumétrico. O método do balão volumétrico para a determinação do volume consiste em colocar 20g de amostra seca e destorroada dentro de um balão volumétrico e completá-lo com álcool etílico absoluto até 50ml. Os cálculos de  $D_r$  são:

$$D_r = m/(V_b - V_a)$$

$m$  = massa da amostra

$V_b$  = volume do balão volumétrico (50 ml)

$V_a$  = volume de álcool gasto para completar o balão volumétrico.

A porosidade do solo pode ser definida como o volume de vazios do solo. A fórmula utilizada para a obtenção da porosidade é:

$$\% P = (D_r - D_a) 100 / D_r$$

$P$  = porosidade

$D_r$  = densidade real

$D_a$  = densidade aparente

As análises de densidade aparente, real e porosidade total foram realizadas no Laboratório de Geomorfologia Dinâmica e Aplicada da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO).

#### 4.8. ANÁLISE DE DIFRATOGRAMAS DE RAIOS-X (DRX)

Para as análises de difratometria de raios-X, foram coletadas seis amostras, sendo três de cada trincheira, com o objetivo de identificar a presença de possíveis argilominerais trimórficos ou com propriedades expansivas e argilominerais com propriedades dispersoras. Essas análises foram efetuadas no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), com recursos próprios.

O LAMIR é equipado com um difratômetro modelo PW-1830, da marca *Philips Analytical*, com programa automático de interpretação, *X'pert Highscore*, marca *Philips*, apoiado em um banco de dados com mais de 140.000 substâncias cristalinas.

A difratometria de raios-X (DRX) é essencial para a caracterização mineralógica de argilominerais e outros constituintes cristalinos presentes nas frações granulométricas mais finas dos solos, como silte e argila (EMBRAPA, 2009). A identificação de argilominerais que compõe o solo é importante para o estudo de sua gênese e classificação, além de identificar o grau de evolução do solo e de mantos de intemperismo (CAMARGO, 2005). Isto é possível porque na maioria dos cristais, os átomos estão ordenados em planos cristalinos separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios-X.

Para os minerais planares, a expressão dos reflexos no difratograma de raios-X é favorecida pela orientação da amostra sobre a lâmina de vidro, de modo que as partículas desses minerais fiquem paralelas umas às outras, intensificando assim os picos ou as reflexões características de cada um deles.

Essa orientação pode ser obtida por sedimentação do material em suspensão (método do gotejamento) ou pela fricção do material em estado pastoso entre duas lâminas de vidro (método do esfregaço). Para minerais não planares, como quartzo, feldspatos, óxidos e hidróxidos cristalinos de ferro, alumínio, titânio e outros, é mais adequada à montagem da lâmina com amostra seca, em pó, apesar desses minerais também serem detectados em amostras orientadas.

Ao se incidir um feixe de raios-X sobre um cristal, o mesmo interage com os átomos presentes na estrutura, gerando o fenômeno da difração. A difração ocorre segundo a Lei de Bragg (equação A) que estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos, característicos para cada fase cristalina:

$$n\alpha = 2d \text{ sen } \theta$$

n: número inteiro;

$\alpha$ : comprimento de onda dos raios X incidentes;

d: distância interplanar;

$\theta$ : ângulo de difração.



## 5. RESULTADOS

### 5.1. ASPECTOS DA EROSÃO EM TÚNEIS NA ENCOSTA DO RIO DAS POMBAS

No setor de baixa encosta do Rio das Pombas registra-se erosão subsuperficial em túneis. Esse processo erosivo possui feições características, destacando-se as estruturas de abatimento e a subsidência do teto dos túneis, que são feições materializadas na superfície. Essas demonstram estágios em que um sistema de túneis pode ser encontrado.

São encontradas feições típicas dessa forma de erosão, evidenciando dois sistemas de túneis independentes na encosta. Um sistema se apresenta com todas as feições superficiais e subsuperficiais e outro com apenas feições subsuperficiais, uma estrutura de abatimento e uma pequena ravina na zona de exfiltração de água da encosta.

As feições superficiais desse processo erosivo demonstram três estágios de evolução nos sistemas encontrados na baixa encosta. São eles:

a) subsidência do teto do túnel – é considerada como feição superficial de estágio intermediário do processo erosivo, que é o rebaixamento do teto de um túnel, comumente reforçado por tramas de raízes de gramíneas, pela retirada de sedimentos ou água, localizados entre a rocha e superfície;

b) estrutura de abatimento – é a principal feição que a erosão em túneis apresenta, podendo ser considerada também, como uma feição de estágio intermediário, que sofre subsidência ou desmoronamento de parte do solo acima do teto, que é levada por ação mecânica da água dentro do túnel.

c) incisão (sulco, ravina ou voçoroca) – é o estágio máximo de evolução de um sistema de túneis, sendo caracterizada pela abertura completa do teto do túnel. Quando aberta, a incisão apresenta mecanismos de evolução de um processo erosivo superficial, com alcovas de regressão, queda vertical de agregados, fendas de tração etc.

Na encosta, a disposição aproximada das estruturas de abatimento, bem como a zona de exfiltração de água, as ravinas, a subsidência do teto do túnel e as trincheiras abertas, podem ser visualizadas na Figura 9. Nesse setor, a encosta se apresenta com formato côncavo convexo com baixa declividade e cobertura superficial rasa, não ultrapassando 0,98m de profundidade.

Para a determinação da ligação entre os túneis, foi lançado corante azul de metileno através das estruturas de abatimento que apresentavam fluxo subsuperficial concentrado. Nesse teste foi observado que uma das estruturas de abatimento, que também apresentava fluxo concentrado, não apresentou nem ao menos traços do corante, sendo assim, considerou-se que existam dois sistemas independentes (sistema 1 e sistema 2).

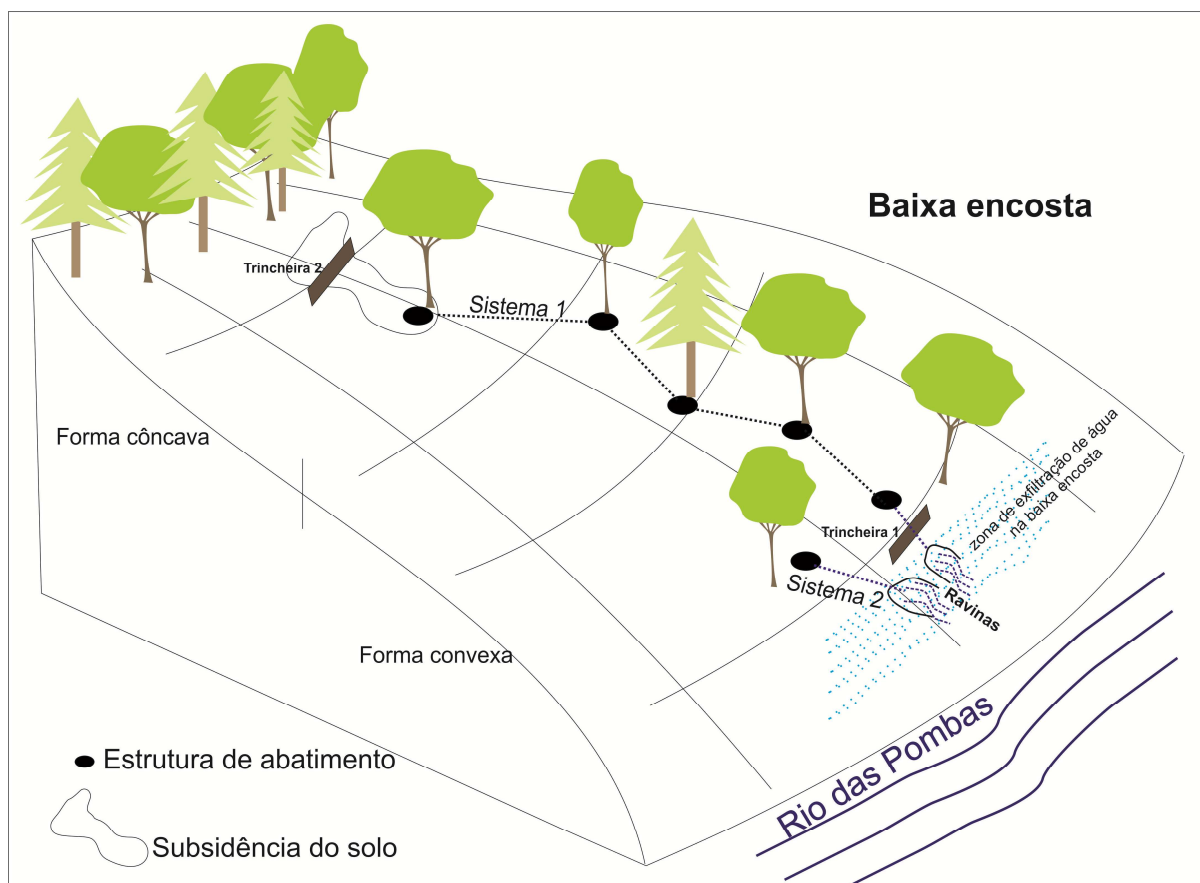


Figura 9 - Distribuição das estruturas de abatimento e trincheiras abertas na encosta.

Org.: Autor

A evolução desses sistemas de túneis se dá principalmente pela ação do movimento da água dentro do solo (fluxos concentrados, exfiltração e liquefação), tendo como mecanismos secundários de evolução a perturbação de animais e

plantas. De acordo com a posição das estruturas de abatimento, notou-se que os túneis não obedecem necessariamente a topografia da encosta. Nem sempre a forma da encosta interfere no direcionamento dos fluxos em subsuperfície, já que os túneis causam alívio de pressão dentro do material, atraindo os fluxos para si. Portanto, a forma convexa conferida à parte final da baixa encosta, não altera a direção dos fluxos subsuperficiais.

Só há alteração nos fluxos subsuperficiais quando há também alteração na topografia da encosta causada pela subsidência do teto do túnel somada à estrutura de abatimento, o que condiciona os fluxos superficiais a entrarem nos túneis. Essa alteração na topografia da encosta é localizada somente em um ponto da baixa encosta, onde a subsidência do teto do túnel expôs lateralmente uma estrutura de abatimento (Figura 10), servindo dessa forma como ponto preferencial de entrada de fluxos superficiais.



Figura 10 - Estrutura de abatimento exposta lateralmente devido à subsidência do teto do túnel.

Foto: Autor

Sobre a evolução do processo ao longo da encosta, é possível utilizar o modelo proposto por Dunne (1990), que demonstra o que ocorre em uma incisão superficial, mas pode ser usado também como modelo para o processo de erosão

em túneis. No modelo, aparece o direcionamento dos fluxos subsuperficiais para a incisão aberta decorrente do alívio de pressão (Figura 11).

Na cabeceira da incisão aberta ou túnel prevaleceria o efeito da exfiltração de água como principal mecanismo de evolução, sendo que numa incisão aberta ainda ocorreria mecanismos influenciados pelos fluxos superficiais.

