

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DOS HORIZONTES DE  
ALTERAÇÃO DA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO, COMO  
DIAGNÓSTICO PARA A ERODIBILIDADE, EM MANAUS-AM.

ELTON RODRIGO ANDRETTA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOCIÊNCIAS

MANAUS

Maio de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ELTON RODRIGO ANDRETTA

CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DOS HORIZONTES DE  
ALTERAÇÃO DA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO, COMO  
DIAGNÓSTICO PARA A ERODIBILIDADE, EM MANAUS-AM.

Dissertação apresentada ao Curso de  
Mestrado do Programa de Pós-Graduação em  
Geociências da Universidade Federal do  
Amazonas, como requisito parcial para  
obtenção do grau de **Mestre em  
Geociências**.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima

MANAUS  
Maio de 2014

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

A561c Andretta, Elton Rodrigo  
CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DOS HORIZONTES DE  
ALTERAÇÃO DA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO, COMO  
DIAGNÓSTICO PARA A ERODIBILIDADE EM MANAUS/AM. /  
Elton Rodrigo Andretta. 2014  
105 f.: il. color; 30 cm.

Orientador: Raimundo Humberto Cavacante Lima  
Tese (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do  
Amazonas.

1. Erosão. 2. Voçoroca. 3. Área de Risco. 4. Manaus. I. Lima,  
Raimundo Humberto Cavacante II. Universidade Federal do  
Amazonas III. Título

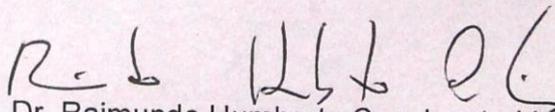
ELTON RODRIGO ANDRETTA

CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DOS HORIZONTES DE  
ALTERAÇÃO DA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO, COMO DIAGNÓSTICO  
PARA A ERODIBILIDADE EM MANAUS/AM

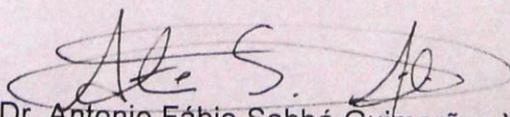
Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Geociências da  
Universidade Federal do Amazonas,  
como requisito parcial para obtenção do  
Título de Mestre em Geociências, área  
de concentração em Geociências.

Aprovado em 02 de julho de 2014.

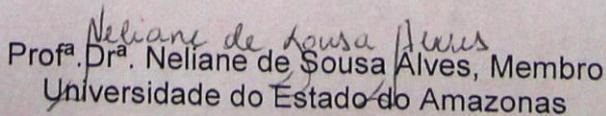
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima, Presidente  
Universidade Federal do Amazonas



Prof. Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira, Membro  
Universidade Federal do Amazonas



Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Neliane de Sousa Alves, Membro  
Universidade do Estado do Amazonas

*Dedico este trabalho aos meus  
filhos Carlos Eduardo e Murilo,  
e a minha esposa Nubya.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Raimundo Humberto Cavalcante Lima pela orientação, incentivo, correções e transmissão de conhecimentos durante toda a pesquisa.

À CPRM por todo o apoio, principalmente ao Supervisor José Luiz Marmos e ao Superintendente Marco Antônio de Oliveira por abonar as faltas e atrasos devido a aulas, trabalhos de campos e tempo para dissertação, assim como a liberação de recursos, pessoal e material para execução dos trabalhos de campo e pela cessão de seus laboratórios e técnicos para auxiliar na execução das análises.

A Universidade Federal do Amazonas pela estrutura e qualidade de ensino e por ceder seus laboratórios para execução das análises com apoio para o desenvolvimento da pesquisa.

A Prefeitura e Defesa Civil de Manaus pela disponibilização de dados e imagens muito úteis para a elaboração do trabalho.

Aos meus dedicados pais Elsio e Maria pelo amor, carinho, auxílio e compreensão durante toda a minha vida. Aos meus irmãos Elsio Filho e Everton pela amizade e confiança no meu sucesso.

Desejo expressa a mais profunda gratidão a minha amada esposa Nubya por estar sempre ao meu lado nos momentos difíceis e nas horas de intensa alegria, as quais não haveria sentido sem sua presença, também pelo incentivo, cobrança e auxílio durante todo mestrado. Em especial aos meus filhos Carlos Eduardo e Murilo, minhas principais realizações.

Finalmente a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para concretização deste trabalho.

