

Wellington Barbosa da Silva

**Origem e evolução de túneis em formações superficiais derivadas de
basalto em clima subtropical úmido, Candói, Paraná**

Tese submetida ao
Programa de Pós-Graduação
em Geografia da Universidade
Federal de Santa Catarina em
cumprimento aos requisitos
necessários à obtenção do
Grau de Doutor em Geografia.
Orientador: Prof. Dr.
Jöel Robert G. M. Pellerin.
Co-orientador: Dr. Julio Cesar
Paisani

Florianópolis, 5 de abril de 2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Wellington Barbosa da
Origem e evolução de túneis em formações
superficiais derivadas de basalto em clima
subtropical úmido, Candió, Paraná / Wellington
Barbosa da Silva : orientador, Jôel Robert George
M. Pellerin, coorientador, Julio Cesar Paisani ,
2017.

227 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis,
2017.

Inclui referências.

1. Geografia. 2. Fluxo subsuperficial. 3. Erosão
subsuperficial. 4. Difratometria de raios X. 5.
Topossequências. I. Pellerin, Jôel Robert George M.
. II. , Julio Cesar Paisani. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação
em Geografia. IV. Título.

Wellington Barbosa da Silva

**Origem e evolução de túneis em formações superficiais
derivadas de basalto em clima subtropical úmido,
Candói, Paraná**

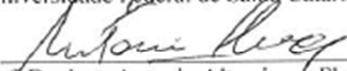
Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do
Título de "Doutor em Geografia", e aprovada em sua forma
final pelo Programa de Pós-graduação em Geografia.

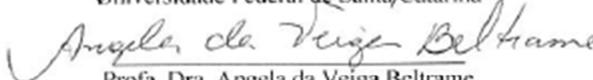
Florianópolis, 05 de abril de 2017.

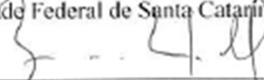
Prof. Dr. Aloysio Marthins de Araújo Junior
Coordenador do PPGG/UFSC

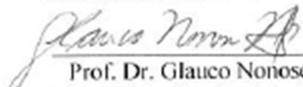
Banca Examinadora:


Prof. Dr. Joel Robert Georges Marcel Pellerin
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Dr. Juan Antonio Altamirano Flores
Universidade Federal de Santa Catarina


Profa. Dra. Angela da Veiga Beltrame
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Dr. Breno Leitão Waichel
Universidade Federal de Santa Catarina


Prof. Dr. Glauco Nonose Negrão
Universidade Estadual do Centro Oeste


Profa. Dra. Eryza Guimarães de Castro
Universidade Estadual do Centro Oeste

Dedico este trabalho a minha mãe, que não teve as mesmas oportunidades que eu para estudar, mas que mesmo assim me incentivou até aqui.

A ação não surge do pensamento, mas de uma disposição para
assumir responsabilidades.

Dietrich Bonhoeffer

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Senhor Jesus que me deu paz, tranquilidade e paciência, a minha família, parentes e amigos pelo apoio.

Em especial, agradeço a minha mãe, Darci B. Silva, a minha irmã, Helen C. B. Silva e a minha namorada, Clarice M. Zwarecz, que me aguentaram pacientemente durante os cinco longos anos que investi para fazer todo o trabalho.

Agradeço também a minha eterna orientadora e amiga Gisele Pietrobelli, pelo incentivo e conselhos.

A minha amiga Eliza B. Tratz, que sofreu junto comigo todas as dificuldades nesse importante período de minha vida.

Aos meus orientandos e amigos Rodrigo Mendes Mathias e Elias Machado por me acompanharem em todo o processo de pesquisa, me ajudando em campo e em laboratório.

Aos meus amigos Rafael A. de Castro, Tiago Giacomet e Miguel Burei Sobrinho pelo apoio e ajuda em campo.

Aos professores Mauricio Camargo Filho, Julio Cesar Paisani, Joel Pelerin, Juan Flores e Breno Waichel pelas discussões e explicações sobre os rumos que eu deveria tomar na pesquisa.

Aos colegas do departamento de Geografia e do SEAA da Unicentro.

Aos meus alunos de todos os cursos e disciplinas que ministrei.

Ao dono da área onde realizei minha pesquisa, senhor João Lazaretti.

A CAPES-REUNI pela concessão da bolsa de pesquisa durante os primeiros anos de doutorado.

Ao programa de pós-graduação em Geografia da UFSC.

A todas as pessoas que eu não citei o nome, mas que de alguma forma me ajudaram nessa caminhada, estendo o meu muito obrigado.

RESUMO

Nas encostas da região centro-sul do estado do Paraná, foram identificados canais reconhecidos como túneis. Neles, pode ser observada a ação constante de fluxos de água, com interação de fluxos subsuperficiais e superficiais. Buscando a identificação e compreensão dos processos relacionados à gênese e evolução desses túneis, foram realizados trabalhos no distrito de Cavernoso, município de Candói, onde foi identificado um sistema de túneis em encosta próxima a um rio, denominado “Boca Apertada”. A hipótese levantada é de que esses túneis surgem devido a características específicas do material em determinados estratos na cobertura superficial, como, por exemplo, alta porosidade ou minerais expansivos. Somada a essas possíveis características dos materiais, há ainda a relação entre os túneis e o controle estrutural gerado pela influência do lineamento do rio Piquiri. A fim de responder ao problema gerado, o objetivo geral da pesquisa se concentrou primordialmente na caracterização dos materiais da encosta. De modo específico, buscou-se: 1) a identificação das feições erosivas e controle estrutural presente na área; 2) a identificação dos mecanismos e processos que ocorreram/ocorrem na encosta relacionados aos túneis; 3) o levantamento da distribuição tridimensional dos materiais da encosta através de topossequências; e 4) caracterização física e química dos materiais. Para tanto, foram feitos trabalhos de campos para coletas de amostras, sondagens a trado, levantamento topográfico, confecção de topossequências, análises granulométricas e difratometria de raios X. Os resultados apontaram que o sistema de túneis tem forte influência geomórfica na área, sendo caracterizado como um processo natural de evolução do relevo. Levando em consideração as questões ligadas à análise dos condicionantes estruturais, análise textural e aos resultados da difratometria de raios X, é possível compreender que os túneis têm sua origem a partir do movimento de água em subsuperfície, que circula através de estratos de materiais mais porosos e que sua evolução ocorre através do tempo. Durante sua evolução, o túnel fornece sedimentos para o canal fluvial, rio Boca Apertada, além de funcionar como um dreno para toda a encosta.

Palavras-chave: Fluxo subsuperficial, Erosão subsuperficial; Difratometria de raios X; Topossequências; Falhas.

ABSTRACT

On the slopes of the central-southern region of the state of Paraná, channels recognized as tunnels were identified. In them, the constant action of water flows can be observed, with interaction of subsurface and superficial flows. In order to identify and understand the processes related to the genesis and evolution of these tunnels, work was carried out in the district of Cavernoso, in the municipality of Candói, where a tunnel system was identified on a slope near a river called "Boca Apertada". The hypothesis raised is that these tunnels arise due to specific characteristics of the material in certain strata in the surface cover, such as high porosity or expansive minerals. In addition to these possible characteristics of the materials, there is also the relationship between the tunnels and the structural control generated by the influence of the Piquiri river lineament. In order to respond to the generated problem, the overall objective of the research focused primarily on the characterization of slope materials. Specifically, we sought: 1) the identification of erosive features and structural control present in the area; 2) the identification of the mechanisms and processes that occurred/occur in the slope related to the tunnels; 3) the survey of the three-dimensional distribution of the materials of the slope through toposquences; and 4) physical and chemical characterization of materials. In order to do so, fieldwork was carried out for sampling, manual probing, topographical survey, confection of toposquences, particle size analysis and X-ray diffractometry. The results indicated that the tunnel system has a strong geomorphic influence in the area. A natural process of the reliefs evolution. Taking into account the issues related to the analysis of structural constraints, textural analysis and the results of X-ray diffraction, it is possible to understand that the tunnels have their origin from the water movement in subsurface, which circulates through strata of more porous materials. And that its evolution takes place over time. During its evolution, the tunnel provides sediments for the fluvial channel, Boca Apertada river, in addition to functioning as a drain for the whole slope.

Keywords: Subsurface flow; Subsurface erosion; X-ray diffractometry; Toposequences; Failures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Os quatro caminhos da água na encosta segundo Dunne (1980): 1) Fluxo superficial; 2) fluxo de base; 3) escoamento subsuperficial; 4) escoamento superficial saturado. Modificado de Dunne (1980).....	3
Figura 2 – Escoamento concentrado dentro do túnel da encosta da “Lagoa Seca”, Candói, Paraná.....	9
Figura 3 - Sistema de túneis em encosta com mata secundária as margens do rio das Pombas em Guarapuava, Paraná.....	11
Figura 4 - Túneis com resíduo de mata primária no município de Candói, Paraná. Fonte: Acervo pessoal.....	12
Figura 5 – Entrada principal do túnel ainda em meio a resquício de mata.....	13
Figura 6 - Salão em forma de abóboda. Notar o desabamento constante de materiais do teto e das paredes, gerando grandes acumulações na base do túnel.....	14
Figura 7 - Cavidades identificadas primeiramente como casas subterrâneas no setor mais alto da encosta.	15
Figura 8 - Convergências de fluxos subsuperficiais até a exfiltração na encosta. Fonte: Dunne (1990).....	18
Figura 9 - Sequência que mostra como ocorre à retirada das partículas finas dos espaços intergranulares do solo (<i>seepage</i>).	19
Figura 10 - Encosta com superfície rebaixada. Propriedade dos Parahutt, Prudentópolis, Paraná.	21
Figura 11 – Estrutura de abatimento com vegetação na encosta Burei, Palmital (PR). Fonte: Acervo pessoal.....	22
Figura 12 - Hipótese de sequência de estados para evolução da erosão em túneis e formação de estruturas de abatimento.....	23
Figura 13 – Direções preferenciais de feições estruturais e voçorocas na região centro sul do Paraná.....	24
Figura 14 – Caverna Casa de Pedra localizada a 752m de altitude e conhecida localmente por “caverna de topo”; a seta indica a abertura principal da caverna. Fonte: Acervo pessoal.	28

Figura 15 - Entrada da caverna Casa de Pedra em Palmital, Pr.	28
Figura 16 - Mapa de localização da área de estudos.	37
Figura 17 – Bloco rolado no setor baixo da encosta com dique esverdeado (média/baixa encosta).....	40
Figura 18 – Bloco rolado brechado com veios preenchidos por calcedônia e peperitos (média encosta).....	40
Figura 19 – Cachoeira formada em rochas do tipo Pitanga (vista da base).	41
Figura 20 – Cachoeiras: Pitanga (P) e Andesito (A).	42
Figura 21 – Marmitas formadas no topo da cachoeira.	42
Figura 22 – Precipitação no estado do Paraná no mês de junho de 2014.	44
Figura 23 - Contato abrupto de material grosseiro com material fino dentro do túnel. Fonte: Acervo pessoal.	45
Figura 24 - Fases da evolução de um túnel, descritas do interior de um túnel. (a) horizonte com maior retenção de água; (b) aumento dos poros e acúmulo de água livre; (c) aumento e conexão de poros com aumento da condutividade hidráulica; (d) entalhe e aumento vertical do canal neoformado; (e) expansão lateral devido ao contato da água com o horizonte de impedimento hidráulico; (f) expansão lateral da erosão iniciando a perda de sustentação do teto; (g1) perda de sustentação lateral e rebaixamento da superfície; (g2) perda de materiais do teto; (h) perda expressiva de materiais do teto e formação de depósitos na base do túnel; (i) desabamento completo do teto do túnel e conectividade com a superfície da encosta. Fonte: Wellington B. Silva (2016).	55
Figura 25 - Relação entre o sistema de túneis e os canais superficiais.	58
Figura 26 - Parte alta da encosta com fluxo temporário.	59
Figura 27 - Fluxo gerado pela alta precipitação no sopé da encosta.	59
Figura 28 - Entrada de água superficial na estrutura de abatimento principal do túnel.	59
Figura 29 - Cascata formada na estrutura de abatimento (entrada de água superficial no sistema subsuperficial).	59

Figura 30 – Fluxo turbulento na entrada do túnel.	59
Figura 31 - Estrutura de abatimento com clastos e matacões expostos junto à estrutura de abatimento (artesianismo).	59
Figura 32 - Vista da encosta rebaixada com as estruturas de abatimento visíveis. Fonte: Acervo pessoal.	59
Figura 33 – Entrada principal do túnel na encosta do rio Boca Apertada.	61
Figura 34 – “Arco romano”, indicando estabilidade do teto do túnel.	61
Figura 35 – Teto do túnel estabilizado com processo de entalhe do piso.	61
Figura 36 – Base sendo entalhada pela ação de fluxos concentrados.	61
Figura 37 – Teto em processo de desabamento.	61
Figura 38 – Processo de desgaste lateral das paredes e acumulação de sedimentos.	61
Figura 39 - Subsidência do teto do túnel, em túnel secundário.	62
Figura 40 - Subsidência do teto do túnel com voçorocamento no final do túnel secundário.	62
Figura 41 – Estrutura de abatimento principal.	63
Figura 42 – Diagrama de roseta (frequência absoluta) das áreas que apresentaram erosão em túneis.	64
Figura 43 - Localização de túneis no Segundo e Terceiro Planaltos Paranaenses com falhas associadas.	67
Figura 44 - Linha de seixos encontrada em sondagem.	69
Figura 45 - Localização das sondagens em mapa com curvas de nível.	71
Figura 46 – Linhas de seixos e grânulos. Fonte: Acervo pessoal. ..	74
Figura 47 – linhas de seixos com fragmentos de quartzo.	74
Figura 48 - “Cabeceira” do túnel expondo materiais grosseiros em linha; notar água superficial entrando no sistema subsuperficial e linha de seixos com cristais de quartzo.	75

Figura 49 - Perfil maior limpo dentro da estrutura de abatimento com indicação da posição do túnel e com seta indicando fragmentos de rocha.	77
Figura 50 – Detalhe do perfil maior limpo com indicação de fragmento de rocha, clastos espalhados próximos à base e base saturada de água de cor cinza azulada com matacão no mesmo nível. Fonte: Acervo pessoal.	77
Figura 51 – Perfil menor limpo, com seta vermelha indicando direção de linha de seixos; seta preta indicando acúmulo de seixos e grânulos.	78
Figura 52 – Concentração de seixos e grânulos em horizonte próximo a base na parede exposta do perfil menor; notar nível acinzentado na base.	78
Figura 53 - Localização das topossequências.	81
Figura 54 - Topossequência 1.	85
Figura 55 - Topossequência 2.	89
Figura 56 - Topossequência 3.	93
Figura 57 – Topossequência 4.	97
Figura 58 - Topossequência 5.	101
Figura 59 – Topossequência 6.	105
Figura 60 – Topossequência 7.	109
Figura 61 – Topossequência 8.	113
Figura 62 - Topossequência 9.	117

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1. EROSÃO EM TÚNEIS	3
1.1. A VERTENTE E A ÁGUA.....	3
1.2. TÚNEIS	5
1.3. O FLUXO SUBSUPERFICIAL NA INSTALAÇÃO DO PROCESSO DE EROSÃO EM TÚNEIS.....	16
1.4. MECANISMOS, PROCESSOS, FEIÇÕES E FORMAS ASSOCIADAS À EROSÃO EM TÚNEIS	19
1.5. CONTROLE ESTRUTURAL E OS TÚNEIS	24
1.6. CABECEIRAS DE DRENAGEM/VALE.....	25
1.7. CAVERNAS DE BASALTO E OS TÚNEIS.....	27
1.8. OS MINERAIS NO SOLO	30
1.8.1. MINERAIS PRIMÁRIOS	31
1.8.2. MINERAIS SECUNDÁRIOS	33
2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS	35
2.1. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO DA ÁREA DE ESTUDOS	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1. ATIVIDADES DE CAMPO.....	47
3.1.1. IDENTIFICAÇÃO EM CAMPO DO SISTEMA DE TÚNEIS	47
3.1.2. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO	47
3.2. ATIVIDADES DE LABORATÓRIO.....	47
3.2.1. ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	47
3.2.2. CONSTRUÇÃO DE TOPOSEQUÊNCIAS	48
3.2.3. DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.....	48
4. RESULTADOS.....	51
4.1. EVOLUÇÃO INTERNA DA EROSÃO EM TÚNEIS.....	51

4.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TÚNEIS DA ENCOSTA BOCA APERTADA.....	57
4.3. FORMAS E FEIÇÕES RELACIONADAS À EROÇÃO EM TÚNEIS	60
4.4. RELAÇÃO ENTRE CONTROLE ESTRUTURAL E OS TÚNEIS NA ENCOSTA DO RIO BOCA APERTADA.....	63
4.5. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS DA ENCOSTA	69
4.5.1. SONDAGENS COM TRADO HOLANDÊS	69
4.5.2. ANÁLISES GRANULOMÉTRICAS.....	73
4.5.3. CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL.....	75
4.5.4. TOPOSSEQUÊNCIAS COM AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS MATERIAIS	79
4.5.5. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DA ENCOSTA POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	119
4.5.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE O DRX DAS AMOSTRAS	123
5. CONCLUSÃO	127
REFERÊNCIAS.....	131
ANEXOS	145
ANEXO I: FORMULÁRIOS DE CAMPO.....	147
ANEXO II - TRIÂNGULOS DE SHEPARD	161
ANEXO III - GRÁFICOS DE DIFRATOMETRIA DE RAIOS X. 181	

INTRODUÇÃO

Um túnel pode ser visto e compreendido como uma passagem, geralmente subterrânea, que corta uma barreira fisicamente intransponível para animais, seres humanos e a água. Podem ser construídos por engenheiros, por animais ou pela ação natural de raízes, vento e circulação de água nas rochas ou no solo.

Nas encostas da região centro-sul do estado do Paraná, foram identificados canais que vão de poucos centímetros a vários metros de diâmetro interno, reconhecidos como túneis, nos quais pode ser observada a ação constante de fluxos de água, com interação de fluxos subsuperficiais e superficiais conforme evoluem para canais abertos em superfície.

No Brasil, trabalhos como o de Camargo (1998), Augustin e Aranha (2006), entre outros, já evidenciavam a existência de túneis indicando que estes ocorrem em diferentes condições climáticas e pedológicas.

São muitas as indagações acerca do assunto, pois o túnel é um “espaço vazio” em subsuperfície, onde o material de origem foi erodido, levando consigo informações sobre a organização estrutural e química do estrato de onde se iniciou o processo.

No distrito de Cavernoso, município de Cândói, foi identificado sistema de túneis em encosta próxima a um rio, nominado de “Boca Apertada”. A partir dessas informações, surgiu a necessidade de se responder a pergunta “qual é a origem e como se dá a evolução dos túneis formados na encosta do rio Boca Apertada?”

A hipótese levantada é a de que esses túneis surgem devido a características específicas do material em determinados estratos na cobertura superficial, como, por exemplo, alta porosidade ou minerais expansivos. Nesses estratos, seriam encontrados materiais que privilegiariam a transmissão de água e o carreamento de partículas menores para faces expostas na

encosta, tanto por solução, quanto por ação mecânica. Somada a essas possíveis características dos materiais, há ainda a relação entre os túneis e o controle estrutural gerado pela influência do lineamento do rio Piquiri.

A fim de responder ao problema gerado, o objetivo geral da pesquisa se concentrou primordialmente na caracterização dos materiais da encosta. De modo específico, buscou-se: 1) a identificação das feições erosivas e controle estrutural presente na área; 2) a identificação dos mecanismos e processos que ocorreram/ocorrem na encosta relacionados aos túneis; 3) o levantamento da distribuição tridimensional dos materiais da encosta através de topossequências; e 4) caracterização física e química dos materiais.

1. EROÇÃO EM TÚNEIS

1.1. A VERTENTE E A ÁGUA

A vertente se caracteriza como a mais básica de todas as formas de relevo, razão pela qual assume importância fundamental para os geógrafos físicos (CASSETI, 2005). Para Moreira e Pires Neto (1998), são superfícies inclinadas que conectam a linha divisora de águas e o fundo de vale. São as vertentes e suas formas que ditam como é dada a distribuição das águas pluviais, que, segundo Bloom (1970), podem ser divididas em coletoras e distribuidoras de água, partindo-se da classificação dada por Troeh (1965).

Dunne (1980) demonstrou que a água se movimenta na vertente por quatro caminhos preferenciais (Figura 1), sendo eles: o escoamento superficial ou hortoniano (*horton overland flow*), fluxo de base (*baseflow*), escoamento subsuperficial (*subsurface flow or throughflow*) e o escoamento superficial saturado (*saturation overland flow*).

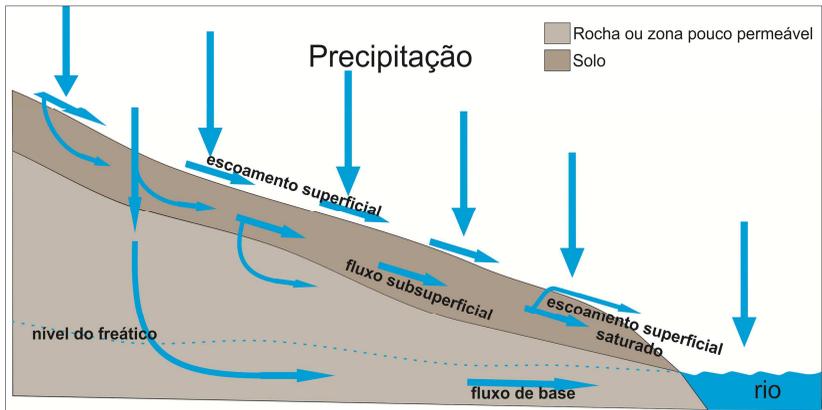


Figura 1 – Os quatro caminhos da água na encosta segundo Dunne (1980): 1) Fluxo superficial; 2) fluxo de base; 3) escoamento subsuperficial; 4) escoamento superficial saturado. Modificado de Dunne (1980).

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.

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.

A formação do fluxo subsuperficial dependerá das características do ambiente e das propriedades do solo (PAISANI, 1998), seguindo por caminhos preferenciais até sua exfiltração.

Os escoamentos subsuperficiais aparecem essencialmente paralelos aos planos de separação das camadas de solo que, em geral, tendem a ser aproximadamente paralelos à superfície do terreno (SANTOS, 2009), obedecendo às leis da gravidade e às forças capilares existente no solo. Também pode carrear quantidade variável de grãos de solo, partículas de argila e outros coloides (CASSETI, 2005).

Os fluxos rápidos de subsuperfície podem ser gerados pelos fluxos darcinianos, através da matriz do solo e pelos fluxos não-darcinianos, que são gerados por meio de macroporos e *pipes* (SANTOS, 2009).

Algumas mudanças de estado ocorrem durante o transporte, tornando-se impraticável a distinção rígida entre dissolução e transporte em suspensão.

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 para o fundo ou onde ocorre uma convergência topográfica (CAMARGO, 1998). Nesse 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).

1.2. TÚNEIS

Os túneis (*tunnel*), referidos muitas vezes na literatura como *pipes*, são considerados, nesta pesquisa, como vazios ou como poros¹ gigantes existentes nas formações superficiais/materiais² das encostas, gerando formas/feições erosivas em decorrência da movimentação da água em subsuperfície, formando canais, que concentram fluxos e os transportam de forma livre e concentrada.

Por formar sistemas com vários canais interligados a um canal principal, e de acordo com a morfologia interna desses canais, entende-se que o termo mais apropriado é “erosão em túneis” para explicar o processo (ZACHAR, 1982; VACHER, *et al.*, 2004; HARDIE *et al.*, 2007) e “túneis” para a forma/feição.

Beven e Germann (1982) também definiram os túneis como macroporos com diâmetro superior a 40 mm, já Jones (2010) preferiu um conceito mais qualitativo para os túneis, definindo-os como poros com “formas esculpidas pela água”. Esse tipo de erosão forma “espaços vazios lineares” pela ação de água corrente concentrada em solos ou em depósitos não

¹ Os poros são volumes “vazios”, isto é, orifícios ou aberturas desprovidas de materiais sólidos que atuam de diferentes formas, capazes de reter líquidos (soluções) e/ou permitir sua percolação, bem como a passagem de ar (gases), de animais, raízes, etc. (CASTRO, 2008).

² O termo “materiais” será utilizado, neste trabalho, de uma forma genérica para explicar o que comumente se chama de “solo”. O termo solo não será aplicado por se considerar que a encosta pode estar recoberta de colúvios e/ou colúvio-alúvios que podem ser constituídos de material vegetal, clastos de rochas e solo.

consolidados que podem causar um colapso da superfície e a formação de sulcos descontínuos (JONES, 2004).

De acordo com as diferentes dinâmicas e intensidade dos fluxos, vários termos são atribuídos a esse processo, como: erosão em túnel, erosão por suspensão, *suffosion*³, erosão por infiltração, por duto, tubagem, pseudocarste⁴ (PANIZZA, 1996).

Na literatura russa e polonesa, o termo é referido como *suffosis*⁵, tendo sido descrito por Pavlova (1894), apresentando-se como uma derivação da palavra latina *suffodere*, que significa “minar”. *Suffosis* também é reconhecido como a dissolução contínua e/ou lavagem do cimento ou componentes solúveis de rochas.

Na literatura inglesa, esse tipo de erosão é referido pelos termos de erosão de ravina em forma de túnel (GIBBS, 1945), tunelamento (DOWNES, 1946), tubulação do solo (CARROLL, 1949), por tubulação (FLETCHER & HARRIS, 1952) e erosão por tubulamento (BROWN, 1962). Cumpre esclarecer que todos esses sinônimos referem-se à erosão em túnel.

A terminologia dos diferentes processos que causam as características da erosão subsuperficial foi discutida mais amplamente por Dunne (1990) e Bryan & Jones (1997).

Essa forma/feição erosiva foi descrita pela primeira vez por Richthofen, em 1872, na China (ZACHAR, 1982). São encontrados em diferentes climas e litologias (CAMARGO, 1998; ROMERO DÍAZ *et al.*, 2007; AUGUSTIN & ARANHA, 2006;

³ Suffosion ou erosão por suspensão pode ser entendida como o transporte de materiais finos entre os interstícios das frações maiores do solo, tornando o esqueleto do solo mais poroso e subsequentemente mais susceptível à circulação livre de água, quando houver ligação entre os poros.

⁴ O termo pseudocarste foi utilizado com o intuito de fazer referência às formas esculpidas em rochas carbonáticas, devido aos canais subsuperficiais apresentarem morfologias semelhantes, porém o termo é utilizado de forma incorreta, quando se faz referência à origem do processo, uma vez que *carste* diz respeito ao processo de dissolução de materiais carbonáticos, de cimentos de rochas sedimentares etc.

⁵ *Suffosis* é também entendida em um sentido mais generalizado como sinônimo de erosão em túnel.

SPOLADORE *et al.*, 2009; SILVA, 2011; BAZZOTTI, 2013), tanto em formações superficiais autóctones, quanto alóctones.

Podem ser encontrados em paisagens naturais e antropogênicas, bem como em diferentes usos do solo e coberturas vegetais (ROMERO DÍAZ *et al.*, 2007), em uma ampla gama de configurações climatológicas, geomorfológicas e pedológicas (BRYAN & JONES, 1997).

Essas formas/feições⁶ reconhecidas como túneis são responsáveis pela remoção de grande quantidade de materiais e, de acordo com Dunne (1990), são geralmente relacionados às diferenças texturais de sequência litoestratigráficas ou de horizontes pedológicos estruturais. Importante notar que, 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.

Para Selby (1982), os fatores possíveis para o surgimento desse tipo de erosão 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. A ocorrência do processo erosivo que dá início à formação dos túneis, também é, usualmente associada, a alterações nas condições hidrológicas do solo (RICHLEY, 2000).

Cada vez mais, esse tipo de erosão é reconhecido como um processo hidrológico de encostas de importância geomorfológica significativa em variadas regiões climáticas

⁶ Os túneis quando aparecem sozinhos na encosta somente com suas feições superficiais típicas (estrutura de abatimento e subsidência do teto) é considerado como forma, porém, quando aparece relacionado a voçorocas, é considerado como feição.

(GILMAN & NEWSON, 1980; JONES, 1981; MCCAIG, 1983; WILSON & SMART, 1984; BRYAN & HARVEY, 1985; CROUCH & MCGARRITY, 1986; UCHIDA et al, 1999; CAREY & WOO, 2000).

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). Não é um processo erosivo que forma uma paisagem cárstica⁷, já que tem sido considerado de pouca importância em comparação com erosão em lençol e voçorocas (VERACHTERT *et al.*, 2010).

Depois de formados os canais (Figura 2), estes podem gerar caminhos preferenciais de circulação para a água subsuperficial (SELBY, 1982; CAMARGO, 1998), refletindo a interação crítica entre as condições climáticas, características da formação superficial e características locais dos gradientes hidráulicos (BRYAN & JONES, 1997).

Swanson *et al.* (1989) concluíram que o extenso processo erosivo ocorrido em meados dos anos de 1900, nas regiões costeiras da Califórnia, foram devido à erosão subterrânea (*pipeflow*). Os autores discutem que o desenvolvimento dos túneis (*pipes*), envolve três estágios: 1) eluviação lateral de argilas (*soil piping*); 2) desenvolvimento de um conduto subsuperficial no qual o fluxo concentrado erode suas paredes (*tunneling*); e 3) expansão do túnel até o ponto em que ocorre o colapso do teto.

⁷ O relevo cárstico é particularmente associado a rochas calcárias, podendo se referir também a paisagens similares elaboradas em outras rochas carbonáticas ou não. Nesse cenário, o modelado apresenta uma morfologia específica (dolinas, vales cegos, paredões, lapíás, entre outras), como também uma drenagem predominantemente subterrânea. Essas características estão associadas ao processo de dissolução da rocha.

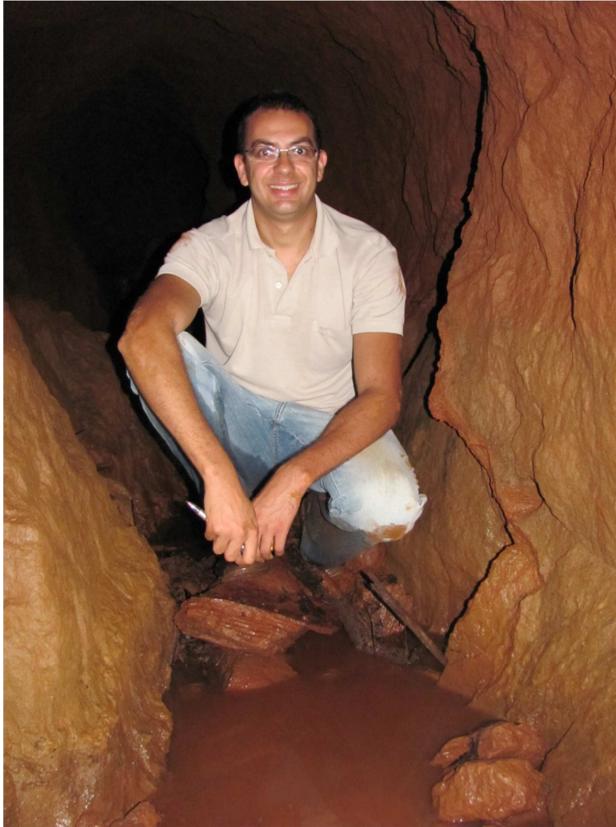


Figura 2 – Escoamento concentrado dentro do túnel da encosta da “Lagoa Seca”, Candói, Paraná.

Fonte: Tiago Giacometi (2012).

Jones (1994) discute que o processo erosivo em túneis é controlado por variados parâmetros físicos e químicos, e é essa variedade que regularia a distribuição de túneis pelo mundo. Para o autor, os parâmetros relacionados aos aspectos químicos dos solos são mais evidentes em solos áridos, principalmente no que concerne às propriedades dispersivas.

Solos sódicos ou solos alcalinos que contenham altas quantidades de argilas do grupo da esmectita-montmorilonita são

altamente susceptíveis ao surgimento dos túneis em regiões secas.

Outra sugestão para o início da erosão em túnel é pelo movimento da água ao longo de canais e de perfil dispersivo do subsolo. Partículas de argila movem-se dissolvidas na água entre partículas maiores aumentando o tamanho dos poros e iniciando o processo.

Faulkner *et al.* (2008) identificaram solos com argila dispersiva em Mocacán, Sudoeste da Espanha, e correlacionaram-nos com o surgimento de túneis e voçorocas na região. As argilas dispersivas promovem o aumento dos macroporos que tendem a aumentar com o incremento de eventos de alta precipitação.

No Oeste de Gippsland, como informa o relatório feito pelo governo de Vitória na Austrália (VICTORIAN GOVERNMENT, 2010), a erosão em túneis se desenvolveu em solos dispersivos subsuperficiais, sendo considerada como uma forma natural de drenagem e estudada na região devido ao pouco conhecimento sobre a extensão de seus impactos. Das observações feitas na região, as principais ficam por conta dos altos volumes de nutrientes e sedimentos que entram nas águas dos lagos "Gippsland", através do rio Mitchell e a alta turbidez nas correntes de captação inferiores do rio Mitchell, causando a interrupção do abastecimento de água Bairnsdale.

Estima-se que, em determinadas localidades, a taxa de transporte de sedimentos chegou à ordem de 1,6 t/h/a de solo. Boucher (2009) afirma que a maior parte das pesquisas realizadas em Vitória, Austrália, se concentra nas propriedades do solo, negligenciando, muitas vezes, os eventos de alta precipitação. Somente autores como Fitzpatrick *et al.* (1994) e Boucher (1995; 2002) se preocuparam com o tema.

Nos estados do Paraná e de Santa Catarina, foram feitas observações em relação às características das encostas com erosão em túneis, sendo que uma das mais importantes foi com

relação à existência de mata nativa ou secundária em alguns poucos locais preservados (Figura 3).



Figura 3 - Sistema de túneis em encosta com mata secundária as margens do rio das Pombas em Guarapuava, Paraná.
Fonte: Acervo pessoal.

Essa observação dá indicações de que os túneis são resultados de “processos erosivos”⁸ que surgem, independentemente, da retirada ou não da cobertura vegetal (Figura 4).

⁸ Os processos erosivos destacados no parágrafo dizem respeito a processos de grande magnitude, onde grandes quantidades de material são mobilizadas. Processos erosivos acontecem naturalmente, com ou sem vegetação, mas com a retirada da cobertura vegetal, são acelerados e de difícil remediação.



Figura 4 - Túneis com resíduo de mata primária no município de Candói, Paraná.
Fonte: Acervo pessoal.

Diferentemente de outros processos erosivos, acelerados com a retirada da vegetação, os túneis aparecem em meio à vegetação, sem ocorrer, necessariamente, uma diminuição ou aceleração do processo erosivo.

A detecção dos túneis fica dificultada, quando há cobertura vegetal, tornando a detecção por imagens aéreas e, mesmo em campo, quase impossíveis.

Quando houve substituição da cobertura vegetal original por gramíneas para pastagens ou formação de lavouras, foi

notada a aceleração do processo de erosão, principalmente pela perda de umidade da cobertura superficial e consequente ressecamento de grumos, provocando desprendimentos de materiais do teto do túnel, perda de sustentação do teto e desabamento.

Um exemplo da importância da compreensão da erosão em túneis foi a descoberta, no município de Palmital, Paraná, de um sistema de túneis onde está ocorrendo a expansão do meio urbano por meio de loteamentos para moradias populares. O referido túnel foi nominado de “Merom Matchula” (Figura 5).



Figura 5 – Entrada principal do túnel ainda em meio a resquício de mata.
Fonte: Acervo pessoal.

A principal característica de evolução interna é a formação de depósitos de sedimentos, incasão⁹ e a existência de salão em forma de abóboda. Essas características demonstram que o túnel possui um processo dinâmico e que quaisquer perturbações externas podem fazê-lo evoluir para uma incisão aberta. O risco de desabamentos nesse estágio é iminente, pois

⁹ Incasão é um termo utilizado para explicar o processo de descolamento de placas de rochas de cavernas carbonáticas, que será utilizado para explicar também o descolamento de “placas” de solo do teto dos túneis.

a tendência do solo é perder completamente a sustentação e desabar, criando, assim, uma estrutura de abatimento (Figura 6).



Figura 6 - Salão em forma de abóboda. Notar o desabamento constante de materiais do teto e das paredes, gerando grandes acumulações na base do túnel.
Fonte: Acervo pessoal.

Externamente não são notadas mudanças bruscas na morfologia da encosta, uma vez que, em pequena escala, as únicas feições existentes são as estruturas de abatimento e incisão aberta no final do sistema.

A maior feição existente é a subsidência do teto do túnel que influencia grande parte da encosta, concentrando fluxos superficiais. Essa é uma observação mais atenciosa e ampla do processo, a partir da qual é possível notar que parte da encosta está em processo de “afundamento” ou subsidência, formando uma depressão no local aonde o túnel atravessa.

Alterações na área de influência do túnel sugerem que o processo tende a evoluir de modo mais rápido e conseqüentemente mais crítico com relação aos processos erosivos superficiais.

Todo o processo passa por modificações lentas ao longo do tempo, mas pode ser acelerada, assim como a erosão superficial. O principal processo de degradação observado nos

locais que apresentam túneis é o desmatamento e plantio de pastagem nas encostas.

O segundo processo mais corriqueiro de degradação é a construção de estradas e desvio de fluxos superficiais para os canais internos e, por fim, a interceptação dos canais subsuperficiais, tanto por engano quanto com o intuito de parar o processo.

O processo de desvio de águas superficiais para o interior dos túneis atua aumentando a erosão, pela ação de fluxos turbulentos, no sentido a jusante do canal interno, provocando o desabamento precoce do teto.

Na ilha de Santa Catarina, foram identificadas cavidades por padre João Alfredo Rohr, em 1971, na comunidade conhecida por “Rio das Pacas”, morro ao leste da Praia da Solidão, sul da ilha. Essas cavidades foram identificadas, primeiramente, como sendo habitações indígenas (casa subterrânea), e, em seguida, como um rico local de prospecção arqueológica (Figura 7).



Figura 7 - Cavidades identificadas primeiramente como casas subterrâneas no setor mais alto da encosta.

Fonte: Acervo pessoal.

A encosta, onde estão localizadas as cavidades, é utilizada há pelo menos 60 anos, sendo que atualmente seu uso está restrito ao pastoreio de gado.

Em campo, é possível identificar que as cavidades que aparecem na superfície são estruturas de abatimento do teto de um sistema de túneis existente na encosta, que também apresenta subsidência, formando um vale em “v” no topo, cortando o morro em sentido N/S com aproximadamente 280 m de comprimento.

No setor alto da encosta, encontram-se as menores declividades da encosta e a concentração de estruturas de abatimento com formas circulares.

Essas estruturas permitem o acesso ao sistema de túneis, além de serem importantes conexões entre o escoamento superficial e o escoamento subsuperficial, incrementando o fluxo dentro dos túneis. Os fluxos internos não se apresentam como turbulentos, porém são constantes, indicando a função de drenagem da encosta. Internamente, o sistema de túneis se apresenta como uma estrutura estável, perceptível pela forma interna das galerias, pelos fungos que se proliferam de maneira uniforme pelas paredes e pela falta de descolamentos de “placas de solo”.