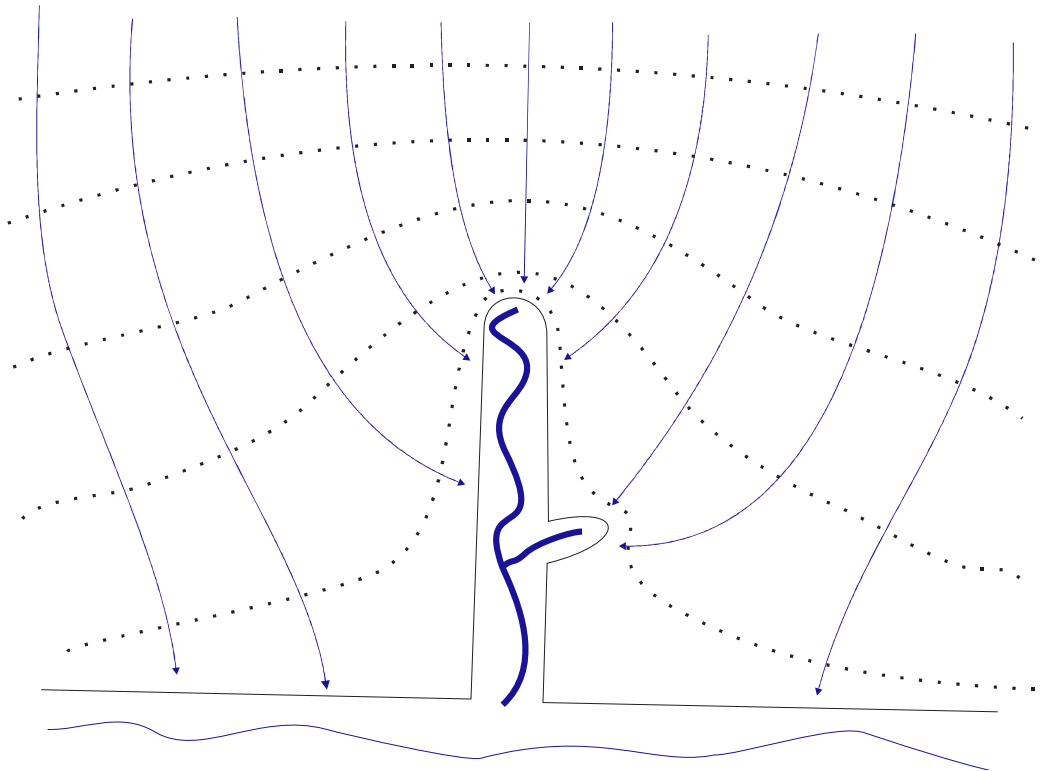


Figura 11 - Convergências de fluxos subsuperficiais até a exfiltração na encosta.  
Fonte: Modificado de Dunne (1990).

Na área de estudo esse direcionamento dos fluxos subsuperficiais conferem aos túneis aumento remontante pelo efeito de exfiltração de água (*seepage*). Esse fato pode ser comprovado pela localização das incisões abertas na encosta, que são as feições mais evoluídas dos sistemas de túneis (Figura 12). Elas estão instaladas na zona de exfiltração de água da baixa encosta e evoluindo remontantemente. Essa evolução é provocada pela concentração dos fluxos de todo o sistema, que desagrega e carrega o material para o canal principal.



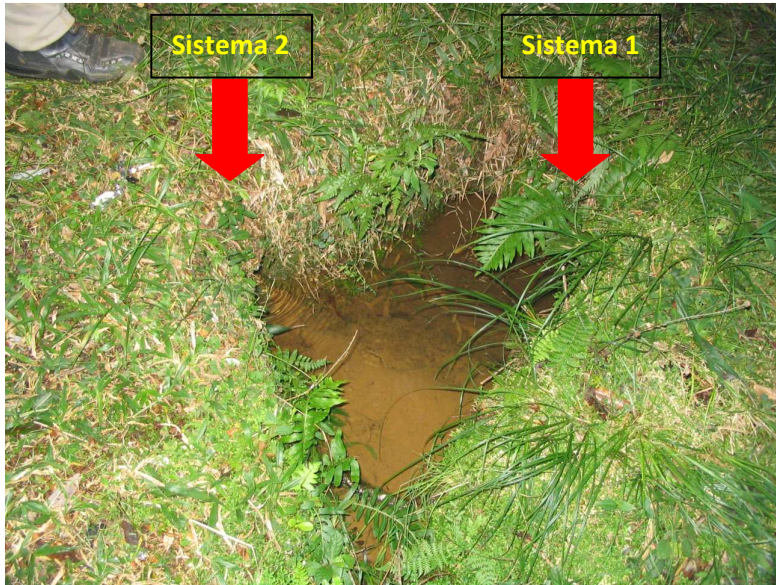


Figura 12 - Ravinas localizadas no final dos sistemas de túneis.  
Foto: Autor

Camargo (1998) já havia destacado que os túneis podem constituir rotas preferenciais de circulação de água na encosta, sendo estes responsáveis por diversos mecanismos de erosão que evoluem para canais em superfície (Figura 13).



Figura 13 - Túnel na cabeceira de voçoroca em Lapa (PR).  
Foto: Maurício Camargo Filho em 08/09/97.  
Fonte: Camargo (1998)

Augustim & Aranha (2006) também destacam a relação de túneis com processos de voçorocamento desenvolvidos em latossolos de origem granito-grnáissica e básicas-metabásicas na região de Gouveia, nordeste de Minas Gerais (Figura 14).



Figura 14 - Erosão em túneis em latossolo (Gouveia, MG).  
Fonte: Augustin & Aranha (2006).

## 5.2. CARACTERIZAÇÃO TOPOGRÁFICA E GEOMÉTRICA DA ENCOSTA

A encosta estudada apresenta-se como rampa de 241m, estendendo-se da estrada até as margens do Rio das Pombas. Em seu setor superior e médio (Figura 15) apresenta-se como rampa longa levemente côncava com declividade menor que 10%. No setor de baixa encosta, apresenta-se côncavo convexa com 49,60m de comprimento e declividade mais acentuada.



Figura 15 - Vista do Setor médio para o setor alto da encosta do Rio das Pombas.  
Foto: autor

Guerra & Cunha (2004) indicam que a declividade é a informação básica de topografia utilizada nas metodologias de identificação de áreas potenciais ao processo de erosão (Quadro 1), sendo que as classes que apresentam maior declividade têm maior probabilidade de apresentar processos erosivos.

Quadro 1 - Classes de declividade da encosta.

<b>CATEGORIAS</b>	<b>PERCENTAGEM</b>
Muito fraca	até 6%
Fraca	de 6% a 12%
Média	de 12% a 20%
Forte	de 20% a 30%
Muito forte	acima de 30%

Fonte: Guerra & Cunha, 2004.

Encostas declivosas e curtas são favoráveis a incisão em canais por concentração de fluxo superficial hortoniano, ao passo que as encostas longas e com declividades menores tendem a determinar a evolução de voçoroca por fluxo subsuperficial, conforme indica Oliveira (1990) em trabalhos desenvolvidos em Bananal, SP.

Trabalhos efetuados por Camargo (1998) no município de Lapa (PR) demonstram que a erosão superficial, assim como a erosão subsuperficial, não estão relacionadas somente com o fator água, mas também com a declividade da encosta, natureza do solo e por vezes com o substrato rochoso. Em seus trabalhos a autora constatou que a declividade média das encostas que apresentavam processos erosivos, superficiais e subsuperficiais, era de 13,21%.

A encosta do Rio das Pombas apresenta-se como rampa longa com declividade fraca, segundo Guerra & Cunha (2004), se encaixando na descrição proposta por Oliveira (1990), onde as baixas declividades favoreceriam processos de erosão subsuperficial, especificamente o processo de formação de túneis.



### 5.3. RECONHECIMENTO E DISTRIBUIÇÃO DA COBERTURA SUPERFICIAL NA ENCOSTA DO RIO DAS POMBAS

Os resultados dos ensaios de granulometria somados as características dos materiais obtidos em campo, possibilitaram o esboço da distribuição dos materiais através de topossequências em toda a encosta.

Para tanto, a encosta do Rio das Pombas foi dividida em três setores distintos, alta, média e baixa encosta. A partir dessa divisão, foram identificadas em campo texturas argilosas no setor de alta encosta e texturas predominantemente arenosas, nos setores de média e baixa encosta, distoando daquilo que era esperado para a região. Nas amostras retiradas de toda a encosta, foi empregada a análise granulométrica convencional proposta pela EMBRAPA (1997).

#### 5.3.1. Setor de alta encosta

Na presente pesquisa foi considerada como alta encosta a região mais alta logo abaixo do corte de estrada (Figura 16). Nesse setor específico da encosta, existem árvores dispersas, sendo predominantemente coberta por gramíneas. Não apresenta afloramentos rochosos como no topo, logo acima da estrada.



Figura 16 - Vista do topo e do setor de alta encosta.

Foto: Autor



Nesse setor são encontradas as maiores espessuras da cobertura superficial, sendo que foram feitas duas sondagens (T13 e T1) para a coleta e análise de amostras para os ensaios de granulometria. Os percentuais de grânulos, areia, silte e argila das amostras coletadas no setor, estão expostos no Quadro 2.

Quadro 2 - Resultado das análises granulométricas, pelo método convencional, do setor de alta encosta.

Setor	Sondagem	Amostras	Profundidade (cm)	Grânulo	Areias	Silte	Argilas
Alta encosta	T13	am1	0 - 34	0,10%	32,06%	11,04%	56,80%
		am2	34 - 65	0,46%	26,86%	10,68%	62,00%
		am3	65 - 87	0,32%	26,70%	14,58%	58,40%
		am4	87 - 98	0,60%	29,18%	16,62%	53,60%
		am5	98 - 120	0,24%	23,22%	15,34%	61,20%
		am6	120 - 155	0,18%	23,42%	16,00%	60,40%
		am7	155 - 184	0,26%	24,80%	19,14%	55,80%
		am8	184 - 200	1,10%	23,06%	16,64%	59,20%
		am9	200-260	0,38%	23,02%	17,80%	58,80%
		am10	260 - 310	0,06%	21,48%	18,66%	59,80%
	T1	am1	0 - 32	0,10%	51,83%	14,07%	34,00%
		am2	32 - 60	0,30%	51,58%	10,12%	38,00%
		am3	60 - 84	0,12%	50,50%	9,38%	40,00%
		am4	84 - 119	0,24%	54,70%	15,46%	29,60%
		am5	119 - 130	0,50%	56,34%	13,56%	29,60%
		am6	130 - 152	0,55%	51,98%	16,67%	30,80%
		am7	152 - 170	17,83%	64,54%	7,23%	10,40%

As observações de campo e das análises granulométricas indicam que o material retirado da parte mais alta do setor da alta encosta, na sondagem T13 (Gráfico 1), tem predominância em sua composição granulométrica, de argila, areia e silte. Já o material analisado da sondagem T1 (Gráfico 2), entre a alta e a média encosta, apresentou composição granulométrica mais arenosa, seguida de argila e silte.

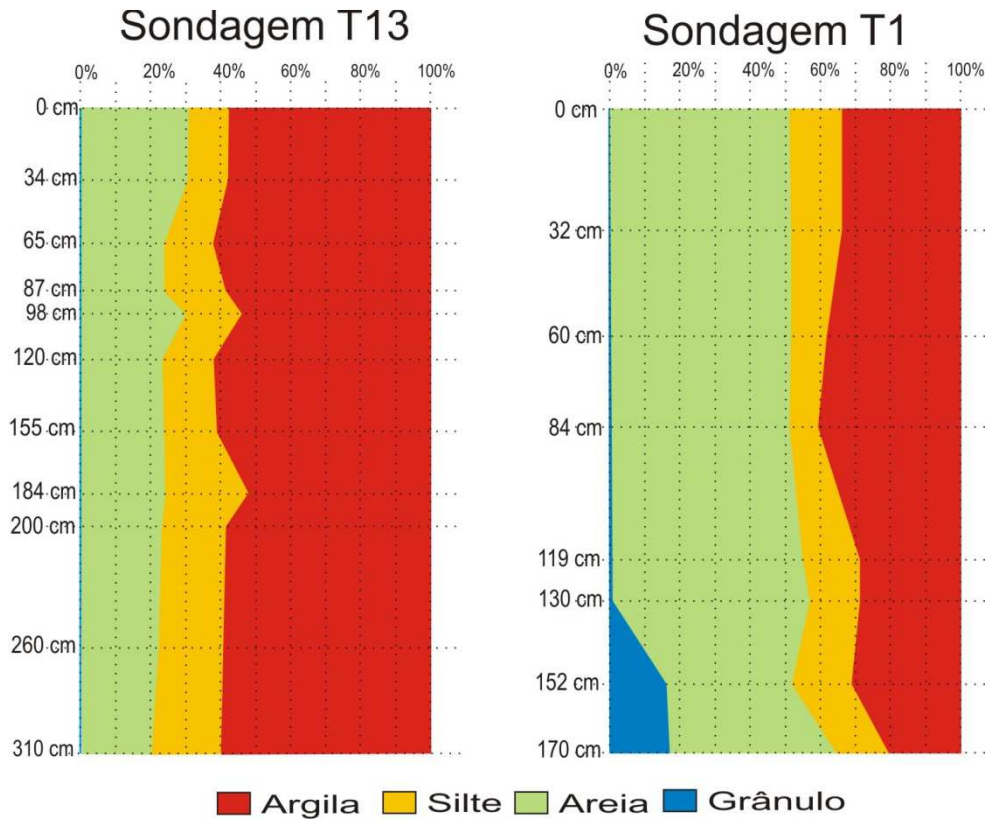


Gráfico 1 - Sondagem T13.