## RESUMO

Tendo em vista a multiplicação das áreas de risco geológico, em Manaus/AM, nas últimas décadas, devido a ocupação do solo irregular e desordenada, motivou-se a pesquisa da qual resulta esta dissertação de mestrado. Seu objetivo principal foi avaliar características intrínsecas dos horizontes de intemperismo da Formação Alter do Chão, que se acham sob a capital amazonense, analisando seus atributos físicos e mineralógicos, bem como sua descrição tátil visual; além disso, buscou-se avaliar o risco geológico, as características exógenas como a pluviosidade, a antropização e a evolução da paisagem local, para tanto, utilizaram-se imagens de satélite e aéreas, correlacionando esses fatores com o desenvolvimento de feições erosivas encontradas em duas áreas de estudos: a primeira área, localizada no bairro Jorge Teixeira, na comunidade João Paulo e a segunda, localizada no bairro Cidade Nova, entre as comunidades Conjunto Cidadão I e Campo Dourado I, respectivamente, nas zonas leste e norte da cidade. A metodologia aplicada consistiu no levantamento bibliográfico; análises de mapas-base; imagens de satélite e fotografias aéreas; investigação de campo com descrição e hierarquização dos setores de risco geológico; ensaios em campo com coleta de amostras por sondagem a trado; análises físicas por ensaios de granulometria e limites de consistência, e ensaios mineralógicos por difração de raios-x. As imagens aéreas e de satélites, aqui analisadas, foram capturadas entre os anos de 2004 a 2013. Na primeira área, as voçorocas nos finais dos arruamentos já estavam bem evoluídas nas imagens de 2004; até 2007, percebe-se a evolução principalmente lateral das bordas das voçorocas; nas imagens de 2010 e 2011, percebe-se uma boa recuperação da vegetação; já na imagem de 2013, diminuição da atividade de erosão, poucos deslizamentos das bordas são notados. Na segunda área, em 2004, observa-se a implantação do Conjunto Cidadão I, com infraestrutura e planejamento; após 2007, algumas casas são retiradas do sopé da encosta, e, nas imagens seguintes, de 2010, 2011 e 2013, a encosta aparece em franca recuperação da vegetação. No mapeamento em risco, executado em campo na 1ª área, verificam-se setores de risco alto a muito alto, com várias moradias próximas às voçorocas; na 2ª área temos apenas um setor em risco alto de soterramento, no sopé da encosta, próximo a feições erosivas menores. Sondagens a trado de 10 metros foram executadas para análise tátil visual e coleta de amostras. Os dados granulométricos, com cálculos de coeficiente de curvatura, grau de uniformidade e dos ensaios de limites de consistência, da 1ª área, indicam boa resistência à erosão, porém, nesse local distinguem-se grandes feições erosivas. Na 2ª área decorre uma menor influência antrópica, sendo que os dados adquiridos nas análises têm comportamento equivalente ao visto em campo. Até 6,5 metros de profundidade, as análises indicam boa resistência das camadas à erosão; abaixo desta, a erodibilidade do material avoluma-se, dando margem a se observar feições erosivas. Para cada local estudado, os agentes endógenos e exógenos atuam de forma diferente. Os principais responsáveis pela formação das voçorocas, na primeira área, são os agentes exógenos somados à antropização e falta de infraestrutura. Na segunda área os fatores endógenos, com as características dos horizontes, foram decisivos para indicar as camadas mais suscetíveis à erosão.

Palavras-chave: Erosão, Voçoroca, Área de Risco, Manaus.