De acordo com o mapeamento feito por Tomazolli & Pelerin (2015), o sistema de túneis está geologicamente localizado em um dique de diabásio (KDb) que corta o Granito Ilha (PGi). Essa informação sugere que os túneis podem ter sido formados pelas características dos materiais fruto do intemperismo do diabásio ou ainda por influência estrutural da intrusão do diabásio na rocha.

1.3. O FLUXO SUBSUPERFICIAL NA INSTALAÇÃO DO PROCESSO DE EROÇÃO EM TÚNEIS

A gênese do fluxo subsuperficial pode ser compreendida através das variações na condutividade hidráulica, sendo esta propriedade do meio poroso que descreve sua capacidade em

transmitir água (PAISANI, 1998), tanto de modo difuso, quanto concentrado no interior do solo. A condutividade hidráulica varia com o conteúdo de umidade do solo, assumindo valores máximos quando o solo tem seus poros completamente preenchidos por água (LUIZ, 2003). 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).

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

Os processos erosivos que ocorrem em subsuperfície estão diretamente relacionados aos mecanismos de infiltração de água nas vertentes.

Autores como Whipkey e Kirky, citados por Paisani (1998), reconheceram que descontinuidades texturais, com materiais de granulometria grosseira sobrepostos a materiais de granulometria mais fina, sob condições de maior umidade, permitem maior percolação e conseqüente saturação dos materiais, gerando fluxos subsuperficiais. De acordo com Luiz (2003), é possível que macroporos ou dutos possam ser formados ou aumentados, pela própria atuação do fluxo subsuperficial.

A concentração dos fluxos subsuperficiais (Figura 8) e seu escoamento é um fenômeno denominado por Dunne (1990) de *tunnel scour* (escoamento por túnel).

A concentração e aumento da velocidade dos fluxos subsuperficiais encosta abaixo, aliado ao aumento da quantidade de água de exfiltração das paredes desses túneis recém-formados, provocam fluxos turbulentos que se movimentam de forma desordenada, desencadeando o desprendimento e carreamento dos materiais de forma mecânica, ampliando cada vez mais, o diâmetro dos túneis.

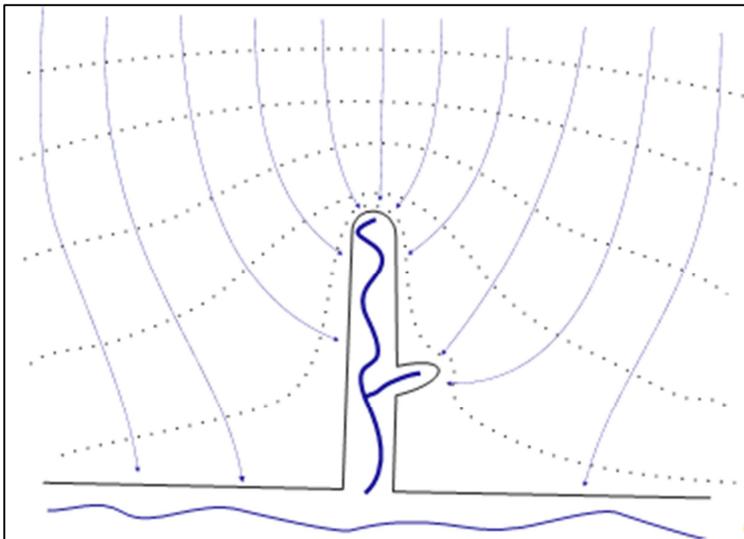


Figura 8 - Convergências de fluxos subsuperficiais até a exfiltração na encosta. Fonte: Dunne (1990).

Essa concentração hidráulica pode assumir a forma tubular de carácter efêmero, com possível colapso de seu teto propiciando a formação de voçorocas com cabeças íngremes (CROSTA & DI PRISCO, 1999).

O primeiro estágio é o carreamento de partículas induzido pela infiltração e posterior exfiltração de água (*seepage*), sendo relacionado a fluxos constantes e emergentes em meio poroso. O segundo é o alargamento de macroporos através da aplicação de tensões de cisalhamento de seus perímetros, comuns em materiais coesivos e solos granulares insaturados.

Os termos *seepage erosion* e *tunnel scour* (Figura 9) podem ser considerados as expressões mais precisas para explicar o processo existente ou não existente (CROSTA & DI PRISCO, 1999).

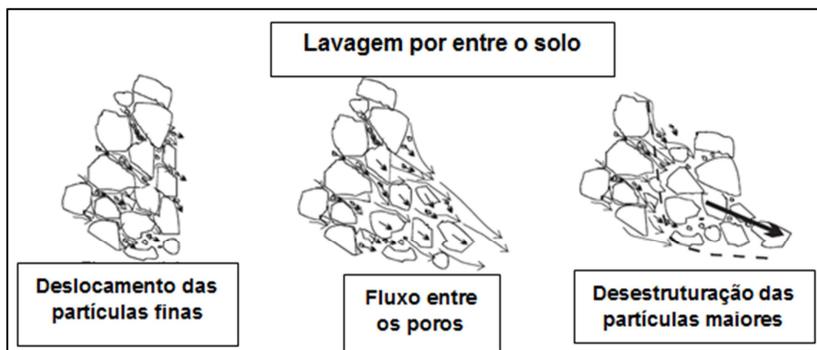


Figura 9 - Sequência que mostra como ocorre a retirada das partículas finas dos espaços intergranulares do solo (*seepage*).

Fonte: Crosta & Di Prisco (1999).

Esse mecanismo de erosão foi descrito e interpretado de várias maneiras, sendo os estudos de Sekera (1951 *apud* Zachar, 1982) que o mencionaram pela primeira vez. Ele se referiu ao “*intrasoil washout*” (lavagem por entre o solo) e usou o termo “*microerosion*” (microerosão) do solo, para explicar a lavagem mecânica de partículas do solo pela água gravitacional no espaço intergranulares.

Com a retirada de materiais, seja por processos mecânicos ou químicos, constituem-se rotas preferenciais de fluxos de água em subsuperfície, responsáveis por diversos mecanismos de erosão (CAMARGO, 1998) e pela formação de redes internas de drenagem das encostas.

1.4. MECANISMOS, PROCESSOS, FEIÇÕES E FORMAS ASSOCIADAS À EROSÃO EM TÚNEIS

Os mecanismos e processos de erosão estão relacionados à dinâmica da água de superfície e subsuperfície, sendo a partir da conjugação desses mecanismos, que são definidas as feições e as formas erosivas (OLIVEIRA *et al.*, 1995).

O principal mecanismo relacionado à erosão em túneis são os fluxos subsuperficiais concentrados, que são incrementados por vazamentos lentos e/ou turbulentos que ocorrem nas paredes dos túneis e pelos fluxos superficiais relacionados aos subsuperficiais por meio de estruturas de abatimento.

Esses fluxos aparecem essencialmente paralelos aos planos de separação das camadas de solo que, em geral, tendem a ser aproximadamente paralelos à superfície do terreno (SANTOS, 2009).

Com relação aos processos de erosão, estes constituem uma sequência de estados de transformação de um sistema ao longo do tempo (OLIVEIRA *et al.*, 1995). Essas transformações, quando aplicadas no sistema encosta, resultam em formas como voçorocas e túneis.

Essas formas erosivas são expressões dos resultados da dinamicidade do processo erosivo. Já as feições erosivas representam impressões ou marcas visíveis nas formas erosivas e são resultantes de mecanismos específicos.

Das feições associadas aos túneis, que são reconhecidas superficialmente, pode-se destacar a subsidência do teto do túnel e as estruturas de abatimento como as principais.

A subsidência da superfície ou rebaixamento do teto do túnel aparece como um rebaixamento, geralmente lento, da superfície (Figura 10). A subsidência do teto surge, quando há perda de sustentação causada pela retirada de água, ar e/ou solo em subsuperfície, ocorrendo de modo disperso na superfície da encosta, alinhadas com a drenagem da água concentrada nos túneis. A subsidência gera mudanças nos gradientes locais, o que favorece a convergência de fluxo superficial e ocorrência de processos erosivos.



Figura 10 - Encosta com superfície rebaixada. Propriedade dos Parahutt, Prudentópolis, Paraná.

Fonte: Clarice Maria Zwarecz (2015).

Quando a subsidência do solo está associada à erosão em túneis, e esta também apresenta ligação com a superfície através de estruturas circulares abertas, denominadas estruturas de abatimento ou poços de desabamento (*sinkhole*), o fluxo superficial tende a escoar para o interior do sistema de túneis (Figura 11).

Elas foram inicialmente descritas por Rodrigues (1984) como estrutura de abatimento, resultante do colapso do material localizado acima do teto do túnel. No processo de erosão em túneis, o colapso do solo gera, na encosta, formas de erosão semelhantes a poços de desabamento. Elas indicam linhas de fluxo subterrâneo ao longo da encosta, essas linhas, em geral, têm posicionamento longitudinal da encosta, contudo, podem ocorrer de forma diagonal ou transversal a curtas distâncias.

A erosão nas estruturas de abatimento evolui, geralmente, de forma remontante, por ação da água de exfiltração na parede da estrutura, pela ação mecânica da água concentrada no túnel e por ação da água de escoamento superficial.



Figura 11 – Estrutura de abatimento com vegetação na encosta Burei. Palmital (PR).
Fonte: Acervo pessoal.

Dessa forma, Camargo (1998) propôs hipótese evolutiva do processo de erosão em túneis, com o aparecimento de estruturas de abatimento ao longo dos canais subsuperficiais e a instalação de voçoroca na encosta, conforme a Figura 12.

Quando estabilizadas ou com crescimento lento, favorecem, devido à maior umidade, o crescimento de vegetação de maior porte e mais densa no seu interior. Inicialmente a rede de canais formada por erosão em túneis apresenta estruturas de abatimento distante umas das outras, porém se o substrato for solúvel ou dispersivo, a erosão avança rapidamente, podendo consumir uma unidade geológica inteira.

A água que exfiltra na face livre das paredes do túnel e das estruturas de abatimento sob poropressões mais elevadas conduz à redução da coesão dos materiais nas paredes, desestabilizando-as e induzindo ao movimento de massa de magnitudes variadas, desde pequenos agregados de solo até o colapso geral do material situado acima do teto do túnel.

Esse colapso pode ser compreendido como rearranjo das partículas do solo que passam a ocupar parcialmente espaços vazios. Isso ocorre porque se dá a eliminação dos vínculos entre

os grãos devido à interação entre eles e o fluido percolante submetidos a uma sobrecarga.

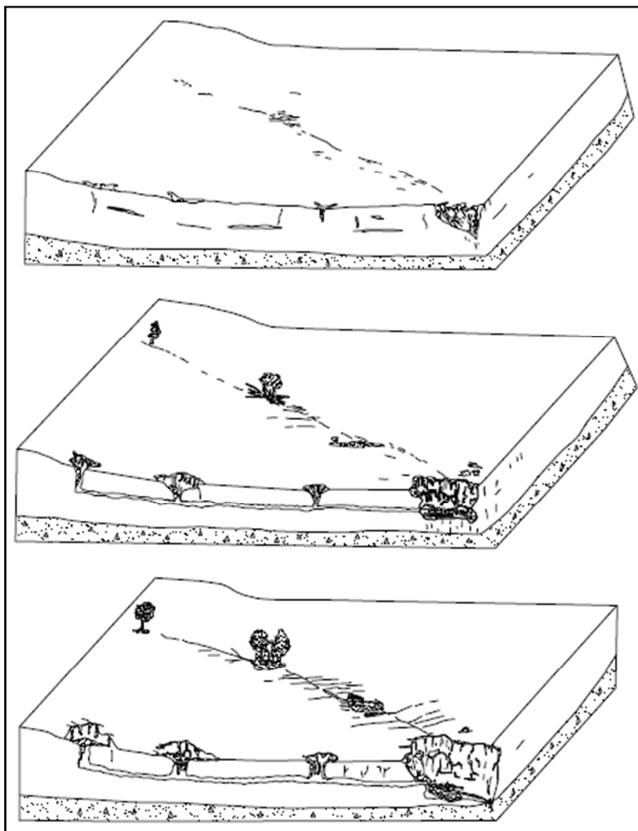


Figura 12 - Hipótese de sequência de estados para evolução da erosão em túneis e formação de estruturas de abatimento.
Modificado de Camargo (1998).

Mendes (2001) reconhece que um solo arenoso, em condição de equilíbrio meta-estável entre as partículas maiores de sua composição, é suscetível a colapso. O equilíbrio meta-estável representa a condição na qual o sistema pode permanecer mantendo-se sua estrutura pela ocorrência de algum vínculo que lhe confira equilíbrio temporário.

1.5. CONTROLE ESTRUTURAL E OS TÚNEIS

Em seu trabalho sobre a “Evolução de cabeceiras de drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a formação e o crescimento de canais sob controle estrutural”, Coelho Netto (2003) apresentou dados relativos a uma pesquisa comparativa com processos ocorridos e publicados por Dietrich *et al.* (1986), Montgomery e Dietrich (1989) e Dietrich e Dunne (1993), na costa oeste norte americana, entre os estados da Califórnia e Washington. No referido trabalho, a autora revisa resultados relativos à propagação de canais em cabeceiras de drenagem, sob forte controle litoestrutural e clima tropical úmido.

Camargo (2005) também descreve fortes indícios de influência estrutural na instalação de processos erosivos superficiais e subsuperficiais em túneis na região centro sul do Paraná (Figura 13).

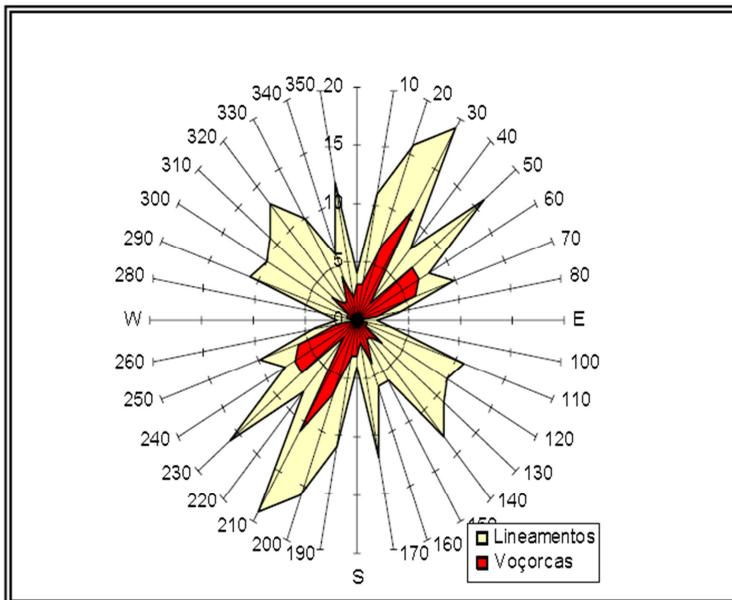


Figura 13 – Direções preferenciais de feições estruturais e voçorocas na região centro sul do Paraná.

Fonte: Camargo (2005).

As principais direções onde ocorrem os processos de voçorocamentos e túneis acompanham as direções dos lineamentos NE-SW e, em menor frequência, NW-SE. A autora ainda enfatiza que esses processos são naturais e recorrentes na região.

1.6. CABECEIRAS DE DRENAGEM/VALE

Cabeceiras de drenagem ou de vale podem ser consideradas como áreas iniciadoras da rede de drenagem superficial (FERREIRA, 2009). Paisani *et al.* (2006) explicam que o termo se refere à área côncava situada a montante de canal de primeira ordem, correspondendo à menor unidade hierárquica, bacia de ordem zero. De acordo com Coelho Netto (2003), desenvolvem-se no domínio das encostas e apresentam topografia côncava sobre as quais se originam ou avançam sobre as cabeças de canais.

A autora ainda cita que o termo “cabeceira de drenagem” é referido por outros autores como *hollow* (HACK, 1960), rampa (MEIS & MONTEIRO, 1979) ou concavidade (AVELAR & COELHO NETTO, 1992), entre outros.

Apresentam zonas de convergência de fluxos superficiais e subsuperficiais, funcionando ativamente por vários dias após eventos de alta pluviosidade, transportando e depositando materiais ao longo das encostas. Desse modo, a geometria das cabeceiras de drenagem atuais reflete períodos de resistasia e biostasia, e os fundos das concavidades, corresponderiam aos setores onde foram depositados os colúvios (PAISANI, 1998). Esses depósitos formam rampas¹⁰ suavemente inclinadas, originadas pela deposição de material.

¹⁰ Rampas de colúvios são descritas por Bigarella & Mousinho (1965) como sendo originadas por processos de solifluxão e escoamento superficial, com mobilização do material eluvial, recobrindo ou interdigitando com material aluvial/colúvio-aluvial. Meis & Machado (1978) ampliaram o termo para

Oliveira & Lima (2004) afirmam que, em decorrência das características dinâmicas das cabeceiras de vale, os sedimentos preservados podem ser gerados por processos que abrangem todas as transições possíveis entre fluxos gravitacionais, ou fluxos densos e fluxos de baixa viscosidade, com capacidade para realizar seleção granulométrica.

Os canais erosivos das cabeceiras de drenagem drenam através da rede principal de canais fluviais, integrando processos de encostas com processos fluviais (COELHO NETTO, 2003).

Camargo (1998; 2005), estudando o município de Lapa (Paraná), explica que ocorreram na região períodos de estabilidade e instabilidade ambiental e conseqüentemente períodos de erosão e deposição de sedimentos.

Nas encostas da região, podem ser encontrados canais escavados e preenchidos, sendo que entre as camadas de sedimentos, foram encontrados paleossolos com idades datadas de 41.490 e 20.830 A.P., indicando esses períodos de estabilidade e instabilidade ambiental (CAMARGO, 1998; CAMARGO & OLIVEIRA, 1998).

A autora ainda explica que subjacente aos paleossolos foram encontrados solos hidromórficos datados de 41.490 A.P., indicando um período de estabilidade ambiental, seguido por um período de soterramento por colúvios. Após esse período de instabilidade, a encosta passou novamente por um período de estabilidade e desenvolvimento dos solos (20.830 A. P.), sendo novamente soterrado. Na atualidade, a encosta encontra-se dissecada com exposição do aquífero e com processo erosivo remontante, sendo encontrados ainda túneis relacionados aos processos de voçorocamento na região.

incluir as cicatrizes erosivas, que constituem feição suavemente inclinada e levemente côncava na baixa encosta.

1.7. CAVERNAS DE BASALTO E OS TÚNEIS

O termo caverna (do latim *cavus*, “buraco”) é definido como “todo e qualquer espaço subterrâneo penetrável pelo ser humano, com ou sem abertura, popularmente conhecido como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, furna e buraco, incluindo seu ambiente, seu conteúdo mineral e hídrico, as comunidades bióticas ali encontradas e o corpo rochoso onde as mesmas se inserem desde que a sua formação tenha sido por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou do tipo de rocha encaixante” (CONAMA, 2004).

As cavidades naturais contemporâneas à formação da rocha, ou simplesmente cavidades naturais singenéticas, devem ser entendidas como espaços, cavidades, túneis etc., não preenchidos durante a formação da rocha. A grande diferença é que, nesse tipo de tipologia genética de cavidades naturais, não ocorre erosão mecânica, nem dissolução (ARCHELA & SPOLADORE, 2007).

No município de Palmital, estado do Paraná, foram reconhecidas no ano de 2012, duas cavernas em “rocha dura”, (cavernas basálticas ou vulcânicas) caracterizadas como sistemas preservados de tubos lávicos ou, simplesmente, tubos de lava. Esses tubos de lava identificados, nominados localmente de Casa de Pedra e Perau Branco, ocorrem em cotas próximas a 800m, no topo de encostas, por isso são denominados popularmente como “cavernas de topo” (Figura 14).

Os tubos são formados durante o processo de escoamento da lava, onde ocorre o resfriamento da superfície do derrame em contato com o ar, formando um revestimento vítreo tubular que impede a perda de calor da lava que continua a escoar por canais subterrâneos a longas distâncias do conduto. Com a drenagem dos fluxos de lava, o canal é esvaziado, formando cavernas vulcânicas, denominadas de tubos de lava.



Figura 14 – Caverna Casa de Pedra localizada a 752m de altitude e conhecida localmente por “caverna de topo”; a seta indica a abertura principal da caverna. Fonte: Acervo pessoal.

O primeiro sistema de tubos reconhecido foi o da caverna conhecida localmente como “Casa de Pedra”. Essa caverna recebeu grande destaque no meio científico e na imprensa, já que foi caracterizada como um tubo de lavas bem preservado, datando aproximadamente 133 M.a. (Figura 15).



Figura 15 - Entrada da caverna Casa de Pedra em Palmital, Pr. Fonte: Acervo pessoal.

Apesar de determinadas semelhanças quanto à forma, as cavernas originárias de tubos de lava e os túneis possuem características distintas. As diferenças principais envolvendo esses dois tipos de cavidades estão expostas no Quadro 1.

Quadro 1 – Comparações entre tubos lávicos e túneis

	TUBOS LÁVICOS	TÚNEIS
Gênese	Tem origem durante o escoamento concentrado de lavas, onde a uma fina camada se solidifica em contato com o ar, impedindo assim que o restante do fluxo perca calor para o ambiente, promovendo o espalhamento mais eficaz do material que está sendo expelido. Ao final do fluxo de lavas, resta somente a camada solidificada e esvaziada em forma de tubo	Tem origem na movimentação de água de subsuperfície em poros existentes em materiais autóctones e alóctones existentes nas encostas.
Formação	Formam-se de maneira rápida, após cessar o fluxo de lavas.	Formam-se de maneira lenta, sendo dependente do constante fluxo de água disponível na encosta.
Evolução	Não evolui após sua formação, sendo observado somente seu desabamento e, conseqüentemente, sua destruição em alguns casos.	Evolui gradativamente, conforme há interação dos fluxos subsuperficiais com fluxos superficiais, fauna cavernícola, perturbações de raízes e determinados tipos de uso do solo. Sua evolução máxima se dá pela formação de incisão aberta linear.
Forma	Tubular com digitações, afinando-se em sua parte final.	Tubular com túneis secundários que expõem água para um túnel principal. Tende a afinar-se em sua parte final e a sofrer deformações em seu teto com a perda de materiais.
Outras características	É um mecanismo de transporte eficiente de lavas relacionado a processos de vulcanismo; são “resistentes” a ação humana e a ação do tempo, devido ao material de origem.	É uma forma/feição relacionado com a dinâmica da água nas encostas e a processos de erosão; são “frágeis” à ação humana e com relação ao tempo, devido à natureza de seus materiais de origem.

A descoberta desses tubos explica o espalhamento dos grandes derrames em superfície em províncias ígneas do tipo Basaltos de Platô (SELF *et al.*, 1997; WAICHEL, 2006; WAICHEL *et al.*, 2013) que facilitam a formação de derrames com grandes extensões, como os que ocorreram na região central do Estado do Paraná.

1.8. OS MINERAIS NO SOLO

Em condições subtropicais e tropicais, o intemperismo de rochas básicas com minerais como olivina, piroxênio e feldspato plagioclásio pode originar solos argilosos com elevado conteúdo em óxidos e hidróxidos de ferro (TREMOCOLDI, 2003).

Além dos óxidos e hidróxidos de ferro, os argilominerais também são produtos do intemperismo. São silicatos hidratados de Al, Fe e Mg, com estrutura cristalina definida, dispostos em lâminas. Os argilominerais filossilicatados 1:1 são, provavelmente, o grupo de maior expansão e frequência nos solos do mundo. Constam de espécies dioctaédricas e trioctaédricas (MELO & WYPYCH, 2009).

A caulinita é o principal representante dos argilominerais 1:1 por sua destacada ocorrência nos solos (MELO & WYPYCH, 2009) apresentando maior densidade e menor estabilidade de agregados em água, de macroporosidade e de permeabilidade, quando comparados a latossolos gibbsíticos (CORTEZ *et al.*, 2009).

Sobre os agregados, Melo & Wypych (2009) explicam que são estruturas secundárias formadas por meio da combinação de partículas minerais com substâncias orgânicas e inorgânicas, em decorrência das cargas elétricas superficiais das partículas coloidais.

Foi observado que os Latossolos possuem uma microagregação muito acentuada, embora possam ter elevado teor de argila, quanto maior o teor de ferro, a sua microagregação lhe confere um comportamento parecido com

um solo arenoso (RESENDE et al., 1997). Essa microagregação, segundo El-Swaify (1980), ocorre muito mais em função do tipo de argila, caulinita combinada à goethita, hematita e gibbsita, do que em função da presença de material orgânico (CORTEZ et al., 2009).

A caulinita tende a se ajustar, face a face, aumentando o grau de coesão entre as partículas do solo, enquanto que a presença de gibbsita nos latossolos promove a formação de estruturas granulares e, conseqüentemente, a formação de macroporos, que de acordo com Resende et al., (1997) resulta em elevados valores de permeabilidade.

A presença de caulinita e gibbsita nos solos é condicionada basicamente pelo conteúdo de sílica, decorrente da evolução pedogenética. Assim, quando a dessilicização é moderada, a caulinita é formada, e, em condições de dessilicização total, forma-se a gibbsita, que é mais comum em latossolos ainda mais evoluídos, onde o processo de latolização foi mais intenso (CAMPOS et al., 2008).

1.8.1. *Minerais primários*

Minerais primários são todos aqueles que não passaram por modificações em sua composição química ou em sua estrutura cristalográfica. São indicadores de evolução dos solos, sendo que os solos com grandes quantidades de minerais primários são considerados os menos desenvolvidos.

Oxidos, hidróxidos e oxiidróxidos de Fe, ou simplesmente óxidos de Fe, compreendem um grupo de minerais que tem recebido, nos últimos 50 anos, atenção da comunidade científica (COSTA & BIGHAM, 2009). Em solos tropicais e subtropicais, os óxidos de Fe são considerados o segundo grupo mais importante de minerais na fração argila, superado somente, na maioria dos solos, pelos minerais do grupo da caulinita e, menos frequente, pela gibbsita e minerais expansivos do tipo 2:1.

Nos solos, os óxidos ocorrem em partículas muito pequenas até submicroscópicas. Tem como estrutura básica um octaedro, no qual cada átomo de Fe ($^{2+ou3+}$) é rodeado por seis O^{-2} $[(FeO_6)]^{9-ou10-}$ ou por seis OH^{-} $[(Fe(OH)_6]^{3-ou4-}$.

Em decorrência de sua natureza química e alta área superficial específica, os óxidos atuam com eficiência na adsorção de ânions inorgânicos, orgânicos, vários biocidas, cátions, além de facilitar a formação de agregados e a cimentação de outros componentes do solo (COSTA & BIGHAM, 2009).

Nas condições mais comuns de pH dos solos tropicais, os valores de CTC e CTA são praticamente equivalentes e muito baixos, o que favorece floculação dos coloides e, conseqüentemente, a agregação dos solos.

Os óxidos também são responsáveis pela coloração dos solos, podendo esse atributo variar de cores avermelhadas a cores amareladas, passando pelo cinza até a cor púrpura. Essa variação nas cores, brilho e tonalidades relacionadas com os óxidos de Fe está intrinsecamente associada ao tamanho das partículas, composição química, tipo, grau de substituição isomórfica e forma das partículas.

É possível aferir em campo o tipo provável de óxido de ferro presente no solo a partir da análise da matiz no sistema de Munsell (Tabela 1).

Tabela 1 - Matiz no Sistema de Munsell associada frequentemente a alguns óxidos de ferro.

Mineral	Matiz no Sistema de Munsell
Ferrihidrita	5YR – 7,5YR
Goethita	2,5Y – 7,5YR
Hematita	5R – 2,5YR
Lepidocrocita	5YR – 7,5YR
Maghemita	2,5YR – 5YR

Fonte: Costa & Bigham (2009).

1.8.2. *Minerais secundários*

Minerais secundários são todos aqueles resultantes da transformação de minerais primários. A esse processo dá-se o nome de transformação, que se baseia em todo processo pedogenético de modificação química, física ou biológica dos constituintes dos solos, sendo que o principal processo de transformação ocorre na rede cristalina dos minerais primários (quartzo, feldspatos, micas) em minerais secundários (caulinita, esmectitas e illita).

2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudos (Figura 16) está localizada a 4 km da rodovia PR-277, em setor de baixa encosta à margem esquerda do rio Boca Apertada, afluente do rio Cavernoso, no distrito “Cavernoso”, município de Candói, Paraná.

Apresenta-se como área de Floresta Ombrófila Mista (FOM) desmatada para criação de gado de corte, com plantação de braquiária e resíduos esparsos de mata.

Em alguns pontos, há afloramentos rochosos e regiões mais úmidas em decorrência da existência de áreas deprimidas. Nas regiões adjacentes, há plantação de eucaliptos em sistema de silvicultura o que incrementa a economia da região que é essencialmente agropastoril.

Nas encostas de maior declividade, predominam processos erosivos superficiais em lençol e reptação, gerada pelo pisoteio do gado, bem como por processos erosivos nas margens das estradas rurais, o que conseqüentemente gera um aumento expressivo na quantidade de sedimentos em suspensão nos corpos hídricos em dias de precipitação.

Mapa de Localização da Área de Estudos

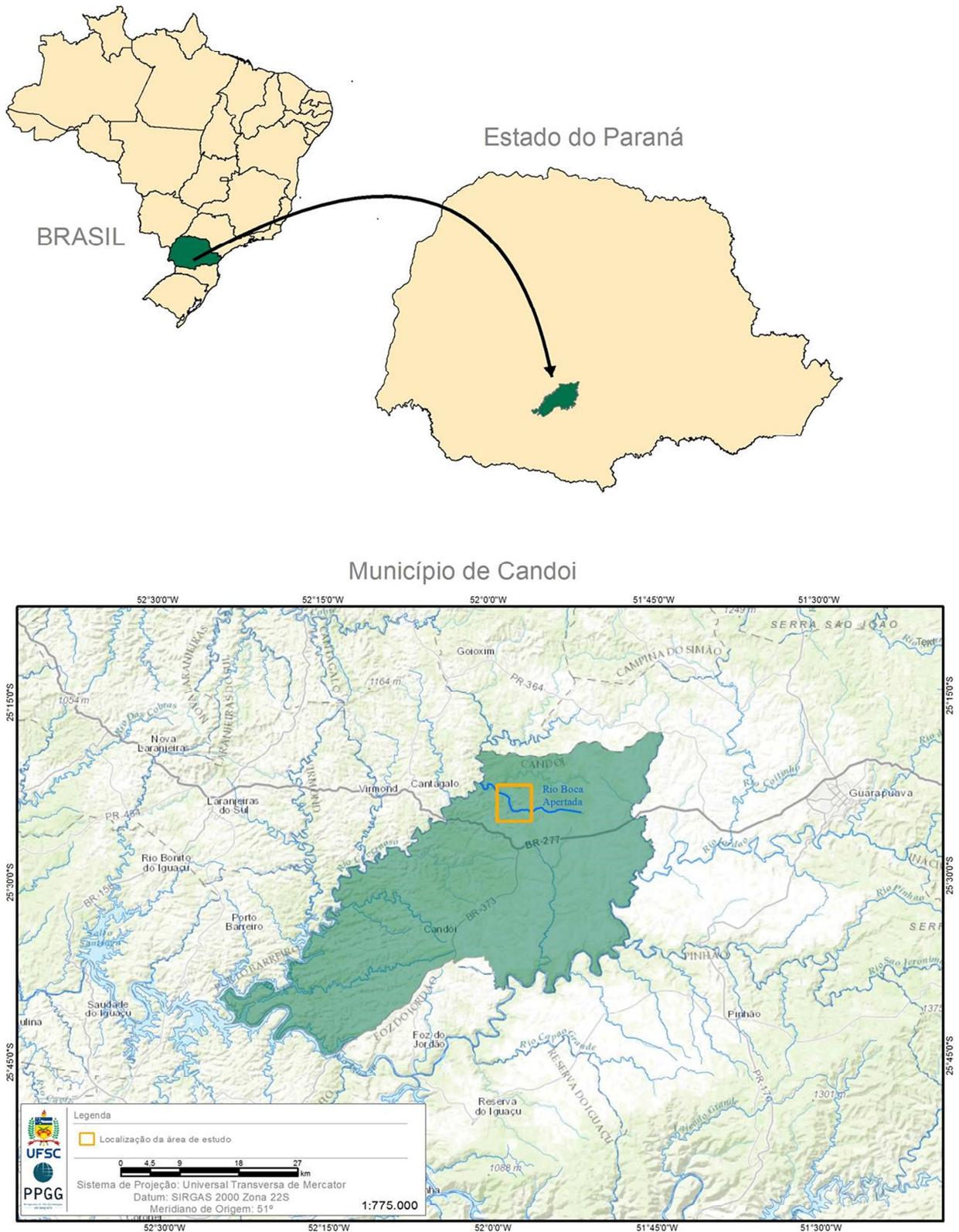


Figura 16 - Mapa de localização da área de estudos.
Fonte: Giovanni Colossi Scoton (2017).

2.1. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO DA ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudo está morfoestruturalmente localizada no Terceiro Planalto Paranaense, na região Centro Sul do estado do Paraná. Em campo, a cobertura litológica identificada é representada por rochas da Formação Serra Geral (FSG), sendo que, nas cotas mais elevadas das encostas, é possível encontrar rochas com estrutura maciça no núcleo apresentando por vezes geodos de quartzo cristalino ou amígdalas preenchidas por calcedônia, afanítica com textura afírica, mesocrática e muito intemperizada.

Entre a média até a baixa encosta, são encontradas lajes expostas e blocos rolados com estrutura vesicular amigdalóide, preenchidas principalmente por calcedônia, pouco fraturadas, mesocrática cinza escura. Em alguns pontos, a encosta é cortada por veios/diques esverdeados, com estrutura de preenchimento maciça e espessura média variando de 0,02 a 0,04 m ou por veios com espessuras de poucos milímetros preenchidos por calcedônia (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Também foram identificados em campo blocos rolados identificados como sendo peperitos¹¹ ou brechas peperíticas (Figura 18).

¹¹ Peperitos são rochas formadas pela interação de magma com sedimentos úmidos e inconsolidados (WAICHEL, 2006).



Figura 17 – Bloco rolado no setor baixo da encosta com dique esverdeado (média/baixa encosta)

Fonte: Acervo pessoal



Figura 18 – Bloco rolado brechado com veios preenchidos por calcedônia e peperitos (média encosta)

Fonte: Acervo pessoal

No rio Boca Apertada e em suas margens, é possível identificar derrames com espessura máxima aproximada de 4m, compostos por rochas escuras, maciças, densamente fraturadas (entablatura), de textura afanítica (Figura 19), interpretadas e

identificadas, de acordo com Paiva (2000), como rochas do tipo Pitanga (Ati). O contato dessas rochas com as rochas imediatamente abaixo, mostra-se abrupto com diferenciação nítida de estrutura.



Figura 19 – Cachoeira formada em rochas do tipo Pitanga (vista da base).
Fonte: Acervo pessoal.

Nas rochas identificadas como do tipo Pitanga, há recuo nitidamente maior em referência as rochas compostas pelos andesitos, podendo ser notada a atuação do intemperismo mecânico na rocha que apresenta menor resistência ao movimento das águas fluviais devido a sua estrutura intensamente fraturada.

Essas diferenciações dos litotipos ficam evidenciadas com a formação de cachoeiras e erosão remontante, visualmente maior nos litotipos Pitanga (Figura 20).



Figura 20 – Cachoeiras: Pitanga (P) e Andesito (A).
Fonte: Acervo pessoal.

Essas rochas que estão em contato com a base do Pitanga, são identificadas como sendo andesito, com estrutura vesicular, mesocrático, parcialmente alteradas, com tonalidade de cinza variando do médio para o claro.

É possível observar fraturas preenchidas por material esverdeado no topo dos andesitos e formação de “marmitas” na zona vesiculada da rocha pela ação da corrosão de fragmentos de rochas somados a ação de fluxos turbulentos (Figura 21).



Figura 21 – Marmitas formadas no topo da cachoeira.
Fonte: Acervo pessoal.

Morfoesculturalmente, o município de Candói está inserido, em parte, no Planalto de Palmas/Guarapuava e, em parte, no Planalto Alto/Médio Piquiri (MINEROPAR, 2006). A área de estudos está localizada dentro do Planalto Alto/Médio Piquiri, apresentando dissecação média e ocupando uma área de 5.840,68 km².

As formas predominantes são topos alongados e isolados, vertentes convexas e convexo-côncavas e vales em “U” aberto, modeladas em rochas da Formação Serra Geral. Notadamente ocorre predomínio de erosão em lençol, ocasionando lavagem da parte superficial da encosta e exposição de blocos rochosos, sendo observados pontos de erosão linear pouco desenvolvida em caminhos feitos pelo caminhamento de gado e eventual reptação nesses pontos.

Com relação ao clima, o sul do Brasil apresenta grandes contrastes nos regimes de precipitação e temperatura. Parte desses contrastes deve-se à situação geográfica da região, na transição entre os trópicos e as latitudes médias, e o relevo declivoso, que contribui para esses contrastes (GRIMM, 2009).

Para o estado do Paraná, os climas predominantes são do tipo Cfa e Cfb pelo sistema de classificação climática de Köppen.

O clima da região centro-sul, de acordo com essa classificação climática, é do tipo Cfb – Clima temperado, com temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C (mesotérmico), com verões frescos, temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C e sem estação seca definida.

A pluviosidade na região é bem distribuída durante todos os meses, com média anual de 1796mm, porém, no ano de 2014, foi registrado no estado do Paraná recorde nos índices de pluviosidade (Figura 22), sendo que o mês com maior índice de chuvas foi junho, com média mensal de 350mm na região de Guarapuava.

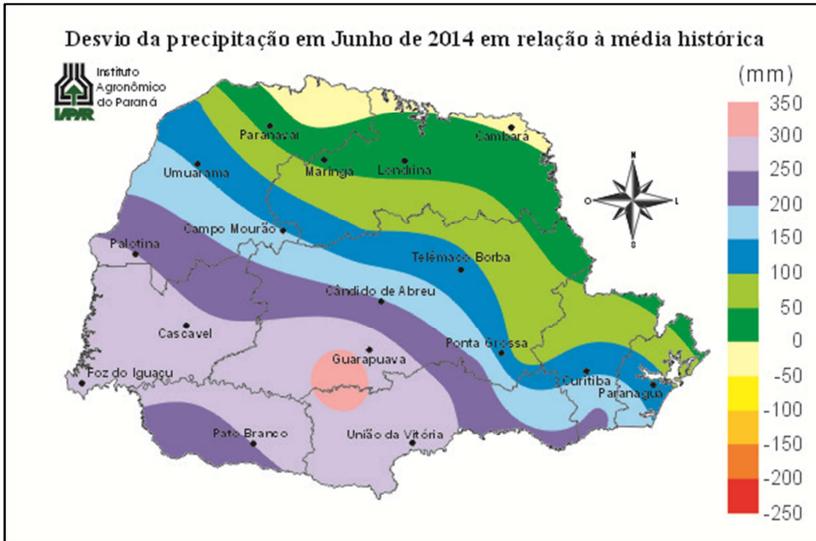


Figura 22 – Precipitação no estado do Paraná no mês de junho de 2014.
Fonte: IAPAR.

Na região que compreende a bacia do rio Cavernoso, em Cândói, a média mensal ficou em 300mm, conforme dados do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR, 2014). Esse elevado índice de pluviosidade teve seu ápice entre os dias 7 e 8 de junho de 2014.

Esse evento atípico de alta pluviosidade em um período de tempo curto (quatro dias) possibilitou a observação direta do funcionamento de fluxos superficiais com os fluxos subsuperficiais na encosta do rio Boca Apertada.