Gráfico 2 - Sondagem T1

A partir de características físicas, individualizaram-se dois volumes de materiais na alta encosta expostos na topossequência (Figura 17).

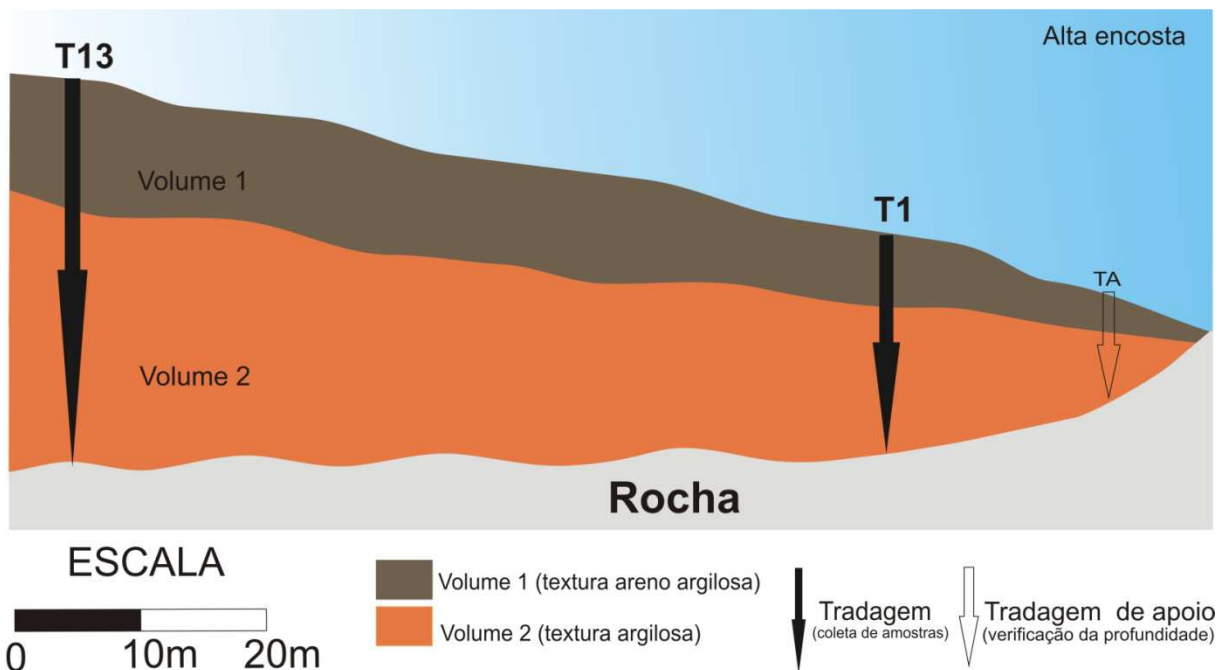


Figura 17 - Topossequência do setor alto da encosta.  
Desenho: autor

O volume 1 ou volume superficial, apresenta textura areno argilosa e cor bruno amarelado escuro (10YR3/6, dark yellowish brown), sendo mais espesso na alta encosta, tornando-se mais delgada no início da média encosta. O volume 2 mostra-se com textura argilosa e cor bruno escura (7.5YR4/6, strong brown).

Assim como o superficial, este volume torna-se mais delgado no início da média encosta. Ainda neste volume, a cor que passa de forma gradual de bruna escura (7.5YR4/6, strong brown) para bruna amarelada escura (10YR4/6, dark yellowish brown). Em geral, nota-se na alta encosta maior espessura da cobertura superficial e predomínio de textura argilosa, transicionando para textura arenosa em direção a média encosta.

### 5.3.2. Setor de média encosta

O setor de média encosta apresenta afloramento de laje, sendo que aparecem também blocos de basalto com presença de amídalas preenchidas por quartzo e, por vezes, calcedônia (Figura 18).



Figura 18 - Afloramento de laje no setor médio da encosta e presença de blocos rochosos.

Foto: Autor

Nele a cobertura vegetal predominante é de gramíneas com existência de árvores distribuídas de forma dispersa. Neste setor formou-se uma zona saturada de água aflorante o ano todo.

Antes do afloramento rochoso a textura da cobertura superficial apresenta transição de textura argilosa para arenosa. As análises granulométricas da sondagem T3 apresentam porcentagens parecidas com as da sondagem T1, onde as porcentagens de areias foram superiores as de argila (Quadro 3).

Quadro 3 - Resultado das análises granulométricas, pelo método convencional, do setor médio da encosta.

Setor	Sondagem	Amostras	Profundidade (cm)	Grânulo	Areias	Silte	Argilas
Média encosta	T3	am1	0 - 18	0,56%	50,06%	9,98%	39,40%
		am2	18 - 40	0,34%	51,32%	11,34%	37,00%
		am3	40 - 58	0,26%	50,06%	10,88%	38,80%

Os resultados também foram expressos através do Gráfico 3 com a porcentagem de cada fração conforme a profundidade da coleta.

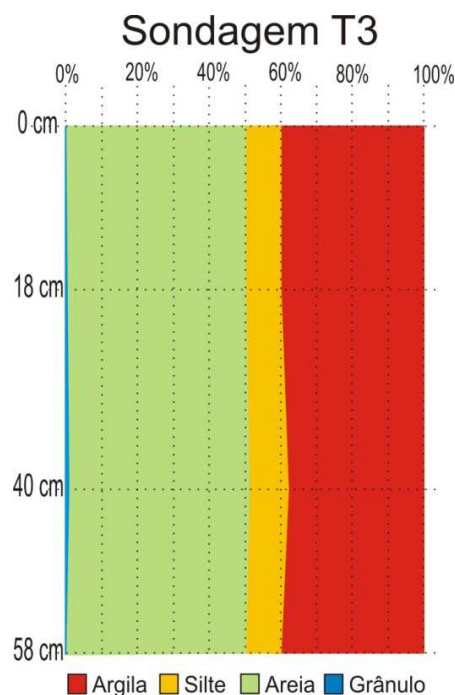


Gráfico 3 - Sondagem T3

Neste setor aparecem três volumes com texturas e cores distintas (Figura 19).

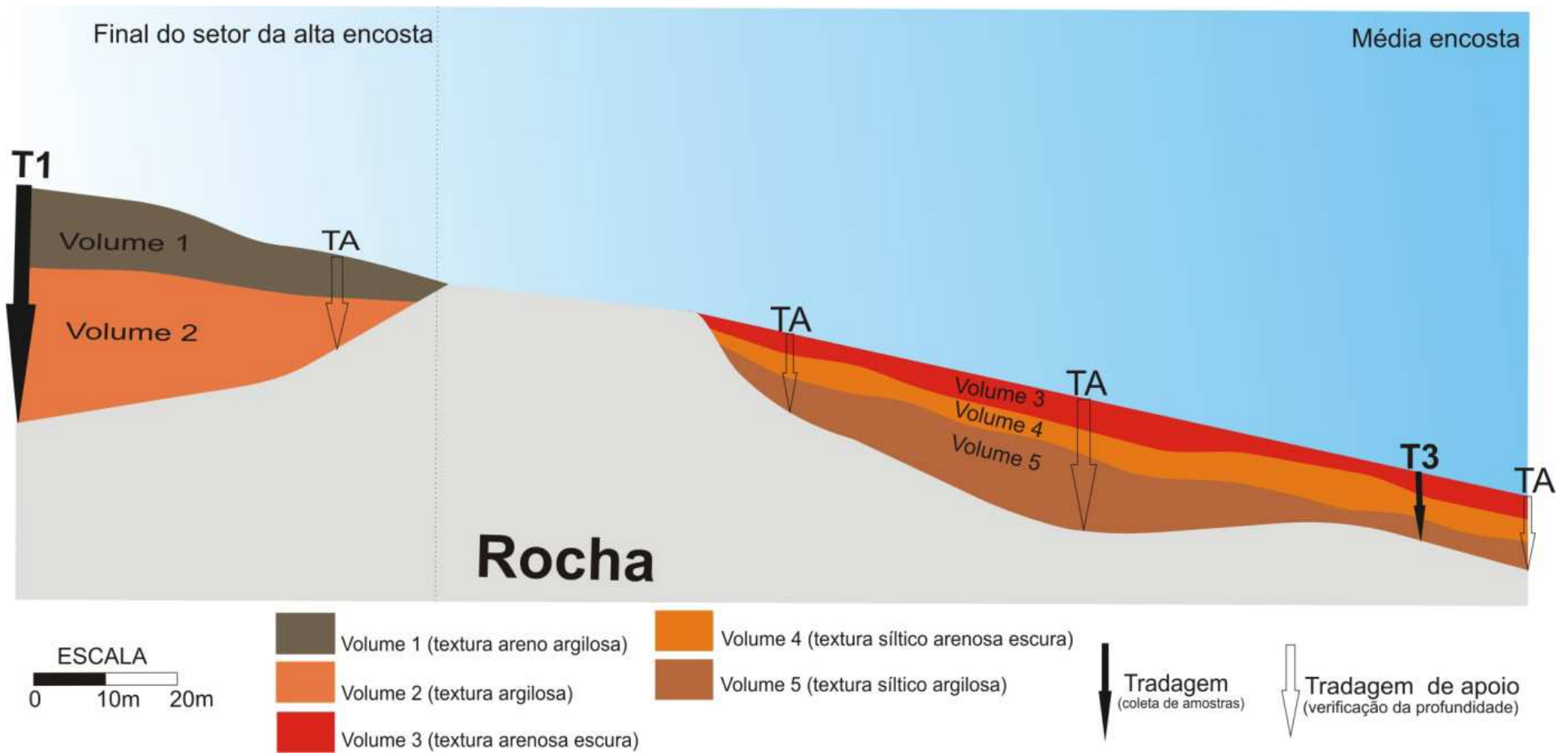


Figura 19 - Topossequência do setor de média encosta.  
Desenho: autor



O volume 3 ou superficial apresenta-se com textura arenosa e cor marrom amarelado escuro (10YR 3/4, dark yellowish brown). Em função dessas características definiu-se este volume como de textura arenosa escura.

O volume 4 ou intermediário, apresenta-se como o volume mais delgado do setor com textura siltico arenosa, com cores variando entre bruno amarelado escuro (10YR 3/6, dark yellowish brown) e bruno amarelado (10YR 5/4, yellowish brown).

O volume 5 ou basal, apresenta-se com grande variação na espessura ficando mais delgado em direção a baixa encosta. Esse volume possui textura siltico argilosa e cor bruno amarelada (10YR 5/4, yellowish brown).