## ABSTRACT

Considering the proliferation of areas of geohazard in Manaus-AM, in the last decades, because of irregular and unplanned occupation, it stimulated this research which resulted in this master dissertation. The main objective is to evaluate intrinsic characteristics of weathering horizons of Alter do Chão Formation, which are under the city of Manaus, analyzing their physical and mineralogical properties and its visual tactile description, also evaluating the geohazard, exogenous characteristics such as rainfall, to anthropization and the evolution of the local landscape from imagery satellite and aerial correlating these factors with the development of erosional features found in two fields of study, the first study area located in the neighborhood Jorge Teixeira, in the community João Paulo, encompassing the late streets, the second area is located in the neighborhood Cidade Nova between the communities Conjunto Cidadão I and Campo Dourado I. These areas are respectively the eastern and northern parts of the city. The methodology applied in this study consisted of in the bibliographical survey, analysis of base maps, satellite images and aerial photographs, field research with description and the hierarchization of geohazard sectors, characterization tests on field and samples collected by probing in auger, analyzes physical, by tests of the particle size and limits consistency and mineralogical assays by x-ray diffraction. Developments mainly lateral edges of the craters are analyzed aerial and satellite images between the years 2004 to 2013, the first area in the late gullies streets were already well evolved in pictures 2004 until 2007 he perceives the images 2010 and 2011 we see a good recovery of the vegetation and the image of 2013 gullies appear to be completely stagnant with vegetation recovered. In the second area in 2004 noted the implementation of the community Conjunto Cidadão I, with infrastructure and planning, after 2007 some houses are removed from the foot of the slope, the following images 2010, 2011 and 2013 the slope appears to be safe with vegetation recovery. In geohazard mapping performed in the field in the 1st district looked high and very high hazards sectors with several houses near of the gully, the 2nd area have only one sector at high hazard for burial at the foot of the slope, near the lower erosional features. Soundings by auger of 10 meters were enforced in the two areas, for visual and tactile analysis with sample collection. Grain size data, with calculations of curvature coefficient, degree of uniformity and tests of consistency limits of the 1st district indicate good resistance to erosion, but this site is great erosional features. In the 2nd area for a smaller anthropogenic influences and the data acquired in the analyzes are equivalent to the behavior seen in the field, up to 6.5 meters deep analysis showing good resistance to erosion of the layers, below that the erodibility of the material increases and features are observed erosive. The activities of endogenous and exogenous agents are different for each site studied. Mainly responsible for formation of gullies in the first area are exogenous agents added to anthropization and a lack of infrastructure. In the second area, the endogenous factors, the characteristics of the layers are decisive to indicate the most susceptible to erosion layers.

Keywords : Erosion , Gullies , Geohazard , Manaus.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>12</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2. METODOLOGIA.....</b>	<b>16</b>
2.1 Seleção e localização das áreas de estudo.....	16
2.2 Preparação de mapas base para uso em campo .....	18
2.3 Etapas de Campo .....	19
2.3.1 Mapeamento de risco geológico.....	19
2.3.2 Sondagem a trado e coleta de amostras .....	21
2.4 Ensaio laboratoriais .....	23
2.4.1 Ensaio físicos .....	23
2.4.1.1 Análise granulométrica .....	24
2.4.1.2 Limites de consistência (Atterberg) .....	30
2.4.2 Identificação mineral por difratometria de raios X.....	36
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>38</b>
3.1 Meio Físico .....	38
3.1.1 Geologia Regional .....	38
3.1.4 Clima .....	42
3.1.5 Relevo .....	44
3.2 Fenômenos de risco .....	45
3.2.1 Erosão .....	46
3.2.2 Deslizamentos ou Escorregamentos .....	49
3.3 Natureza das coberturas de alteração.....	51
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>54</b>
4.1 Descrição e análise de imagens aéreas e de satélite .....	54
4.2 Mapeamento de risco geológico.....	65
4.3 Descrição e análise dos perfis a trado.....	71
4.4 Análises físicas – descrição dos resultados de laboratório .....	75
4.4.1 Granulometria.....	75
4.5 Análise mineralógica – descrição dos resultados – DRX .....	85
<b>5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>92</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>98</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01	Localização das áreas de estudo na cidade de Manaus	16
Figura 02	Localização da 1ª área de estudo no bairro Jorge Teixeira, com localização dos pontos visitados (Jt) e de sondagem (ST)	17
Figura 03	Segunda área de estudo, com pontos de descrição de risco (Cn) e de sondagem a trado (ST2)	18
Figura 04	Início da sondagem a trado, no dia 15/07/2013, utilizando cavadeira, trado tipo concha no chão a esquerda. Local: Ponto ST-01, bairro Jorge Teixeira	22
Figura 05	Amostra retirada do furo de sondagem ST-01, no bairro Jorge Teixeira, sobre lona, para análise táctil-visual e coleta. Data 15/07/2013	22
Figura 06	Amostras coletadas, armazenadas e identificadas	23
Figura 07	Balanças de precisão e estufa usadas nas análises granulométricas	25
Figura 08	Escala em $\Phi$ de Wentworth	26
Figura 09	Peneiras utilizadas para ensaio granulométrico por peneiramento	27
Figura 10	Conjunto Granulométrico a laser e unidade hidro 2000 MU	28
Figura 11	Limites de consistência, em relação ao aumento da umidade h(%)	30
Figura 12	Amostra passando pela peneira com abertura de 0,425mm (35 mesh)	31
Figura 13	Espátula e recipiente de porcelana, usados nas análises de limite de liquidez e de plasticidade	31
Figura 14	Aparelho Casagrande, usado nas análises de limite de liquidez	32
Figura 15	Cinzel utilizado para fazer a ranhura na amostra colocada no aparelho Casagrande	32
Figura 16	Aparelho Casagrande com amostra preparada para a execução do ensaio	33
Figura 17	Gabarito de 3mm de espessura e 10cm de comprimento com amostra	34
Figura 18	Carta de plasticidade de Casagrande	36
Figura 19	Gral de ágata, soquete, porta amostra e placa de vidro	37
Figura 20	– Difratômetro de raios-x Shimadzu, do Lab. De Tec. Mineralógicas – UFAM	37
Figura 21	Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas	40
Figura 22	Perfil geológico simplificado para lateritos imaturo e maturo	42
Figura 23	Gráfico das precipitações médias mensais em milímetros entre os anos de 1998 a 2014, pluviômetro instalado e monitorado pela CPRM	43
Figura 24	Gráfico das precipitações médias mensais, de Janeiro de 1984 à Janeiro de 2014. Dados do pluviômetro do INMET estação 82331, localizado em Manaus - AM	44
Figura 25	Esboço geomorfológico da cidade de Manaus e arredores	45
Figura 26	“Splash”, impacto da gota e destacamento das partículas do solo	47
Figura 27	Escorregamento planar	50
Figura 28	Escorregamento rotacional	51
Figura 29	Escorregamento em cunha	52
Figura 30	Imagem de satélite de 2004 da 1ª área	55
Figura 31	Imagem do satélite Geoeye de Junho de 2005, com delimitação da 1ª área	56
Figura 32	Imagem do satélite Geoeye de Julho de 2007, com delimitação da 1ª área	57
Figura 33	Fotografia aérea da 1ª área de estudo, de outubro de 2010	58