Sobre a pedologia proeminente na área, de acordo com o SIBCs (2006), há predominância de cambissolos com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, com textura variando de franco-arenosa a argilosa, que se caracterizam como pouco evoluídos, sem horizonte B diagnóstico definido. Seu horizonte superficial diagnóstico pode ser classificado como antrópico (EMBRAPA, 2006).

Nos setores baixos das encostas, aparecem solos diagnosticados como Gleis, acinzentados logo acima da rocha

intemperizada, que herdaram características texturais e estruturais da rocha mãe, fortemente influenciado pelo acúmulo de água.

Em várias partes da encosta, é possível notar contato abrupto com material psamítico (Figura 23) e horizontes de acúmulo de ferro.

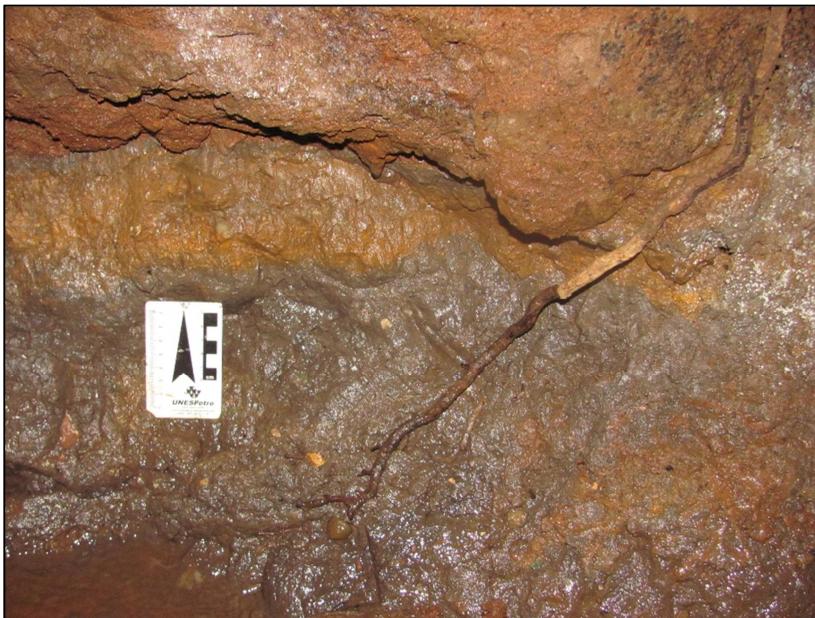


Figura 23 - Contato abrupto de material grosseiro com material fino dentro do túnel.
Fonte: Acervo pessoal.

São também encontradas linhas de clastos, de vários tamanhos, espalhadas no perfil, com diferenciações entre a quantidade e tamanho dos clastos encontrados em matriz argilosa a argilo arenosa.

Nos horizontes superficiais, é constatada forte influência da ação de raízes e da fauna edáfica, podendo ser notada também a influência da criação de gado nas características texturais e estruturais do solo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. ATIVIDADES DE CAMPO

3.1.1. Identificação em campo do sistema de túneis

A erosão em túneis apresenta dois estágios de evolução, o túnel em si e o desabamento do teto do túnel, formando uma incisão linear aberta.

A identificação em campo de sistemas de túneis foi feita por meio da observação do alinhamento das estruturas de abatimento, da parte interna do túnel e da voçoroca em sua parte final.

3.1.2. Levantamento topográfico

O levantamento topográfico da encosta foi realizado por caminhamento com GPS da marca Leica SR 20, com antena receptora GNSS SP80 *Spectra Precision*, com plano de terra incorporado. Juntamente à topografia, foram delimitados os contornos das feições erosivas encontradas, como as estruturas de abatimento, subsidência e a voçoroca no final do sistema de túneis.

3.2. ATIVIDADES DE LABORATÓRIO

3.2.1. Análise Granulométrica

Foi seguido o ensaio de análises granulométricas proposto pelo manual da EMBRAPA (1997). Para a realização das análises, foram coletadas amostras deformadas de solo através de trado tipo holandês, as quais foram secas em estufa à temperatura de 65°C por durante 24h, sendo posteriormente quarteadas e desagregadas em graal de porcelana e pistilo

envolto de borracha. Após a secagem e moagem de todo o volume de material, retirou-se 50g de amostra para peneiramento sobre um conjunto de peneiras sobrepostas de 2,0mm, 1,0mm, 0,50mm, 0,250mm e 0,125mm, sendo que o material peneirado foi pesado em balança de precisão e os materiais finos foram lavados e pipetados para a obtenção dos valores relativos a siltes e argilas. Todas as análises foram realizadas no Laboratório de Geomorfologia Dinâmica e Aplicada da Unicentro, pertencente ao Departamento de Geografia.

3.2.2. *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 holandês e dos trabalhos de levantamento topográfico. Concluída essa etapa, foram feitas sondagens com trado e descrição das amostras de solo em campo. Essas descrições buscaram indicar quais eram as condições do material coletado no momento da sondagem, sendo anotadas as características texturais, de cor, de plasticidade, umidade e observações gerais, tais como, presença de raízes, presença de carvão, mosqueamento etc.

Conforme as amostras eram retiradas, anotaram-se também as profundidades até que o trado alcançasse a rocha ou algum horizonte que impedisse a continuidade da perfuração. Todo o trabalho foi concluído com os resultados obtidos em laboratório, após serem feitas as análises granulométricas. A partir desse ponto, começou a construção dos desenhos em programa gráfico apropriado. Neste trabalho, foi utilizado o programa gráfico *Corel Draw X8*.

3.2.3. *Difratometria de raios X*

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 (CALDERANO *et al.*, 2009).

Os difratogramas foram obtidos utilizando-se um difratômetro *D2 Phaser* da Bruker, com ânodo de cobre, comprimento de onda de 1,54 Å referente à linha de emissão Cu K α , varredura de 10° a 70° em 2 θ . Para a realização desses ensaios, foram enviadas um total de 25 amostras em pó.

O método funciona com a incidência de um feixe de raios X sobre um policristalino, e o mesmo, interage com os átomos presentes na estrutura, gerando o fenômeno da difração. A difração ocorre, segundo a Lei de Bragg (equação), que estabelece a relação entre o ângulo de difração e a distância entre os planos atômicos, característicos de cada fase cristalina:

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

$n\lambda$: ordem de difração;

α : comprimento de onda dos raios X incidentes;

d : distância interplanar

θ : ângulo de difração

Foram plotadas as fases cristalinas, utilizando-se o *software Origin 8* e caracterizadas pelo *PDF – 2¹² do banco de dados do ICDD*. Todas as análises de DRX foram feitas no Laboratório Multiusuário, pertencente ao Departamento de Química da Unicentro.

¹² PDF-2 (Powder Diffraction File) é a sistematização de dados relativos a difratogramas reunidos pelo ICDD (International Centre of Diffraction Data). Os dados ficam reunidos em um arquivo que apresenta os picos de cada mineral ou estrutura cristalina.

4. RESULTADOS

4.1. EVOLUÇÃO INTERNA DA EROÇÃO EM TÚNEIS

Túneis são formas/feições naturais encontradas internamente nas encostas, muitas vezes, com o acesso dificultado devido às dimensões, presença de água, risco de desabamento, animais peçonhentos, etc. Quando é possível o acesso ao interior dessas formas, a observação direta da interação dos mecanismos e processos fornece informações importantes sobre a evolução da erosão (Figura 24).

Internamente, o mais importante é a identificação de horizontes com diferenças texturais, que podem ser verificados pelo simples toque em amostra retirada à mão, pela observação do arranjo e tamanho dos clastos. De forma concomitante, é necessário observar se há exfiltração e em qual ou quais horizontes esse fato ocorre. Se não ocorrer exfiltração nos sedimentos com textura mais grosseira (a), é necessário entender se há água suficiente na encosta para ser exfiltrada.

Quando há aporte de água suficiente para ser exfiltrada em faces expostas da encosta (parede do túnel ou parede de voçoroca), essa água busca sair por esses horizontes com texturas mais grosseiras (b). Em alguns casos, horizontes com texturas notadamente argilosas, possuem exfiltração proeminente originadas de pequenos poros, gerados pelo mecanismo de vazamento (*seepage*). Se acaso a quantidade de água exfiltrada aumenta, ocorre o aumento das pressões internas dos materiais da encosta e conseqüente aceleração do processo erosivo, com expulsão de sedimentos mais finos.

A perda de material aumenta a capacidade de exfiltração em decorrência do aumento dos canalículos, gerando assim o túnel em si (c) ou mesmo túneis secundários em um túnel maior.

Com mais espaço e com poros cada vez mais conectados, há um aumento na condutividade hidráulica e expansão do processo interno de erosão da encosta. Com a movimentação da água dentro dos canais neoformados, ocorre o entalhe do material subjacente até um horizonte de impedimento ou até a rocha (d), originando um processo de expansão lateral da erosão.

Essa expansão lateral da erosão vai lentamente e aos poucos desestruturando as paredes do túnel e alterando a estabilidade do sistema (e). A gravidade atuante nos materiais, que resistem no teto do túnel, faz um contraponto com o atrito existente nos materiais da parede (princípio do arco romano), promovendo determinada resistência ao teto pelo tempo que a erosão lateral promove o desgaste do material (f). Com o passar do tempo, das condições hidrológicas da encosta e de fatores externos à dinâmica natural da encosta, bem como do avanço da erosão lateral, o teto vai perdendo sustentação de maneira lenta (g1), sentindo os efeitos da perda dos materiais.

É importante salientar que a perda de água e ar também pode provocar o rebaixamento do teto sem, necessariamente, ocorrer à existência de um canal retilíneo e vazio como um túnel. Esse fato pode ainda ocorrer pela existência de gramíneas que promovem a sustentação do material pelo entrelaçamento de suas raízes.

Esse rebaixamento é chamado de subsidência do teto do túnel e promove alterações visíveis em superfície, provocando o acúmulo de água em situação de precipitação e permitindo a absorção de uma dada quantidade de água em um tempo prolongado devido ao acúmulo de água na depressão.

Por vezes, já foi observado que áreas de subsidência expõem lateralmente o canal principal ou expõe canais secundários dos túneis, o que promove a entrada extra de água no sistema subsuperficial de escoamentos e a entrada de materiais existentes somente na superfície, como a serrapilheira.

Quando há uma perda de sustentação rápida do teto (g2 e h) do túnel, este acaba por expor o canal subsuperficial e fornece acesso vertical ao túnel (i). Essa feição do túnel, reconhecida como estrutura de abatimento, torna a erosão em túneis visível na superfície e também pode colaborar para a entrada de materiais superficiais dentro do canal. Essa feição é, em sua forma, análoga a feições de cavernas carbonáticas, reconhecidas por espeleólogos como chaminés ou claraboias, ainda que seu processo de formação seja diferenciado, quando vista de dentro do túnel, podendo ainda ser considerada como um sumidouro (*sinkhole*), quando vista da superfície.

Em eventos de alta e prolongada precipitação, ocorre artesianismo através dessas estruturas de abatimento. O fato ocorre devido à quantidade excessiva de água dentro dos canais ou mesmo pelo entupimento a jusante do canal pelos materiais (serrapilheira, madeiras, blocos) vindos da superfície ou arrancados do próprio túnel.

Nessas estruturas de abatimento, há grande umidade favorecendo a instalação de vegetação e entrada de animais dentro do canal, dando ao túnel uma dinâmica diferenciada e independente das condições únicas de hidrologia da encosta.

Com o passar do tempo, as mudanças de umidade dos materiais, a instalação e desenvolvimento da vegetação, fungos e animais, as estruturas de abatimento tendem a aumentar de forma longitudinal, acompanhando o canal principal subsuperficial. Nesse processo, conecta-se a outras estruturas de abatimento, fazendo com que o canal, antes subsuperficial, seja, a partir de um dado momento, um canal superficial, sujeito a toda a dinâmica da superfície. Esse é o momento de evolução máxima de um túnel e também de sua extinção como forma presente na encosta. Com o canal principal abatido, a nova incisão linear (voçoroca) expõe em suas laterais os túneis secundários.

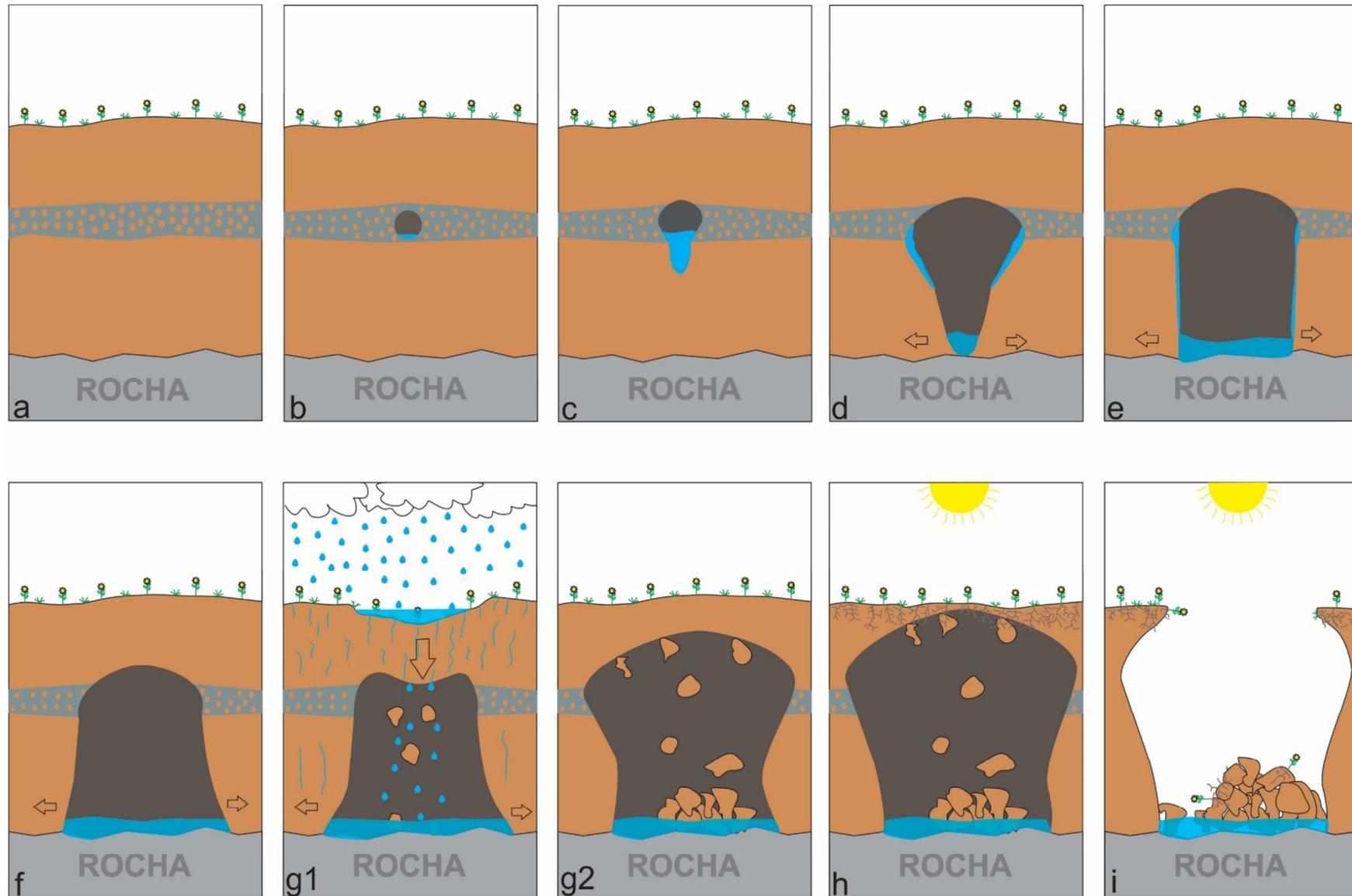


Figura 24 - Fases da evolução de um túnel, descritas do interior de um túnel. (a) horizonte com maior retenção de água; (b) aumento dos poros e acúmulo de água livre; (c) aumento e conexão de poros com aumento da condutividade hidráulica; (d) entalhe e aumento vertical do canal neoformado; (e) expansão lateral devido ao contato da água com o horizonte de impedimento hidráulico; (f) expansão lateral da erosão iniciando a perda de sustentação do teto; (g1) perda de sustentação lateral e rebaixamento da superfície; (g2) perda de materiais do teto; (h) perda expressiva de materiais do teto e formação de depósitos na base do túnel; (i) desabamento completo do teto do túnel e conectividade com a superfície da encosta. Fonte: Wellington B. Silva (2016).

4.2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TÚNEIS DA ENCOSTA BOCA APERTADA

O sistema de túneis encontrados na encosta do rio Boca Apertada apresenta-se em fase de evolução completa no terço final de sua extensão e em fase intermediária de evolução nos primeiros dois terços. Esse fato pode ser constatado pelos tipos de feições superficiais aparentes, onde ora o túnel se apresenta como forma, ora se apresenta como feição.

Ocorre também formação de vários canais menores transversais ao canal principal (túneis secundários), observados internamente no túnel ou perceptíveis na superfície através de estruturas de abatimento e subsidência do teto.

Esses canais menores colaboram para a drenagem da encosta, coletando água de setores mais distantes do canal principal, incrementando os fluxos concentrados e exfiltração das paredes do canal. Além disso, fornecer sedimentos, o que por vezes, gera mudanças da direção dos fluxos internos devido à formação de depósitos inconsolidados em locais com menor energia. Desse modo, mesmo em tempo de estiagem, o túnel se mantém com fluxos constantes e transmitindo água de forma mais rápida para o canal fluvial.

A presença de túnel e a estrutura de abatimento na encosta promovem mudanças no escoamento superficial, quando ocorre precipitação com volumes suficientes para que haja fluxo superficial concentrado (Figura 25), indicando mudanças no sentido dos fluxos superficiais, que, ao caírem nas estruturas de abatimento, incrementam os fluxos subsuperficiais.

Esse fato é importante devido à interação dos fluxos superficiais no incremento do fluxo subsuperficial, promovendo mudanças nas formas da encosta em decorrência dos fluxos turbulentos que se formam dentro do túnel.



Figura 25 - Relação entre o sistema de túneis e os canais superficiais.
Fonte: Bing (2016)

Durante o evento de alta precipitação que ocorreu em junho de 2014, foi possível observar de modo direto a dinâmica dos fluxos na encosta em dias chuvosos. Essa dinâmica também ficou perceptível pelas marcas deixadas na superfície, onde é evidente a continuidade do canal antes do aparecimento da estrutura de abatimento (Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32).

É notável que os canais subsuperficiais não obedecem à topografia observada na superfície, não sendo possível estabelecer sua direção exata na encosta sem a existência de feições superficiais.



Figura 26 - Parte alta da encosta com fluxo temporário.
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 27 - Fluxo gerado pela alta precipitação no sopé da encosta.



Figura 28 - Entrada de água superficial na estrutura de abatimento principal do túnel.
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 29 - Cascata formada na estrutura de abatimento (entrada de água superficial no sistema subsuperficial).



Figura 30 - Fluxo turbulento na entrada do túnel.
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 31 - Estrutura de abatimento com clastos e matacões expostos junto à estrutura de abatimento (artesianismo).



Figura 32 - Vista da encosta rebaixada com as estruturas de abatimento visíveis.
Fonte: Acervo pessoal.

4.3. FORMAS E FEIÇÕES RELACIONADAS À EROSÃO EM TÚNEIS

Formas e feições relacionadas à erosão em túneis estão intimamente ligadas aos mecanismos que ocorrem internamente após a instalação do processo erosivo.

Na encosta do rio Boca Apertada, a principal forma observada é o próprio túnel (Figura 33). Dentro do túnel, foi observado que algumas partes ao longo do canal possuem forma de “arco romano” (Figura 34). Essa forma é um indicativo de estabilidade do teto e das paredes.

Paredes verticalmente retilíneas ou levemente curvadas também são indicativas de estabilidade do interior do túnel (Figura 35).

Em partes com maior gradiente hidráulico e fluxos turbulentos, ocorre o entalhe da base do túnel até a rocha (Figura 36), indicando que o processo de erosão em túneis teve início em camadas superiores as quais se encontra atualmente.

Determinadas partes dos túneis apresentam formas instáveis, com o teto em forma de abóboda (Figura 37) e desabamento constante de partes do teto. É comum a formação de depósitos desses materiais desprendidos do teto nesses locais. São nesses locais que surgirão as estruturas de abatimento.

Paredes que possuem base plana e com forma alongada (Figura 38) indicam instabilidade e perda de sustentação interna, refletindo superficialmente em áreas rebaixadas ou áreas de subsidência.

Na encosta do rio Boca apertada, existe um sistema de túneis que acompanha quase paralelamente o sentido do rio, sendo este considerado o sistema principal de túneis na área devido ao seu tamanho e a sua capacidade de transmissão de água.



Figura 33 – Entrada principal do túnel na encosta do rio Boca Apertada.
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 34 – “Arco romano”, indicando estabilidade do teto do túnel.
Fonte: Acervo pessoal.

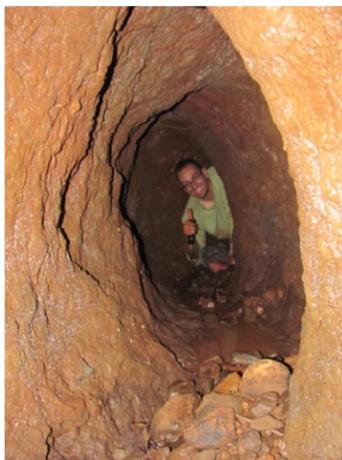


Figura 35 – Teto do túnel estabilizado com processo de entalhe do piso.
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 36 – Base sendo entalhada pela ação de fluxos concentrados.
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 37 – Teto em processo de desabamento.
Foto: Rodrigo M. Mathias (2014)



Figura 38 – Processo de desgaste lateral das paredes e acumulação de sedimentos.
Fonte: Acervo pessoal.

Existem, porém, dois túneis secundários (Figura 39 e Figura 40) em sentido transversal a esse túnel principal, que estão conectados na porção final do sistema, onde é possível verificar a existência de uma voçoroca, gerada pelo desabamento de parte do túnel.



Figura 39 - Subsidiência do teto do túnel, em túnel secundário.
Fonte: Acervo pessoal.

São nesses túneis que feições tipo subsidiência do teto do túnel aparecem, ficando evidentes em superfície pelo nítido rebaixamento do terreno.



Figura 40 - Subsidiência do teto do túnel com voçorocamento no final do túnel secundário.
Fonte: Acervo pessoal.

As feições mais expressivas na superfície são as estruturas de abatimento. No sistema principal de túneis, são encontradas quatro estruturas de tamanhos diferentes. A estrutura principal (Figura 41) fornece condições de acesso ao interior do sistema de túneis.



Figura 41 – Estrutura de abatimento principal.
Fonte: Acervo pessoal.

As estruturas menores somente indicam a conexão do túnel com a superfície e colaboram para a definição da direção por onde passa o canal subsuperficial.

4.4. RELAÇÃO ENTRE CONTROLE ESTRUTURAL E OS TÚNEIS NA ENCOSTA DO RIO BOCA APERTADA

A área de estudos aparece entre os lineamentos do rio Piquiri e rio Uruguai, sendo fortemente influenciada pelo lineamento do rio Piquiri (N60-65W) que possui 20 km de largura e 115 km de comprimento, estruturalmente com grande importância regional.

Assim sendo, foram tiradas as direções dos lineamentos adjacentes existentes nas regiões próximas ao lineamento do

Piquiri, tanto ao norte quanto ao sul, por imagens SRTM de 1 arc/seg, que apresentam áreas com erosão em túneis (Figura 42).

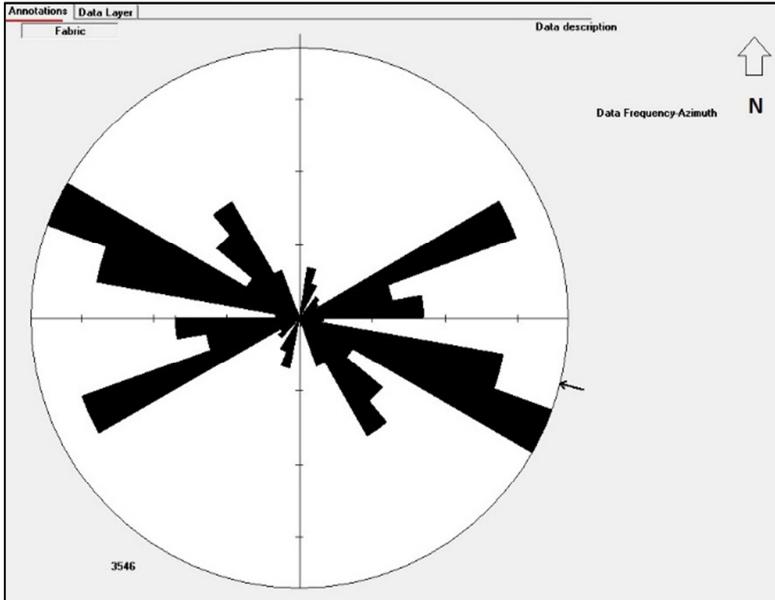


Figura 42 – Diagrama de roseta (frequência absoluta) das áreas que apresentaram erosão em túneis.

Autor: Diego Moraes Flores (2016).

Com a plotagem dos pontos de ocorrência de túneis e com a análise das frequências do aparecimento desses lineamentos menores no diagrama de roseta, é possível aferir que há predominância de direções de falhas em sentido ONO-ESSE ao norte em contraponto a uma frequência menor de direções no sentido ENE-OSO ao sul do lineamento.

Esses lineamentos promovem mudanças no relevo e desencadeiam o surgimento de feições morfológicas e adaptações da rede de drenagem.

Assim sendo, um lineamento com importância regional como o Piquiri, provoca mudanças na drenagem dos canais fluviais, provocando o rebaixamento do nível de base regional

influenciando os lineamentos adjacentes e alterando a dinâmica das vertentes até seu equilíbrio. Essa ocorrência vai de encontro ao que foi descrito por Coelho Netto (2003), pois força a drenagem das encostas e acelera os fluxos subsuperficiais.

Os túneis surgem em decorrência dos materiais acumulados nessas estruturas, do período ambiental (estável ou instável) e da topografia do depósito e não, necessariamente, por causa da estrutura em si.

Dessa forma, foi construído mapa de localização dos túneis encontrados no Paraná, no Segundo e Terceiro Planaltos Paranaenses (Figura 43). Foram plotados três túneis (Schwab, Parahutt e Cowboy) no Segundo Planalto, na cidade de Prudentópolis e 12 túneis (Rio das Pombas, Aeroporto, Sepultura, Lagoa Seca, Boca Apertada, Lima, Boa, Neves, Rio da Casa, Matchula, Vila Burei e Pedreira) no Terceiro Planalto.

A maioria dos túneis plotados, tanto ao norte quanto ao sul do lineamento do rio Piquiri, foram encontrados em materiais existentes no Terceiro Planalto que, em campo, se apresentaram como sendo depósitos de encosta. Os túneis do Segundo Planalto foram encontrados sobre solos oriundos da Formação Teresina¹³ em meio a depósitos coluviais/colúvio-aluviais.

Em períodos de instabilidade, os materiais das partes mais altas das encostas preenchem as estruturas geradas formando depósitos de materiais heterogêneos, uma vez que o selecionamento dos materiais se dá em decorrência da dinâmica dos períodos de precipitação.

De acordo com o que foi descrito por Oliveira & Lima (2004), esse fato é um indicativo de que nas cabeceiras de drenagem ocorrem dinâmicas características que podem preservar sedimentos, gerados por processos que abrangem todas as transições possíveis entre fluxos gravitacionais, densos

¹³ A Formação Teresina é constituída por siltitos acinzentados com intercalações de calcário micrítico e estromatolítico, de ambiente de planície de marés e plataforma epinerítica. Apresenta laminação paralela, ondulada e flaser (MINEROPAR, 2001).

e de baixa viscosidade com capacidade para realizar seleção granulométrica.

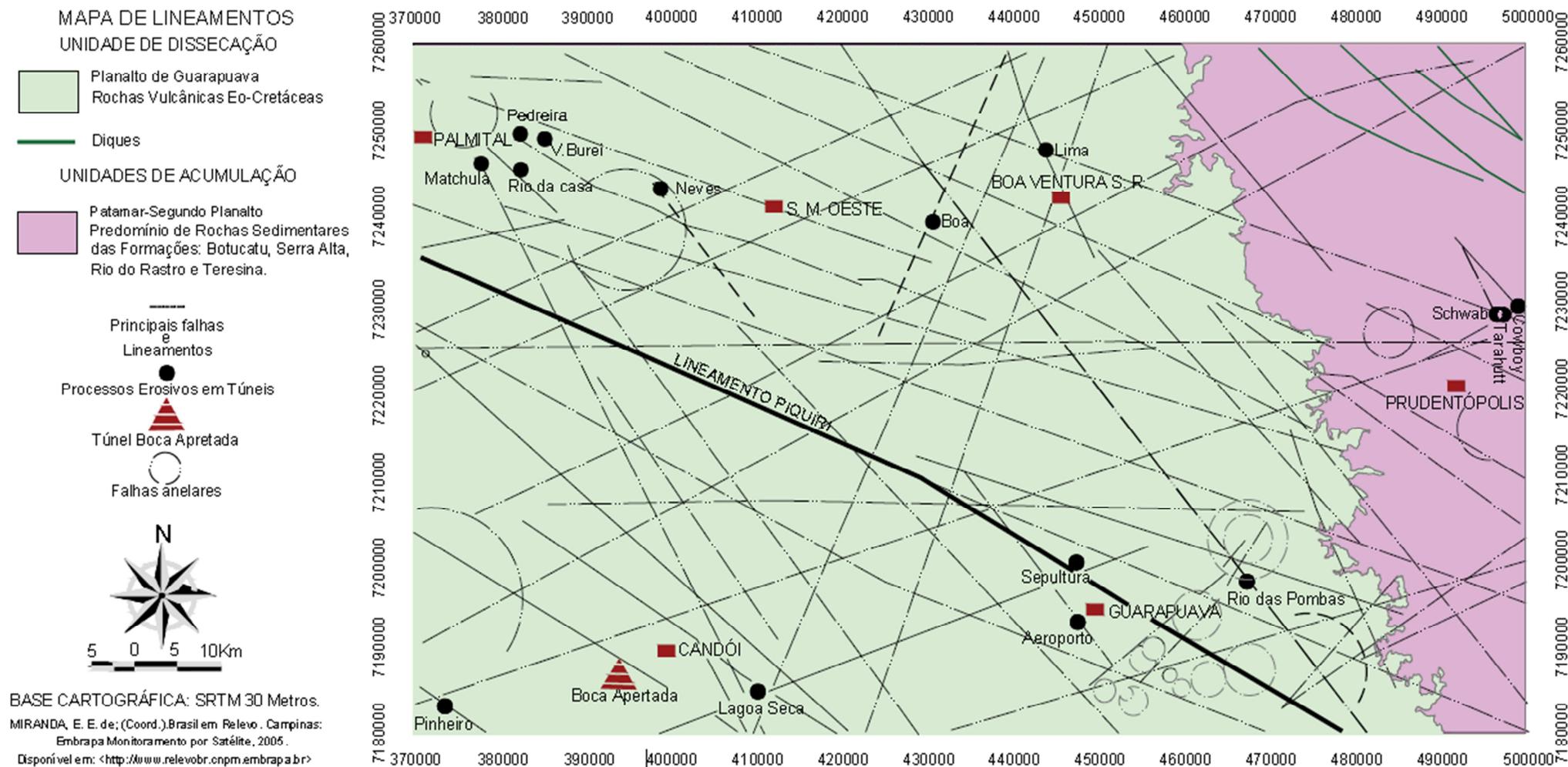


Figura 43 - Localização de túneis no Segundo e Terceiro Planaltos Paranaenses com falhas associadas.
Autora: Eliza do Belem Tratz (2016).

4.5. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS DA ENCOSTA

4.5.1. Sondagens com trado holandês

As sondagens foram feitas nas adjacências do túnel principal, com limite nas áreas com rochas aflorantes em forma de lajes, estrada e outros sistemas de túneis (Figura 44).



Figura 44 - Linha de seixos encontrada em sondagem.
Fonte: Acervo pessoal.

Na parte mais inclinada da encosta, à direita do sistema principal de túneis, foram realizadas sondagens em maior número devido ao local não apresentar nenhum túnel secundário. Esse cuidado foi tomado em função da fragilidade da encosta e

da preocupação de não iniciar um possível processo erosivo superficial da encosta (Figura 45).

Os materiais coletados, descritos em formulário próprio, (ANEXO I) e as amostras foram levados para o laboratório a fim de que fosse feita a classificação textural dos sedimentos, através dos resultados das análises granulométricas.

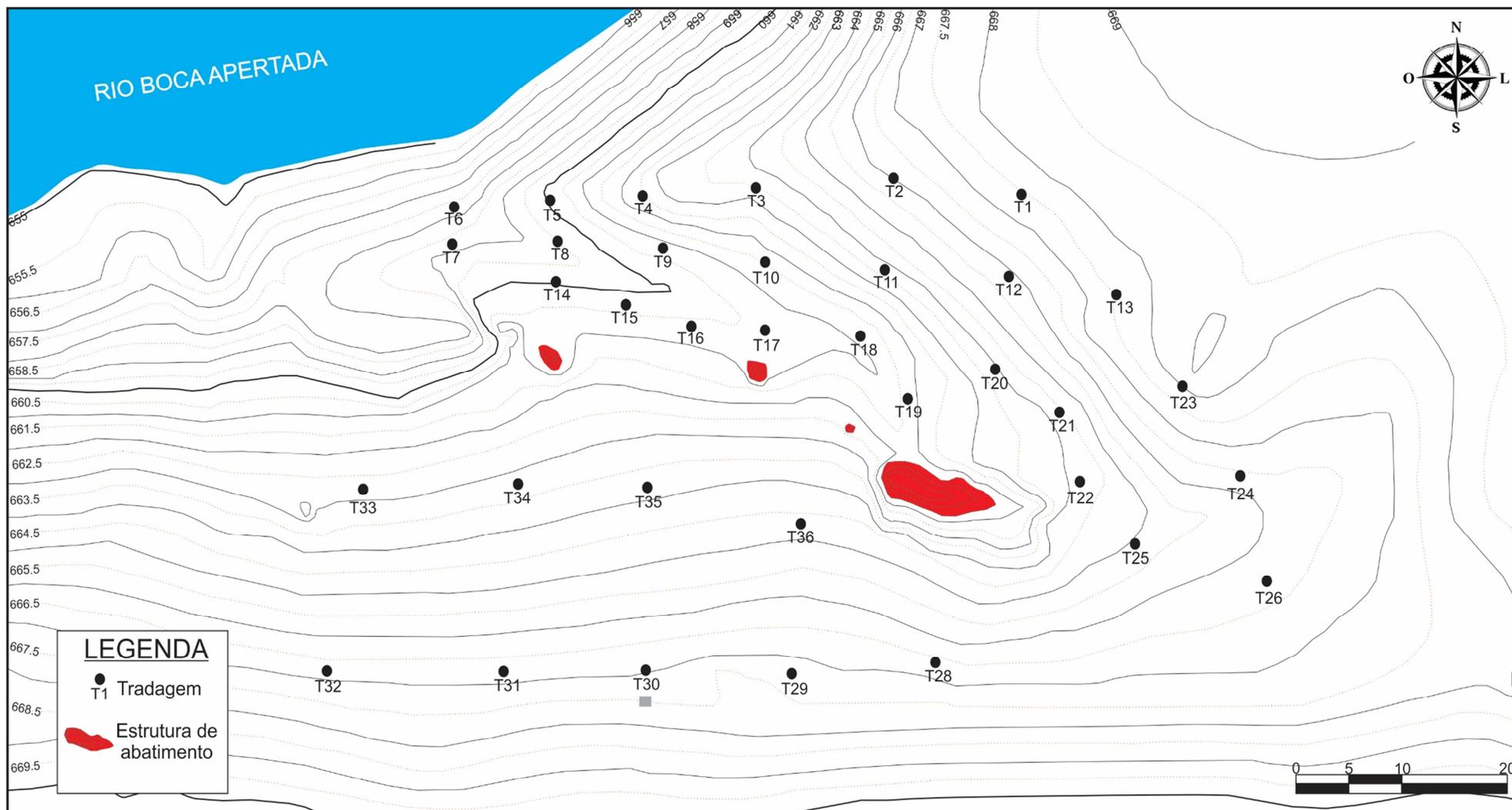


Figura 45 - Localização das sondagens em mapa com curvas de nível.
Fonte: Tiago Giacomet & Rafael Adriano de Castro (2015).

4.5.2. *Análises granulométricas*

De todas as observações feitas em campo, as variações texturais e a disposição nos materiais ao longo das sondagens foram as mais importantes, uma vez que elas auxiliaram na compreensão da organização dos materiais da encosta. Dentre as principais observações, a disposição das linhas de seixos, distribuição dos materiais, as mudanças de coloração e os fragmentos de quartzo são os mais consideráveis.

Os resultados (ANEXO I) das descrições texturais de campo indicaram predominância de textura arenosa nos materiais mais superficiais e argilosos em profundidade. Em determinadas sondagens, texturas indicando a presença de silte foram percebidas em níveis intermediários, bem como a presença de areia em camadas localizadas entre materiais argilosos.

Seixos e grânulos em linha (Figura 46 e Figura 47) foram encontrados em vários níveis dentro das sondagens, sugerindo que o material seja alúvio/coluvial e coluvial. Fragmentos de quartzo e calcedônia também foram encontrados em meio ao material, ora junto às linhas de pedra, ora espalhados de forma aleatória no material.



Figura 46 – Linhas de seixos e grânulos.
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 47 – linhas de seixos com fragmentos de quartzo.
Fonte: Acervo pessoal.

Em determinadas sondagens, foi possível verificar várias linhas de seixos e grânulos em sequência em um mesmo perfil, indicando que o material foi depositado e coberto sucessivamente, assim como apresentado por Mousinho & Bigarella (1965). Clastos de tamanhos variados também puderam ser observados nas paredes expostas da estrutura de abatimento e dentro do túnel, principalmente acumulados na base.

Com relação à cor percebida, os materiais da encosta variaram entre vermelho acastanhado de várias tonalidades e cores de alteração das rochas (vermelho amarelado).

Algumas sondagens (T1, T12 e T14) recuperaram materiais com cores variando entre bege e cinza. De acordo com a tabela de *Munsell (Munsell Color Chart, 2000)*, as cores apresentadas foram 5YR3/2, 5YR4/4, 7,5YR2,5/2, 7,5YR2,5/3, 7,5YR3/3, 7,5YR3/4, 7,5YR4/3, 7,5YR 5/3, 10YR3/4 e 10YR3/6.

Essas cores foram observadas em seções expostas na estrutura de abatimento maior, na voçoroca e dentro do túnel principal.

4.5.3. Classificação textural

Os resultados dos triângulos (ANEXO II) indicaram que o material encontrado em toda a encosta apresenta variações texturais condizentes com a dinâmica existentes em cabeceiras de drenagem.

Nas camadas superficiais, há presença de materiais com textura arenosa em decorrência de perturbações causadas pelo manejo do solo e da vegetação da encosta.

Em profundidade, os materiais têm alterações graduais e abruptas de textura, variando de texturas mais grosseiras a finas (Figura 48).