### 5.3.3. Setor de baixa encosta

O setor de baixa da encosta é marcado pela presença de mata secundária (Figura 20) com cobertura superficial rasa e grande quantidade de blocos rolados. Neste setor coberto por mata ocorrem processos e feições erosivas decorrentes do aparecimento de túneis.



Figura 20 - Início do setor de baixa encosta com presença de mata secundária.

Foto: Autor

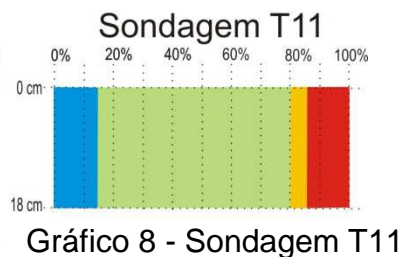
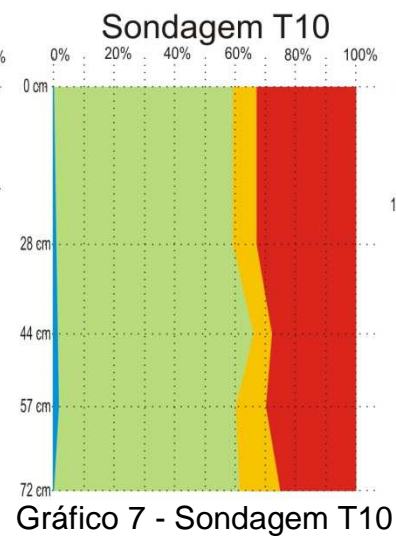
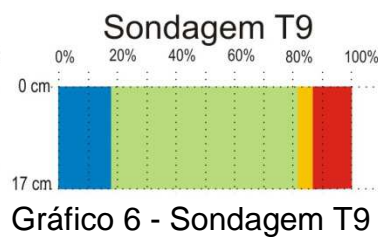
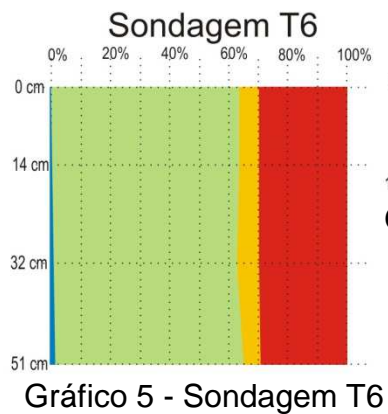
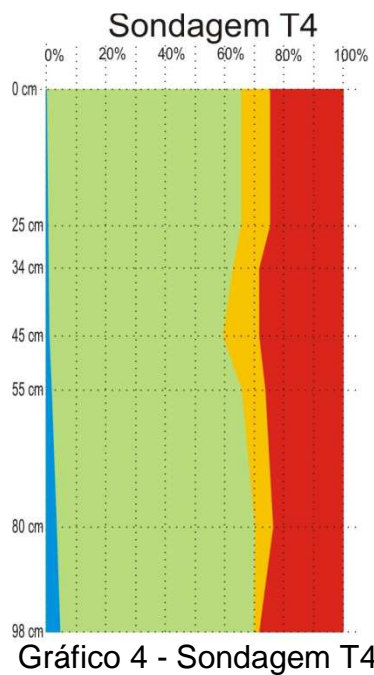
Nele foram confeccionadas duas topossequências, uma acompanhando a direção longitudinal e outra, no sentido transversal. Esta última teve como objetivo, verificar a distribuição lateral da cobertura superficial no setor onde os túneis aparecem.

Foram realizadas cinco sondagens para coleta e análise dos materiais desse setor. Os materiais de todas as sondagens (T4, T6, T9, T10, T11) apresentaram composição granulométrica predominantemente arenosa.

Onde a espessura da cobertura superficial apresentava-se mais rasa ocorreu um aumento na quantidade de grânulos e diminuição na quantidade de areias. Esses percentuais estão dispostos no Quadro 4 e nos gráficos: Gráfico 4, Gráfico 5, Gráfico 6, Gráfico 7 e Gráfico 8.

Quadro 4 - Resultado das análises granulométricas, pelo método convencional, do setor baixo da encosta.

Setor	Sondagem	Amostras	Profundidade (cm)	Grânulo	Areias	Silte	Argilas
Baixa encosta	T4	am1	0 - 25	0,23%	65,62%	8,55%	25,60%
		am2	25 - 34	0,61%	62,25%	9,14%	28,00%
		am3	34 - 45	1,24%	58,10%	11,86%	28,80%
		am4	45 - 55	2,57%	61,56%	9,87%	26,00%
		am5	55 - 80	2,94%	56,66%	16,80%	23,60%
		am6	80 - 98	3,81%	65,20%	12,59%	18,40%
	T6	am1	0 - 14	0,88%	62,94%	5,78%	30,40%
		am2	14 - 32	0,68%	63,44%	7,88%	28,00%
		am3	32 - 51	2,52%	64,18%	6,50%	26,80%
	T9	am1	0 - 17	19,51%	62,52%	5,57%	12,40%
	T10	am1	0 - 28	0,03%	58,57%	7,80%	33,60%
		am2	28 - 44	0,20%	65,08%	7,12%	27,60%
		am3	44 - 57	1,82%	58,61%	10,37%	29,20%
		am4	57 - 72	0,86%	61,70%	12,24%	25,20%
	T11	am1	0 - 18	17,60%	63,56%	4,84%	14,00%



■ Argila ■ Silte ■ Areia ■ Grânulo



No sentido longitudinal da baixa encosta foi possível verificar a permanência dos três volumes principais de materiais já descritos na média encosta

Em todo este setor, os materiais apresentaram plasticidade mais alta. Próximo a rocha, também pode ser notada a presença de material muito fino depositado em camadas, com estrutura lamelar, plasticidade muito alta e de cor amarelada (Figura 21).



Figura 21 - Material com estrutura lamelar encontrado no contato com a rocha.  
Foto: autor

Nesse setor os materiais estão distribuídos de maneira uniforme por todo o perfil longitudinal, atingindo maior espessura na sondagem T4 com 0,98m e sua menor espessura na sondagem T6, com 51 cm de espessura (Figura 22).

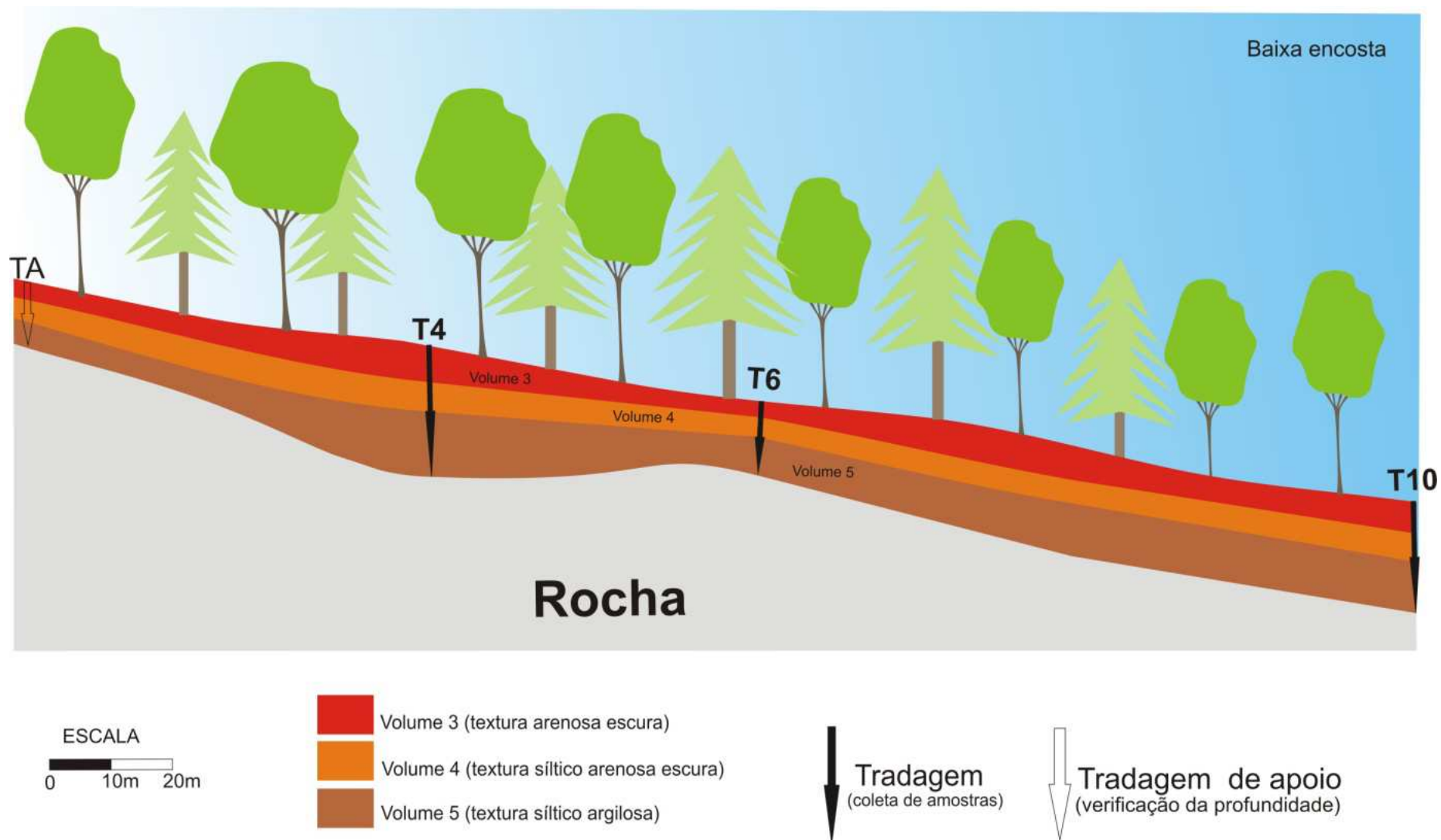


Figura 22 - Toposequência do setor de baixa encosta no sentido longitudinal.

No sentido transversal os materiais se apresentaram mais espessos no centro, atingindo 0,72m na sondagem T10 e tornando-se mais delgados nas laterais da encosta com 0,17 m na sondagem T9 e 0,18 m na T11 (Figura 23).

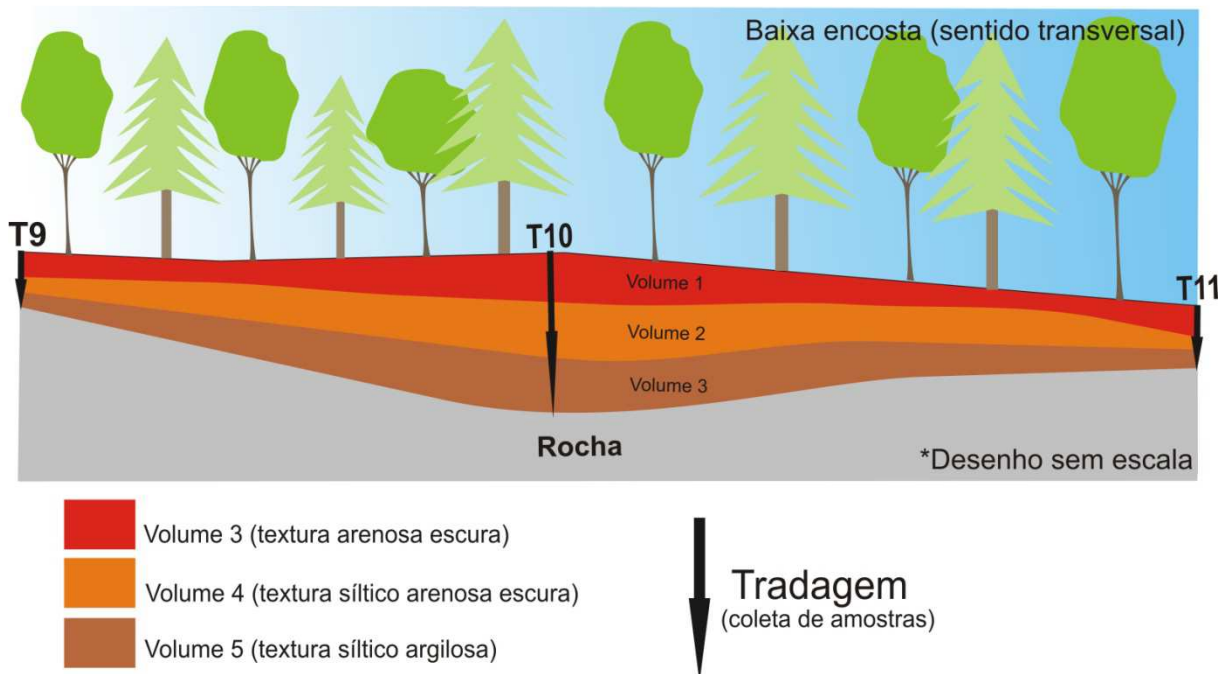


Figura 23 - Toposequência do setor de baixa encosta no sentido transversal.