Figura 34	Imagem do satélite Geoeye de Novembro de 2011, com delimitação da 1ª área	59
Figura 35	Imagem do satélite Geoeye de Outubro de 2013, com delimitação da 1ª área	60
Figura 36	Imagem de satélite Quickbird de 2004, 2ª área de estudo	61
Figura 37	Imagem do satélite Geoeye de Junho de 2005, com a delimitação da 2ª área	62
Figura 38	Imagem do satélite Geoeye de Junho de 2007, com a delimitação da 2ª área	63
Figura 39	Fotografia aérea ortorretificada de Outubro de 2010, da 2ª área de estudo	63
Figura 40	Imagem do satélite Geoeye de Novembro de 2011, com a delimitação da 2ª área	64
Figura 41	Imagem do satélite Geoeye de Agosto de 2013, com a delimitação da 2ª área	64
Figura 42	Delimitação das áreas de risco na 1ª área de estudo.	65
Figura 43	Composta por 4 fotos do ponto Jt1. 1 – Imagem lateral de uma voçoroca. Observam-se restos da base de uma casa. 2 – Voçoroca na direção do fluxo, com igarapé assoreado no vale. 3 – Topo da voçoroca com lixo e entulho despejados pela população local. 4 – Obras de infraestrutura subdimensionadas, danificadas e ineficientes	66
Figura 44	Fotos ponto JT2. 5 – Casa próximo da voçoroca. 6 – Direção do fluxo de escavação da voçoroca com igarapé assoreado. 7 – Voçoroca com lixo e entulho na encosta, casa próxima. 8 – Laje de casa já removida do local, caminho preferencial da água e tubulação danificada	67
Figura 45	Fotos 9 e 10 – Imagem do ponto JT3. 9 – Voçoroca paredes íngremes, visualização dos horizontes argiloso e saprolítico. 10 – Voçoroca com cicatrizes na parede indicando um próximo deslizamento	68
Figura 46	Foto aérea ortorretificada de 2010, com delimitação do risco geológico.	69
Figura 47	Ponto Cn-01, feições erosivas aparentes na base da encosta	70
Figura 48	Foto de detalhe da base do talude, com indicações de algumas feições erosivas	70
Figura 49	Foto em detalhe de sulco erosivo encontrado na segunda área de estudo	71
Figura 50	Perfil litológico, táctil-visual, com descrição do material e profundidades de coletas do furo de sondagem ST1, na 1ª área de estudo	73
Figura 51	Perfil litológico, com descrição táctil-visual, profundidades de coletas, do furo de sondagem ST2, na 2ª área de estudo	74
Figura 52	Diagrama de Folk (1954), com proporções de argila, silte e areia e a classificação das amostras do primeiro furo de sondagem	78
Figura 53	Diagrama de Folk (1954), com proporções de finos (argila + silte), areia e cascalho (grânulos) e a classificação das amostras, da primeira sondagem	79
Figura 54	Diagrama de Folk (1954), com proporções de argila, silte e areia com a classificação das amostras, do segundo furo de sondagem	80
Figura 55	Diagrama de Folk (1954), com a classificação e as quantidades de cascalho, areia e finos das amostras do segundo furo de sondagem	81
Figura 56	Gráfico mostrando distribuição das amostras do primeiro furo de sondagem (ST1), na carta de plasticidade de Casagrande, 1948, dados da Tabela 7	84
Figura 57	– Gráfico mostrando distribuição das amostras, do primeiro furo de sondagem (ST2), na carta de plasticidade de Casagrande, 1948, dados da Tabela 8	85
Figura 58	Difratogramas das primeiras camadas encontradas na sondagem ST1	86
Figura 59	Difratograma do horizonte EA-01E, laterita, da sondagem ST1	86
Figura 60	Difratogramas do horizonte mosqueado, encontrado na sondagem ST1	87
Figura 61	Difratogramas das amostras EA-01 I e J, da sondagem ST1 na primeira área	88