Na encosta, foram encontrados materiais com texturas classificadas como Lama (L), Lama Arenosa (LA), Lama Cascalho Arenosa (LCA), Lama Cascalhosa (LC), Areia (A), Areia Lamosa (AL), Areia Cascalho Lamosa (ACL) e Cascalho Areno Lamoso (CAL), segundo a classificação proposta por Shepard (1954).



Figura 48 - "Cabeceira" do túnel expõe materiais grosseiros em linha; notar água superficial entrando no sistema subsuperficial e linha de seixos com cristais de quartzo.

Fonte: Acervo pessoal.

Longitudinalmente, no vale, onde se encontra o túnel, são encontrados os materiais mais grosseiros da área. Essa distribuição das texturas na encosta indica o acúmulo de materiais grosseiros no eixo principal do sistema de túneis à profundidade intermediária (1,80m em média) no perfil (ver formulários de campo, ANEXO I) e também próximo à base rochosa. Esse fato é um indicativo de que texturas grosseiras favorecem a circulação de água entre camadas mais finas como proposto na Figura 24 c.

Nas paredes da estrutura de abatimento, é possível notar, ao lado esquerdo do sentido do fluxo (perfil maior com 2,85 m), seção com materiais arenosos vermelho-acastanhados na superfície do perfil. Esses materiais tornam-se mais avermelhados e homogêneos em profundidade até a proximidade da base, onde aparecem clastos angulosos a subangulosos em meio à matriz fina (areias, silte e argilas), reconhecidos em campo como fragmentos intemperizados de rochas, fragmentos de calcedônia e quartzo (Figura 49).

Na base do perfil, é encontrado material cinza-azulado em contato abrupto com o material sobrejacente, indicando nível de saturação de água e redução de ferro. Também é possível encontrar matacões e blocos rolados nesse nível (Figura 50).



Figura 49 - Perfil maior limpo dentro da estrutura de abatimento com indicação da posição do túnel e com seta indicando fragmentos de rocha.
Fonte: Acervo pessoal.



Figura 50 – Detalhe do perfil maior limpo com indicação de fragmento de rocha, clastos espalhados próximos à base e base saturada de água de cor cinza azulada com matacão no mesmo nível.
Fonte: Acervo pessoal.

Na parede da estrutura de abatimento, do lado direito, foi limpo um perfil (perfil menor com 2,25m), onde foram descritos materiais com textura arenosa de cor vermelho-acastanhada na superfície, com material subjacente de cor avermelhada e estrutura grumosa, ficando com textura mais argilosa em profundidade (Figura 51).

O contato desse material avermelhado é determinado por linha de seixos e grânulos (linha de pedra), tendo como material subjacente, argila arenosa de cor amarelada.

Abaixo desse horizonte, observa-se a transição para material argiloso com clastos de rocha e quartzo, angulosos e

subangulosos, de cor amarelada, espalhados por toda a matriz (Figura 52).



Figura 51 – Perfil menor limpo, com seta vermelha indicando direção de linha de seixos; seta preta indicando acúmulo de seixos e grânulos.

Fonte: Acervo pessoal.



Figura 52 – Concentração de seixos e grânulos em horizonte próximo a base na parede exposta do perfil menor; notar nível acinzentado na base.

Fonte: Acervo pessoal.

Esse material argiloso tem cor amarelada transicionando para cinza. O material da base do perfil apresenta cor cinza azulada, com textura muito fina com matações espalhados e saturação de água permanente.

4.5.4. Topossequências com as características físicas dos materiais

A construção de topossequências apresenta-se como um meio prático de se demonstrar como se dá a organização dos materiais nas encostas. Pode ser feita por meio da abertura de trincheiras, paredes expostas ou através da coleta de amostras em furos de sondagem.

Em locais onde aparecem sistemas de túneis, o mais indicado é a coleta de materiais a partir de sondagens, uma vez que trincheiras causam perturbações que podem desencadear o abatimento do teto e gera feições de erosão superficial na encosta.

Na encosta do rio Boca Apertada, optou-se por se fazer uma malha de pontos de sondagem e descrição dos materiais (Figura 53). Não obstante, foram limpas as paredes expostas da estrutura de abatimento e feita a observação direta do interior do túnel.

Todas as sondagens foram feitas de modo alinhado para serem confrontadas com o intuito de entender a distribuição dos materiais, de acordo com as características percebidas em campo e em laboratório (ver ANEXO I e II). Desse modo, foram construídas nove topossequências, sendo cinco transversais ao sistema de túneis e quatro longitudinais.

Todos os desenhos são ilustrações das principais características encontradas, atentos para os detalhes como o túnel em si, estrutura de abatimento e voçoroca na parte final do sistema.

Buscando não introduzir elementos a mais nas ilustrações, não foram plotadas todas as profundidades das coletas nas sondagens. As ilustrações podem ser conferidas no ANEXO I, onde estão todas as características dos materiais e todas as profundidades de recuperação de amostras.

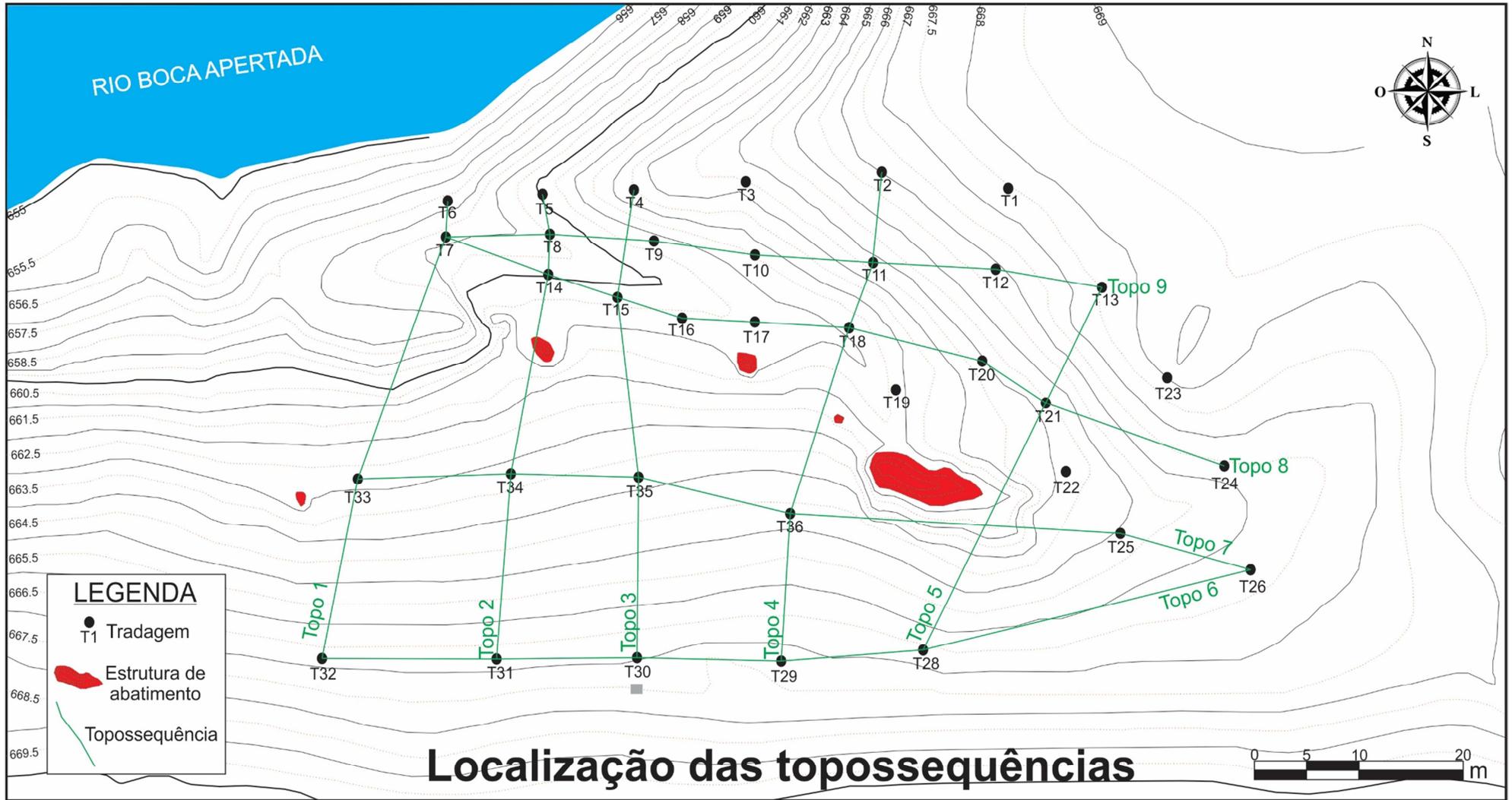


Figura 53 - Localização das topossequências.

A topossequência 1 (Figura 54) foi construída a partir das sondagens T6, T7, T33 e T32, cortando a voçoroca existente na área.

A sondagem T6 foi feita na parte alta do lado direito da encosta, em relação ao sistema de túneis, com profundidade total de 0,15m apenas. Apresenta textura arenosa, com muitos fragmentos de quartzo e areia preta, sendo, entãõ, texturalmente classificada como Lama Arenosa (LA). A T7 tem apenas 0,20m de profundidade, possui muitos fragmentos de quartzo e textura Lama Arenosa (LA), assim como na sondagem anterior.

Entre uma encosta e outra, entre as sondagens T6, T7 e T33, T32, é verificada a existência de voçoroca originada pelo desabamento da parte final do túnel. Nessa erosão linear, há um aumento da umidade e o desenvolvimento de vegetação. Nesse ponto da encosta, há a conexão entre o rio e o canal aberto pelo túnel.

A sondagem T33, com profundidade total de 1,41m, apresentou variações nos tamanhos dos grãos, que variaram da fração grânulo a seixo, com formação de linha de pedra na profundidade de 0,46m a 0,85m. Dentro do perfil, a textura percebida em campo variou de arenosa nos primeiros 0,46m e entre argilosa a areno siltosa no restante do perfil e classificada como Lama Arenosa (LA).

Na sondagem T32, a profundidade total foi de 2,30m sem grandes variações na textura dos materiais, sendo classificada em campo como material coeso e uniforme. Na profundidade próxima a 2m, foi alcançado o nível d'água e a rocha alterada.

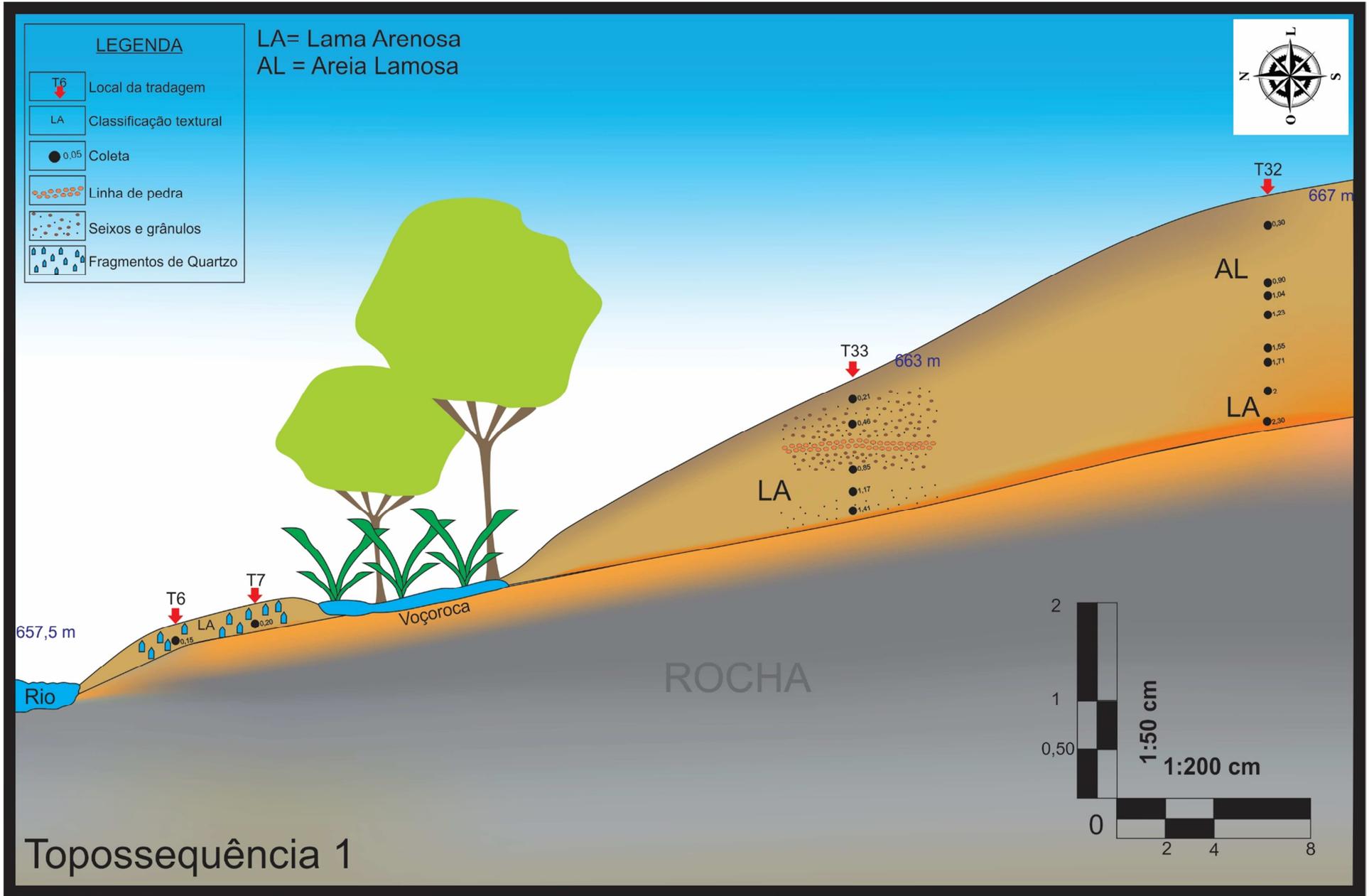


Figura 54 - Topossequência 1.

A Topossequência 2 (Figura 55) é constituída de cinco furos, três furos na parte menor da encosta (T5, T8 e T14) e dois furos na parte maior da encosta (T34 e T31). Na sondagem T5, a profundidade máxima foi de 0,47m e por todo o perfil do furo não houve mudanças abruptas nos tipos de materiais, predominando frações seixos. Na T8, com profundidade de 0,78m, há o mesmo predomínio de seixos em todo o perfil, sendo entendida como uma continuação dos materiais da T5.

Na sondagem T14, a profundidade máxima atingida foi de 0,47m. Nesse furo, há ocorrência de areias com uma tonalidade bege clara dispersa em uma matriz arenosa de cor castanho-avermelhada. A transição mostrou-se gradual em relação ao perfil anterior. Segundo os resultados das análises texturais, as três sondagens têm textura predominante de Lama Arenosa (LA).

Entre a sondagem T14 e a sondagem T34, há uma estrutura de abatimento expondo o túnel, antes de chegar ao seu final, como mostrado na topossequência 1.

Na sondagem T34, há uma mudança completa nos tipos de materiais encontrados, aparentando ser o túnel o ponto onde há a divisão mais considerada de texturas. Nessa sondagem, a profundidade máxima foi até 1,42m.

Na profundidade de 0,66m, foram encontrados fragmentos de quartzo espalhados no perfil, sendo que logo abaixo foi identificada linha de pedra, formada por seixos, grânulos e materiais de frações grosseiras. Dentro do túnel, é possível notar a presença de linhas de pedras e contatos abruptos entre materiais grosseiros e finos.

Na sondagem T35, com profundidade total de 0,90m, foi destacada a existência de fragmentos de quartzo entre a profundidade de 0,35 a 0,90m. Em campo, a percepção do alinhamento de fragmentos de quartzo é dificultada pela deformação proporcionada pelo trado, sendo possível afirmar, somente, que os fragmentos se encontram espalhados nessa parte do perfil.

Sugere-se que há uniformidade no espalhamento desses fragmentos de quartzo entre um furo e outro, dando a ideia de deposição em um mesmo momento.

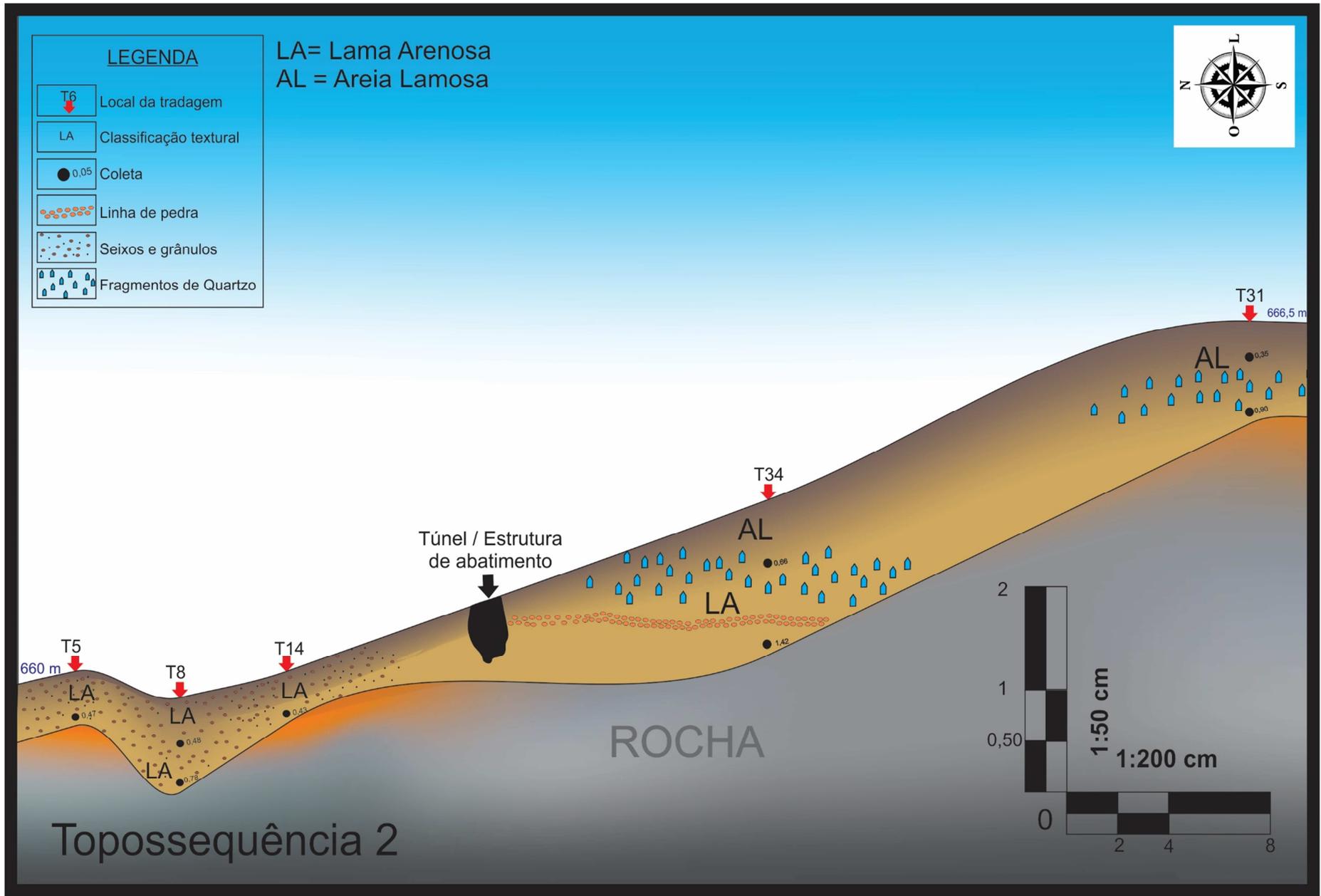


Figura 55 - Topossequência 2.

A topossequência 3 (Figura 56) foi feita transversalmente, sendo constituída por quatro sondagens (T4, T15, T35 e T30).

A sondagem T4 foi feita na parte alta do lado direito da encosta com relação ao sistema de túneis, com profundidade total de 0,53m, textura medianamente grosseira, com grânulos espalhados em sua matriz arenosa (LCA) no topo do perfil, com transição gradual para textura mais fina em profundidade (LA) e presença de seixos dispersos. Sua transição para a sondagem T15 se dá de forma gradual.

A sondagem T15, com 0,60m, apresenta materiais com texturas grosseiras espalhadas em matriz arenosa/lamosa (AL) em seu topo gradando para texturas mais finas (LA) com seixos espalhados, assim como na T4, em profundidade.

Essa sondagem foi feita em superfície onde é notado o acúmulo de materiais depositados por fluxos superficiais, de acordo com a topografia da encosta e discordante com o fluxo subsuperficial. Entre a sondagem T4 e a sondagem T35, há a interceptação do túnel, que aparece em uma parte da encosta discordante com o sentido do fluxo superficial.

Em um nível topográfico mais elevado, na parte maior da encosta, se encontra a sondagem T35, com profundidade de 2,61m. Seu topo possui materiais com textura grosseira em matriz lamosa/arenosa (LA). Notadamente encontram-se fragmentos de quartzo nas camadas mais superficiais que vão diminuindo em profundidade. Na profundidade compreendida entre 1,27m e 1,63m, são novamente encontrados fragmentos de quartzo e grânulos em meio a material de textura fina, chegando por fim a horizonte com materiais argilosos próximos à rocha.

A sondagem T30 encontra-se na parte mais alta do setor de baixa encosta, logo abaixo da estrada de acesso à área. Essa sondagem tem 2,18m, apresentando textura mais grosseira em sua camada mais superficial com presença de fragmentos de quartzo e grânulos espalhados em matriz arenosa (AL).

Em profundidade, o material com textura AL se mantém com materiais com textura mais fina nos horizontes intermediários (LA), voltam a se tornar grosseiros em profundidade.

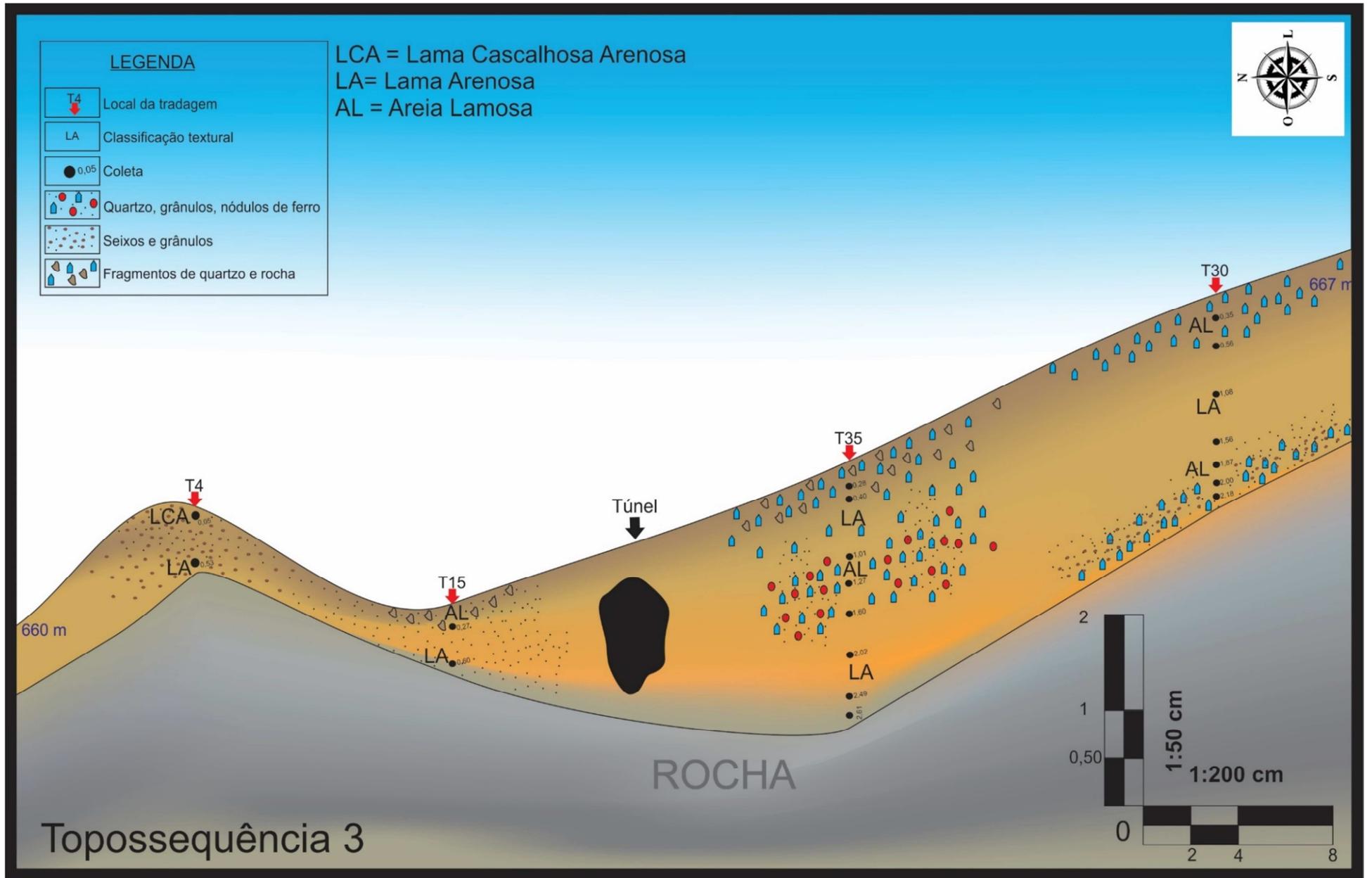


Figura 56 - Topossequência 3.

A topossequência 4 (Figura 57) foi feita transversalmente ao túnel em sua porção intermediária, sendo constituída por cinco sondagens (T2, T11, T18, T36 e T29).

A sondagem T2 possui uma profundidade total de 1,40m. Os materiais dessa sondagem se apresentam heterogêneos, sendo que nos estratos mais superficiais, encontram-se seixos e grânulos de cores esverdeadas e brancas. Abaixo desses materiais, encontra-se um predomínio de seixos e, na sequência, uma mistura de fragmentos de quartzo com seixos a uma profundidade de 0,40 a 0,80m. Não foi possível avaliar se esses fragmentos estavam alinhados. Texturalmente pode-se notar que as texturas mais grosseiras se encontravam na superfície.

A sondagem T11 foi realizada na parte alta do lado direito da encosta com relação ao sistema de túneis, com profundidade de 0,18 m com textura arenosa (LA), sem a presença aparente de quartzo. A T18, com 0,84m, apresenta textura areno argilosa (LA) com raízes em sua parte superior e grânulos no restante do furo, bem como possui material alaranjado e material preto espalhados por sua matriz.

Na outra face da encosta foi feita a sondagem T36, com um total de 2,21m e sete coletas de material até a base rochosa da encosta. Em sua parte superior, é descrito em campo, material com textura areno argilosa (AL). Em média profundidade (0,65 a 1,37m), são encontrados fragmentos de quartzo do tamanho de seixos e linhas de seixo e grânulos espalhados em matriz majoritariamente argilosa (LA). Em 1,45m a 1,96m, são novamente encontradas linhas de seixos e grânulos ainda em matriz argilosa (LA).

A sondagem T29 possui 1,48m de profundidade total e textura predominantemente, aferida em campo, como sendo argilosa, porém, após peneiramento, a textura se apresentou como sendo areno argilosa (AI). A profundidade de 0,45 a 0,68m apresenta fragmentos de quartzo dispersos e, logo abaixo, clastos de tamanhos variados também dispersos na matriz. Na amostra retirada entre 1,15 e 1,22m, aparece material arenoso de cor amarelada e logo abaixo, 1,22 a 1,48m voltam a aparecer fragmentos de quartzo até a rocha.

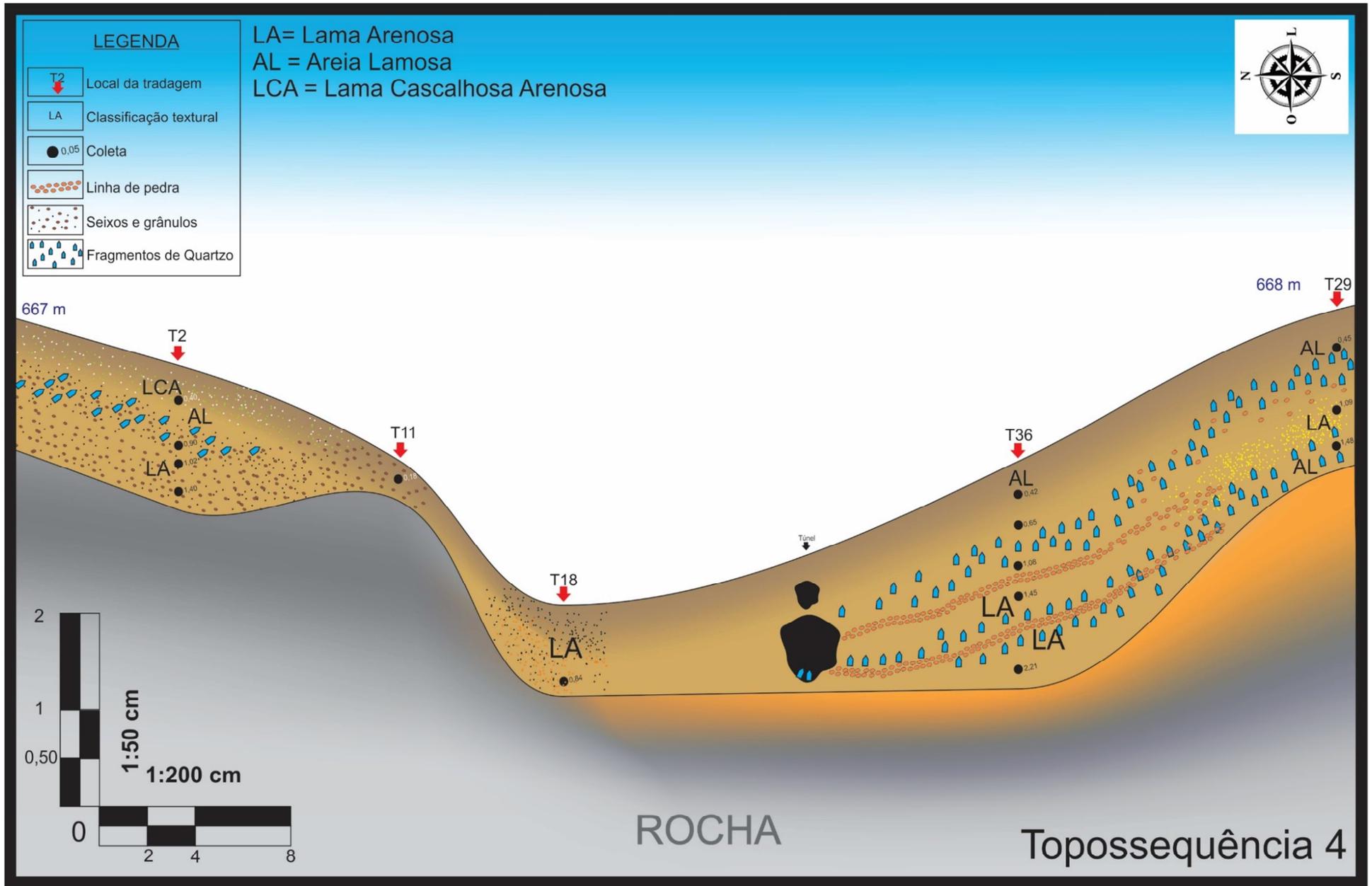


Figura 57 – Topossequência 4

A topossequência 5 (Figura 58) realizou-se na parte da encosta onde não há túnel, próxima à cabeceira da incisão aberta (T13, T21 e T28).

A sondagem T13 possui uma profundidade total de 0,80m, com aparecimento de clastos de tamanhos variados nos primeiros 0,32m (AL). Esses materiais diminuem em profundidade e apresentam minerais esverdeados e pretos por todo o perfil, sendo sugerida a ideia de que o material possui óxido de manganês e celadonita. Sua textura predominante é argilosa (LA).

Já a sondagem T21 possui 0,60m de profundidade total e textura areno siltosa e silto argilosa, reconhecidas em campo (AL e LA). Por todo o perfil, é possível encontrar fragmentos de quartzo, porém, em sua parte final, a profundidade compreendida entre 0,54 e 0,60m, são verificados seixos e grânulos aparentemente alinhados.

A sondagem T28 possui apenas 0,40m e textura predominante areno argilosa (AL), segundo descrição de campo. Por todo o furo, são encontrados fragmentos de tamanhos variados de quartzo até o impedimento do furo por um bloco rolado (ACL).

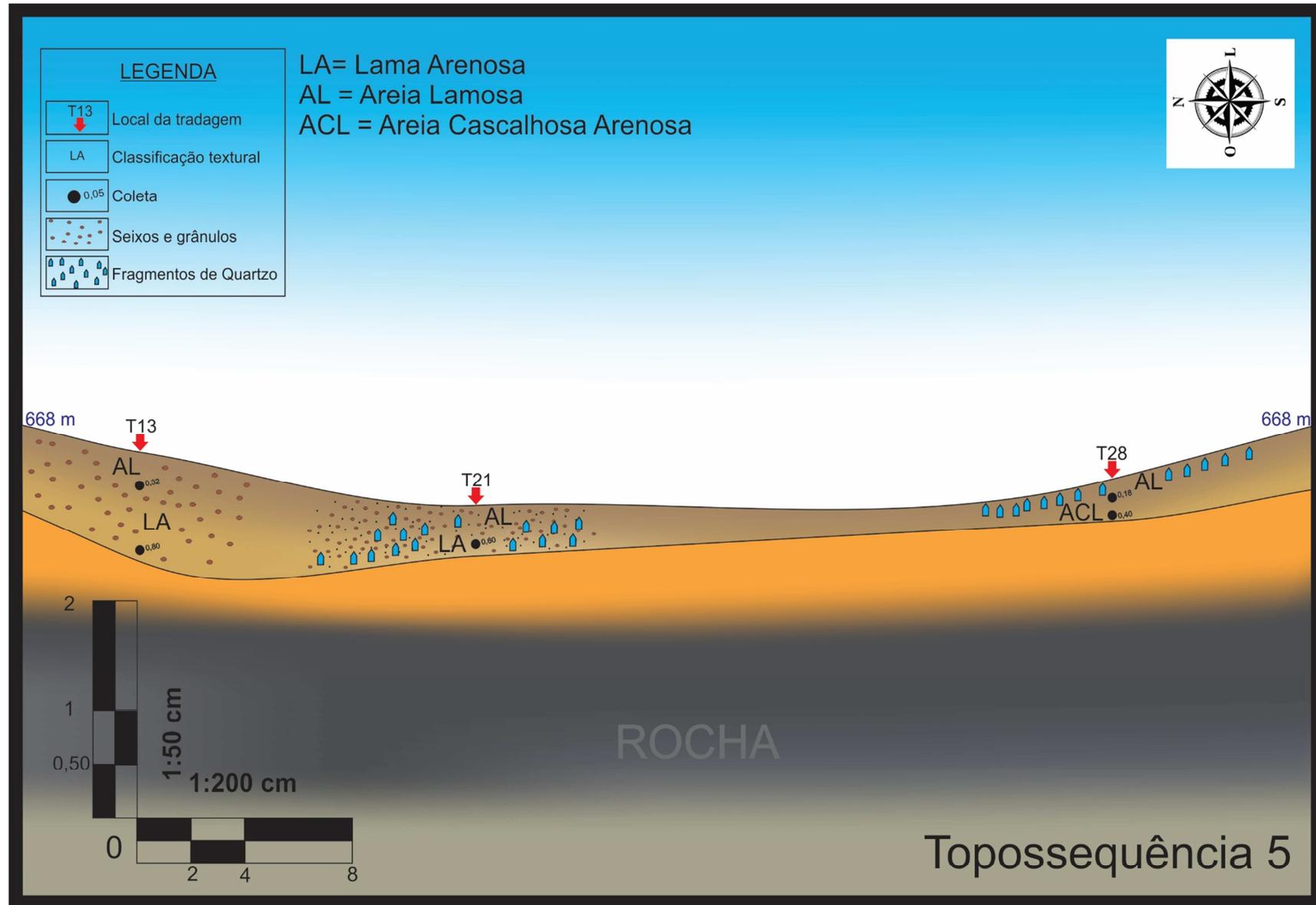


Figura 58 - Toposequência 5.

A topossequência 6 (Figura 59) é uma topossequência longitudinal ao sistema principal de túneis. É constituída por seis sondagens: T26, T28, T29, T30, T31 e T32.

A sondagem T26 possui uma profundidade total de 1,83m, em campo, foi percebida textura areno argilosa nos primeiros 0,57m e textura argilosa no restante do perfil, sem variações bruscas nas cores dos materiais e sem grandes diferenciações na umidade. Foram percebidos fragmentos de quartzo em meio ao material argiloso.

No furo T28, tem profundidade de 0,40m, com textura areno argilosa, fragmentos de quartzo nos primeiros 0,18m e presença de blocos de rochas, o que pode ajudar a explicar sua pouca profundidade.

A sondagem T29 possui uma profundidade total de 1,48m, sendo que, nos primeiros 0,45m, são encontrados fragmentos de carvão. Entre 0,45 e 0,68m, são encontrados fragmentos de quartzo, precedendo clastos de tamanhos variados (areias, grânulos e seixos). Na parte final da sondagem, voltam a aparecer fragmentos de quartzo.

Na sondagem T30, a profundidade aumenta para 2,18m. Todo o perfil tem predominância de textura argilosa com fragmentos de quartzo na parte mais superficial da sondagem e grandes fragmentos de quartzo nos últimos 0,18m juntamente com fragmentos de rocha.

A sondagem T31 apresenta uma profundidade total de 0,91m com textura predominantemente argilosa, repetindo o que foi encontrado na anterior. A uma profundidade de 0,80m, são encontrados fragmentos de quartzo. Na sondagem T32, há um aumento na profundidade da sondagem, chegando a alcançar 2,30m. Nesse furo, a textura predominante continua sendo argilosa. Nos últimos centímetros do furo, é encontrada água em cima de material argiloso acinzentado, classificado em campo como material hidromorfizado (glei) sobreposto a material amarelado típico de alteração de rochas da região.