Os três volumes de materiais encontrados apresentam-se, da superfície para base, com as mesmas texturas e cores encontradas na toposequência longitudinal do setor de baixa encosta.

A interpretação das toposequências deixa evidente a diferenciação dos tipos de texturas existentes nos setores da encosta. Na alta encosta verificou-se que as texturas são argilosas, mudando para arenosas em direção a média e baixa encosta. As espessuras da cobertura superficial do setor alto são destacadamente maiores do que nos setores médio e baixo.

Grãos de quartzo dispersos na matriz podem indicar a natureza alóctone do material que recobre esse setor. A textura predominantemente arenosa encontrada no setor de baixa encosta pode decorrer do comportamento de microagregação gerado por algum constituinte presente nos materiais, tipo argilominerais ou oxidróxidos de alumínio/ferro.

Outro fato que corrobora para essa afirmação é a pouca declividade do setor, que naturalmente gera zona de baixa energia potencial, oferecendo condições para a deposição de material.

Deve-se atentar para o fato de que a encosta sofreu alterações de suas condições naturais, quando foi utilizada para a extração de madeira e para a formação de pasto. Portanto, não é possível estabelecer com exatidão o processo formador desse material.

#### 5.4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MINERALÓGICAS DO SETOR DE BAIXA ENCOSTA DO RIO DAS POMBAS

##### 5.4.1. Composição granulométrica dos materiais na baixa encosta

De acordo com os resultados obtidos com a confecção das topossequências, foi necessário buscar maiores detalhes sobre as características físicas e mineralógicas dos materiais do setor de baixa encosta.

Para tanto foram abertas duas trincheiras para coleta de amostras. Uma foi aberta logo acima de onde aparecem as duas ravinas, no final da baixa encosta. Esse local foi escolhido por se considerar às ravinas como feição de evolução máxima do processo erosivo em túneis (Figura 24).

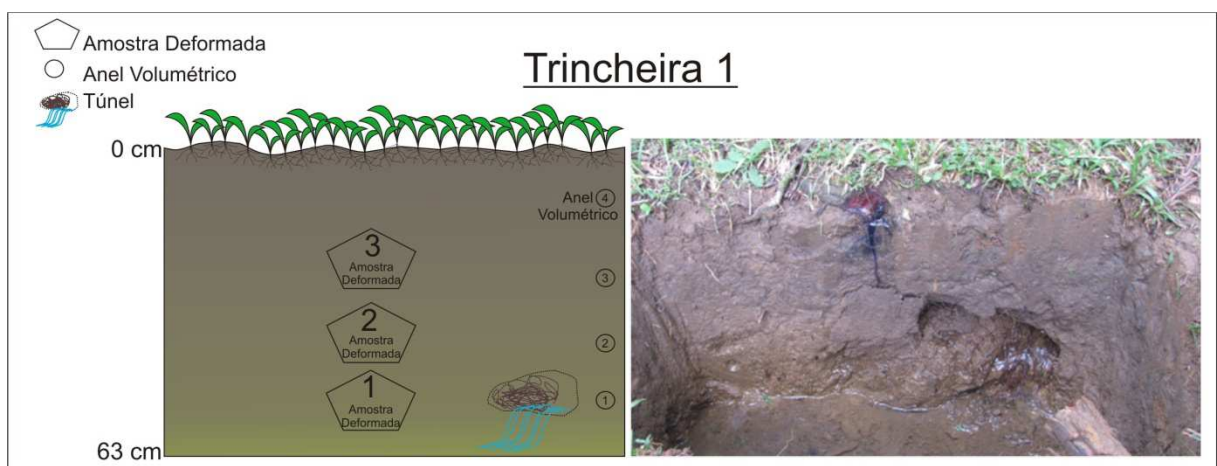


Figura 24 - Desenho e fotografia da trincheira 1.

A outra foi aberta dentro de uma feição de subsidência do teto do túnel, logo na transição entre o campo e a mata (Figura 25).

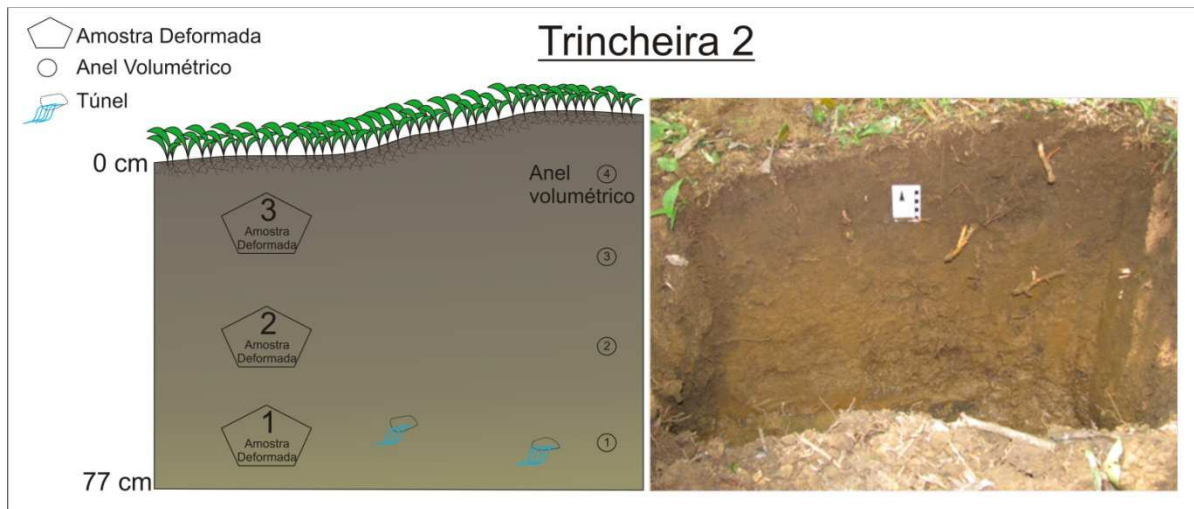


Figura 25 - Desenho e fotografia da trincheira 2.

Os dados referentes às análises granulométricas dos materiais retirados de dentro das trincheiras e analisados segundo ensaio convencional proposto pela EMBRAPA (1997), podem ser vistos no Quadro 5.

Quadro 5 - Ensaio convencionais de granulometria dos materiais retirados de dentro das trincheiras.

AMOSTRAS DEFORMADAS		Profundidade (cm)	Areias (%)	Siltes (%)	Argilas (%)
Trincheira 1	AD3	32-0	81,44	12,99	5,57
	AD2	44-32	85,13	11,34	3,53
	AD1	63-44	82,19	12,47	5,34
Trincheira 2	AD3	29-0	77,11	20,80	2,09
	AD2	55-29	70,02	29,53	0,45
	AD1	77-55	61,09	29,85	9,06

As amostras retiradas da trincheira 1 apresentaram porcentagens altas de areia, ficando um pouco acima de 80%, uma quantidade constante de silte em toda a seção e uma quantidade muito baixa de argilas para cobertura superficial de origem basáltica.



Na trincheira 2 ocorreu diminuição na quantidade de areias, aumento três vezes maior da fração silte, em comparação com a primeira trincheira e uma variação grande do teor de argilas. Esses dados também estão representados no Gráfico 9 e Gráfico 10.

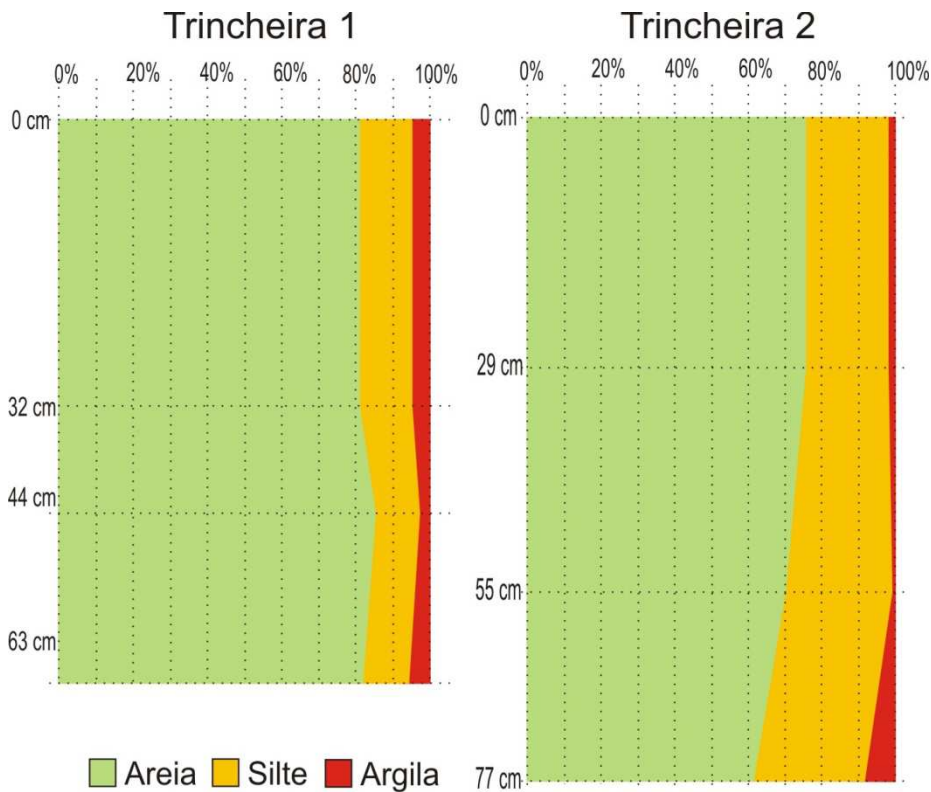


Gráfico 9 - Granulometria das amostras da Trincheira 1.

Gráfico 10 - Granulometria das amostras da Trincheira 2.

Submetendo-se então o mesmo material da trincheira 1 e 2 ao agitador eletromagnético e ao ultrassom (sonificação), foi verificado que os resultados apresentaram diferenças na composição granulométrica (Quadro 6).

Quadro 6 - Ensaio de granulometria dos materiais retirados de dentro das trincheiras com o uso de sonificação.

AMOSTRAS DEFORMADAS		Profundidade (cm)	Areias (%)	Siltes (%)	Argilas (%)
Trincheira 1	AD 3	32-0	14,52	16,97	68,51
	AD 2	44-32	13,5	15,36	71,14
	AD 1	63-44	2,97	36,57	60,46
Trincheira 2	AD 3	29-0	9,44	23,85	66,71
	AD 2	55-29	11,12	11,98	76,90
	AD 1	77-55	11,12	26,16	62,72

A sonificação é aplicada com o intuito de desagregar os finos (silte e argila), uma vez que os ensaios feitos na alta encosta indicaram uma maior quantidade de argilas.