Figura 62	Difratogramas das amostras EA-02 A e B, coletadas na sondagem ST2	88
Figura 63	Difratogramas das amostras EA-02 C, da sondagem ST2, horizonte laterítico	89
Figura 64	Difratogramas das amostras EA-02 D, E e F, da sondagem ST2	90
Figura 65	Difratogramas das amostras EA-03 G, H, I, J e K, saprolito da sondagem ST2	91
Figura 66	Gráfico sobreposto do índice de plasticidade com os intervalos granulométricos a esquerda e difratômetros com minerais a direita, referente a amostras do 1º perfil de sondagem (ST1)	94
Figura 67	Gráfico comparativo entre os limites de consistência e intervalos granulométricos a esquerda e difratômetros e minerais a direita, referente ao 2º perfil de sondagem	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Localização geográfica dos pontos de descrição de risco e da sondagem a trado na 1ª área de estudo	17
Tabela 2	Localização geográfica dos pontos de descrição de risco e de sondagem, na 2ª área de estudo no bairro Cidade Nova	18
Tabela 3	Critérios para definição do grau de probabilidade de ocorrências de processos erosivos e de movimento de massa nas áreas mapeadas	21
Tabela 4	Classificação relativa da erodibilidade	48
Tabela 5	Grau de uniformidade e coeficiente de curvatura, amostras da sondagem ST1	76
Tabela 6	Grau de uniformidade e coeficiente de curvatura, amostras da sondagem ST2	77
Tabela 7	Resultados das análises dos limites de consistência, para as amostras coletadas na sondagem a trado ST1, realizado na primeira área de estudo	82
Tabela 8	Limites de consistência para as amostras coletadas na sondagem a trado ST2, da segunda área de estudo	83

## 1. INTRODUÇÃO

A ocupação desordenada das cidades brasileiras, juntamente com a ação antrópica têm ocasionado diversos problemas ao meio ambiente, sobretudo em locais com taludes de alta declividade e grande extensão, que formam feições erosivas e movimentos de massas, o que pode vir a causar danos materiais e de vida à população. A cidade de Manaus, *lócus* desta pesquisa, tem sofrido um processo de intensa expansão de sua área urbana, nos últimos 50 anos, o que se deve principalmente ao fluxo migratório originado pela implementação da Zona Franca e do Distrito Industrial de Manaus, em 1967.

Em 1970, Manaus tinha uma área urbanizada de 25,32 Km<sup>2</sup>, ocupados por 311.622 habitantes, numa densidade de 12,3 hab./km<sup>2</sup>. Em 1991, a cidade já ocupava 300 Km<sup>2</sup>, com uma população de 1.010.558 habitantes e densidade populacional de 3.368 hab./km<sup>2</sup> (IMPLAN / CPRM, 1996). No censo de 2000, Manaus alcançava uma população de 1.405.835 habitantes (IBGE, 2000) ocupando aproximadamente 440 Km<sup>2</sup> - isto significa 3.195 hab./km<sup>2</sup>. E, finalmente, no último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2012 a população alçou a marca de 1.861.838 habitantes, ocupando uma área de 451,56 Km<sup>2</sup> - isto corresponde a uma densidade de 4.123 hab./km<sup>2</sup>, em Manaus.

De acordo com Santos Júnior (2000), esta expansão acelerada, associada à crise econômica instalada no final da década de 80, a qual gerou diminuição de empregos nas indústrias da Zona Franca, vem ocasionando a ocupação urbana de áreas inadequadas a esse fim, tais como: planícies de inundação, leitos de igarapés e encostas declivosas. Estes locais, quando ocupados sem planejamento, apresentam-se como potenciais áreas de risco. O alto índice pluviométrico da região, associado à retirada da cobertura vegetal, ao acúmulo de lixo nas encostas, à impermeabilização do solo e à falta de infraestrutura ocasionam a aceleração dos processos erosivos, gerando voçorocas e movimentos de massas, além de assoreamento de igarapés.