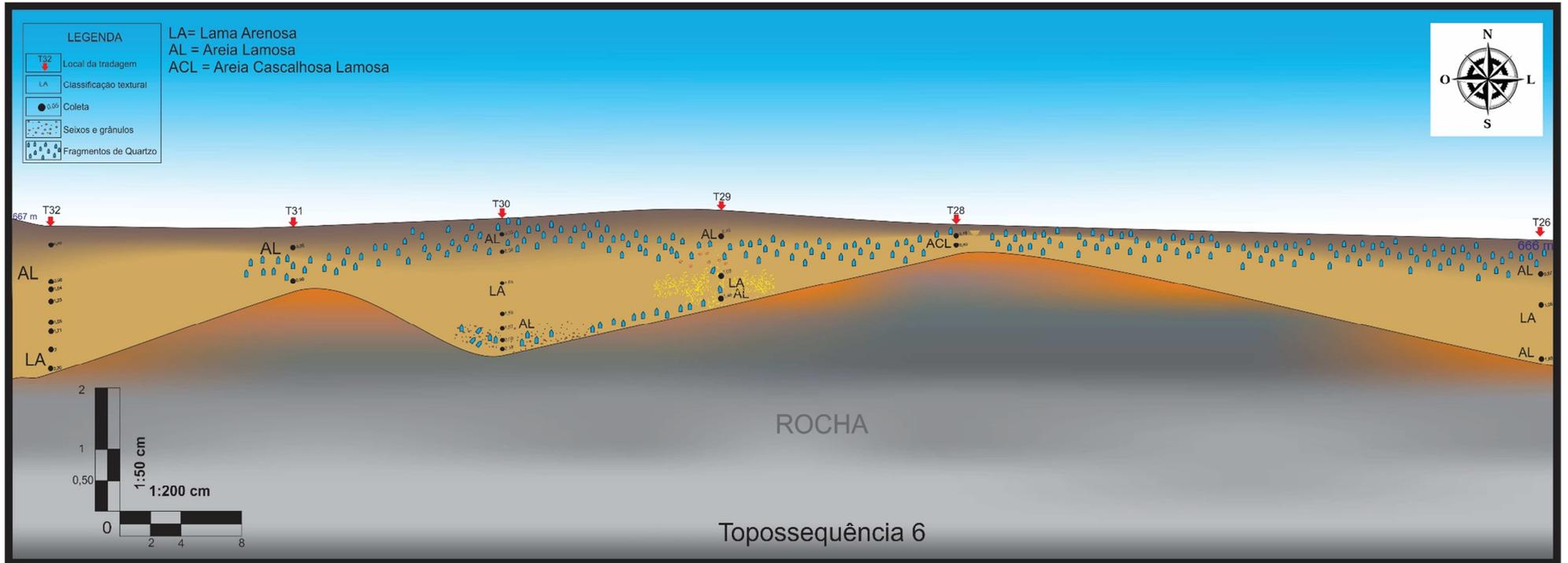


Figura 59 – Topossequência 6.

A topossequência 7 (Figura 60) também é constituída de seis furos (T26, T25, T36, T35, T34 e T36), feita em sentido longitudinal ao sistema principal de túneis da encosta.

O furo T26 possui uma profundidade total de 1,83m e, em campo, foi percebida textura areno argilosa nos primeiros 0,57m e textura argilosa no restante do perfil, sem variações bruscas nas cores dos materiais e sem grandes diferenciações na umidade. Foram notados fragmentos de quartzo em meio ao material argiloso.

A sondagem T25 alcançou uma profundidade de 3,20m. Até os 0,58m, foram encontradas raízes transportadas por água misturadas ao material argiloso. Entre 0,80 e 1,14m foram encontrados fragmentos de quartzo, justamente onde a plasticidade aumentou dentro do perfil. Nas amostras 7 e 8, foram localizados fragmentos de calcedônia e linha de pedra com clastos de tamanhos variados e fragmentos de quartzo. A T36 tem uma profundidade total de 2,21m e, em sua parte superior, é descrito em campo, material com textura areno argilosa (AL). Em média profundidade (0,65 a 1,37m), foram notados fragmentos de quartzo do tamanho de seixos e linhas de seixo e grânulos espalhados em matriz majoritariamente argilosa (LA). Em 1,45m a 1,96m, novamente encontraram-se linhas de seixos e grânulos ainda em matriz argilosa (LA).

A sondagem T35 possui profundidade de 2,61m. Em seu topo, possui materiais de textura grosseira em matriz lamosa/arenosa (LA). Notadamente, encontram-se fragmentos de quartzo nas camadas mais superficiais que vão diminuindo em profundidade. Na sondagem T34, a profundidade máxima foi até 1,42m. Aos 0,66m, estavam perceptíveis fragmentos de quartzo espalhados no perfil, sendo que, logo abaixo, identificou-se uma linha de pedra, formada por seixos, grânulos e materiais de frações grosseiras. Dentro do túnel, é possível notar a presença de linhas de pedras e contatos abruptos entre materiais grosseiros e finos.

A sondagem T33, com profundidade total de 1,41m, apresentou linha de pedra na profundidade 0,46 m a 0,85m. Dentro do perfil, a textura percebida em campo variou de arenosa nos primeiros 0,46m e entre argilosa a areno siltosa no restante do perfil, tendo sido classificada como Lama Arenosa (LA).

A topossequência 8 (Figura 61) possui nove furos (T24, T21, T20, T18, T17, T16, T15, T14 e T7).

A sondagem T24 possui uma profundidade total de 0,61m, textura grosseira e fragmentos de quartzo e rocha. Já a sondagem T21 possui 0,60m de profundidade total e textura areno siltosa e silto argilosa reconhecidas em campo (AL e LA). Por todo o perfil, é possível encontrar fragmentos de quartzo, porém, em sua parte final, a profundidade compreendida entre 0,54 e 0,60m, é possível verificar seixos e grânulos aparentemente alinhados.

A sondagem T20 possui profundidade total de 1,10 m com presença de material grosseiro por todo o perfil, formando pelo menos duas linhas de pedra bem marcadas.

A T18, com 0,84m, apresenta textura areno argilosa (LA) com raízes em sua parte superior e grânulos no restante do furo. Possui material alaranjado e material preto espalhados por sua matriz. A T17, tem 0,72m com presença de materiais grosseiros em sua parte superior e materiais com texturas mais finas em profundidade.

A sondagem T16 apresenta profundidade total de 0,50m e materiais grosseiros, assim como na sondagem anterior. A sondagem T15, com 0,60m, apresenta materiais com texturas grosseiras espalhadas em matriz arenosa/lamosa (AL) em seu topo, gradando para texturas mais finas (LA) com seixos espalhados.

Na sondagem T14, a profundidade máxima atingida foi de 0,47m. Nesse furo, há ocorrência de areias com uma tonalidade bege clara dispersa em uma matriz arenosa de cor castanho-avermelhada, típica dos solos formados na região. A transição mostrou-se gradual em relação ao perfil anterior. Segundo os resultados das análises texturais, as três sondagens tem textura predominante de Lama Arenosa (LA).

A sondagem T7 tem 0,20m de profundidade, possui muitos fragmentos de quartzo e textura Lama Arenosa (LA).

A topossequência 9 (Figura 62) é constituída de sete furos (T7, T8, T9, T10, T11, T12 e T13).

Na sondagem T7, o perfil tem apenas 0,20m de profundidade, possuindo muitos fragmentos de quartzo e textura de Lama Arenosa (LA). Na T8, com profundidade de 0,78m, há predomínio de seixos em todo o perfil.

A sondagem T9 possui 2,45m, onde foram feitas 10 coletas de materiais. Por quase a totalidade do perfil, foram encontrados materiais grosseiros heterogêneos, com clastos variando dos tamanhos grânulos a calhaus. Na profundidade compreendida entre 1,32 a 1,56m, é possível identificar linha de pedra bem marcada.

Na sondagem T10, com profundidade de 1,20m, são encontrados seixos e grânulos acumulados em determinadas profundidades do perfil. Todo esse material se encontra misturado a materiais argilosos, presentes em todo o perfil. A sondagem T11 tem profundidade de 0,18m com textura arenosa (LA), sem a presença aparente de quartzo.

Na sondagem T12, com profundidade total de 0,88 m, são descritos materiais grosseiros no tamanho de seixos espalhados por todo o perfil. A textura predominante, percebida em campo, foi arenosa.

A sondagem T13 possui uma profundidade total de 0,80m, com aparecimento de clastos de tamanhos variados nos primeiros 0,32 m (AL). Esses materiais diminuem em profundidade. Apresentam minerais esverdeados e pretos por todo o perfil, sendo sugerida a ideia de que o material possui óxido de manganês e celadonita. Sua textura predominantemente é argilosa (LA).

4.5.5. Caracterização dos materiais da encosta por difratometria de raios X

Para o entendimento da mineralogia presente em solos, devido a sua complexidade, é necessária a compreensão sobre a geologia e tudo o que for relativo à origem do material.

Dessa forma, as amostras coletadas são transformadas em pó e utilizadas para análises qualitativas. Foram coletadas 141 amostras de solo no total, sendo que foram enviadas para análise de difratometria de raios X 25 amostras (ANEXO III). Todas as amostras foram pulverizadas e previamente preparadas para análise de difratometria de raios X para o método do pó.

Os principais picos encontrados nas amostras foram elencados e suas características principais descritas a seguir.

a) Quartzo - SiO_2

O quartzo em forma de pegmatitos ocorre no topo das colinas, em geodos nas rochas, sendo um bom indicador de processos de erosão e remobilização de materiais. São majoritariamente incolores, apresentando-se como cristais subédricos e euédricos de tamanhos variados. Em determinados estratos da encosta, encontram-se alinhados em locais, que indicam perda de materiais finos e maior heterogeneidade granulométrica, o que influencia diretamente na circulação dos fluxos internos de água na encosta.

b) Magnetita - Fe_3O_4

A magnetita ocorre como um mineral bem cristalizado, que não é considerado de origem pedogênica. Segundo Costa & Bigham (2009), esse mineral tende a se acumular em sulcos de erosão de solos derivados de rochas eruptivas básicas.

Esse mineral pode ser formado pela oxidação de Fe^{2+} em solução ou/e pela ação de bactérias existentes no solo. Possui

estrutura isométrica, de classe hexaoctaédrica, da família dos óxidos, comumente encontrado junto a acumulações de sedimentos em frações mais grosseiras. A forma de ocorrência da magnetita são cristais octaédricos que possuem em comum a face (111).

Pertence ao grupo dos espinélios, mas, com estrutura inversa do espinélio, determina que os sítios tetraédricos estejam ocupados com Fe^{3+} , os sítios octaédricos sejam ocupados por Fe^{3+} remanescentes, e os Fe^{2+} produzam a fórmula química $(\text{Fe}^{3+})^{\text{T}}(\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+})^{\text{O}}\text{O}_4$. Diferentemente dos outros óxidos de Fe, a magnetita apresenta Fe^{2+} e Fe^{3+} em sua constituição química.

c) Maghemita – (Fe_2O_3 , $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)

A maghemita apresenta-se como um mineral de estrutura isométrica, de um espinélio não-estequiométrico, muito parecida com a estrutura da magnetita, sistema cristalino cúbico ou tetragonal, porém é um polimorfo da hematita, da classe hexaoctaédrica, da família dos óxidos.

Comum em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas básicas, sendo facilmente identificada com o uso de imãs. Sua gênese está atrelada à oxidação de Fe^{2+} da magnetita durante o intemperismo ou queima de resíduos orgânicos na superfície dos solos na presença de outros óxidos de Fe (SCHWERTMANN & TAYLOR, 1989 *apud* COSTA & BIGHAM, 2009).

d) Hematita - (Fe_2O_3)

A hematita é um óxido comum em regiões tropicais e intertropicais quentes e úmidas, acumulando em solos de drenagem livre, geralmente em posições estáveis do relevo (plano e ondulado), derivados de diferentes materiais de origem (COSTA & BIGHAM, 2009).

Kampf (1981) reportou que altas temperaturas favorecem a formação da hematita, enquanto pH baixo, alta umidade e alto carbono orgânico favorecem a formação da goethita

(TREMOCOLDI, 2003). Juntamente à goethita, são de longe, os óxidos mais comuns.

e) Goethita - $FeO(OH)$

A goethita ocorre em solos formados a partir de rochas com baixa concentração de Fe em sua composição, em climas regionais mais frios e úmidos ou posições de relevo que facilitam o acúmulo de água ou temperaturas mais baixas (COSTA & BIGHAM, 2009).

É responsável pela cor amarelada dos solos, sendo que, em muitos solos avermelhados, a goethita é associada à hematita que é o segundo óxido de ferro mais abundante nos solos (TREMOCOLDI, 2003). É formada nas etapas iniciais do intemperismo e é associada com solos jovens ou nos horizontes próximos as rochas.

f) Caulinita - $Si_2Al_2O_5(OH)_4 + 4H_4SiO_4 + 2K^{+} + 2OH^{-}$

A caulinita é um argilomineral com formação favorecida por condições de intenso intemperismo químico e lixiviação dos produtos da dissolução dos minerais, principalmente cátions de caráter básico (Ca^{2+} , Mg^{+2} , K^{+} , Na^{+}) e sílica (MELO & WYPYCH, 2009), sendo encontrada na maioria dos climas e solos, sob diversas condições de alteração (VELDE & MEUNIER, 2008).

Em solos de clima tropical úmido, apresenta, frequentemente, baixa cristalinidade ou, de acordo com Brindley *et al.* (1986), alto grau de desordem estrutural. Interfere em vários processos físico-químicos do solo: formação de agregados, porosidade, retenção de água, drenagem, reações de troca, lixiviação de nutrientes, etc. (MELO & WYPYCH, 2009).

g) Gibbsita - $(Al(OH)_3)$

A gibbsita é descrita como um hidróxido de alumínio de estrutura monoclinica, da classe prismática com alta superfície específica e alta densidade de carga, o que lhe confere grande

influência sobre as propriedades físico-químicas do solo. Em regiões com rochas de caráter básico ou calcários, não há favorecimento para a formação de gibbsita.

Velde & Meunier (2008) afirmam que a presença de gibbsita nas fases iniciais de intemperismo (em regiões temperadas da Europa), na zona de alteração (água/rocha), tem relação com a drenagem rápida das encostas em decorrência de sistemas de fraturas ou alta porosidade.

A via pedogênica para a formação de gibbsita por dessilicação de aluminossilicatos primários ou secundários é condicionada pela intensidade de lixiviação, a qual é afetada pela precipitação pluvial, temperatura e material de origem, topografia, nível do lençol freático, vegetação e tempo.

h) Montmorilonita - $(Mg, Ca)O \cdot Al_2O_3 \cdot Si_5O_{10} \cdot nH_2O$

A montmorilonita ocorre como um argilomineral do grupo dos filossilicatos 2:1, e pode se formar como resultado de intemperismo de outros minerais (AZEVEDO & VIDAL-TORRADO, 2009). Suas placas apresentam perfil irregular, com tendência a se agregarem no processo de secagem e boa capacidade de delaminação quando em contato com a água.

Quando as lamelas individuais de montmorilonita são expostas à água, as moléculas de água são adsorvidas na superfície das folhas de sílica, que são então separadas umas das outras. Esse comportamento é chamado de inchamento interlamelar e é controlado pelo cátion associado à estrutura da argila. A espessura da camada de água interlamelar, varia com a natureza do cátion adsorvido e da quantidade de água disponível (SILVA & FERREIRA, 2008).

Em solos tropicais, a ocorrência de esmectitas é restrita, porém o contraste das propriedades das esmectitas com a dos minerais 1:1 e óxidos, torna sua presença bastante importante, mesmo em baixos teores (AZEVEDO & VIDAL-TORRADO, 2009).

i) Ilita - $(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, H_2O]$

A ilita ocorre como um hidróxido de alumínio de estrutura monoclinica, que pode ser formada através da intemperização da muscovita/feldspatos.

Uma parte significativa desse mineral pode ter origem na transformação da esmectita ou, o mais provável, é que o solo tenha fontes diferentes de minerais para formar a ilita (VELDE & MEUNIER, 2008), sendo comumente relatada em quase todos os tipos de solos e zonas climáticas, que possuam rochas básicas (basaltos, diabásios, serpentinas, etc.) e rochas eruptivas vítreas.

4.5.6. Considerações sobre o drx das amostras

Foram realizadas análises de difratometria de raios X com as frações finas de sondagens aleatórias feitas na encosta, onde foram feitas análises qualitativas dos picos existentes. O intuito da aplicação da técnica seria identificar possíveis minerais que pudessem influenciar na gênese da erosão em túneis.

Foram identificadas picos de Maghemita (PDF 00-004-0755 Fe_2O_3), Ilita (PDF 00-002-0042 $(Na, K)Al_2(Si_3AlO_{10})(OH)_2$), Caulinita (PDF 00-001-0527 $Al_2Si_2O_5(OH)_4$), Montmorilonita (PDF 00-002-0009 $Si_{3.74}Al_{2.03}Fe_{0.03}Mg_{0.02}.O_{11}$), Hematita (PDF 00-002-0915 Fe_2O_3), Quartzo (PDF 00-001-0649 SiO_2), Magnetita (PDF 00-001-1111 Fe_3O_4), Rutilo (PDF 00-001-1292 TiO_2), Anatásio e Gibbsita.

O reflexo de maior intensidade em todas as amostras é o do quartzo. Sua presença relaciona-se ao grau de evolução e reserva mineral por longos períodos nos solos. Para o caso específico da encosta, o quartzo não apresenta grande influência nas propriedades químicas, ainda que esse mineral, quando em frações maiores (areias, grânulos, etc.) tenha grande influência nas propriedades texturais, principalmente as que dizem respeito à porosidade do material, quando em grande proporção ou

acumulado em determinados estratos ou setores. Essa influência está relacionada diretamente ao seu acúmulo ao longo do tempo devido a sua resistência ao intemperismo.

Nas amostragens, apareceram fragmentos de quartzo que variavam de grânulos até calhaus, dando indicações de que o material foi mobilizado das partes mais altas da encosta, onde há geodos com cristais.

A magnetita é um mineral comum nos solos de origem basáltica e foi identificada em quase todas as amostras. Nas amostras T14-1, T18-1, T25-8, T30-5, T35-3 e T36-5, foram as únicas amostras que não apresentaram Magnetita. Essa pode ser uma indicação de locais que não são propícios à acumulação desse mineral, comum em locais com intenso processo erosivo.

A maghemita, juntamente à magnetita, é um dos óxidos ferromagnéticos mais comuns nos solos de origem basáltica, tem sua existência atrelada a questões de fertilidade dos solos e também os mais importantes minerais magnéticos. Aparece nas frações mais grosseiras do solo, sendo um mineral secundário originário da magnetita.

A hematita, além de dar uma coloração avermelhada típicas dos solos da área, aparece em todas as amostras, porém, nas amostras T3-1, T3-4, T14-1, T12-1, T21-1, T29-1, T30-5, T35-5, T36-5, os reflexos aparecem com a base larga, podendo estar mascarados.

Essa observação é pertinente à natureza da hematita, que ocorre como partículas pequenas e móveis, podendo ser mobilizadas se ocorrer acúmulo de água em determinados estratos. Na base do túnel, é possível verificar a existência de argila com indicação de redução e, conseqüentemente, perda desse óxido. A hematita encontrada sugere evolução do solo de acordo uma sequência de transformações da magnetita para maghemita para hematita, mesmo carecendo de mais estudos sobre esses minerais.

A goethita apresentou seus principais reflexos nas amostras T12-1, T12-3, T14-1, T21-1, T12-3, T29-4, T36-5 e

T12-3. É o mineral responsável por dar coloração amarelada aos solos, se desenvolver em regiões de clima frio e também é o mineral que possui interação com a matéria orgânica.

Seu desenvolvimento pode indicar que ocorreram mudanças de um clima mais quente para um mais frio, além de indicar uma topografia menos declivosa, mais plana que a atual. Pode ter origem a partir da hematita, se de fato for comprovada as alterações climáticas.

Nas amostragens feitas, foram encontrados nódulos de ferro espalhados nos materiais, os quais foram identificados como sendo goethita. Para a análise das propriedades físicas do solo, a goethita soma-se a outros fragmentos e agregados, corroborando para a melhor infiltração e circulação de água na encosta pelo aumento da porosidade dos materiais.

Dentre os minerais mais comuns dos solos brasileiros, está a caulinita, que apresentou picos em quase todas as amostras de DRX da encosta, menos nas amostras T15-1 e T15-2.

A importância da caulinita para o processo de erosão em túneis é seu aparecimento em estratos intermediários, pois suas características de agregação podem corroborar para uma melhor drenagem e favorecimento do processo de erosão por vazamento, expulsando partículas menores e mais móveis que estejam entre os agregados maiores. Devido a sua estrutura lamelar, propicia também a retenção de água e, por vezes, apresenta expansividade e alta plasticidade.

Para que seja constatada sua participação no processo de gênese e evolução dos túneis, é necessário sua quantificação e sua qualificação, quanto ao grau de intemperismo, uma vez que sua formação não se dá somente a partir de minerais primários.

A gibbsita apresenta reflexos nas amostras T25-1, T12-1, T3-1, T16-1, T15-1, que são amostras das camadas mais superficiais dos solos da encosta. Os reflexos voltam a aparecer nas amostras T29-4, T30-5 e T35-5, que são intermediárias.

Na superfície, o aparecimento de gibbsita é indicativo de boa infiltração devido a sua capacidade de formar agregados e aumentar a porosidade. Como a encosta se apresenta como um depósito de materiais, a presença de gibbsita em estratos intermediários, indica boa circulação de água e porosidade alta.

Uma das principais contribuições da gibbsita para o processo de erosão em túneis, seria a formação de pseudo-silte, uma partícula altamente móvel que seria expulsa por meio de exfiltração de paredes expostas ou vazios no solo. Esse fato só pode ser comprovado para a gênese da erosão em túneis, com a quantificação dos DRX, Fluorescência de raios X e micromorfologia dos materiais da encosta.

A montmorilonita e a illita, que aparecem em alguns reflexos, geram dúvidas quanto a sua existência, uma vez que seus reflexos possuem base larga e podem ser mascarados. Tomando como certa sua existência na encosta, sua origem pode estar atrelada à presença de brechas peperíticas, material avermelhado que foi identificado em rochas da região e na área em blocos rolados e pequenas intrusões em forma de diques.

5. CONCLUSÃO

Os túneis são formas/feições que aparecem nas encostas naturalmente, em decorrência da dinâmica das águas subsuperficiais. Das observações e resultados obtidos para a confecção deste trabalho, não foi verificada a existência de túneis gerados por perturbações ou alterações antrópicas, mas, sim, da evolução das formas em decorrência de mudanças no ambiente onde já estava instalado o processo de erosão em túneis. Dessas alterações antrópicas nas encostas, as mais notáveis são a derrubada da mata para plantação de pastagens e desvio de águas superficiais em decorrência da construção de estradas.

De modo contrário ao que sempre foi postulado sobre erosão dos solos, o processo erosivo que está relacionado à formação dos túneis não tem ligação direta com a retirada de vegetação, uma vez que muitos dos túneis encontrados durante a pesquisa, ainda estão sob a proteção da mata, demonstrando assim que esse processo erosivo não é um processo de degradação do ambiente, como é regularmente discutido por vários autores.

Na encosta do rio Boca Apertada, o sistema de túneis encontrado está em estágio intermediário de evolução, com sua parte final completamente exposta em incisão linear aberta (voçoroca), com estruturas de abatimento ao longo do canal subsuperficial e com subsidência de toda a encosta, formando um vale em “V”. O sistema de túneis provoca alterações significativas no relevo de sua área de influência, sendo caracterizado como um processo natural e de importância hidrogeomórfica na evolução do relevo.

Entre as modificações mais importantes no modelado, estão: a subsidência da superfície gerada pela perda de material em subsuperfície, o desabamento de parte do teto (estruturas de

abatimento), surgimento de incisões lineares abertas (voçorocas) e desvio dos fluxos superficiais para o interior do túnel.

Com relação às hipóteses aventadas para a origem da formação do túnel, optou-se por se trabalhar as que estavam ligadas às questões dos componentes químicos do solo da encosta. No decorrer dos trabalhos, passou-se a se considerar como de maior relevância a questão de controle estrutural da região para a gênese do processo erosivo.

Sobre a primeira hipótese, os resultados não indicaram nenhum mineral incomum aos solos da região que pudesse favorecer o processo erosivo subsuperficial.

O destaque maior ficou por conta do aparecimento de reflexos de montmorilonita e illita nos difratogramas de raios X algo que pode ser explicado pela existência de brechas peperíticas e sedimento em algumas pequenas porções das rochas da área e/ou em diques esverdeados.

Desses minerais, somente a montmorilonita tem propriedades expansivas, porém sua relação com os processos erosivos em regiões subtropicais não é bem clara. Em regiões de clima árido, minerais expansivos e sódicos tem um efeito mais proeminente na desestruturação do solo e conseqüentemente no início de processos erosivos do que em regiões de clima tropical e subtropical.

Excluindo-se a possibilidade de alterações no comportamento dos materiais da encosta pela atividade de minerais expansivos, voltam-se os estudos para o comportamento da caulinita, que se apresenta como um mineral com alta desordem estrutural nos solos da região devido ao intemperismo menos proeminente. Toda essa desordem tende a ter reflexos no comportamento físico dos materiais, como agregação e solubilização.

O mineral que se apresentou como o mais relevante para o processo de erosão em túneis é, sem dúvidas, a gibbsita. A gibbsita é um mineral que possui forte relação com questões ligadas à formação de agregados e à existência de frações do

tamanho de silte, que possuem alta mobilidade entre agregados. A presença desse filossilicato poderia ser decisiva como ponto de partida para a erosão em túneis, se estes se desenvolvessem em materiais autóctones. No caso da encosta em estudo, os materiais são alóctones.

Desse modo, entende-se que os minerais presentes na encosta do rio Boca Apertada não possuem influência preponderante na gênese da erosão em túneis, porém carecem de maiores estudos para o entendimento das funções exercidas por cada mineral no material, não podendo ser excluídas essas possibilidades em outras áreas.

Sobre as questões relativas à textura dos materiais, a característica principal é a existência de materiais heterogêneos espalhados por toda a encosta, indicando que o material foi depositado. As topossequências ilustram as diferenças dos materiais nos diversos estratos da encosta, em todos os sentidos.

Em campo, ainda é possível ver calhaus e matacões espalhados em meio ao material, indicando períodos de instabilidade elevada na região. No eixo principal onde está localizado o túnel, o imbricamento dos materiais fica clara a existência de um antigo canal que foi entulhado e reativado como túnel.

Esses materiais imbricados também se apresentam muito heterogêneos quanto ao tamanho de seus clastos e sua composição (rochas frescas, parcialmente intemperizadas e fragmentos de quartzo), sendo chamado no texto de “cabeceira do túnel” pela sua contínua descarga de água, mesmo em períodos de estiagem. Nesse setor, a porosidade observada é alta, influenciando o túnel por ser um local de fornecimento de água subsuperficiais, em períodos de estiagem, e por captura de fluxos superficiais, em eventos de pluviosidade.

Com relação às questões relativas ao controle estrutural da área, foi identificado que o túnel se desenvolveu nos sedimentos

depositados no interior de um falhamento. Observando outros túneis próximos, no Terceiro e Segundo Planaltos, notou-se que todos os túneis se desenvolveram sob as mesmas influências.

É importante salientar que a falha em si não provoca o desenvolvimento do túnel, uma vez que esta é muito mais antiga, porém possibilita a acumulação de sedimentos e condiciona a drenagem pelo rebaixamento do nível de base, que é controlado pela falha do rio Piquiri, a principal feição estrutural da região.

Com a junção da falha, depósito de materiais heterogêneos, drenagem forçada, topografia e períodos alternados de estabilidade e instabilidade climática, há a ocorrência de túneis.

Levando em consideração as questões ligadas à difratometria de raios X dos materiais da encosta, análise dos condicionantes estruturais e análise textural, é possível compreender que os túneis têm sua origem a partir do movimento de água em subsuperfície, que circula através de estratos de materiais mais porosos, como ilustrados nas topossequências.

A topografia com baixa declividade da encosta também possibilita a existência do túnel, uma vez que os materiais conseguem se estabilizar sem desabar conforme é erodido. Locais com topografia mais íngreme também podem dar origem ao mesmo processo, mas sem a formação de túneis em decorrência do desmoronamento e escorregamento dos materiais.

Sua evolução se deu ao longo do tempo e de fatores ligados à circulação de água na encosta. Durante sua evolução, o túnel forneceu sedimentos para o canal fluvial, alterou significativamente as formas da encosta do rio Boca Apertada.

REFERÊNCIAS

ARCHELA, E. **Geologia de cavernas**. Apostila do curso ministrado na I Semana de Geografia da Unicentro, Campus Irati. Irati, 12 a 17 de setembro de 2005.

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.

AVELAR, A.S. & COELHO NETTO, A.L. Fraturas e o desenvolvimento de unidades côncavas no médio vale do rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 22, n.2. 1992.

AZEVEDO, A.C.; VIDAL-TORRADO, P. **Esmectita, vermiculita, minerais com hidróxi entrecamadas e clorita**. In: Melo, V.F.; Alleoni, L.R.F. (Ed.). Química e mineralogia do solo: Parte I - Conceitos básicos. cap. 6, p. 381-426. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009.

BAZZOTTI, D. M. **Relação entre cobertura superficial e piezometria em encosta com processo de erosão em túneis e voçoroca no leste de Cascavel (PR)**. Universidade Estadual do Centro Oeste. Dissertação de Mestrado, 2013.

BEVEN, K & GERMANN, P. Macropores and water flow in soils. **Water Resources Research** 18:1311-1325, 1982.

BLOOM, A. **Superfície da Terra**. S. Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1970.

BOUCHER, S. C. **Management options for acidic sodic soils affected by tunnel erosion.** In 'Australian sodic soils – distribution, properties and management'. (Eds R Naidu, ME Sumner and P Rengasamy) pp. 239-246. (CSIRO Australia: East Melbourne), 1995.

BOUCHER S. C. **The initiation and development of tunnel erosion near Costerfield, Victoria.** Unpublished PhD thesis, School of Geography and Environmental Science, Monash University, Clayton, Australia, 2002.

BOUCHER, S. C. **Tunnel hydrology near Costerfield.** School of Geography and Environmental Science. Monash University, Victoria 3800, 2009.

BROWN, G. W. **Piping erosion in Colorado.** J. Soil Water Conserv 17, 5, 220-222, 1962.

BRYAN, R. B. & HARVEY, L. E. Observations on the geomorphic significance of tunnel erosion in a semiarid ephemeral drainage system. **Geogr. Ann.** 67A, 257–273., 1985.

BRYAN, R. B. & JONES, J. A. A. The significance of soil piping process: inventory and prospect. **Geomorphology** 20 (1997), p. 209-218, 1997.

CALDERANO, S. B.; DUARTE, M. N.; GREGORIS, G. **Análise mineralógicas das frações finas do solo por difratometria de raios X.** Comunicado técnico 53. Rio de Janeiro, 2009.

CAMARGO, G. **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. & OLIVEIRA, M. A. T. de. Análise tridimensional de volumes de solo e evolução de encosta em área afetada por erosão em voçorocas e em túneis no sul do Segundo Planalto Paranaense. **Geosul**, v. 14, n. 27, p. 430-437. nov. 1998.

CAMARGO, G.; CAMARGO FILHO, M.; MASCARELLO, L. V. **Processos de erosão em ravinas e voçorocas na bacia do Rio das Pedras – Guarapuava/PR**. In: BATTISTELLI, M.; CAMARGO FILHO, M.; HEERDT, B. (Orgs). Proteção e manejo da bacia do Rio das Pedras. p. 51-59. Guarapuava: Editora B&D Ltda., 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.

CAMPOS, P. M; LACERDA, M. P. C; PAPA, R. A.; GUIMARÃES, E. M.; COSTA NETO, F. **Difratometria de raios X aplicada na identificação de gibsita e caulinita em latos solos do Distrito Federal**. In: SIMPÓSIO NACIONAL CERRADO, 9., SIMPÓSIO INTERNACIONAL SAVANAS TROPICAIS 2., Anais... Brasília, p. 01-07, 2008.

CAREY, S. K & WOO, M .K. **The role of soil pipes as a slope runoff mechanism**. Subartic Yukon, Canadá. J. Hydrol, 233, 206-222, 2000.

CARROL, P. H. **Soil piping in southeastern Arizona**. Bull. 110, Soil Series 13, Region 5, U.S.D.A. Soil Conservation Service, Lincoln, 1949.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. [S.l.]: [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 2015.

CASTRO, S. S. Micromorfologia de solos: bases para descrição de lâminas delgadas. 2ª Edição. Unicamp/UFG, Campinas/Goiânia, 2008.

COELHO NETTO, A L. Evolução de Cabeceiras de Drenagem no Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (SP/RJ): a Formação e o Crescimento da Rede de Canais sob Controle Estrutural. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 4, Nº 2 69- 100. 2003.

CONAMA, 2004. Resolução no 347, de 10 de setembro de 2004. Diário Oficial de União, Edição 176, de 13/09/2004 – Seção 1, p. 54-55.

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.

COSTA, A. C. S. & BIGHAM, J. M. **Química e Mineralogia do Solo**. Parte I, 695p. (Eds. Vander de Freitas Melo e Luis Reynaldo Ferraciu Alleoni). SBCS, Viçosa, 2009.

CROSTA, G & DI PRISCO, C. **On slope instability induced by seepage erosion**. Can. J. Geotech. 36: 1056-1073, 1999.

CROUCH, R. J; MCGARITY, J. W; STORRIER, R. R. Tunnel formation processes in the Riverina Area N.S.W, **Australia. Earth Surface Processes and Landforms** 11 (2), 157-166, 1986.

DIETRICH, W. E.; DUNNE, T. The channel head. In: BEVEN, K.; KIRKBY, M. J. (Eds) **Channel Network Hydrology**. p.175-219. John Willey & Sons Ltd, 1993.

DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; Reneau, S. L. Hollows, colluvium, and landslides in soil-mantled landscapes, in **Hillslope Processes**, edited by A. D. Abrahams, pp. 361 – 388, Allen and Unwin, Concord, Mass., 1986.

DOWNES, R.G. Tunnelling erosion in North-Eastern Victoria. **Journal of Council of Science and Industrial Research, Australia** 19, 283-292,1946.

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.

DPI - Department of Primary Industries and Water. **Dispersive soils and their management**. Technical Reference Manual. State of Tasmania, April, 2009.

EL-SWAIFY, S. A. Physical and mechanical properties of Oxisols. In: THENG, B.K.G., ed. Soils with variable change. p.303-324. Palmerston, **New Zealand Society Soil Science**, 1980.

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

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FAULKNER, H; ALEXANDER, R; ZUKOWSKYJ, P. Slope-channel coupling between pipes, gullies and tributary channels in the Mocatán catchment badlands, Southeast Spain. Published online in October 2007. **Earth Surface and Landforms**, 33, 1242-1260, 2008.

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, G. M. S. S. **Estratigrafia de depósitos Quaternários em cabeceira de vale (Cerro do Touro, Campo Alegre – SC): Aplicação de análise textural e micromorfológica** (Dissertação de Mestrado), UFSC, 2009.

FITZPATRICK R. W; BOUCHER S. C., NAIDU R; FRITSCH, E. **Environmental consequences of soil sodicity**. Australian Journal of Soil Research 32, 1069-1093, 1994.

FLETCHER, J. E. & HARRIS, K. **Soil piping**. Progr. Agric. In Arizona 4, 7. 1952.

GIBBS, H.S., Tunnel-gully erosion on the Wither Hills, Marlborough, New Zealand. **New Zealand Journal of Science and Technology** 27 (Section A(2)), 135–146, 1945.

GILMAN, K., NEWSON, M.D., Soil Pipes and Pipeflow: a Hydrological Study in Upland Wales. Br. **Geomorphol. Res. Group Mono.** 1, Geobooks, Norwich, 1980.

GRIMM, A. M. Clima da região Sul do Brasil. In: **Tempo e Clima no Brasil**. Orgs: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J; Silva, M G. A. J; Dias, M. A. F.S. Capítulo 17, ed. Oficina de textos, São Paulo, 2009.

HACK, J. T. Interpretation of erosional topography in Humid Temperate regions. **American Journal of Science**, 188, p 80-97. 1960.

HARDIE, M. & COTCHING WE, Zund P. Rehabilitation of field tunnel erosion using techniques developed for construction with dispersive soils. **Australian Journal of Soil Research** 45(4) 280–287, 2007.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR. **Desvio de precipitação em junho de 2014 em relação à média histórica**. Paraná, 2014.

JONES, J. A. A. The nature of soil piping — a review of research. Br. Geomorphol. Res. Group, Res. Mono 3, **Geo Abstracts**, Norwich, 1981.

JONES, J. A. A. **Soil piping and its hydrogeomorphic function**. Cuaternario y Geomorfología, 8 (3-4), pp. 77-102. University of Wales, Aberystwyth, UK, 1994.

Jones, J. A. A. Pipe and piping. In: Goudie, A.S. (Ed.), Encyclopedia of Geomorphology. Routledge, pp. 784–788., 2004.

JONES, J. A. A. Soil piping and catchment response. **Hidrologic Process** 24: 1548-1566, 2010.

KÄMPF, N. **Die Eisenoxidmineralogie einer Klimasequenz von Böden aus Eruptiva in Rio Grande do Sul, Brasilien.** (Tese de Doutorado). Freising, Technische Universität München, 271p., 1981.

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.

MCCAIG, M. Contributions to storm quickflow in a small headwater catchment: the role of natural pipes and soil macropores. **Earth Surface Processes and Landforms**. v.8, p 239-252, 1983.

MEIS, M.R. M. & MONTEIRO, A.M.F. UpperQuaternary rampas: Doce rivervalley, SE Brazilian Plateau. **Zeit. Geomorph.**, 23: 132- 151. 1979.

MELO, V. F. & WYPYCH, F. **Química e Mineralogia do Solo.** Parte I, 695p. (Eds. Vander de Freitas Melo e Luis Reynaldo Ferracciu Alleoni). SBCS, Viçosa, 2009.

MINEROPAR – Minerais do Paraná. **Atlas geomorfológico do estado do Paraná** - Escala Base, 1:250.000/1:500.00 modelos reduzidos minerais do Paraná; Universidade Federal do Paraná, 63 p. Curitiba, 2006.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. **Source area, drainage density and channel incision.** Water resources research, v.25, n. 8, p. 1907-1918, 1989.

MOREIRA, C. V. R.; PIRES NETO A. G. **Clima e relevo**. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Org.). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. p. 69-85, 1998.

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.

MUNSELL SOIL COLLOR CHART. **Munsell Collor Company**, Baltimore, 2000.

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, Goiania. *Anais...* p 647-651, 1995.

OLIVEIRA, M. A. T & LIMA, G. L. Classificação de sedimentos Quaternários em cabeceiras de vale através da aplicação do diagrama de Flemming: município de Campo Alegre, Norte de Santa Catarina. **Rev. Geociências**, v.23, n. ½, p. 67-78. UNESP, São Paulo, 2004.

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.

PAISANI, J.C.; PONTELLI, M.E.; GEREMIA, F. Cabeceiras de drenagem da bacia do rio Quatorze – Formação Serra Geral (SW do Paraná): distribuição espacial, propriedades morfológicas e controle estrutural. **R. RA'E GA**, UFPR, n.12, p.211- 219, 2006.

PAIVA FILHO, A. **Estratigrafia e tectônica do nível de iodacitos pórfiros da Formação Serra Geral**. Tese de doutorado. UNESP, Rio Claro, 2000.

PANIZZA, M. **Environmental Geomorphology**. In: *Developments in Earth Surface Processes 4*, Elsevier: Amsterdam. 285p. 1996.

PAVLOVA, P. **On the relief of the plain and its change due to the activity of the surface and underground water** (in Russian), *Zemkvedenie* 3-4, 1894.

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. Sanches; SERRATO, F. Belmonte; FAULKNER, H. **The causes of piping in a set of abandoned agricultural terraces in southeast Spain**. *Catena*, 2007.

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.

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

SHEPARD, F.P. Nomenclature base on sand-silt-clay ratios. **Journal Sedim. Petrology**, v. 24, p. 151-158, 1954.

SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS (SIBICS). 2. ed. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2006. 306 p.

SILVA, A. J. P.; LOPES, R. C.; VASCONCELOS, A. M.; BAHIA, R. B. C. Bacias sedimentares paleozoicas e meso-cenozóicas interiores. In: **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Eds: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. Cap. II, CPRM, Brasília, 2003.