Com a sonificação foi possível verificar que os teores de argila aumentaram e os de areia caíram consideravelmente. Os teores de silte foram os que tiveram maior variação dentro de sua própria fração no perfil (Gráfico 11 e Gráfico 12).

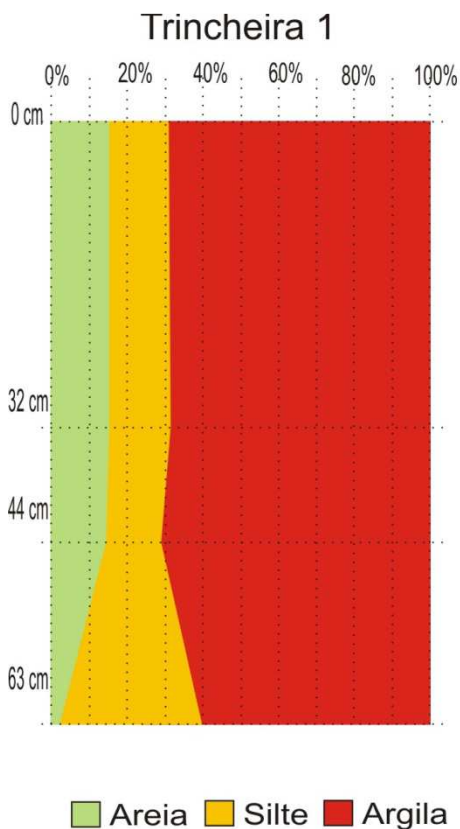


Gráfico 11 - Granulometria com sonificação das amostras da Trincheira 1.

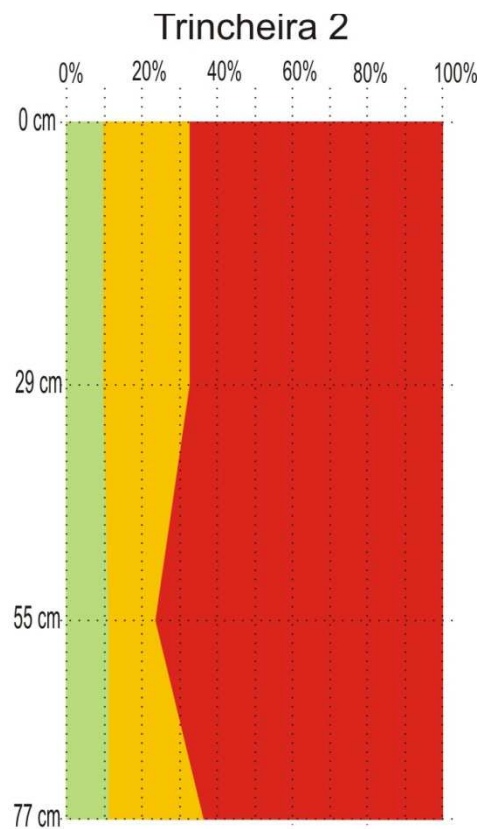


Gráfico 12 - Granulometria com sonificação das amostras da Trincheira 2.

Com esse ensaio foi possível demonstrar que o material analisado das duas trincheiras, apresenta comportamento de areia, porém não se trata de material arenoso, mas sim, de material argiloso agregado. Esse material indica que há agregação dos finos, sendo que estes só são revelados quando aplicada energia ultrassônica.

No material que foi gerado após o peneiramento, foram encontradas grandes quantidades de grãos de quartzo, principalmente nas frações areia fina e muito fina.

Esses grãos estavam envoltos por material fino, uma vez que não foram encontrados em grande quantidade nos materiais sobressalentes do ensaio convencional, sendo apresentados somente após a sonificação.

A relevância da aplicação das duas técnicas está no fato de uma indicar como o material se comporta (análise convencional) e da outra indicar qual é a verdadeira composição granulométrica do material estudado (sonificação).

Para o estudo do processo erosivo em túneis, o comportamento do material influi diretamente na instalação do processo erosivo. Esse fato vem de encontro ao que autores como Richley (2000) e Romero Díaz *et. al.* (2007) já haviam citado em seus trabalhos, de que o processo erosivo aparece principalmente em materiais com textura arenosa.

#### 5.5. DENSIDADE APARENTE, REAL E POROSIDADE TOTAL

A densidade dos materiais diminuiu conforme as amostras se aproximam da superfície (Quadro 7), apresentando valores, respectivamente de,  $0,84\text{g/cm}^3$  e  $0,82\text{g/cm}^3$ , nas coletas das duas trincheiras. Próximo a rocha, a densidade aumentou nas duas trincheiras, com valores de  $1,28\text{g/cm}^3$  na trincheira 1 e  $1,33\text{g/cm}^3$  para a 2.

Quadro 7 - Resultados dos ensaios para densidade aparente, real e porosidade total pelo método do anel volumétrico.

Anel Volumétrico	Profundidades (cm)	Peso (g)	Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )		% Porosidade total	
			Aparente	Real		
Trincheira 1	AV 4	15-0	78,94	0,84	2,35	64,26
	AV 3	32-15	89,75	0,95	2,22	57,21
	AV 2	44-32	101,22	1,07	2,40	55,42
	AV 1	63-44	120,58	1,28	2,38	46,22
Trincheira 2	AV 4	10-0	77,45	0,82	2,25	63,55
	AV 3	29-10	92,64	0,98	2,22	55,86
	AV 2	55-29	102,66	1,09	2,37	54,12
	AV 1	77-55	125,43	1,33	2,73	51,28



A densidade real sofreu variações dos seus valores ao longo do setor de baixa encosta, nas duas trincheiras. Os resultados das análises de densidade real apresentaram valores com variação entre  $2,40\text{g/cm}^3$  e  $2,22\text{g/cm}^3$ , respectivamente na trincheira 1. Na trincheira 2 ocorreu uma variação maior, entre  $2,73\text{g/cm}^3$  e  $2,22\text{g/cm}^3$ .

A porosidade do material estudado pode ser considerada de alta para muito alta (Quadro 8), podendo ser relacionada com o tipo de textura encontrada no setor, que se apresentou como arenosa.

Quadro 8 - Relação entre porosidade, índice de vazios e sua denominação.

<b>POROSIDADE (%)</b>	<b>INDICE DE VAZIOS</b>	<b>DENOMINAÇÃO</b>
Maior que 50	Maior que 1	Muito alta
50 – 45	1,0 – 0,8	Alta
45 – 35	0,8 – 0,55	Média
35 – 30	0,55 – 0,43	Baixa
Menor que 30	Menor que 0,43	Muito baixa

Fonte: laeg, 1974 *apud* Fiori & Carmignani, 2001.

Ainda que esses resultados mostrem que dentro do volume há variações de densidade, não se pode considerar que há horizonte de impedimento ao longo do corte em nenhuma das trincheiras, indicando assim, uniformidade na drenagem no sentido vertical da cobertura superficial por todo o setor onde aparecem os túneis. A porosidade encontrada também demonstra as características dos materiais, que estão sob a forma de areias, sendo classificada como muito alta em todas as amostras.

## 5.6. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X (MINERALOGIA DE ARGILAS)

Foram submetidas seis amostras, retiradas das seções expostas nas duas trincheiras, para difratogramas de raios-X. Para diferenciar as utilizadas no ensaio de difratometria, convencionou-se chamar de “trincheira 1 ou 2, difratometria de raios-X 1, 2 ou 3 (TR1 ou 2 DRX1,2 ou 3).

Nos materiais correspondentes a trincheira 1, foram identificados argilominerais do tipo caulinita, vermiculita, quartzo, anatásio, goethita e rutilo (Quadro 9 e Figura 26). Verticalmente não há importantes variações entre os argilominerais presentes na seção à exceção do rutilo que aparece exclusivamente na base da trincheira 1 (posição 26,62).

Quadro 9 - Os argilominerais identificados na trincheira 1.

Amostras de ocorrência (DRX)	Nome dos componentes	Fórmula química
1,2, 3	Caulinita <sup>1</sup>	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$
1, 2, 3	Quartzo <sup>2</sup>	$\text{SiO}_2$
1, 2, 3	Gibbsita <sup>2</sup>	$\text{Al}(\text{OH})_3$
1, 2, 3	Goethita <sup>2</sup>	$\text{Fe}^{+3} \text{O} (\text{OH})$
1, 2, 3	Anatásio <sup>2</sup>	$\text{TiO}_2$
3	Rutilo <sup>2</sup>	$\text{TiO}_2$

1 Argilomineral (grupo) identificado por comparação das distâncias interplanares em diferentes condições de tratamento (amostra seca ao ar, solvatada com etilenoglicol e calcinada a 550°C).; 2 Mineral identificado por comparação com os padrões do *Joint Committee on Powder Diffraction Standards (International Centre for Diffraction Data)*.

A intensidade dos reflexos mais importantes da amostra TR1 DRX3 ocorre com a caulinita, gibbsita, quartzo e goethita (posições 12,22, 18,30, 20,31 e 21,94). Na amostra intermediária, TR1 DRX2, há diminuição dos picos de quartzo, gibbsita e caulinita (posição 21,26) e de goethita e gibbista (posição 45,75). A amostra da base, TR1 DRX1, apresentou aumento no pico com quartzo, gibbsita e caulinita (posição 21,36) e pico de goethita (posição 33,42).

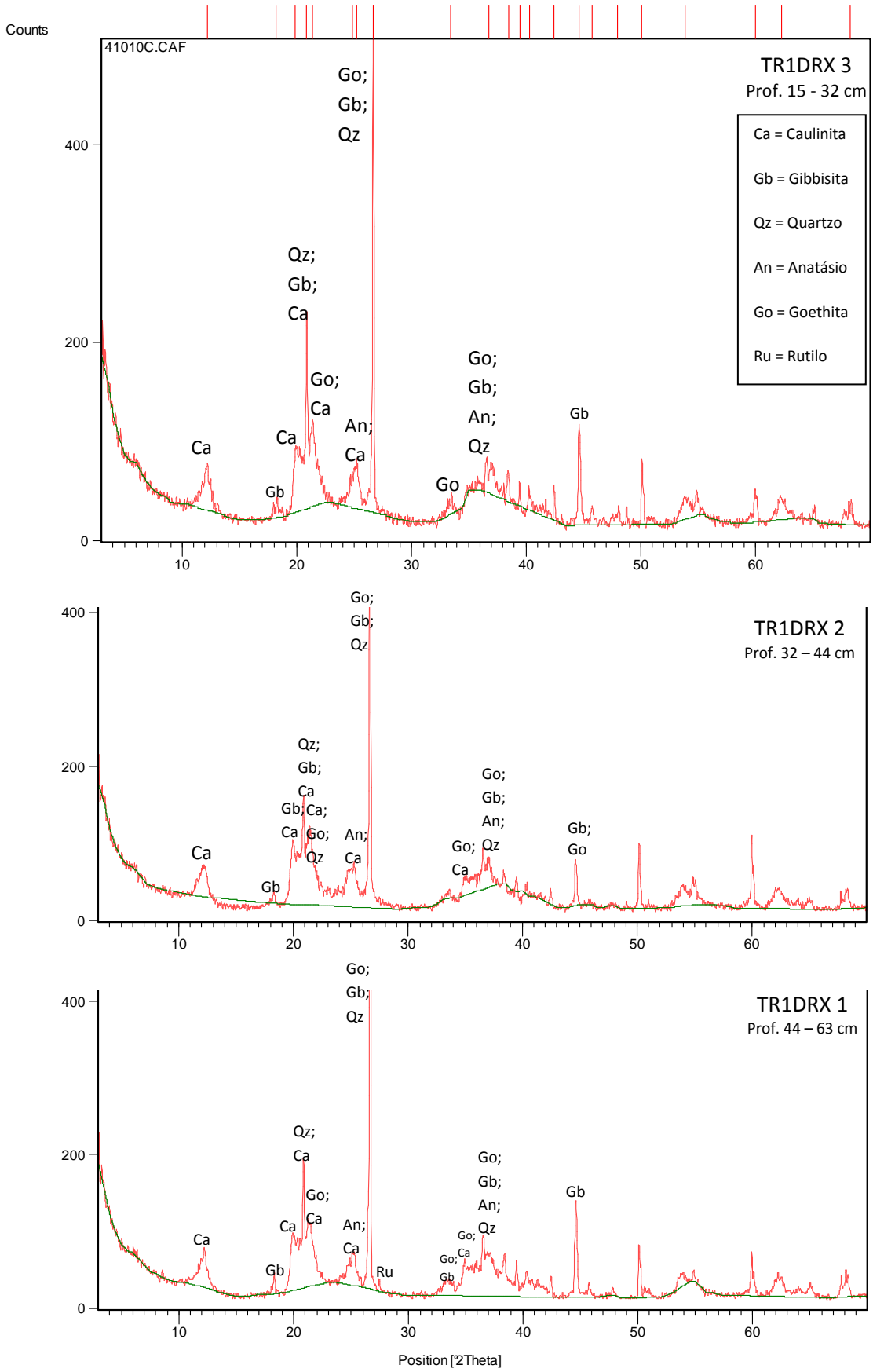


Figura 26 - Gráficos de DRX da trincheira 1.