Esses fenômenos, denominados desastres naturais, vêm sendo estudados por diversos autores (GUERRA, 1998; GUERRA e CUNHA, 2001; VIEIRA, 2008). Todavia, como não é possível chegar a um modelo representativo perfeito para todos os casos ocorridos, é importante avaliar os locais isoladamente e comparar quais os pontos semelhantes ou divergentes entre os locais estudados, na tentativa

de se chegar a um modelo para cada lugar ou região. Vieira (2008) estudou as voçorocas de Manaus, analisando as influências dos aspectos geomorfológicos, hidrográficos e antrópicos de 91 voçorocas do município. Concluiu que as voçorocas estão relacionadas a características do relevo, combinadas com o uso e ocupação do solo e com o sistema de drenagem pluvial, contabilizando os danos monetários ocasionados.

Os processos erosivos são decorrentes de fatores externos, como cobertura do solo, declividade do terreno e clima; bem como de fatores internos, como o tipo de solo, estrutura e umidade natural. Em geral, estes fatores configuram-se a características naturais do ambiente; contudo, a intervenção antrópica talvez seja o elemento mais importante nesse fenômeno, por meio da alteração do estado do solo e do escoamento superficial (CARVALHO *et. al.*, 2006).

A erosividade da chuva e a erodibilidade do solo são fatores consideráveis que afetam a magnitude da erosão do solo. Assim, a determinação da erodibilidade dos solos, por meio de ensaios geotécnicos, tem sido uma ferramenta fundamental para identificar, entender e até mesmo propor soluções, quando do surgimento de processos erosivos.

Algumas características internas para ocorrência dessas feições erosivas podem se relacionar às propriedades físicas, químicas e mineralógicas das alterações de rocha e solos encontrados nas áreas de estudo. As características externas como o regime pluviométrico, a declividade e o comprimento da encosta, o tipo de ocupação, o desmatamento e a cobertura vegetal igualmente interferem sobre o equilíbrio natural.

Como as camadas ou horizontes são lateral e verticalmente heterogêneas, elas podem gerar diferentes processos de instabilidade. A partir destas ideias, visualiza-se, pois, a importância de estudos geológicos e geotécnicos no entendimento dos processos das erosões das encostas, suas causas e consequências.

Esta pesquisa objetiva estudar a erodibilidade e erosividade de duas encostas localizadas na cidade de Manaus, por meio de ensaios mineralógicos e físicos, dos horizontes de intemperismo do local; também se efetuarão a setorização das áreas de risco, a análise morfológica e da intervenção antrópica dos locais de estudo. Serão indicados, por fim, quais os fatores exógenos e endógenos determinantes para a ocorrência das feições erosivas de cada encosta.

## 2. METODOLOGIA

Nesta dissertação foram realizadas as seguintes etapas para se chegar aos resultados desejados:

### 2.1 Seleção e localização das áreas de estudo

Para a pesquisa foram selecionadas duas áreas na cidade de Manaus para a pesquisa, em bairros diferentes e onde ocorrem fenômenos e processos de erosão. Essas áreas distam cerca de 6 km uma da outra (Figura 01).