SILVA, A. R. V. & FERREIRA, H. C. Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e produtores/fornecedores nacionais e internacionais. **Rev. Elet Mat. e Proc. (REMAP)**, v.3, 26-35 p., Campina Grande (PB), 2008.

SILVA, W. B. **Caracterização das formações superficiais em encosta na Bacia do Rio das Pombas, Guarapuava – PR: bases para entendimento da gênese erosiva em túneis**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Dissertação de Mestrado, 2011.

SPOLADORE, A; FUKUDA, E. A.; GONÇALVES, M. A. **Considerações sobre a gênese e desenvolvimento da Gruta de barro (PR 272), município de Tamarana (PR)**. In: Anais do XXX Congresso Brasileiro de Espeleologia, Sociedade Brasileira de Espeleologia. Montes Claros, 9 a 12 de julho de 2009.

SWANSON, M. L.; KONDOLF, G. M.; BOISON, P. J. An example of rapid gully initiation and extension by subsurface erosion: Coastal San Mateo County, California. **Geomorphology**, n. 2, p. 393-403, 1989.

TOMAZOLLI, E. R. & PELERIN, J. M. Unidades do mapa geológico da ilha de Santa Catarina: as rochas. **Geosul**, Florianópolis, v. 30, n. 60, p 225-247, jul./dez. 2015

TREMOCOLDI, W. A. Mineralogia dos silicatos e dos óxidos de ferro da fração argila de solos desenvolvidos de rochas básicas no estado de São Paulo. **Rev. Biociênc.** Taubaté, v. 9, n. 1, p15-22, jan-mar, 2003.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Science**, v.263, p.616-627, 1965.

UCHIDA, T.; KOSUGI, K.; MIZUYAMA, T. Runoff characteristics of pipeflow and effects of pipeflow on rainfall-runoff phenomena in a mountainous watershed. **Journal of Hydrology**. 222: 18–36, 1999.

VACHER C. A.; LOCH R. J.; RAINE S. R. **Identification and Management of Dispersive Mine Spoils**. Final Report for Australian Centre for Mining Environmental Research, Kenmore Queensland, 2004.

VELDE, B. & MEUNIER, A. The origin of Clay minerals in soils and weathered rocks. **Springer-Verlag** Berlin Heidelberg, 2008.

VERACHTERT, E; VAN DEN EECKHAUT; POESEN, J; DECKERS. J. Factors controlling the spatial distribution of soil piping erosion on loess-derived soils: A case study from central Belgium. **Geomorphology**, 118, 339-348, 2010.

VICTORIAN GOVERNMENT. **Tunnel erosion in East Gippsland**. Department of Primary Industries, Bairnsdale, Victoria 3953, Australia. The State of Victoria, April 2010.

WAICHEL, B. L. **Estruturação de Derrames e interação lava-sedimento na Porção Central da Província Basáltica Continental do Paraná**. Tese de doutorado. Programa de Pós Graduação em Geociências da Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

WAICHEL, B. L.; TRATZ, E. B.; PIETROBELLI, G.; JERRAM, D. A.; CALIXTO, G. R. BACHA, R. R.; TOMAZZOLLI, E. R.; SILVA, W. B. Lava tubes from the Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province: Morphology and importance to emplacement models. **Journal of South American Earth Sciences** **48**, 255-261, 2013.

WILSON, C. M. & SMART, P. L. Pipes and pipe flow process in an upland catchment Wales. **Catena** **11**, 145-158, 1984.

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

ANEXOS

ANEXO I: FORMULÁRIOS DE CAMPO

Formulários de campo

Amostra	Profundidade em m	Textura	Cor	Tabela de Munsell	Umidade	Plasticidade	Moesqueamento	Observações
T1 – 1	0 – 0,30	Areno-argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 5/3	Baixa	Baixa	-	Presença de raízes
T1 – 2	0,30 – 0,42	Areno-argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	Verde	Presença de raízes + grânulos
T1 – 3	0,42 – 0,60	Areno-siltosa	Castanho	7,5 YR 4/3	Baixa	Baixa	Verde e branco	Grânulos, calcedônia intemperizada
T1 – 4	0,60 – 0,70	Areno-siltosa	Castanho	7,5 YR 4/3	Baixa	Baixa	Verde e branco	Grânulos, calcedônia intemperizada; nível com mais calcedônia
T1 – 5	0,70 – 0,80	Siltosa	Castanho	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	Redução de pontos verdes	-
T1 – 6	0,80 – 0,90	Areno-siltosa	Castanho mais claro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	Branco, preto e marrom	Quartzo e calcedônia aparecem misturados ao material
T1 – 7	0,90 – 0,95	Arenosa	Castanho claro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	Branco, preto e verde	Argila mais clara
T1 – 8	0,95 – 1,13	Areno-argilosa	Castanho claro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	Branco, preto e verde	O material branco se desfaz ao toque
T2 – 1	0 – 0,20	Arenosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	Branco e verde	Raízes, seixos intemperizados verdes e brancos
T2 – 2	0,20 – 0,40	Arenosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	Branco e verde	Seixos
T2 – 3	0,40 – 0,80	Areno-argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 4/3	Baixa	Baixa	Verde, preto, marrom	Quartzo, grânulos e seixos
T2 – 4	0,80 – 0,90	Areno-argilosa	Acastanhado amarelado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Grânulos
T2 – 5	0,90 – 1,02	Areno-argilosa	Acastanhado amarelado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Grânulos e seixos
T2 – 6	1,02 – 1,10	Areno-argilosa	Acastanhado amarelado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Grânulos
T2 – 7	1,10 – 1,20	Areno-argilosa	Acastanhado amarelado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	-
T2 – 8	1,20 – 1,40	Areno-argilosa	Castanho avermelhado	10 YR 3/6	Média	Plástico	-	Material amarelado junto a base rochosa

Amostra	Profundidade em m	Textura	Cor	Tabela de Munsell	Umidade	Plasticidade	Mosqueamento	Observações
T3 - 1	0 - 0,18	Arenosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	Verde	Raízes e seixos
T3 - 2	0,18 - 0,26	Arenosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	-
T3 - 3	0,26 - 0,74	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	Preto	Seixos e carvão
T3 - 4	0,74 - 1,29	Argilo siltosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	Verde e preto	Seixos
T3 - 5	1,29 - 1,70	Arenosa	Vermelho acastanhado claro	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	-
T3 - 6	1,70 - 2,00	Areno argilosa	Vermelho acastanhado claro	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	Preto	-
T3 - 7	2,00 - 2,20	Arenosa	Castanho	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	Preto e vermelho	Seixos, óxido de ferro, material desestruturado (solto)
T4 - 1	0 - 0,05	Arenosa	Castanho, cinza, amarelo	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Materiais com tamanhos variando entre seixos, grânulos, areias; cascalho
T4 - 2	0,05 - 0,53	Arenosa	Castanho	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Predomínio de seixos
T5 - 1	0 - 0,30	Arenosa	Castanho escuro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Predomínio de seixos
T5 - 2	0,30 - 0,47	Arenosa	Castanho claro	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Predomínio de seixos
T6 - 1	0 - 0,15	Arenosa	Vermelha acastanhado / bege	5 YR 3/2	Baixa	Baixa	Vermelho mosqueado de bege	Muito quartzo; areia escura
T7 - 1	0 - 0,20	Arenosa	Vermelho acastanhado	5 YR 3/2	Baixa	Baixa	-	Muito quartzo na matriz

Amostra	Profundidade em m	Textura	Cor	Tabela de Munsell	Umidade	Plasticidade	Mosqueamento	Observações
T8 – 1	0 – 0,30	Arenosa	Vermelho acastanhado	10 YR 3/2	Baixa	Baixa	Amarelo	Raízes, grânulos, seixos
T8 – 2	0,30 – 0,48	Arenosa	Vermelho acastanhado claro	10 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	-
T8 – 3	0,48 – 0,63	Arenosa	Castanho amarelado	10 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Seixos
T8 – 4	0,63 – 0,78	Arenosa	Vermelho acastanhado misturado com cinza	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Rocha alterada
T9 – 1	0 – 0,27	Arenosa	Vermelho acastanhado escuro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	Verde	Raízes e calhaus
T9 – 2	0,27 – 0,37	Arenosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Grânulos
T9 – 3	0,37 – 0,43	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Calhaus
T9 – 4	0,43 – 0,90	Argiloso	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Muitos seixos
T9 – 5	0,90 – 1,20	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Muitos seixos
T9 – 6	1,20 – 1,32	Arenosa	Vermelho acastanhado claro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Muitos seixos
T9 – 7	1,32 – 1,56	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Linhas de pedra, seixos e grânulos
T9 – 8	1,56 – 1,88	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Baixa	-	-
T9 – 9	1,88 – 2,40	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Baixa	Preto	-
T9 – 10	2,40 – 2,45	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Baixa	Preto	-

Amostra	Profundidade em m	Textura	Cor	Tabela de Munsell	Umidade	Plasticidade	Mosqueamento	Observações
T10 – 1	0 – 0,20	Arenosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Raízes
T10 – 2	0,20 – 0,28	Arenosa	Vermelho acastanhado mais claro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Raízes
T10 – 3	0,28 – 0,70	Areno argilosa	Vermelho acastanhado claro	7,5 YR 4/3	Baixa	Baixa	-	Muitos seixos
T10 – 4	0,70 – 1,14	Areno argilosa	Vermelho acastanhado/ esverdeado	7,5 YR 3/4	Média	Baixa	Verde	-
T10 – 5	1,14 – 1,20	Areno argilosa	Castanho escuro	7,5 YR 3/4	Média	Baixa	Verde	Seixos e grânulos
T11 – 1	0 – 0,18	Arenosa	Castanho claro	10 YR 3/4	Baixa	Baixa	Verde	Seixos e elúvio
T12 – 1	0 – 0,26	Arenosa	Castanho alaranjado	10 YR 3/2	Baixa	Baixa	-	Mistura de materiais e seixos
T12 – 2	0,26 – 0,37	Arenosa	Castanho avermelhado	10 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Seixos
T12 – 3	0,37 – 0,88	Arenosa	Castanho avermelhado	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	Preto	Seixos
T13 – 1	0 – 0,32	Arenosa	Castanho avermelhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	Preto, amarelo	Raízes, mistura de materiais e seixos
T13 – 2	0,32 – 0,70	Arenosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 2,5/2	Baixa	Baixa	Preto, verde	Poucos seixos
T13 – 3	0,70 – 0,80	Arenosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 4/3	Baixa	Baixa	Preto, verde	Poucos seixos
T14 – 1	0 – 0,43	Arenosa	Castanho avermelhado	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Raízes, areia bege clara

Amostra	Profundidade	Textura	Cor	Tabela de	Umidade	Plasticidade	Mosqueamento	Observações
---------	--------------	---------	-----	-----------	---------	--------------	--------------	-------------

	em m			Munsell				
T15 - 1	0 - 0,27	Arenosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 2,5/2	Baixa	Baixa	-	Raízes, grânulos, fragmentos de rocha
T15 - 2	0,27 - 0,60	Areno siltosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Muitos grânulos
T16 - 1	0 - 0,30	Arenosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 2,5/2	Baixa	Baixa	-	Raízes, carvão
T16 - 2	0,30 - 50	Areno siltosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 2,5/2	Média	Baixa	-	Raízes, linha de pedra
T17 - 1	0 - 0,43	Areno siltosa	Castanho avermelhado escuro	5 YR 2,5/1	Baixa	Baixa	-	Seixos próximos a superfície, raízes, mistura de materiais
T17 - 2	0,43 - 0,72	Silto argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Mais argila
T18 - 1	0 - 0,84	Areno argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/1	Baixa	Baixa	Verde	Raízes, grânulos, material preto e alaranjado
T19 - 1	0 - 0,60	Arenosa	Castanho avermelhado escuro	5 YR 3/1	Baixa	Baixa	-	Linha de pedra, grânulos, material alaranjado
T19 - 2	0,60 - 0,68	Argilosa	Castanho avermelhado	5 YR 3/2	Baixa	Baixa	-	Linha de pedra, mistura de materiais

Amostra	Profundidade em m	Textura	Cor	Tabela de Munsell	Umidade	Plasticidade	Mosqueamento	Observações
T20 – 1	0 – 0,23	Arenosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 2,5/2	Baixa	Baixa	-	Raízes, seixos
T20 – 2	0,23 – 0,55	Areno argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 2,5/2	Baixa	Baixa	-	Linha de pedra
T20 – 3	0,55 – 0,84	Areno argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 2,5/3	Baixa	Baixa	-	Material mais grosseiro
T20 – 4	0,84 – 0,90	Areno argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/3	Média	Baixa	-	Seixos, linha de pedra
T20 – 5	0,90 – 1,10	Argilo siltosa	Castanho avermelhado escuro	5 YR 3/2	Média	Baixa	-	Material heterogêneo
T21 – 1	0 – 0,25	Areno siltosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 2,5/3	Baixa	Baixa	-	Raízes, fragmentos de quartzo
T21 – 2	0,25 – 0,54	Silto argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 2,5/3	Média	Baixa	-	Fragmentos de quartzo
T21 – 3	0,54 – 0,60	Silto argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 2,5/3	Média	Baixa	-	Seixos e grânulos de quartzo

Amostra	Profundidade em m	Textura	Cor	Tabela de Munsell	Umidade	Plasticidade	Mosqueamento	Observações
T22 – 1	0 – 0,23	Argilo arenosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Raízes
T22 – 2	0,23 – 0,42	Argilosa	Castanho avermelhado escuro	5 YR 3/2	Baixa	Baixa	Vermelho, alaranjado	-
T22 – 3	0,42 – 0,66	Argilo siltosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	-
T22 – 4	0,66 – 0,86	Argilo siltosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	-
T22 – 5	0,86 – 0,92	Silto argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa/Média	-	Grânulos, fragmentos de quartzo
T22 – 6	0,92 - 1	Argilosa	Castanho avermelhado escuro	5 YR 3/2	Média	Média	-	Grânulos, linha de pedra
T22 – 7	1 – 1,36	Argilosa	Castanho avermelhado escuro	5 YR 3/3	Média	Média	Laranja	Grânulos
T22 – 8	1,36 – 1,50	Argilosa	Castanho avermelhado escuro	5 YR 3/2	Média	Baixa	Preto, laranja	Grânulos, linha de pedra
T23	0 – 0,10	Arenosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/4	-	-	-	Raízes, sem coleta de amostras
T24 – 1	0 – 0,36	Arenosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Pedregulho, quartzo, raízes
T24 – 2	0,36 – 0,61	Arenosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Quartzo, seixos

Amostra	Profundidade em m	Textura	Cor	Tabela de Munsell	Umidade	Plasticidade	Mosqueamento	Observações
T25 – 1	0 – 0,26	Areno argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 2,5/3	Baixa	Baixa	-	Raízes transportadas pela água
T25 – 2	0,26 – 0,34	Areno argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Raízes transportadas pela água
T25 – 3	0,34 – 0,58	Areno silto argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Raízes transportadas pela água
T25 – 4	0,58 – 0,80	Argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/3	Baixa	Baixa	-	Material homogêneo
T25 – 5	0,80 – 1,14	Argilosa	Castanho avermelhado escuro	7,5 YR 3/4	Baixa	Média/Alta	-	Fragmentos de quartzo
T25 – 6	1,14 – 1,32	Argilosa	Castanho avermelhado escuro	5 YR 3/4	Baixa	Alta	-	-
T25 – 7	1,32 - 2	Argilosa	Castanho avermelhado escuro	5 YR 3/4	Média/Alta	Alta	-	Fragmentos e amígdalas de calcedônia
T25 – 8	2 – 3,20	Argilosa	Castanho avermelhado escuro	5 YR 3/4	Alta	Alta	-	Linha de pedra, quartzo
T26 – 1	0 – 0,57	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	10 YR 3/4	Alta	Alta	-	-
T26 – 2	0,57 – 1,05	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Alta/ média	Alta	-	-
T26 – 3	1,05 – 1,33	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	Preto; laranja	-
T26 – 4	1,33 – 1,83	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/3	Média	Alta	-	-

Amostra	Profundidade em m	Textura	Cor	Tabela de Munsell	Umidade	Plasticidade	Mosqueamento	Observações
T27 - 1	0 – 0,47	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/3	Média	Alta	-	-
T27 - 2	0,47 – 0,78	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/3	Média	Média	-	-
T27 - 3	0,78 – 1,03	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Baixa	-	-
T27 - 4	1,03 – 1,20	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Baixa	Preto; azul (calcedônia)	-
T27 - 5	1,20 – 1,40	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Baixa	-	-
T27 - 6	1,40 – 1,48	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Baixa	-	-
T27 - 7	1,48 – 1,57	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Baixa	-	-
T28 - 1	0 – 0,18	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Raízes; quartzo
T28 - 2	0,18 – 0,40	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Bloco
T29 - 1	0 – 0,45	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	Preto	Raízes; carvão
T29 - 2	0,45 – 0,68	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Média	-	Quartzo
T29 - 3	0,68 – 0,95	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Média	-	Clastos
T29 - 4	0,95 – 1,09	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Média	-	-
T29 - 5	1,09 – 1,15	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Média	-	-
T29 - 6	1,15 – 1,22	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Média	-	Areia amarelada
T29 - 7	1,22 – 1,48	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Média	-	Quartzo

Amostra	Profundidade em m	Textura	Cor	Tabela de Munsell	Umidade	Plasticidade	Mosqueamento	Observações
T30 – 1	0 – 0,35	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Média	-	Raízes; quartzo
T30 – 2	0,35 – 0,56	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Média/ alta	-	-
T30 – 3	0,56 – 0,90	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Média/ alta	-	-
T30 – 4	0,90 – 1,08	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Média/ alta	-	-
T30 – 5	1,08 – 1,20	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Média/ alta	Cinza escuro	-
T30 – 6	1,20 – 1,29	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Média/ alta	-	-
T30 – 7	1,29 – 1,56	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Alta	Média/ alta	-	-
T30 – 8	1,56- 1,87	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Alta	Alta	-	-
T30 – 9	1,87 – 2	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Alta	Alta	-	-
T30 – 10	2 – 2,18	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Alta	Alta	Cinza escuro	Quartzo (grande); seixos e grânulos
T31 – 1	0 – 0,35	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Média	-	-
T31 – 2	0,35 – 0,69	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Média/ alta	-	-
T31 – 3	0,69 – 0,80	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Média/ alta	-	Quartzo
T31 – 4	0,80 – 0,91	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Alta	-	-

Amostra	Profundidade em m	Textura	Cor	Tabela de Munsell	Umidade	Plasticidade	Mosqueamento	Observações
T32 – 1	0 – 0,30	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Raízes
T32 – 2	0,30 – 0,90	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	-
T32 – 3	0,90 – 1,04	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	-
T32 – 4	1,04 – 1,23	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	-
T32 – 5	1,23 – 1,55	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	-
T32 – 6	1,55 – 1,71	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	-
T32 – 7	1,71 – 2	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Média /Alta	-	Nível d'água
T32 – 8	2 – 2,30	Argilosa	Marrom acizentado	7,5 YR 3/4	Alta	Alta	Amarelo	Rocha intemperizada
T33-1	0 – 0,21	Arenosa	Vermelho acastanhada	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Raízes
T33 – 2	0,21 – 0,46	Arenosa	Vermelho acastanhada	5 YR 3/3	Baixa/média	Baixa	-	Seixos e grânulos
T33 – 3	0,46 – 0,85	Areno siltosa	Vermelho acastanhada	5 YR 2,5/2	Média	Baixa	-	Seixos e grânulos; linha de pedra
T33 - 4	0,85 – 1,01	Argilosa	Vermelho acastanhada	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	Coesa
T33 – 5	1,01 – 1,17	Argilosa	Vermelho acastanhada	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	Grânulos; pontos esverdeados
T33 - 6	1,17 – 1,27	Areno siltosa	Vermelho esverdeado	7,5 YR 3/3	Média	Baixa	Amarelado	Grânulos
T33 - 7	1,27 – 1,41	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Alta	Média/Alta	-	-
T34 - 1	0 – 0,38	Argilo arenosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Raízes
T34 – 2	0,38 – 0,66	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	Coesa
T34 – 3	0,66 – 0,72	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	Cerosidade, quartzo
T34 - 6	1,22 – 1,42	Argilosa	Verm. acastanhado	5 YR 4/4	Média	Média	-	Linha de pedra
T34 - 7	1,42 – 1,48	Arenosa	Verm. acastanhado	5 YR 4/4	Média	Média	-	Rocha amarelada/acinzentada

Amostra	Profundidade em m	Textura	Cor	Tabela de Munsell	Umidade	Plasticidade	Mosqueamento	Observações
T35 - 1	0 - 0,28	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Quartzo
T35 - 2	0,28 - 0,40	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa/ média	Média	-	Quartzo; pedregulho
T35 - 3	0,40 - 1,01	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	-
T35 - 4	1,01 - 1,27	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	Nódulos de ferro, quartzo
T35 - 5	1,27 - 1,60	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	Grânulos, nódulos, quartzo
T35 - 6	1,60 - 1,71	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	-
T35 - 7	1,71 - 2,02	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	-
T35 - 8	2,02 - 2,36	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	-
T35 - 9	2,36 - 2,49	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	-
T35 - 10	2,49 - 2,61	Arenosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	Rocha amarela acizentada
T36 - 1	0 - 0,42	Areno argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Baixa	-	Raízes
T36 - 2	0,42 - 0,65	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	média	Média	-	-
T36 - 3	0,65 - 1,08	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	Quartzo
T36 - 4	1,08 - 1,37	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	Vermelho amarelado	Linha de pedra
T36 - 5	1,37 - 1,45	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	-	-
T36 - 6	1,45 - 1,96	Argilosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Média	Alta	Vermelho, preto, branco	Quartzo, linha de pedra
T36 - 7	1,96 - 2,21	Argilo arenosa	Vermelho acastanhado	7,5 YR 3/4	Baixa	Alta	-	-

ANEXO II - TRIÂNGULOS DE SHEPARD

Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T1-1	6,3146	50,1252	43,5602
T1-2	7,4978	43,873	48,6292
T1-3	11,418	46,641	41,941
T1-4	4,3014	52,4636	43,235
T1-5	5,3054	57,3132	37,3814
T1-6	3,4186	43,6594	52,922
T1-7	5,8496	59,5684	34,582
T1-8	6,652	51,1058	42,2422

T1

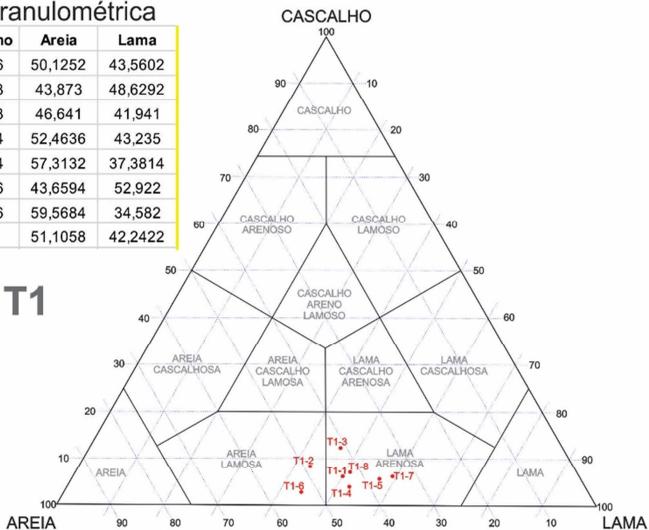


Diagrama de Shepard (1954) modificado

Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T2-1	2,8048	52,1304	45,0648
T2-2	26,5758	42,8132	30,611
T2-3	5,572	33,3426	61,0854
T2-4	13,2294	51,8548	34,9158
T2-5	7,1716	47,6608	45,1676
T2-6	0,2678	50,6002	49,132
T2-7	9,7864	60,2596	29,954
T2-8	3,7692	60,8558	35,375

T2

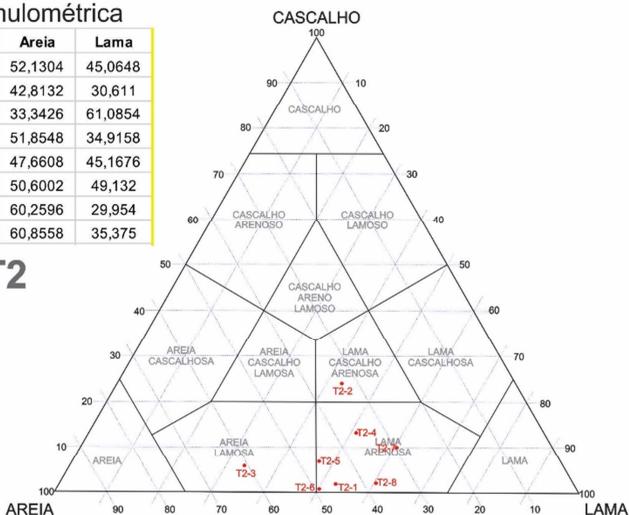


Diagrama de Shepard (1954) modificado

Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T3-1	4,3202	31,9248	63,755
T3-2	2,0144	44,9364	53,0492
T3-3	17,1194	47,6692	35,2114
T3-4	1,3214	44,131	54,5476
T3-5	6,8452	54,3556	38,7992
T3-6	0,326	57,7586	41,9154
T3-7	1,4118	59,9538	38,6344

T3

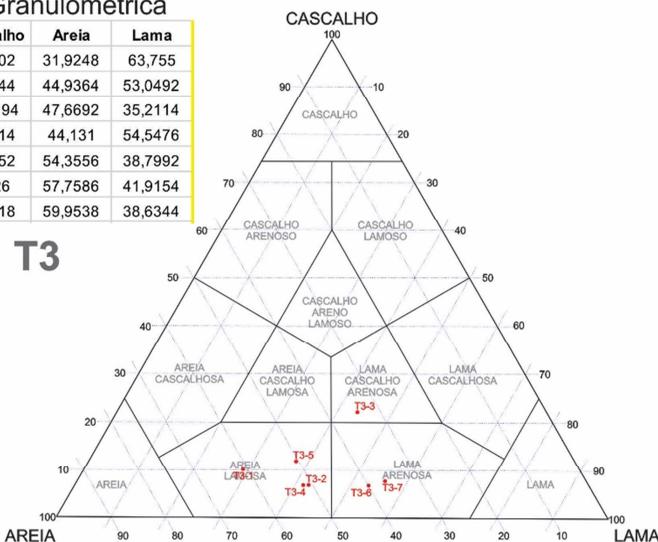


Diagrama de Shepard (1954) modificado

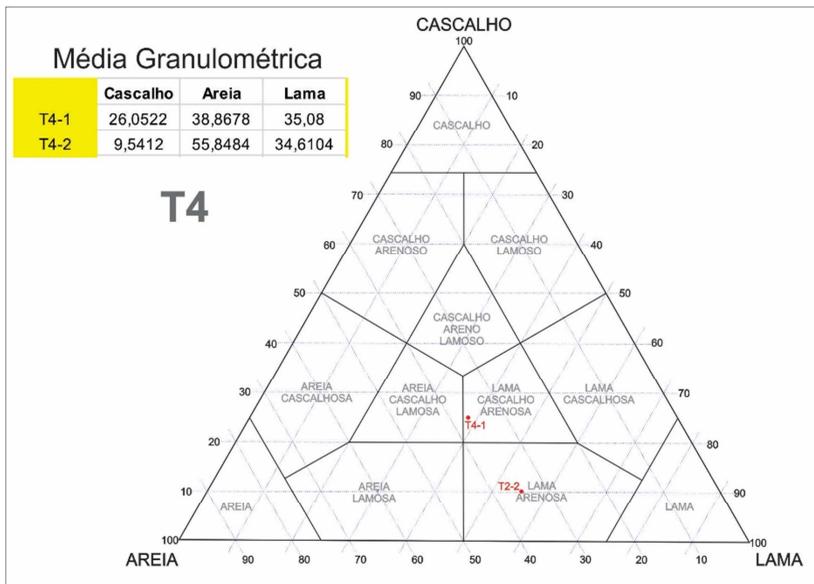


Diagrama de Shepard (1954)
modificado

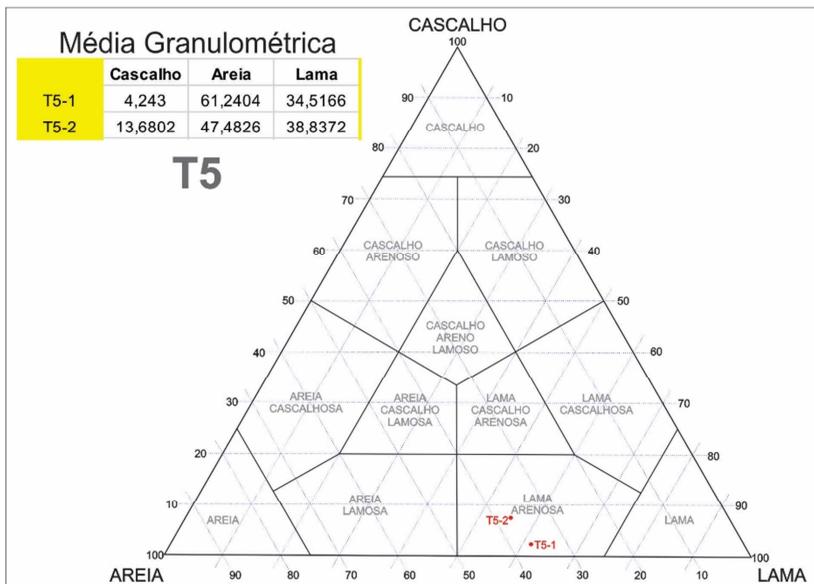


Diagrama de Shepard (1954)
modificado

Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T6-1	7,8108	50,6406	41,5486

T6

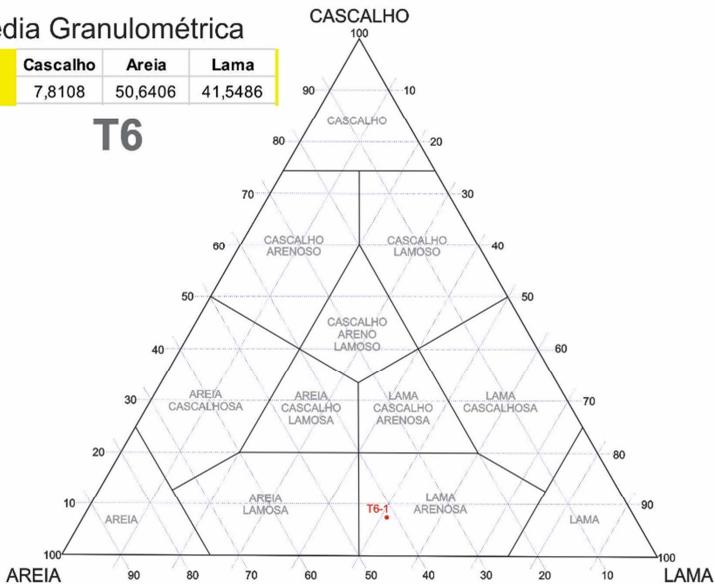


Diagrama de Shepard (1954) modificado

Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T7-1	5,8584	58,8084	35,3332

T7

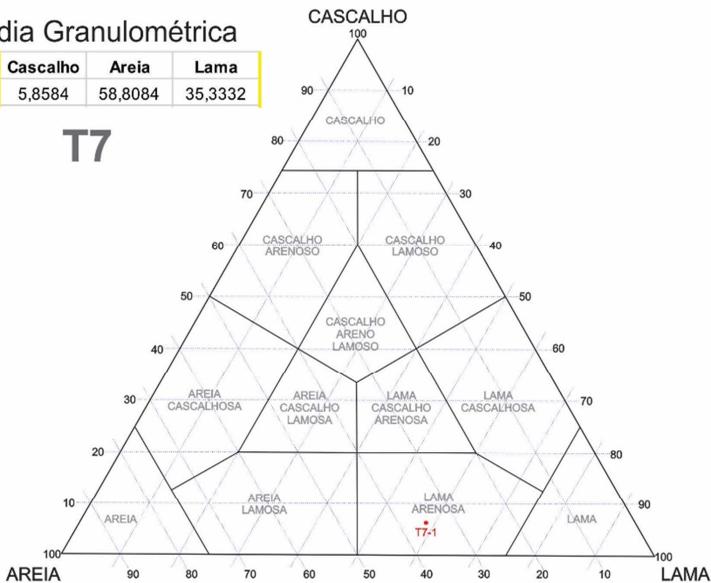
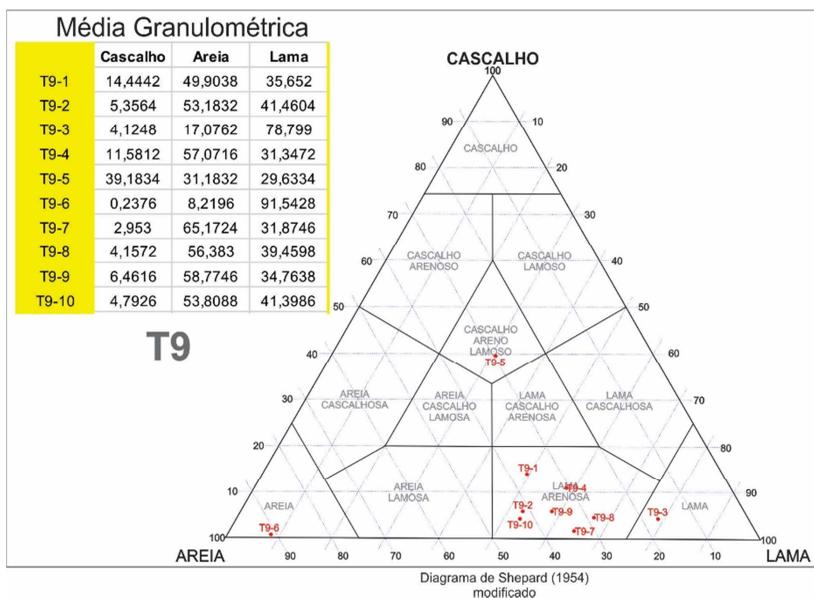
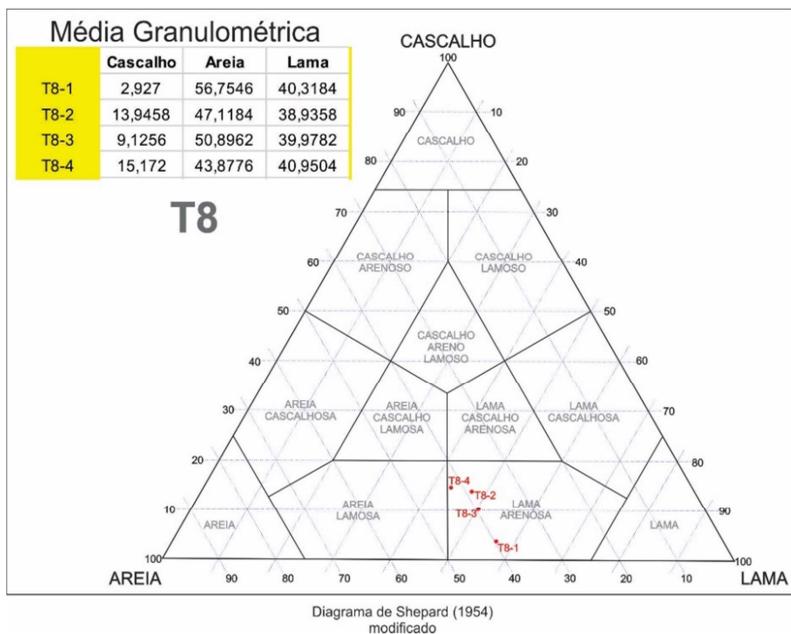


Diagrama de Shepard (1954) modificado



Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T10-1	15,4232	38,374	46,2028
T10-2	1,459	39,1422	59,3988
T10-3	11,6178	43,3396	45,0426
T10-4	0,2378	53,376	46,3862
T10-5	4,8214	56,1532	39,0254

T10

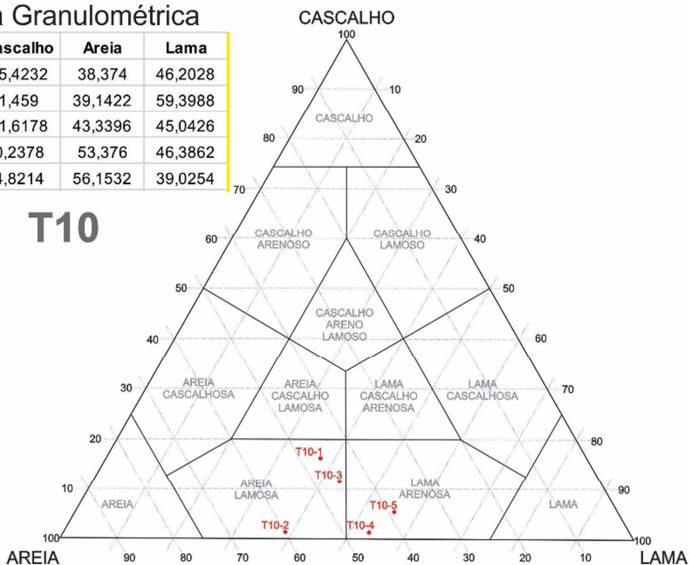


Diagrama de Shepard (1954) modificado

Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T11-1	6,6328	56,064	37,3032

T11

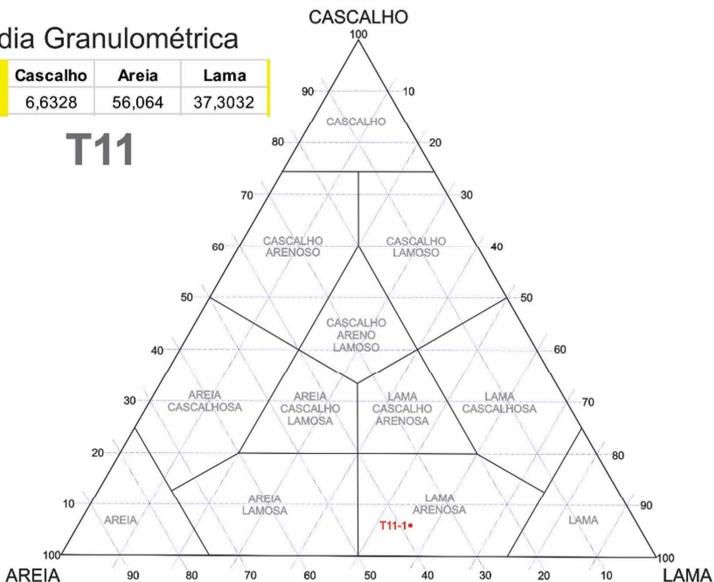
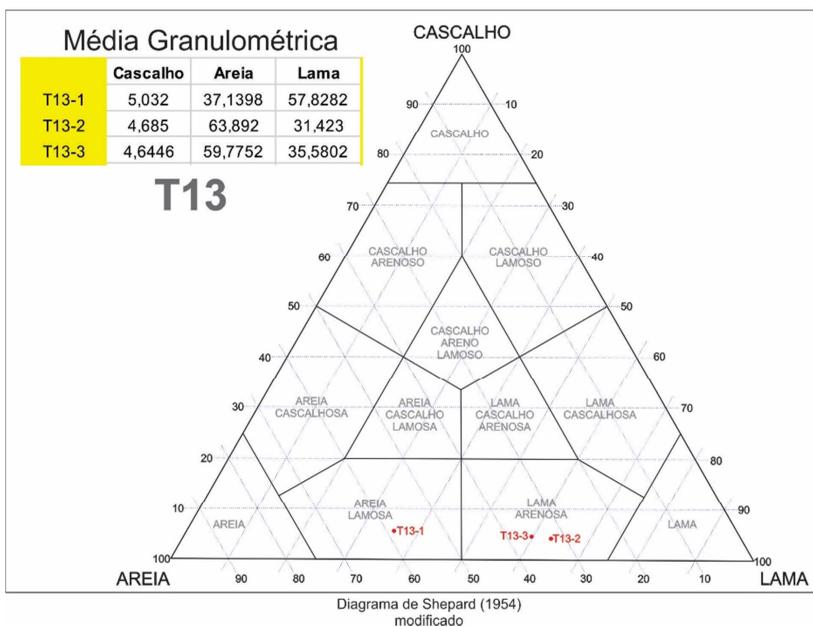
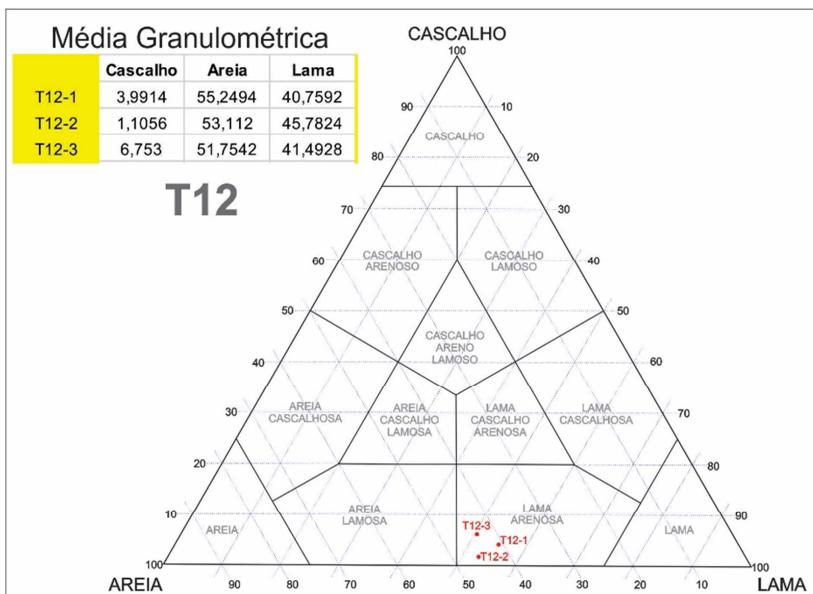