Nos materiais referentes à trincheira 2, setor de início de aparecimento dos túneis, os argilominerais identificados foram: caulinita, gibbsita, quartzo, anatásio e goethita (Quadro 10 e Figura 27). Esses argilominerais aparecem de forma relativamente uniformes na seção, com um aumento dos reflexos de gibbsita (posições 18,28 e 44,59) na base. Variações verticais entre esses picos mostram-se pouco significativas, havendo apenas uma ligeira redução geral das intensidades dos argilominerais na amostra intermediária (TR2 DRX2). Nesta seção nota-se aumento nos reflexos de gibbsita em comparação com os da trincheira 1.

Quadro 10 - Os argilominerais identificados na trincheira 2.

Amostras de ocorrência (DRX)	Nome dos componentes	Fórmula química
1, 2, 3	Caulinita <sup>1</sup>	$\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$
3	Vermiculita <sup>1</sup> ( <i>provável presença</i> )	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{++}, \text{Al})_3 (\text{Al}, \text{Si})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$
1,2	Vermiculita <sup>1</sup>	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{++}, \text{Al})_3 (\text{Al}, \text{Si})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$
1, 2, 3	Quartzo <sup>2</sup>	$\text{SiO}_2$
1, 2, 3	Gibbsita <sup>2</sup>	$\text{Al}(\text{OH})_3$
1, 2, 3	Goethita <sup>2</sup>	$\text{Fe}^{+3} \text{O} (\text{OH})$
1, 2, 3	Anatásio <sup>2</sup>	$\text{TiO}_2$

1 Argilomineral (grupo) identificado por comparação das distâncias interplanares em diferentes condições de tratamento (amostra seca ao ar, solvatada com etilenoglicol e calcinada a 550° C).; 2 Mineral identificado por comparação com os padrões do *Joint Committee on Powder Diffraction Standards (International Centre for Diffraction Data)*.

Na área predominam as classes dos latossolos (MÜLLER & POTT, 2004) e o predomínio de gibbsita na fração argila desses latossolos favorece maior agregação (SILVA *et al.*, 1998 *apud* CORTEZ, 2009). A gibbsita tem a propriedade de agregação dos finos, dando ao material estrutura granular e comportamento de areia.

A conseqüência da manutenção da estrutura microgranular nesses solos, resulta em elevados valores de permeabilidade (RESENDE *et al.*, 1997) favorecendo a circulação de água e carreando conseqüentemente as frações mais finas de material encontrados entre os macroporos. Em faces expostas, pelo efeito de exfiltração da água (*seepage*), os finos são destacados e carregados, gerando assim os túneis.

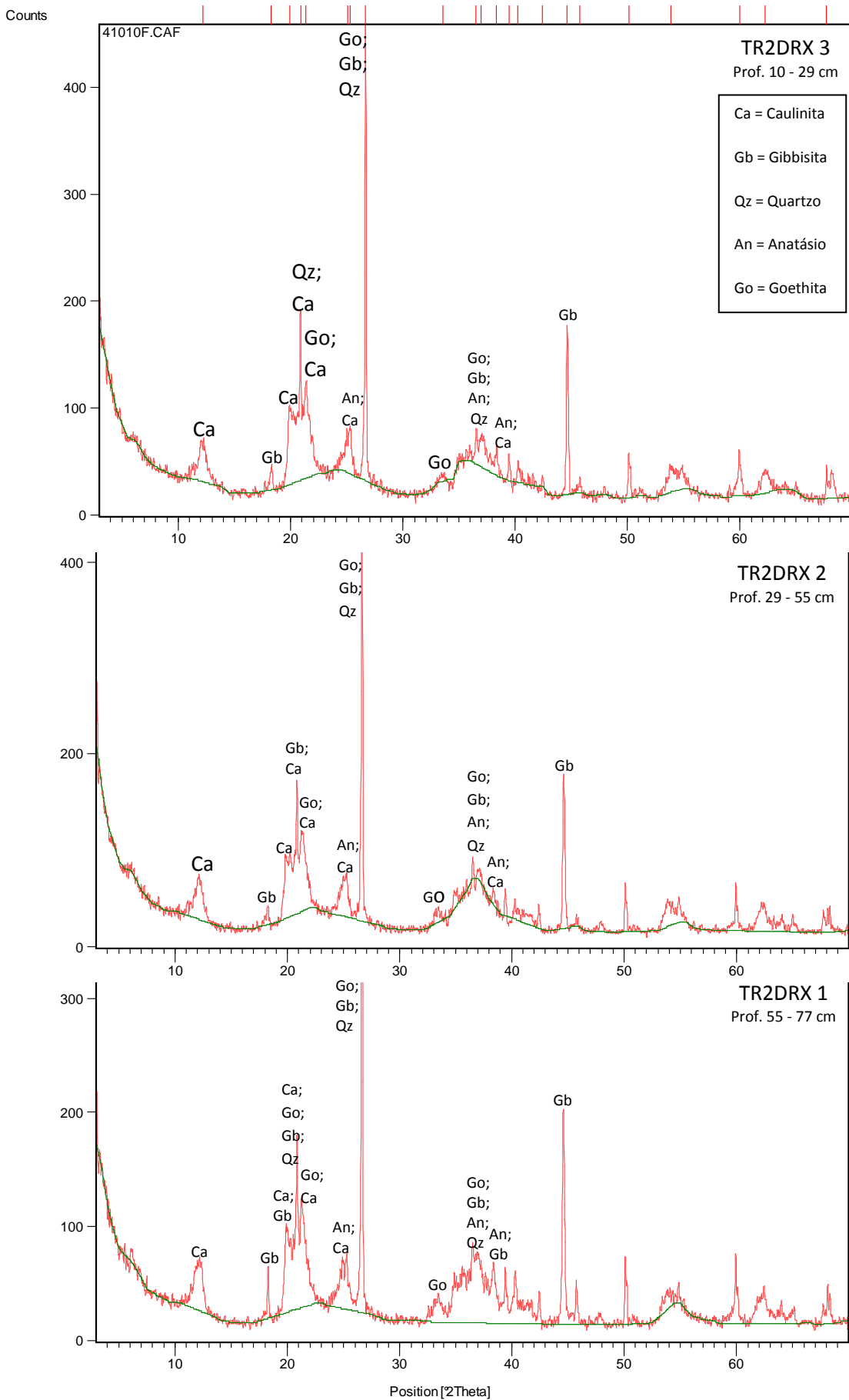


Figura 27 - Gráficos de DRX da trincheira 2.

De acordo com Ferreira *et. al.* (1999) a caulinita apresenta o solo maior densidade e menor estabilidade de agregados em água, de macroporosidade e de permeabilidade, quando comparados a latossolos gibbsíticos. Nos difratogramas os reflexos de caulinita foram menores dos que o de gibbsita, demonstrando quimicamente que a cobertura superficial tem maior favorabilidade de agregação do que de dissolução.

Autores como Ferreira *et. al.*(1999a) e Pedrotti (2000) *apud* Cortez *et. al.*, (2009) já sugeriam que a correlação direta com teores de gibbsita e inversa com teores de caulinita, refletem a importância desses constituintes na formação e estabilização de agregados.

Também pode ser notada essa tendência da cobertura pelas análises de densidades e porosidade total, onde os valores encontrados indicaram alta permeabilidade. Sobre a formação de agregados, pode-se notar que os finos só foram dispersos e quantificados após a sonificação.

A ausência de minerais primários tais como feldspatos, olivinas e piroxênios presentes na rocha matriz evidencia elevado grau de alteração da cobertura superficial da parte baixa da encosta.

## 6. CONCLUSÃO

A instalação do processo erosivo em túneis depende de um conjunto de fatores. Trata-se de processos subsuperficiais de erosão que apresentam feições típicas, tais como, subsidência do teto dos túneis e estruturas de abatimento, que tendem a evoluir para feições superficiais.

Para esta pesquisa foram confeccionadas quatro topossequências para a interpretação de como se dá a distribuição granulométrica em todos os setores da encosta. A interpretação das topossequências deixou evidente a diferenciação dos tipos de texturas existentes em todos os setores da encosta.

Na alta encosta verificou-se que a textura apresenta-se argilosa mudando gradualmente, encosta a baixo, para arenosa e as profundidades são destacadamente maiores do que nos setores médio e baixo. Na baixa encosta, onde aparecem os túneis, a textura da cobertura superficial é arenosa, apresentando alta porosidade, o que acaba favorecendo maior circulação de água no setor.

Quartzo e calcedônia não alterada aparecem na fração areia grossa, muito grossa e grânulo, em todo perfil analisado na baixa encosta. Entende-se que esse material teve sua origem nos setores mais elevados da encosta onde ocorrem os basaltos vesiculares e amígdolaidais com quartzo. Uma vez dispersos por toda baixa encosta admite-se a natureza alóctone dos materiais nas amostras analisadas retiradas da baixa encosta.

Sobre as classes texturais mais comuns derivadas da alteração do basalto, admite-se que é gerada grande quantidade de frações finas, dando aos solos, características argilosas. Contudo, a complexidade textural aumenta, pois o intemperismo químico produz argilominerais com propriedades de microagregação (gibbsita), que dá características de textura arenosa aos materiais da encosta. Em laboratório foram reconhecidas nas análises granulométricas porcentagens altas de areia sob a forma de agregados.

Assume-se que, as condições hidrológicas da encosta e a umidade gerada pela proximidade com o rio, propiciaram a instalação de vegetação. Para a

instalação dos túneis, uma sequência de mecanismos que puderam ser postos para análise, sendo eles: alteração da rocha basáltica, geração de argilominerais com propriedades de microagregação (gibbsita), formação de macroporosidade e aumento da circulação de água em subsuperfície, além de exfiltração de água em macroporos ou paredes expostas (seepage).

Com esses mecanismos ocorre a evolução do processo erosivo em subsuperfície, abatimento ou subsidência do teto do túnel, formação de feições erosivas relacionadas ao carreamento de agregados, concreções e argilominerais pela ação mecânica da água e, por fim, instalação de feições erosivas superficiais.

As características físicas, textura arenosa e macroporosidade, e químicas, microagregação gerada pela gibbsita, encontradas na área de estudo, demonstram que a cobertura superficial é determinante para a instalação desse tipo de erosão que ocorre subsuperficialmente no setor baixo da encosta.