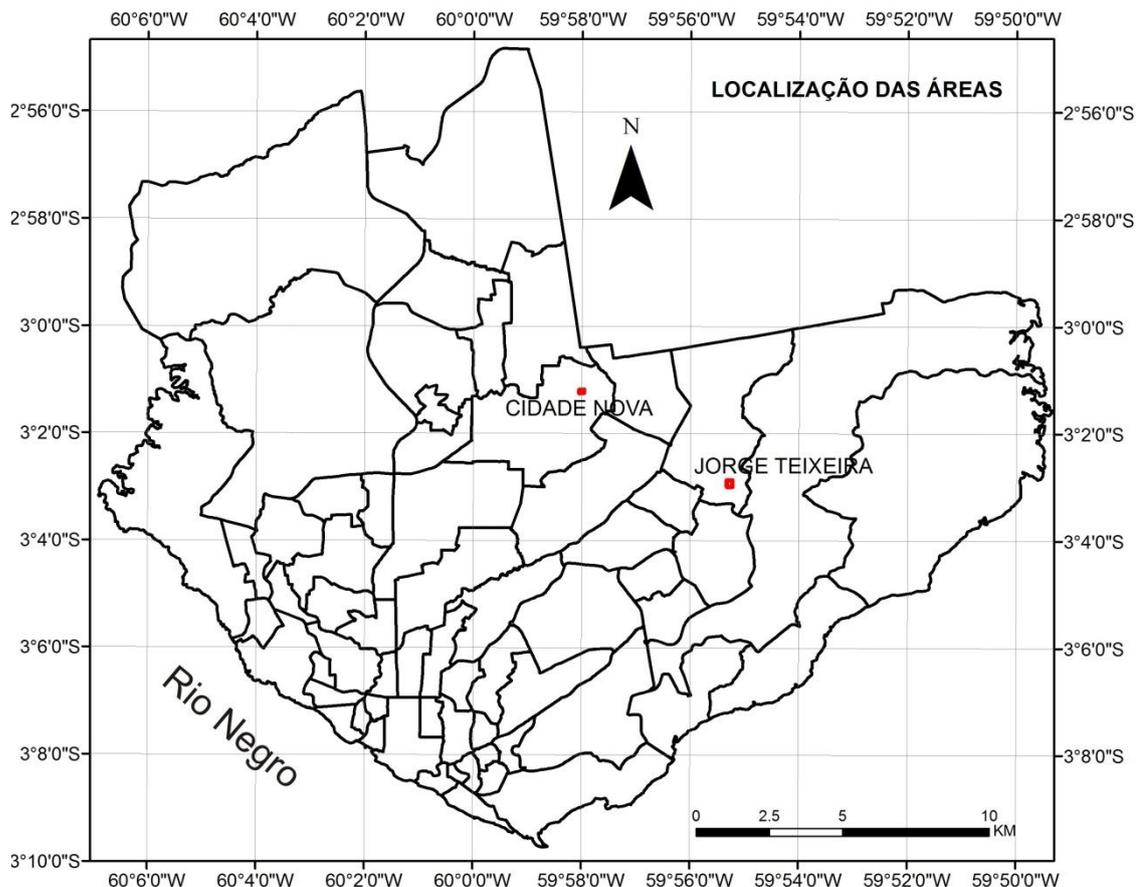


Figura 01 – Localização das áreas de estudo na cidade de Manaus. Elaborado pelo Autor.

Essas áreas foram selecionadas a partir do estudo “Mapeamento das Áreas de Risco Geológico da Zona Urbana de Manaus” (ANDRETTA *et al.*, 2012), no qual esse 1º autor participou como coordenador, chefe de projeto e integrante da equipe técnica e executora. No trabalho em questão, analisaram-se os pontos de ocorrência de deslizamento e voçorocas cadastrados pela Defesa Civil municipal, a declividade do terreno, informações locais com moradores sobre áreas com deslizamentos e erosões, e estudos de campo com a finalidade de setorização e delimitação das áreas de risco e inundação na cidade de Manaus. Foram encontrados 734 setores com 28.668 moradias em risco.

A primeira área, delimitada em vermelho na Figura 02, localiza-se na zona leste da cidade, no Bairro Jorge Teixeira, dentro da comunidade João Paulo I (Santa Inês) e contempla os finais das ruas F, H, J e M.

Nessa área foram descritos três pontos denominados “Jt” com delimitação do risco geológico e um ponto ST1 com a coleta de amostras por sondagem (Tabela 1).