Diagrama de Shepard (1954) modificado



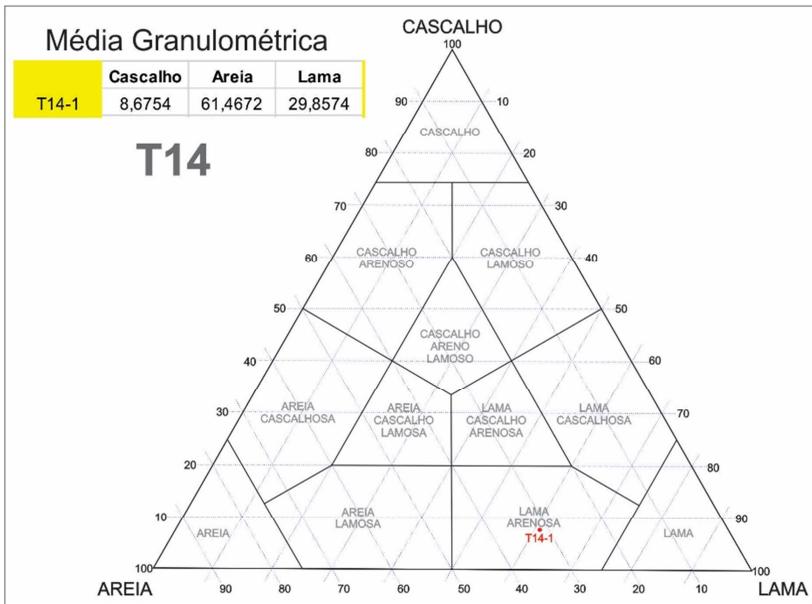


Diagrama de Shepard (1954) modificado

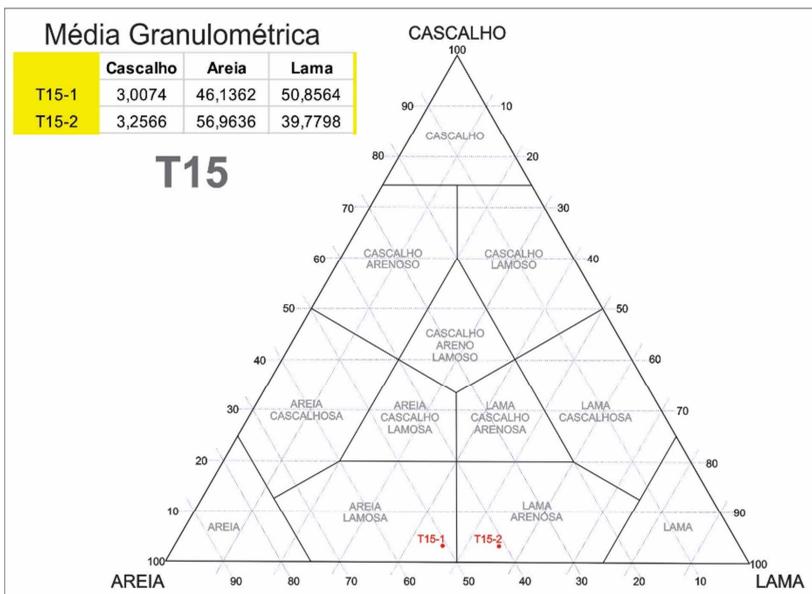
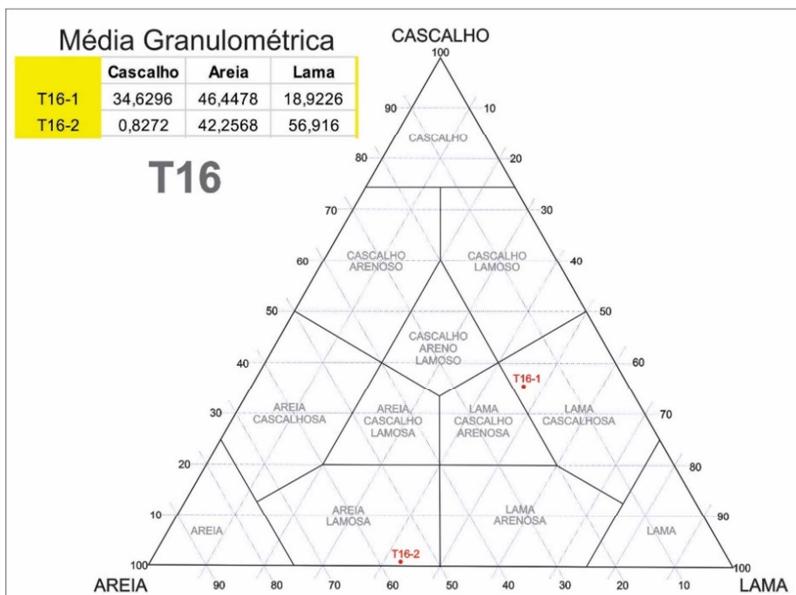
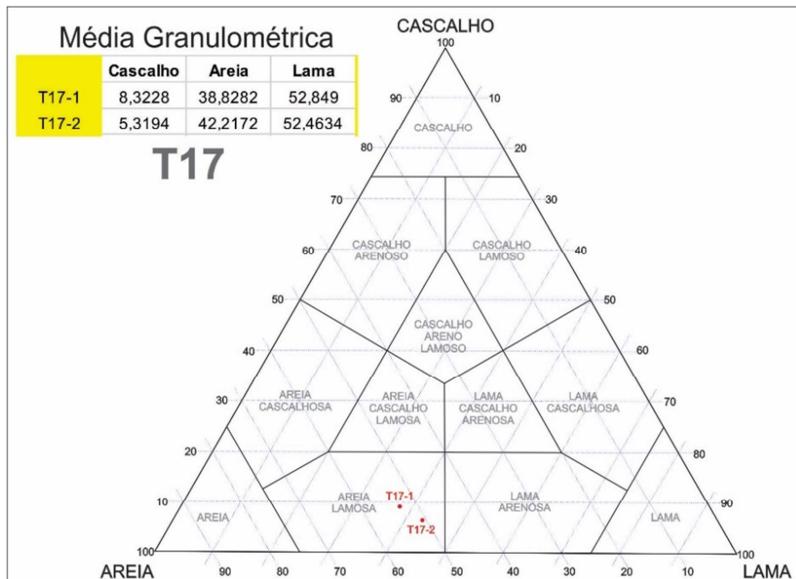


Diagrama de Shepard (1954) modificado

Diagrama de Shepard (1954)
modificadoDiagrama de Shepard (1954)
modificado

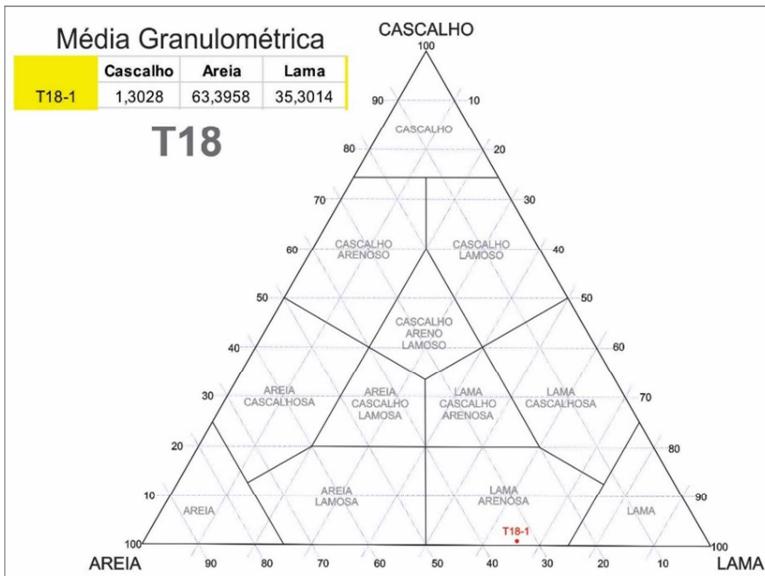


Diagrama de Shepard (1954) modificado

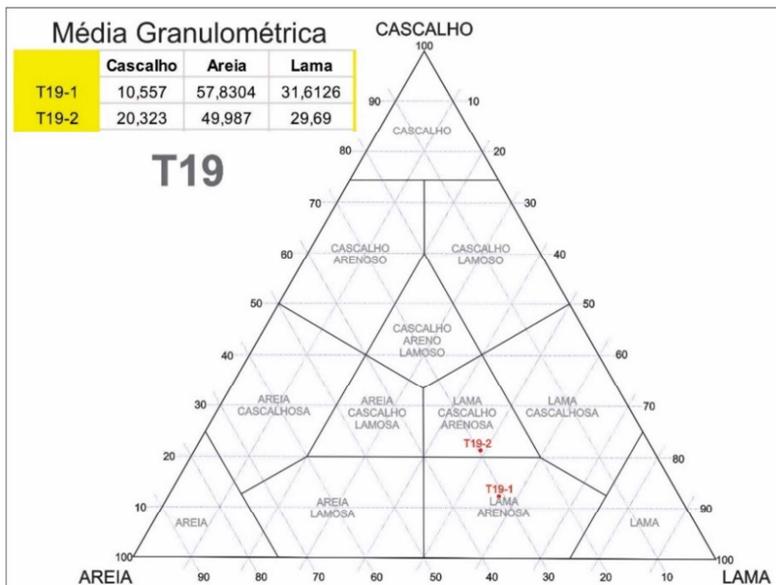
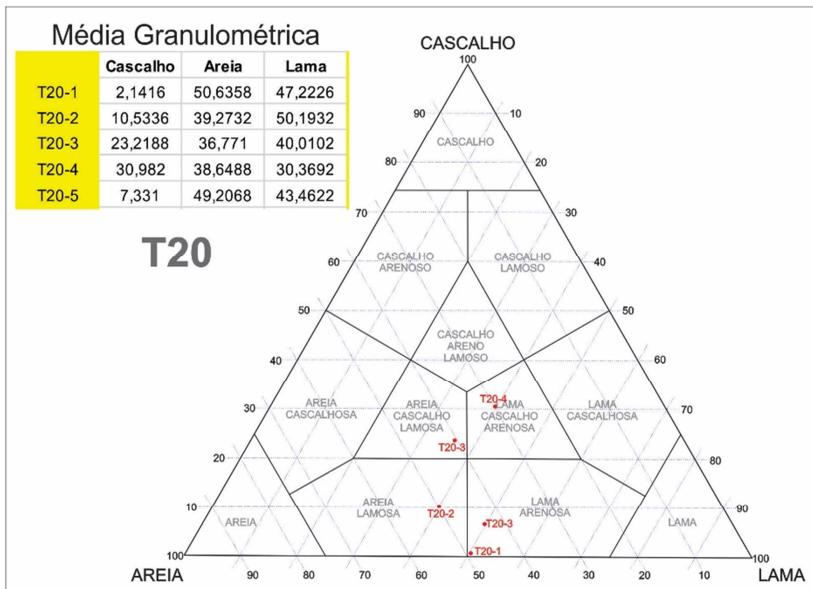
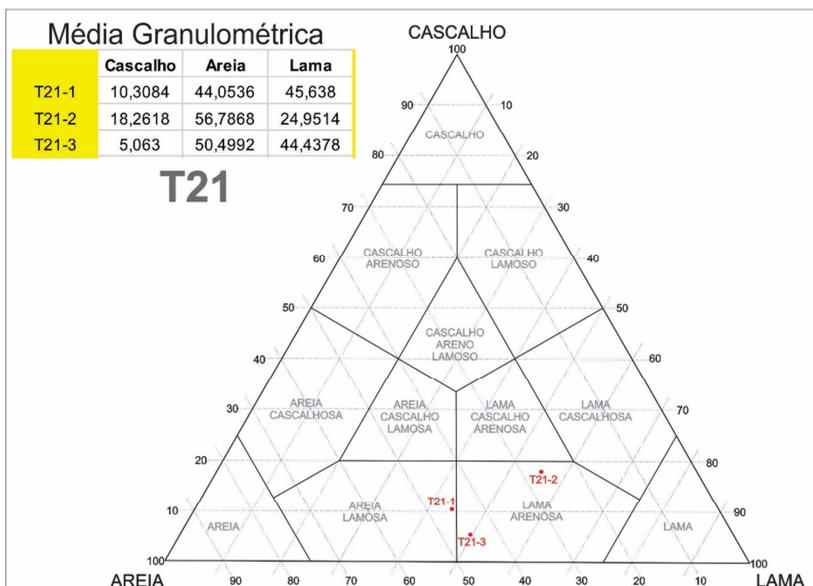


Diagrama de Shepard (1954) modificado

Diagrama de Shepard (1954)
modificadoDiagrama de Shepard (1954)
modificado

Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T22-1	6,273	38,8622	54,8648
T22-2	7,1216	40,6094	52,269
T22-3	0,5376	25,4456	74,0168
T22-4	41,5996	25,8428	32,5576
T22-5	13,8442	38,7804	47,3754
T22-6	9,8366	50,2732	39,8902
T22-7	3,9268	45,5274	50,5458
T22-8	11,742	40,9764	47,2816

T22

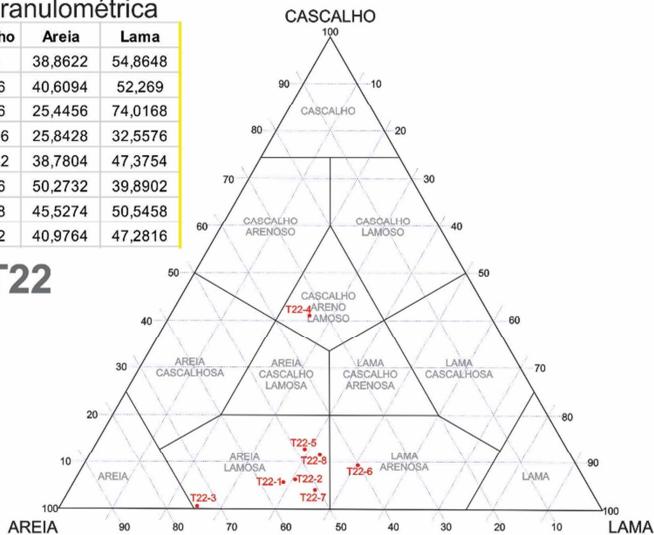


Diagrama de Shepard (1954) modificado

NÃO EXISTE O TRIANGULO 23

Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T24-1	14,882	44,4562	40,6618
T24-2	15,8094	51,5754	32,6152

T24

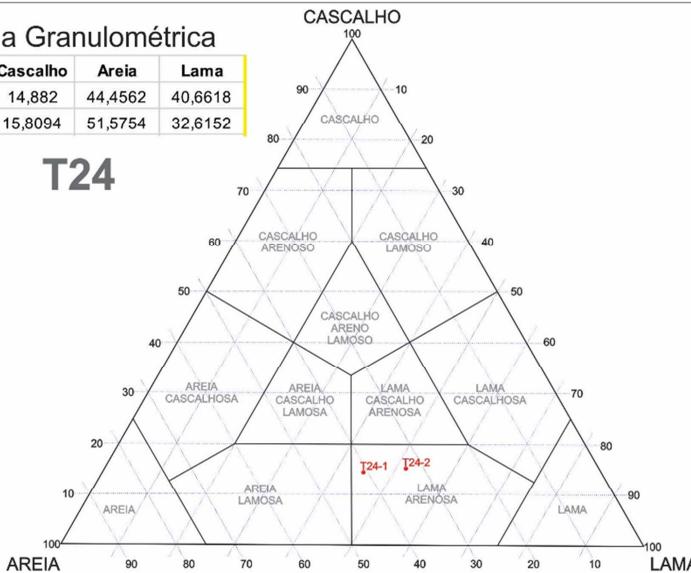
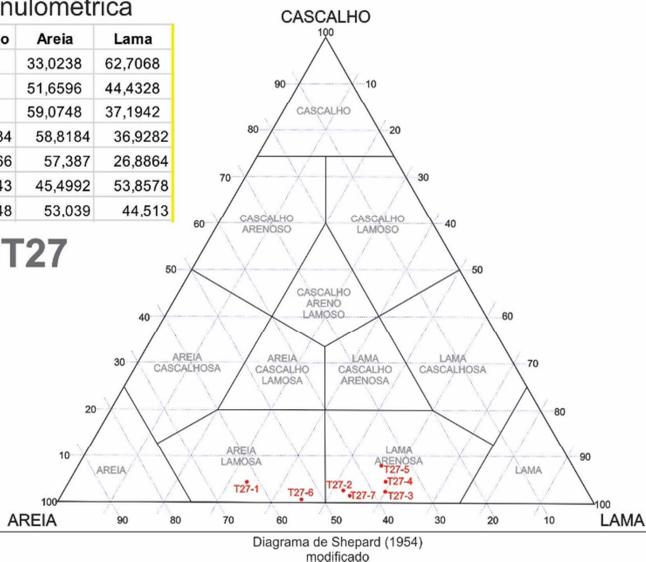


Diagrama de Shepard (1954) modificado

Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T27-1	4,2694	33,0238	62,7068
T27-2	3,9076	51,6596	44,4328
T27-3	3,731	59,0748	37,1942
T27-4	4,2534	58,8184	36,9282
T27-5	15,7266	57,387	26,8864
T27-6	0,643	45,4992	53,8578
T27-7	2,448	53,039	44,513

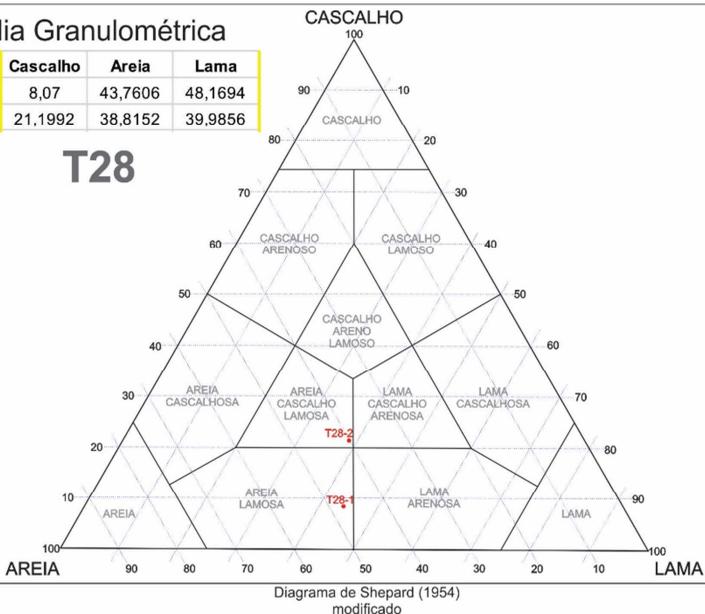
T27

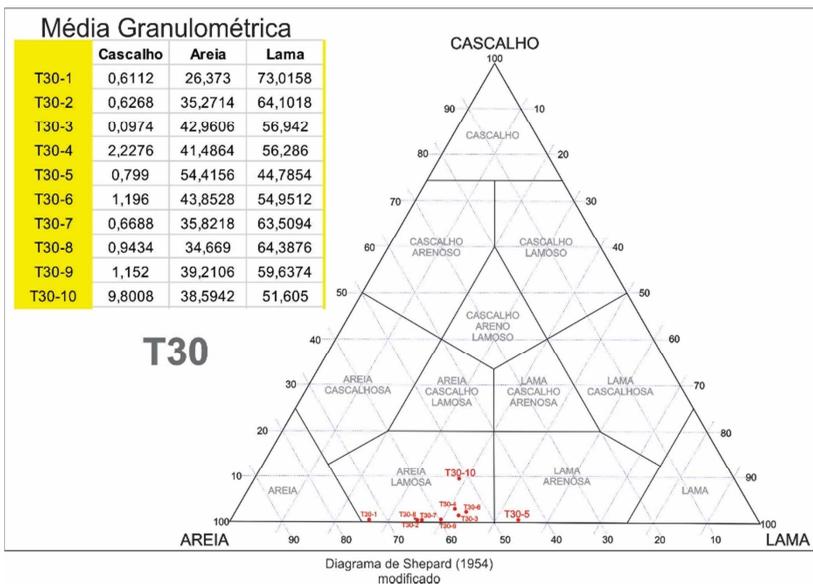
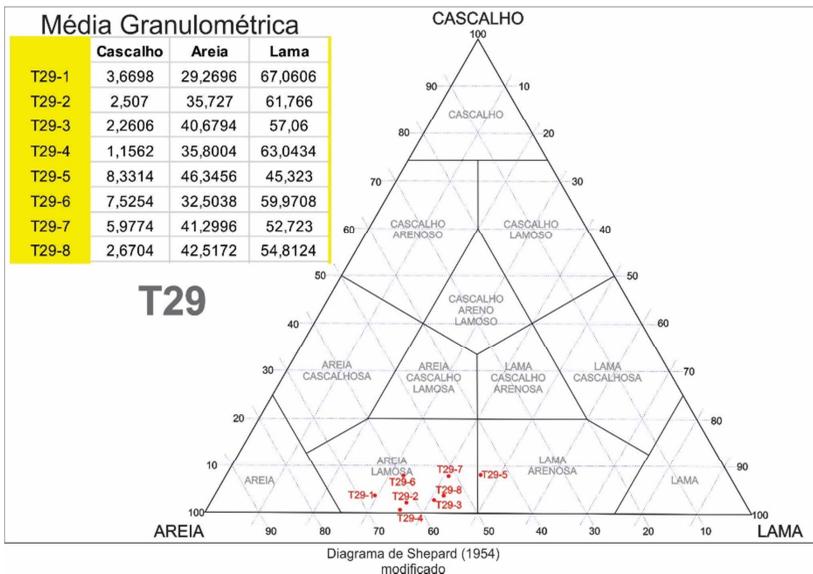


Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T28-1	8,07	43,7606	48,1694
T28-2	21,1992	38,8152	39,9856

T28





Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T31-1	0,649	35,132	64,219
T31-2	1,0696	37,7978	61,1326
T31-3	2,1182	31,822	66,0598
T31-4	5,449	41,173	53,378
T31-5	11,6766	31,868	56,4554

T31

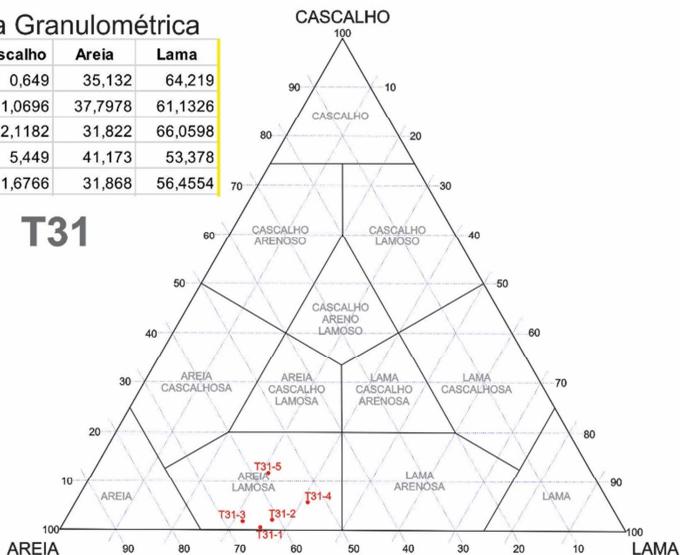


Diagrama de Shepard (1954) modificado

Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T32-1	0,308	30,4918	69,2002
T32-2	0	35,0796	64,9204
T32-3	0,3122	35,8502	63,8376
T32-4	1,8758	35,7928	62,3314
T32-5	0,4708	39,2992	60,23
T32-6	8,1258	54,3294	37,5448
T32-7	1,3558	54,3972	44,247
T32-8	0,175	44,4876	55,3374
T32-9	0,6212	40,8472	58,5316

T32

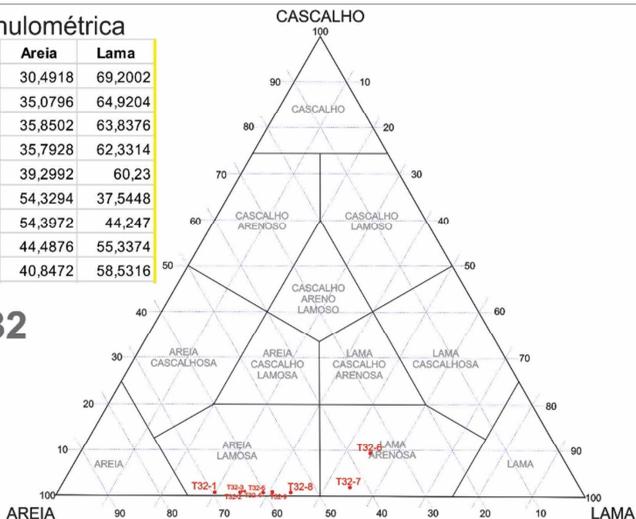
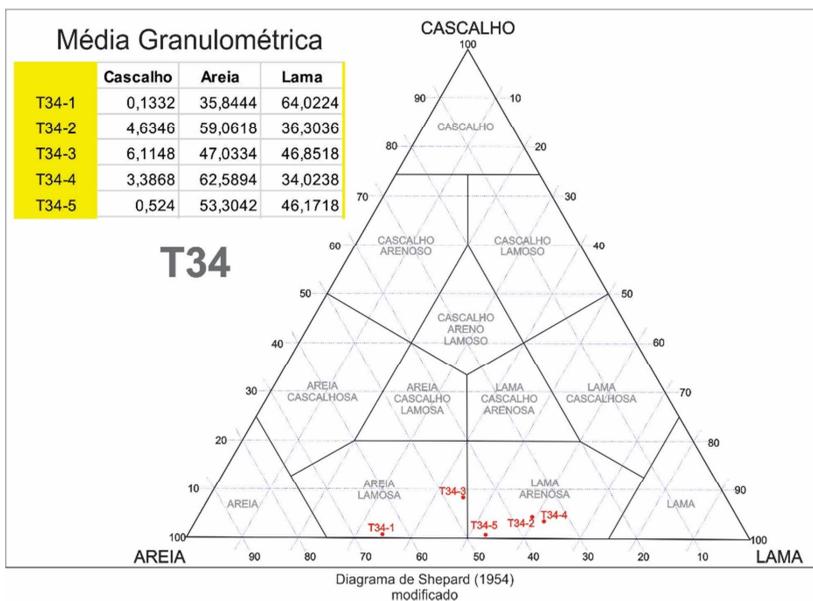
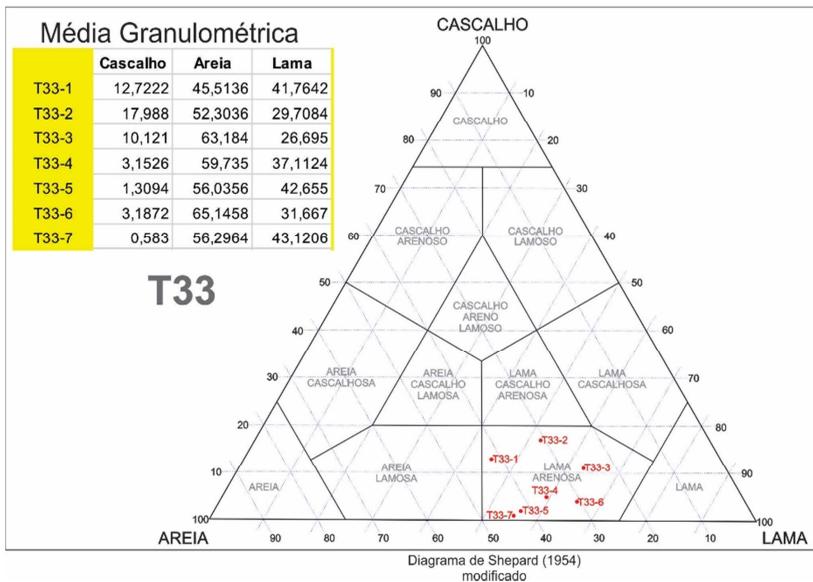


Diagrama de Shepard (1954) modificado



Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T35-1	2,8206	54,1962	42,9832
T35-2	10,9618	49,1528	39,8854
T35-3	1,806	53,6374	44,5566
T35-4	0,538	48,7048	50,7572
T35-5	0,821	44,7244	54,4546
T35-6	1,7416	61,4834	36,775
T35-7	4,4854	62,0868	33,4278
T35-8	5,7516	60,8458	33,4026
T35-9	13,841	55,7382	30,4208
T35-10	2,0768	51,6122	46,311

T35

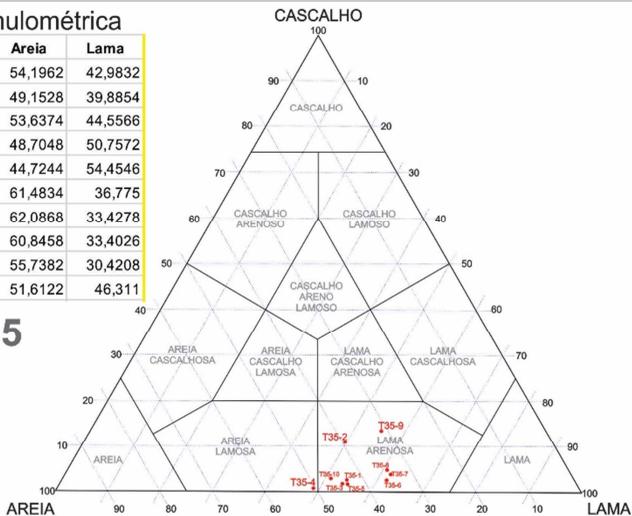


Diagrama de Shepard (1954) modificado

Média Granulométrica

	Cascalho	Areia	Lama
T36-1	0,4508	39,4882	60,061
T36-2	0,3662	34,376	65,2578
T36-3	2,8214	56,976	40,2926
T36-4	10,5938	56,6422	32,764
T36-5	0,8022	47,0374	52,1604
T36-6	7,8888	56,1264	35,9848
T36-7	15,114	49,7982	35,0878

T36

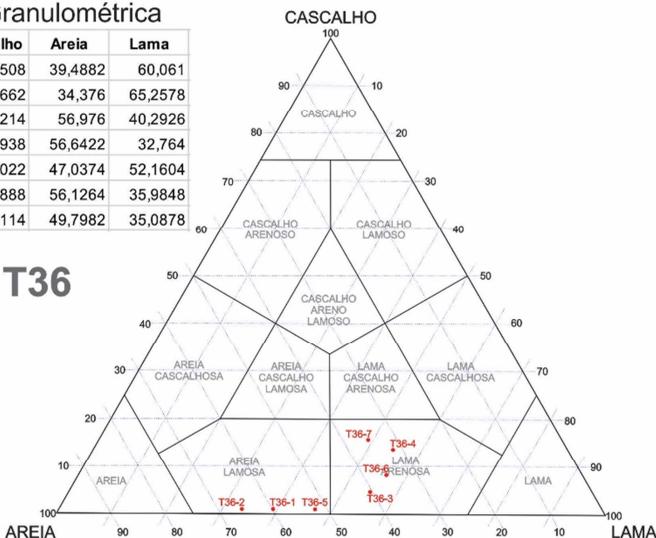
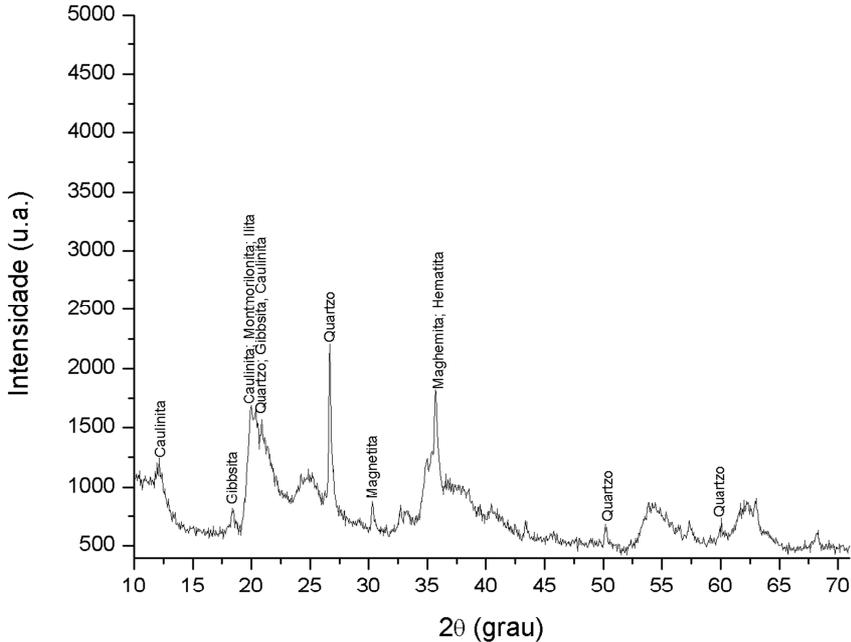
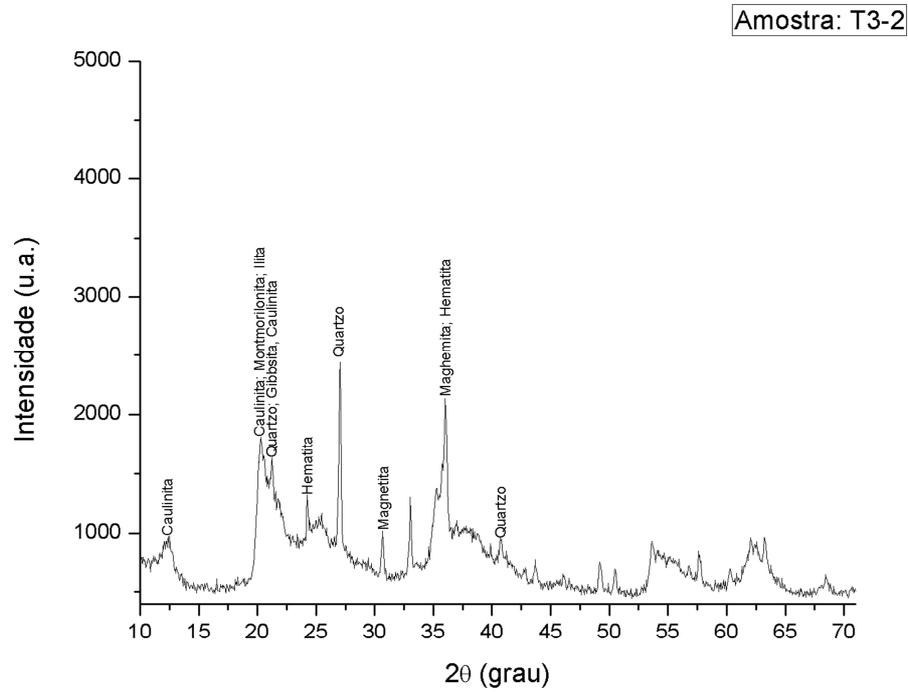


Diagrama de Shepard (1954) modificado

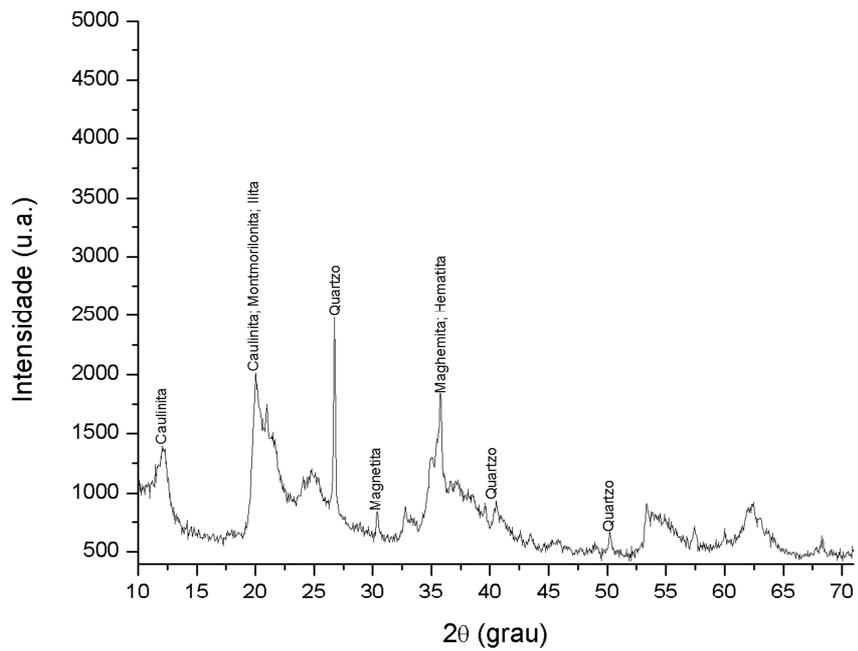
**ANEXO III - GRÁFICOS DE DIFRATOMETRIA DE
RAIOS X**