## 7. REFERÊNCIAS

- AMARAL, N. D. **Noções de conservação de solo**. São Paulo: Nobel, 1984.
- AUGUSTIN, C. H. R. R. & ARANHA, P. R. A. Piping em área de voçorocamento, noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia** - Ano 7, nº 1, 2006.
- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; SANTOS, G. F. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**: fundamentos geológicos-geográficos, alteração química e física da rochas, relevo cárstico e dômico. Florianópolis: EDUFSC, 1994.
- BRYAN, R. B. & JONES, J. A. A. The significance of soil piping process: inventory and prospect. **Geomorphology** 20 (1997), p. 209-218, 1997.
- CAMARGO, Gisele. **Processo de erosão no Centro e Sul do Segundo Planalto Paranaense: evolução de encosta e influência da erosão subterrânea na expansão de voçorocas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- CAMARGO, G.; CAMARGO FILHO, M.; MASCARELLO, L. V. Processos de erosão em ravinas e voçorocas na bacia do Rio das Pedras. In: **Proteção e Manejo na Bacia do Rio das Pedras: relato de experiências**. BATTISTELLI, M.; CAMARGO FILHO, M.; HEERDT, B. (Orgs.). Ed. B&D Ltda, Guarapuava, 2004.
- CAMARGO, G. **O significado paleoambiental de depósitos de depósitos de encosta e de preenchimento de canal no município de Lapa no sul do Segundo Planalto Paranaense**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- CAMARGO, G.; CAMARGO FILHO, M. SILVA, W. B.; BAZZOTTI, D. M.; BINDA, A. L. **Processo de erosão em túneis e mecanismos associados: estudo de caso em Guarapuava (PR)**. Anais do Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Natal (RN), 2007.
- CAMARGO FILHO, M. **Aspectos Fundamentais da Evolução Geomorfológica Cenozóica da Bacia do rio Bananas- Guarapuava – PR**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 1997.
- CAMPY, M.; MACAIRE, J. J. **Geologie des formations superficielles: geodynamique – fácies – utilization**. Paris: Marron, 1989.
- CAROLINO DE SÁ, M. A.; LIMA, J.M.; SILVA, M. L. N.; DIAS JUNIOR, M. S. Índice de desagregação do solo baseado em energia ultra-sônica. **Rev. Bras. Ci. Solo**. 23:525-531, 1999.

CASTRO, S. S.; COOPER, M.; SANTOS, M. C.; VIDAL-TORRADO, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. **Tópicos em Ciência do solo**, vol. I. Sociedade Brasileira de Solos, Viçosa, MG, 2000.

COELHO-NETO, A. L. Hidrologia de Encosta na Interfase com a Geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T & CUNHA, S.B. Geomorfologia: uma atualização de Bases e Conceitos. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

CORRÊA, A. C. B. Dinâmica geomorfológica dos compartimentos elevados do Planalto da Borborema, Nordeste do Brasil. Rio Claro, Tese de Doutorado – IGCE, UNESP, 386p., 2001.

CORRÊA, A. C. B.; MENDES, I. A. O problema das superfícies de erosão: novas abordagens conceituais e metodológicas. **Revista de Geografia DCG/UFPE**, Recife, v. 18, n. 2, p. 70-86, 2002.

CORTEZ, L. A.; MARQUES JUNIOR, J; PELUCO, R. G.; PEREIRA, G. T.; CAMARGO, L. A. **Relações espaciais entre caulinita e gibbsita e a estabilidade dos agregados de latossolo**. Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias. Botucatu, SP, 2009.

CRUZ, L. O. M. **Assinatura geoquímica de unidades coluviais da bacia do córrego do Rio Grande – depressão de Gouveia/MG**. Dissertação de mestrado, UFMG. Belo Horizonte, 2006.

DEWOLF, Y. Proposition pour une définition, une typologie et une cartographie des formations superficielles. USP, Dep. Geogr., Col. Est. Cart. Form. Sup. e Aplic. reg. trop., vol. 1:433-445, 1983.

DUNNE, T. **Formation and controls of channel networks**. Progress in Physical Geography (4), 1980.

DUNNE, T. Hydrology, mechanics, and geomorphic implications of erosion by subsurface flow. In: **Groundwater Geomorphology**. Geological. Soc. Am. Spec. Pap. 252, 1-28, 1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos**. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997.

FAIRBRIDGE, R.W. (Ed.) **The Encyclopedia of Geomorphology**. Reinhold Book, Nova York., 1968.

FAULKNER, H. **Improvements to the dispersion status of piped gully soils following reworking and stabilization by vegetation**. Catena, 2007.

FERNANDES, N. F. **Hidrologia subsuperficial e propriedades físico-mecânicas dos “complexos de rampa”- Bananal (SP)**. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. **Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil**. R. Bras. Ci. Solo, 23:507-514, 1999.

FIORI, A. P. & CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos: aplicações na estabilidade de taludes**. 20. ed. Curitiba: Editora da UFPR, Universidade Federal do Paraná, 550 p., 2001.

GALETI, P. A. **Conservação do Solo**. Campinas: Instituto Campineiro de ensino Agrícola, 1973.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

GUTIÉRREZ, M.; SANCHO, C.; BENITO, G.; SIRVENT, J.; DESIR, G. Quantitative study of piping processes in badland areas of the Ebro Basin, NE Spain. **Geomorphology** 20 (1997), p.237-253, 1997.

HIGGINS, Charles G. & SCHONER, Carl. Sinkholes formed by piping into buried channels. **Geomorphology** 20 (1997), p. 307-312, 1997.

LUIZ, E. L. **Influência da dinâmica hidrológica e das características das formações superficiais nos mecanismos de rupturas das encostas com rochas granitóides de áreas subtropicais - São Pedro de Alcântara/SC**. Instituto de Geociências, UFRJ, Tese (doutorado), Rio de Janeiro, 2003.

MENEZES, M. L.; CARVALHO, V. L. CRUZ, L. O.; VALADÃO, R. C. **CARACTERIZAÇÃO DAS FORMAÇÕES SUPERFICIAIS EM UMA VERTENTE DO CÓRREGO DO QUEBRA – DEPRESSÃO DE GOUVEIA/MG**. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia/Regional Conference on Geomorphology. Goiânia, GO, 2006.

MOURA, J.R.S. & MEIS, M.R.M. Contribuição a Estratigrafia do Quaternário Superior no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul- Bananal (SP). **Anais Acad. Bras. Ciências**, 58, 1986.

MOUSINHO, M. R.; BIGARELLA, J. J. Movimentos de massa no transporte dos detritos da meteorização das rochas. **Boletim Paranaense de Geografia**. Curitiba, n. 16/17, p. 43-84, 1965.

MÜLLER, M. M. L. & POTT, C. A. Cobertura pedológica na bacia do rio das Pedras, Guarapuava/PR. In: **Proteção e Manejo na Bacia do Rio das Pedras: relato de experiências**. BATTISTELLI, M.; CAMARGO FILHO, M.; HEERDT, B. (Orgas.). Ed. B&D Ltda, Guarapuava, 2004.

NUNES, E. D.; ROMÃO, P. A. Análise da entropia da paisagem como subsídio ao entendimento de processos erosivos na microbacia do córrego Barreiro - Goiânia -

GO. In: **Simpósio Nacional de Geomorfologia**. Anais SINAGEO (CD), Belo Horizonte, 2008.

OLIVEIRA, M. A. T. de. Slope geometry and gully erosion development: Bananal, São Paulo, Brazil. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v.34, n. 4, p. 423-434, 1990.

OLIVEIRA, M. A. T. de.; SBRUZZI, G. J.; PAULINO, L. A. Taxas de erosão acelerada por voçorocas no médio vale do rio Paraíba do Sul. In: SIMPÓSIO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA (4: Goiânia). **Anais**. Goiânia, 1995.

OLIVEIRA, M. A. T. & CAMARGO, G. Integração de estruturas de abatimento e erosão por voçorocas. **Sociedade e Natureza**, Uberlândia, n.15. p.117-120, 1996.

PAISANI, J.C. **Descontinuidades hidrológicas, escoamento superficial e desenvolvimento de incisões erosivas em áreas de cabeceira de drenagem: estudo de caso na Colônia Quero-Quero, Palmeira (PR)**. Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Dissertação (Mestrado), Florianópolis, SC, 1998.

PALMIERI, F. & LARACH, J. O. I. Intemperismo em regiões tropicais. In: **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Orgs: Antonio José Teixeira Guerra & Sandra Baptista da Cunha. 3ª Ed., Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, 2000.

PLAISANCE, G. & CAILLEUX, A. **Dictionaire des Sols**. Paris: La Maison Rustique, 1958.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B. & CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 2.ed. Viçosa, NEPUT, 367p., 1997.

RICHLEY, Lindsay. Treatment of tunnel erosion in Tasmania. **Natural Resource Management**. Volume 3, número 2, setembro de 2000.

RODRIGUES, J. E. Estudo geotécnico de fenômenos erosivos acelerados (boçorocas). **Anais 4º Congresso Brasileiro de Geografia Física**, 169-182, 1984.

ROMERO DÍAZ, A.; SANLEANDRO, P. Marín; SORIANO, A. Sánches; SERRATO, F. Belmonte; FAULKNER, H. **The causes of piping in a set of abandoned agricultural terraces in southeast Spain**. Catena, 2007.

SANTOS, S. M. **Investigações metodológicas sobre o monitoramento da subsidência do solo devido à extração de água subterrânea – caso da região metropolitana de Recife**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2005.

SANTOS, H. G.; BHERING, S. B.; BOGNOLA, I. A.; CÚRCIO, G. R.; MANZATTO, C. V.; CHAGAS, C. S. **Solos: atualização do mapa de solos do Estado do Paraná**. SIBCS, 2006.

SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica.** Universidade Federal de Santa Catarina. Tese de doutorado, 2009.

SCHUMM, S. A. **The Fluvial System.** Chichester: Wiley, 1977.

SELBY, M. J. **Hillslope materials & processes.** New York, Oxford University Press, 1982.

SELBY, M. J. Hillslope sediment transport and deposition. In: PYE, K. (Ed.) **Sediment transport and depositional processes.** London: Blackwell Scientific Publications, 397p., 1994.

SILVA, D. W. A vegetação da Bacia do Rio das Pedras. In: **Proteção e Manejo na Bacia do Rio das Pedras: relato de experiências.** BATTISTELLI, M.; CAMARGO FILHO, M.; HEERDT, B. (Orgas.). Ed. B&D Ltda, Guarapuava, 2004.

SUGUIO, K. **Introdução à Sedimentologia.** São Paulo: Edgard Blücher, 280p., 1973.

SUGUIO, K. **Dicionário de Geologia Sedimentar e Áreas Afins.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1.222p., 1998.

THOMAS, M. F. **Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes.** John Wiley & Sons Ed. Wichester, England, 1994.

THOMAZ, E. L. & VESTENA, L. R. **Aspectos Climáticos de Guarapuava-PR.** Guarapuava: UNICENTRO, 2003.

THOMAZ, E. L. & ROSS, J. L. S. Processos hidrogeomorfológicos em vertente com solos argilosos rasos em Guarapuava-PR, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia.** Ano 7, nº 2, 2006.

TONIOLO, H; KODIAL, P; HINZMAN, L. D.; YOSHIKAWA, K. **Spatio-temporal evolution of a thermokarst in Interior Alaska.** Cold regions Science and Technology 56, 2009.

TRATZ, E. B. **As rochas vulcânicas da província magmática do Paraná, suas características de relevo e sua utilização como recurso mineral no município de Guarapuava-PR.** Dissertação (mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina - Programa de Pós-Graduação em Geografia. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2009.

VIDAL-TORRADO, P; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. In: **VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P. da; CARDOSO, E. J. (Ed.)** Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.4, 145-192, 2005.

ZACHAR, D. **Soil Erosion.** Bratislava: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.