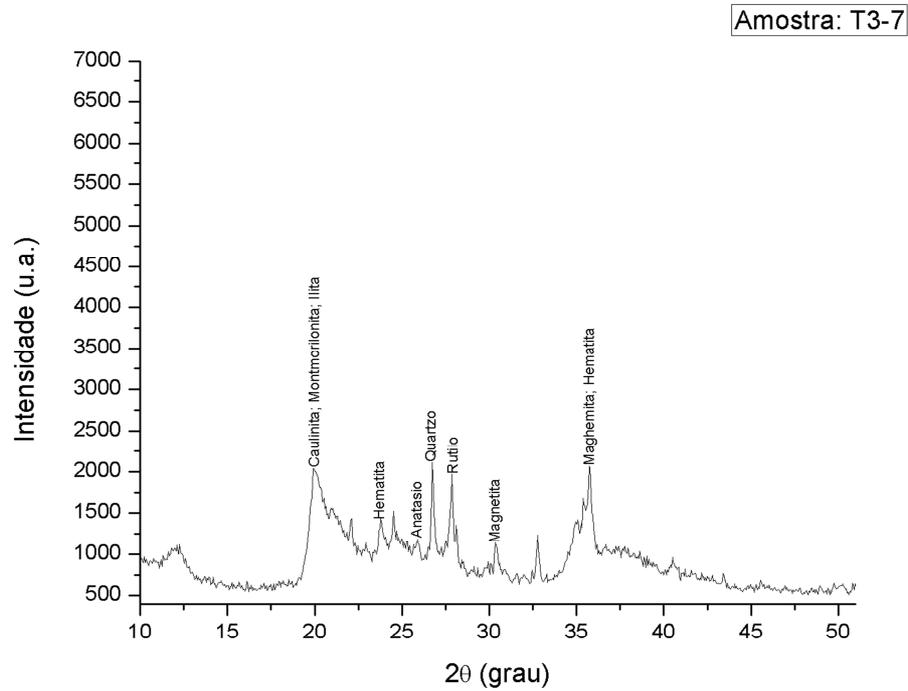
Amostra: T3-1



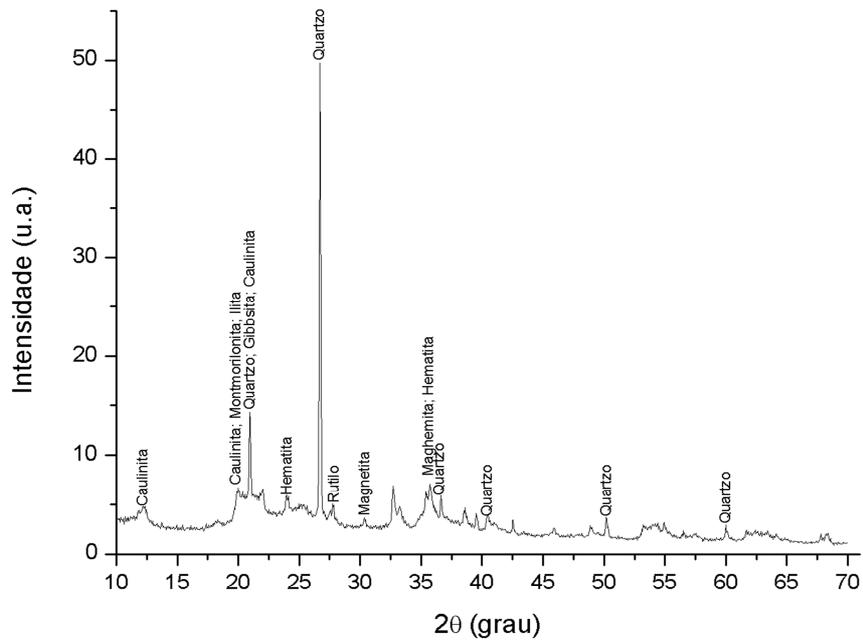


Amostra: T3-4

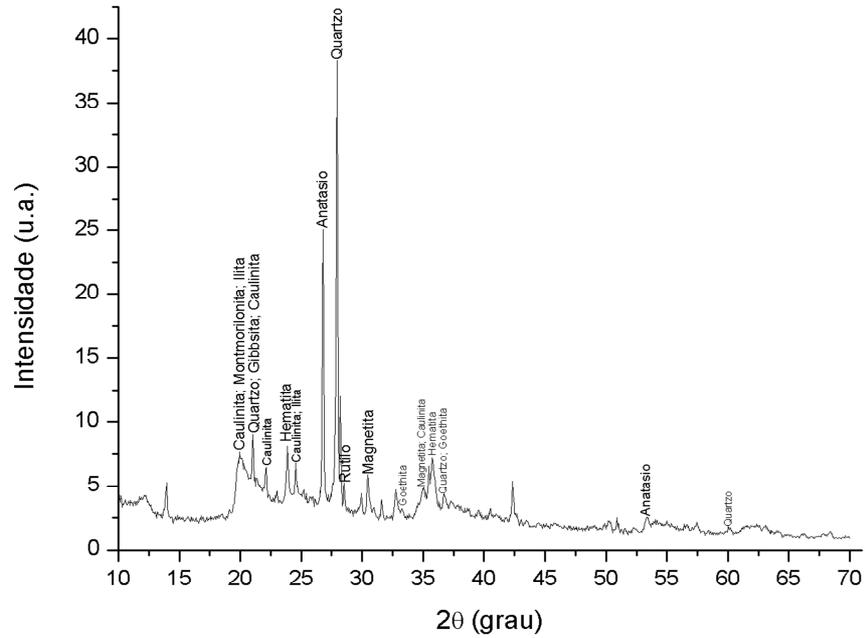




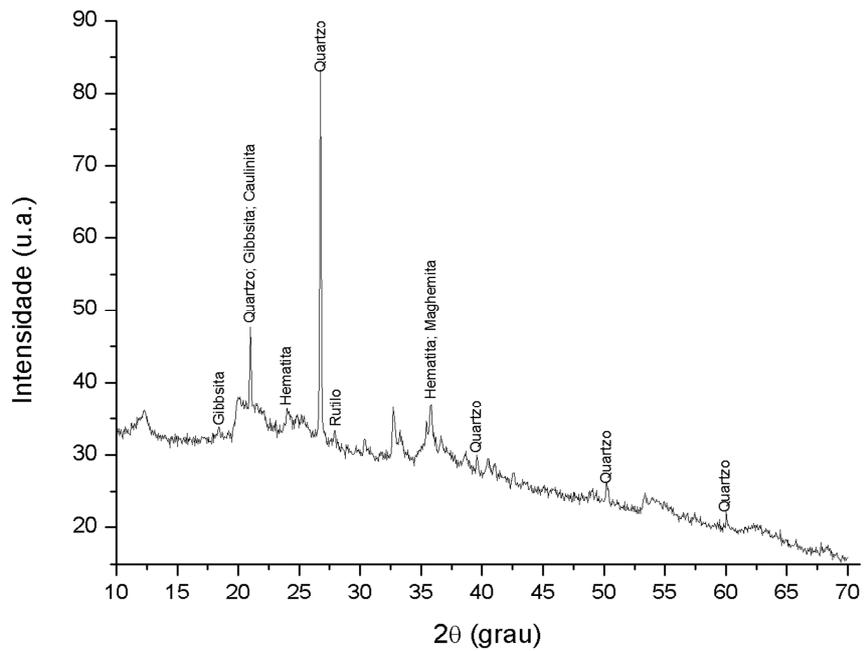
Amostra: T7-1



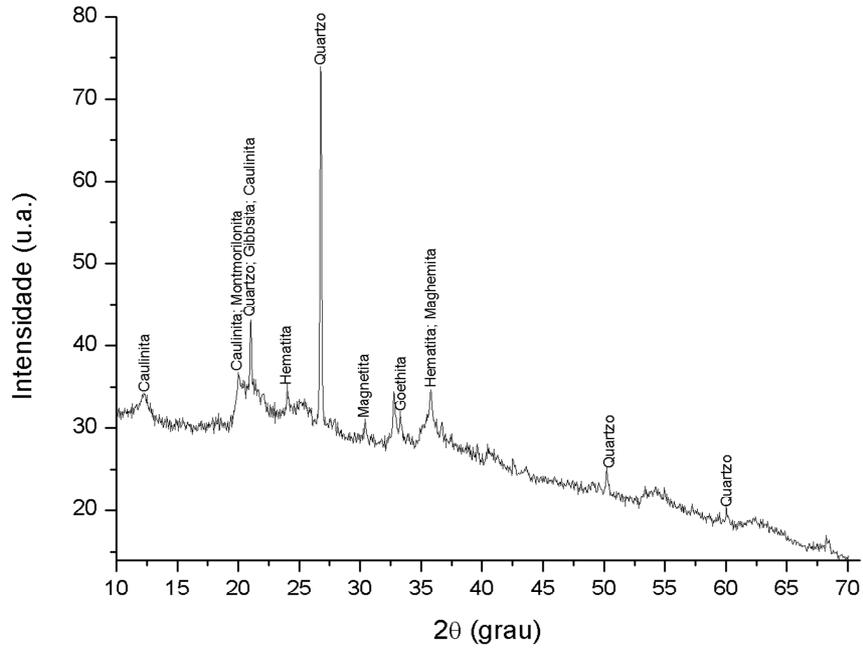
Amostra:T11-1

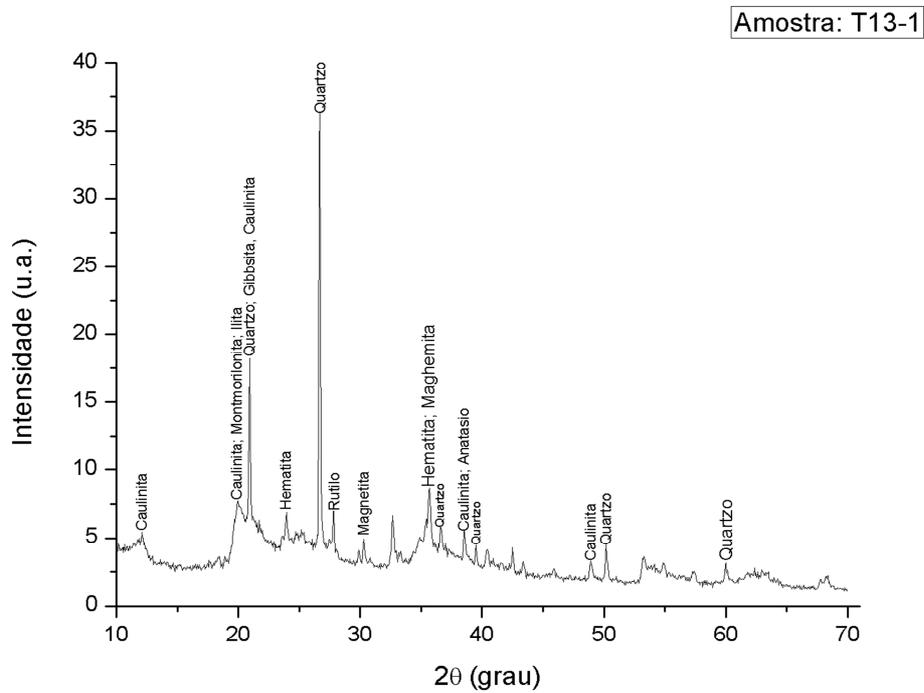


Amostra: T12-1

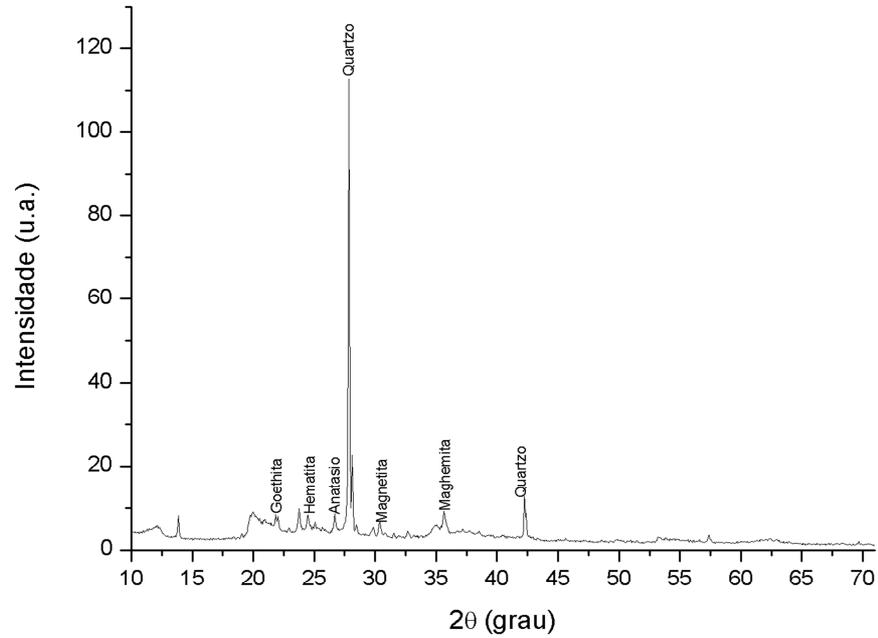


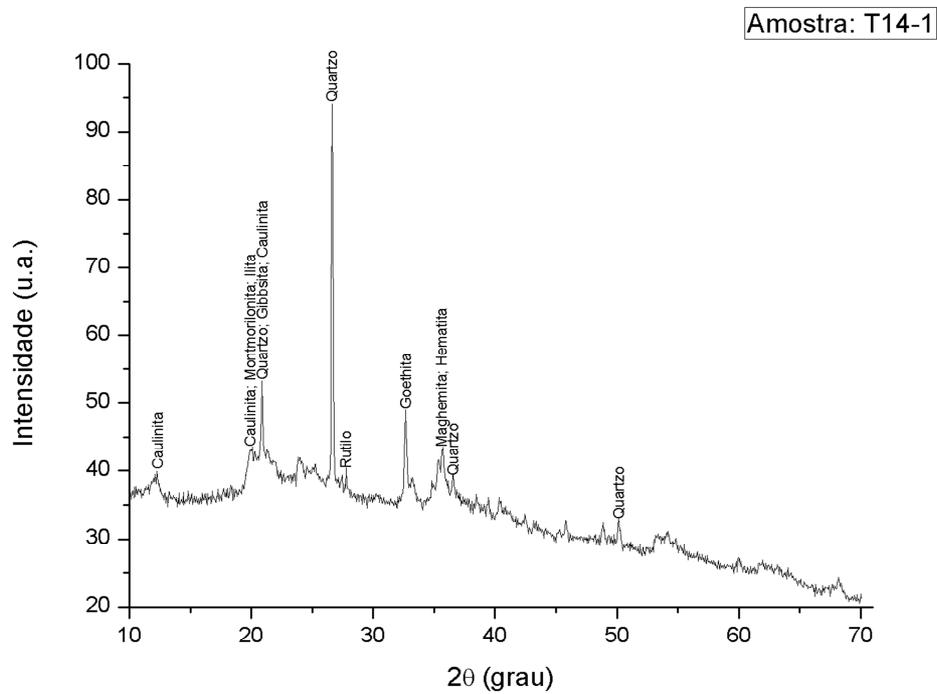
Amostra: T12-3



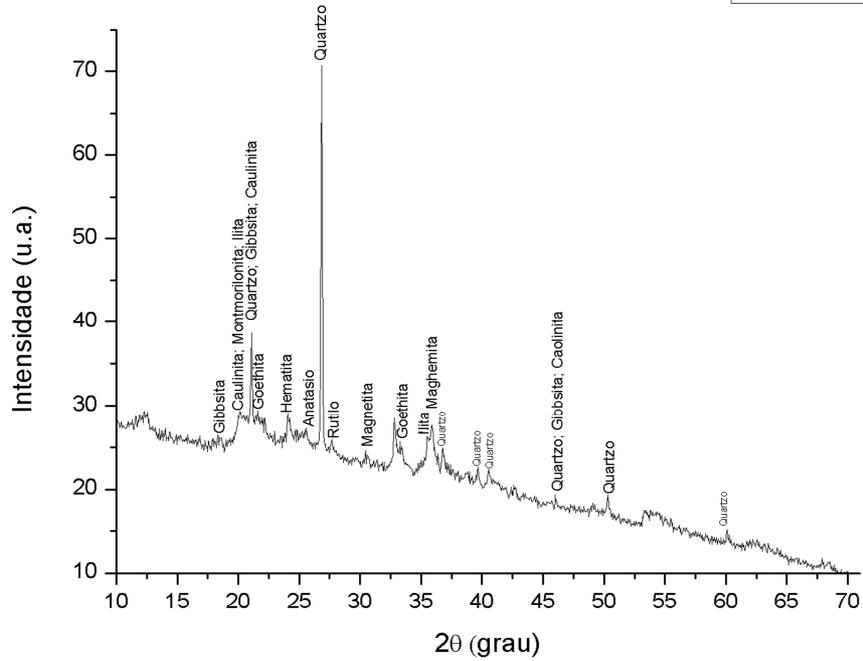


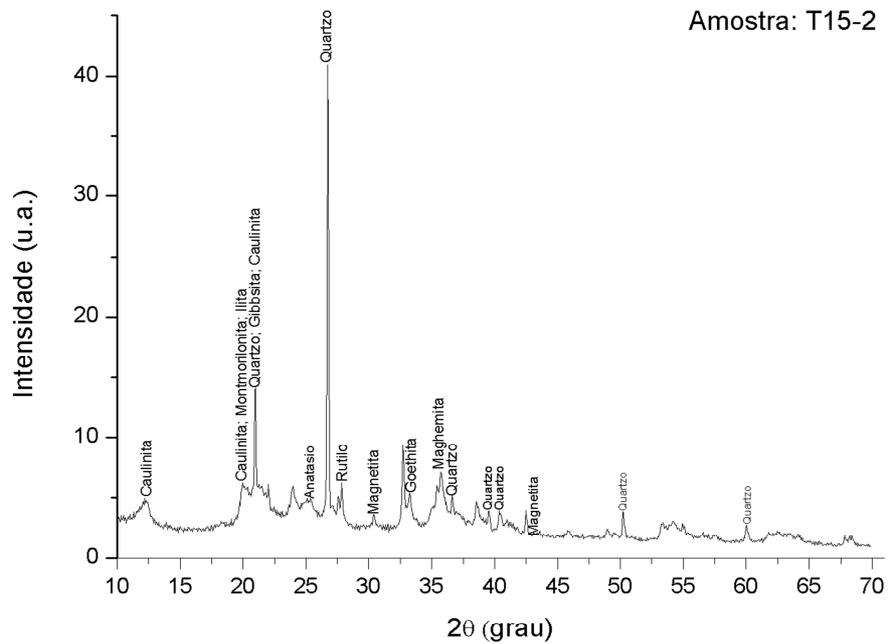
Amostra: T13-3



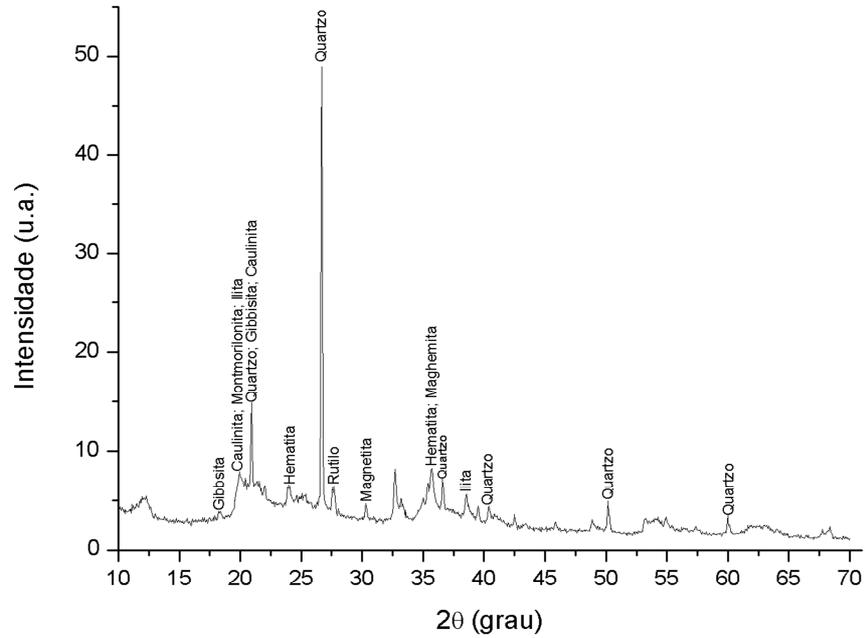


Amostra: 15-1

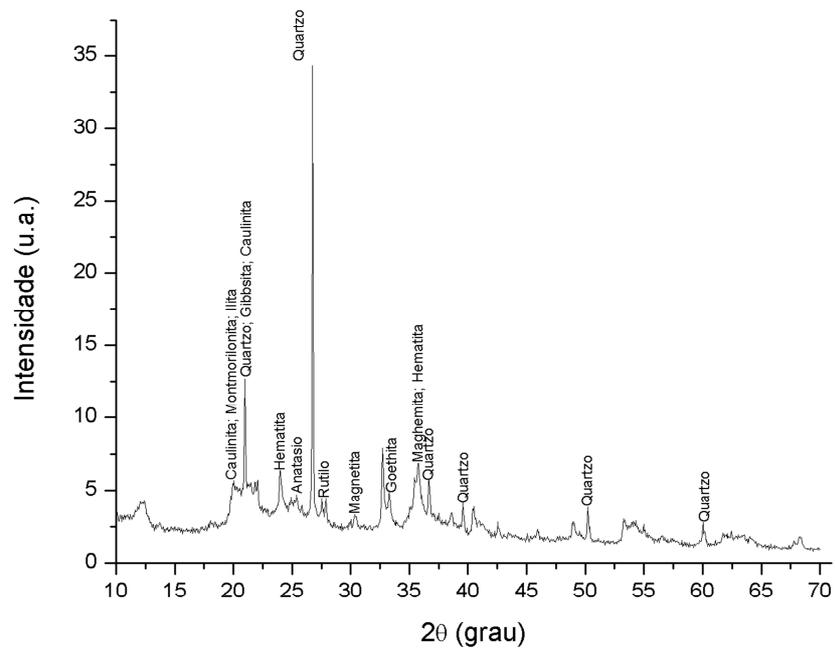


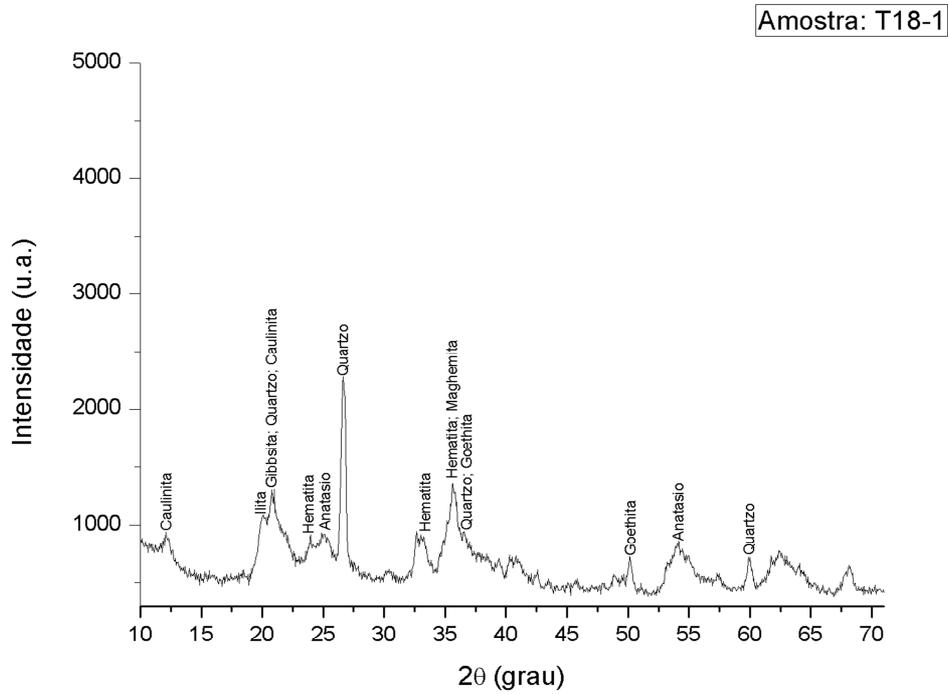


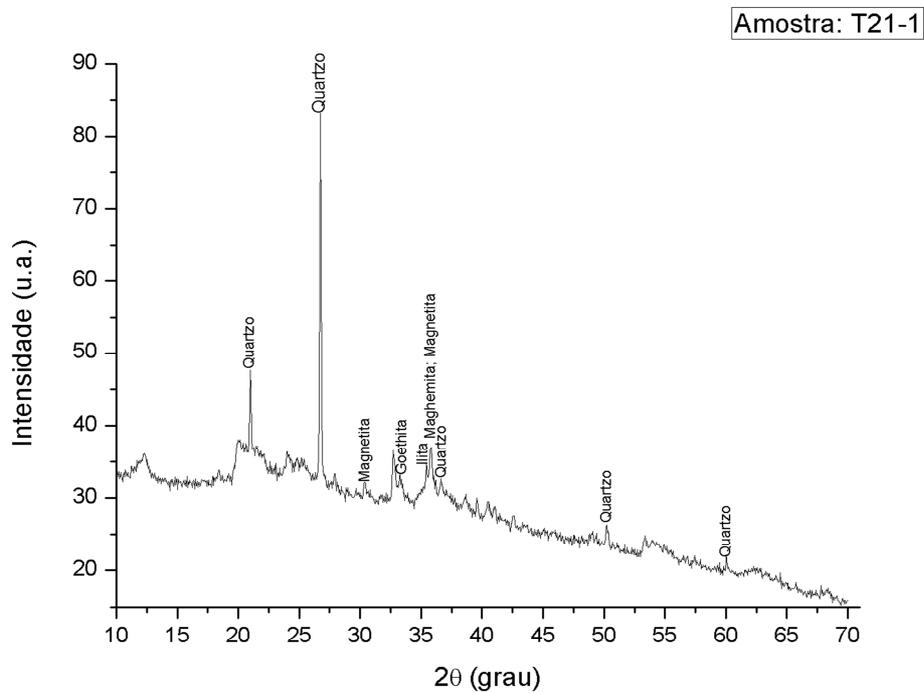
Amostra: T16-1

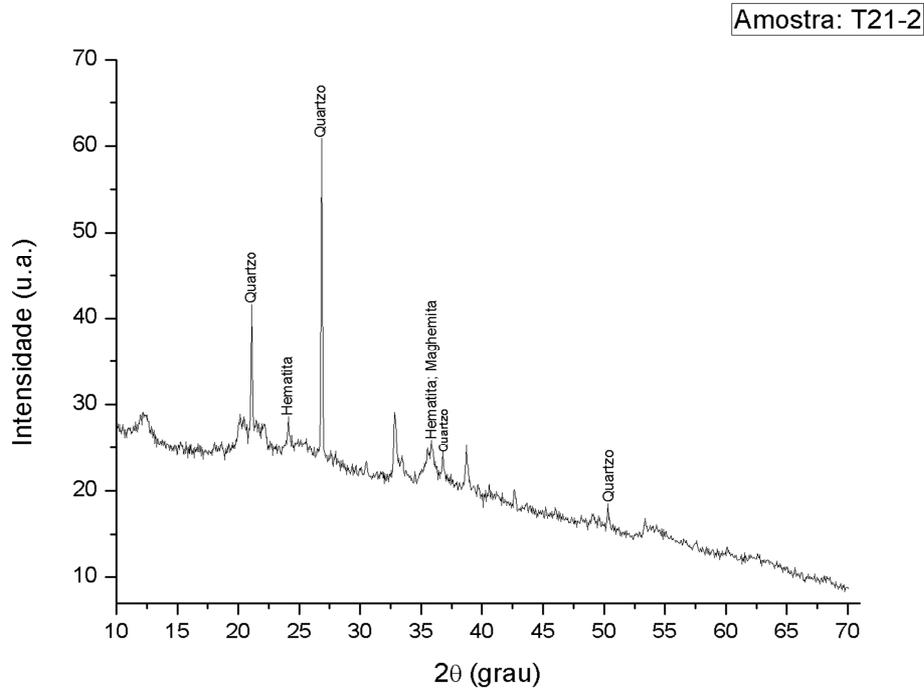


Amostra: T16-2

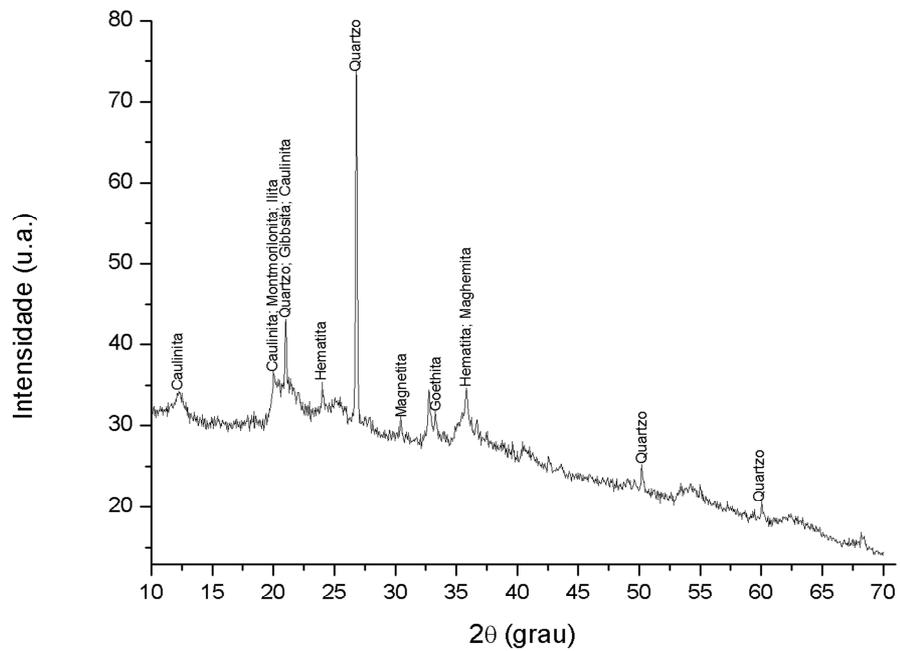


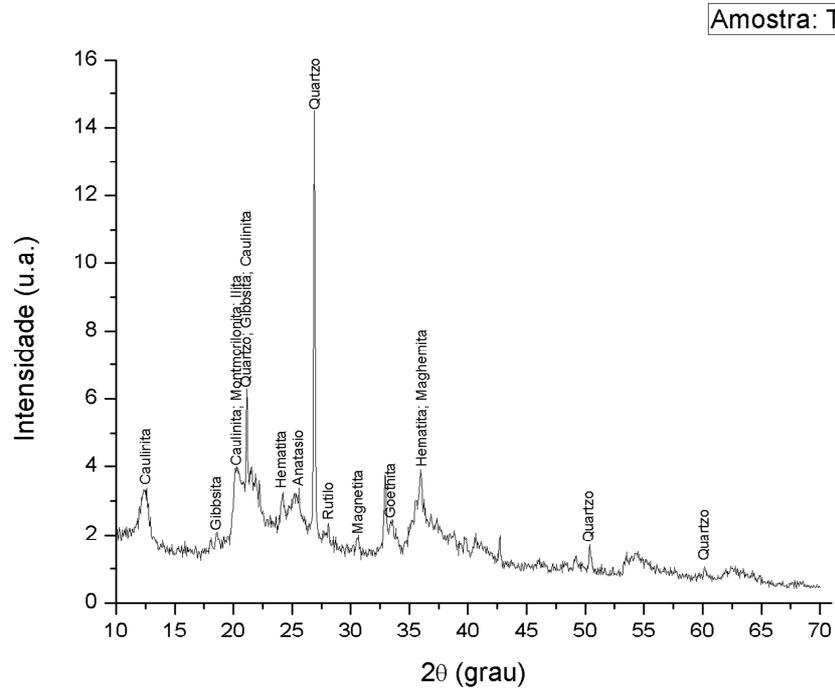




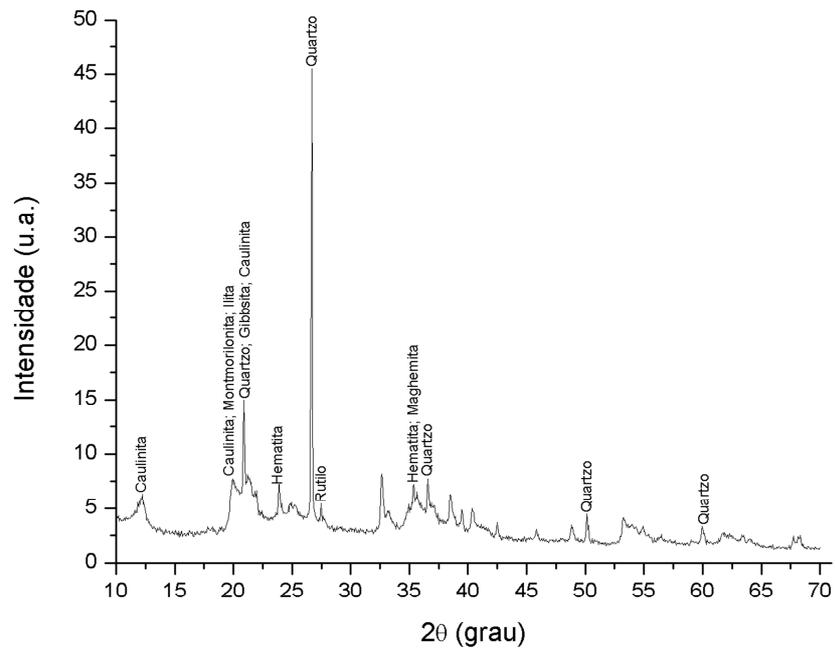


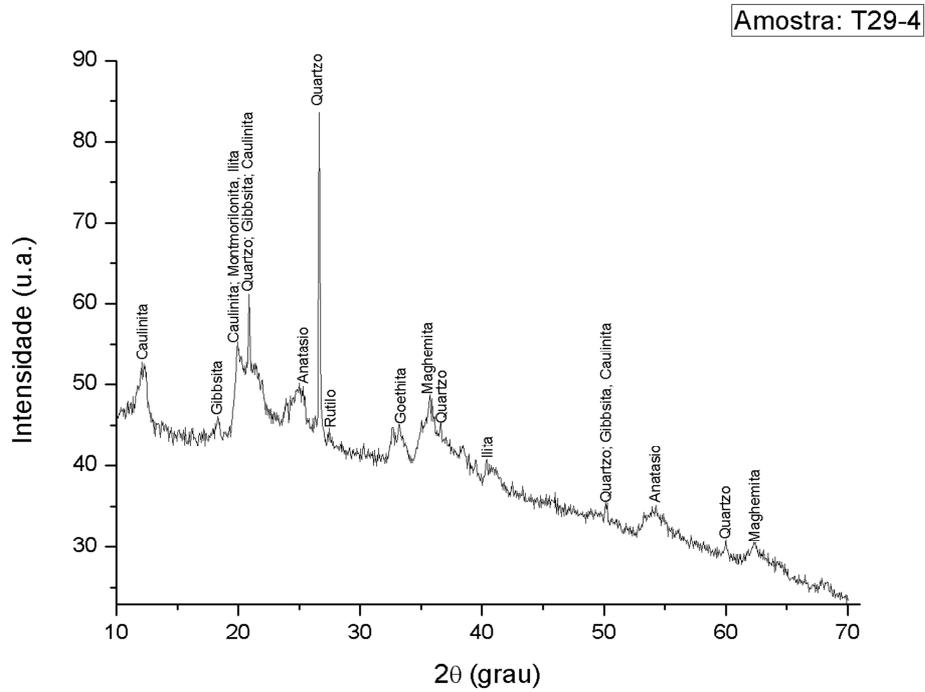
Amostra: T21 - 3



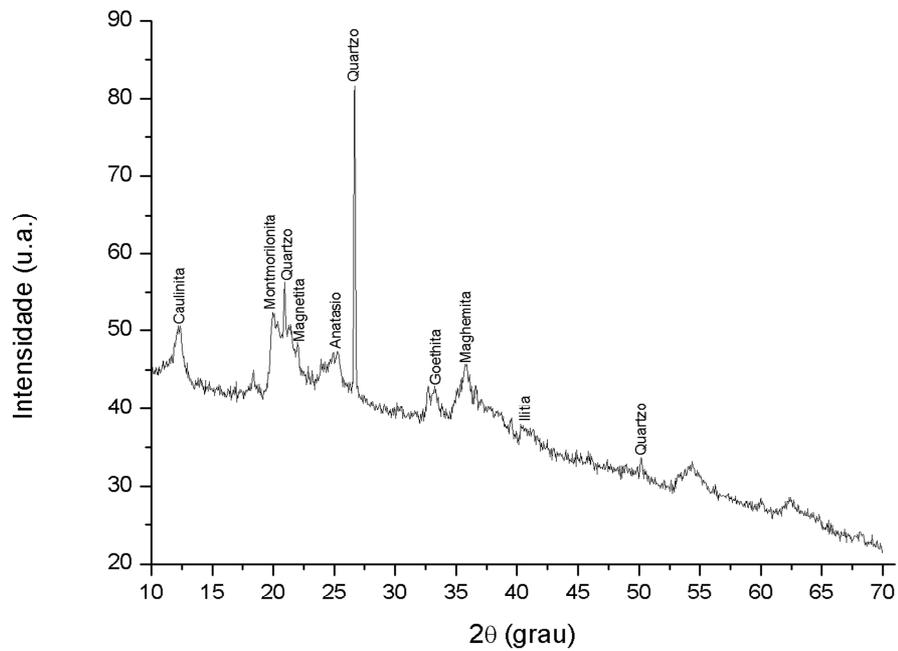


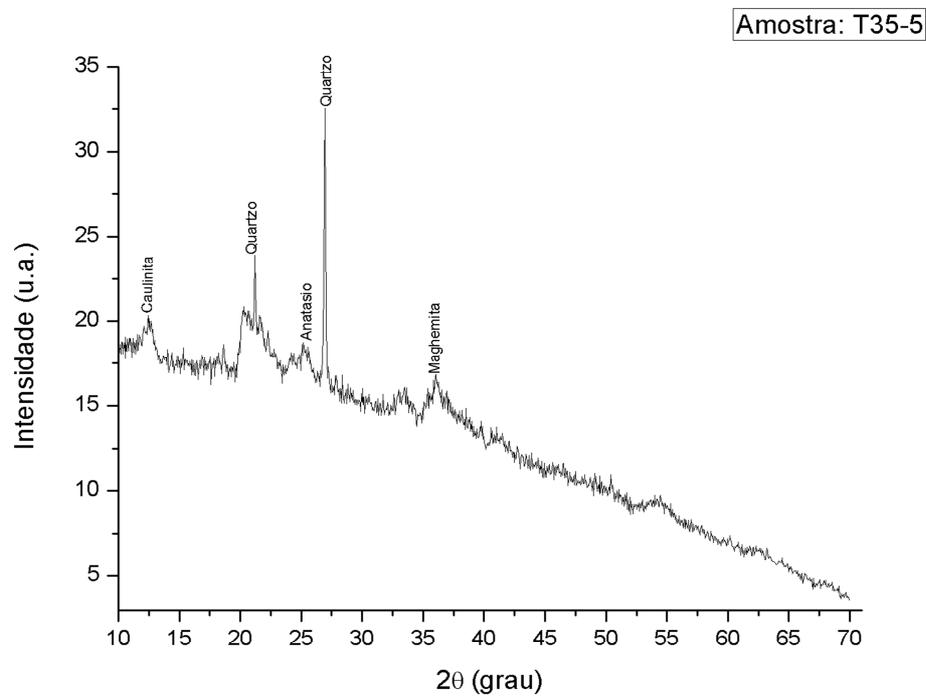
Amostra: T25-8





Amostra: T30-5





Amostra: 36-5