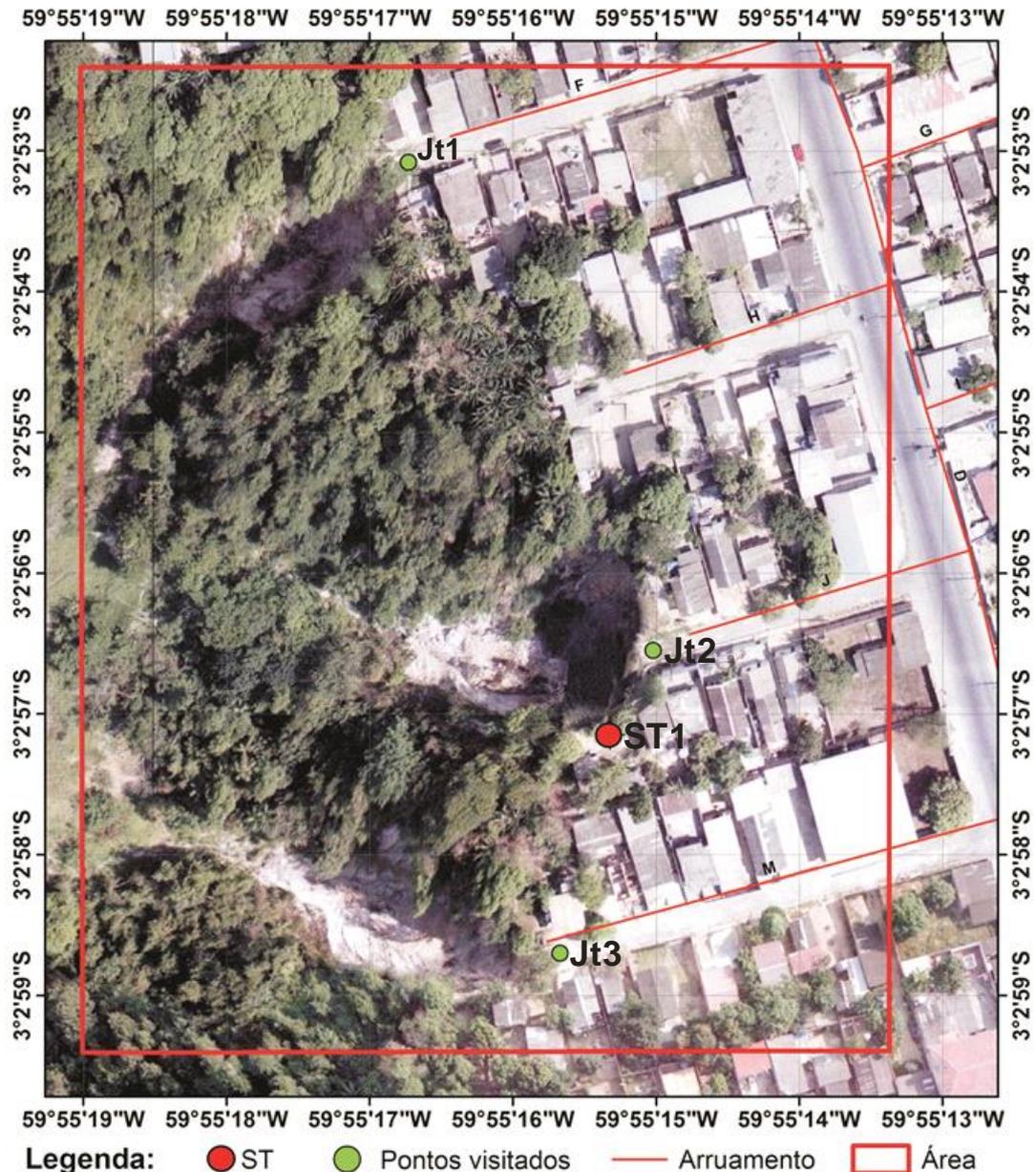


Figura 02 – Localização da 1ª área de estudos no bairro Jorge Teixeira, com localização dos pontos visitados (Jt) e de sondagem (ST). Sobre foto aérea ortorretificada de 2010 da prefeitura de Manaus.

Tabela 1 – Localização geográfica dos pontos de descrição de risco e da sondagem a trado na 1ª área de estudo. Datum: WGS 1984.

PONTO	W	S
Jt1	59°55'18,4"	3°2'54,2"
Jt2	59°55'16,7"	3°2'57,6"
Jt3	59°55'17,3"	3°2'59,8"
ST1	59°55'17,0"	3°2'58,3"

A segunda área fica na zona Norte da cidade, está localizada no bairro Cidade Nova, na divisa das comunidades Conjunto Cidadão I e Campo Dourado I, entre as Ruas Dignidade e Pedro Collor, respectivamente uma em cada comunidade (Figura 03).

Nesta área foram descritos dois pontos denominados “Cn”, com a delimitação da área de risco e um ponto ST2 de sondagem com coleta de amostras (Tabela 2).



Figura 03 – Segunda área de estudo, com pontos de descrição de risco (Cn) e de sondagem a trado (ST2). Fotografia aérea ortorretificada de 2010, da prefeitura de Manaus.

Tabela 2 – Localização geográfica dos pontos de descrição de risco e de sondagem, na 2ª área de estudo no bairro Cidade Nova. Datum: WGS 1984.

PONTO	W	S
Cn1	59°58'2,4"	3°1'13,4"
Cn2	59°58'1,56"	3°1'12,9"
ST2	59°58'2,14"	3°1'13,7"

## 2.2 Preparação de mapas base para uso em campo

Na preparação do mapa-base para uso em campo, foram utilizados os mapas de curvas de nível e riscos geológicos elaborados por Andretta *et. al.* (2012) que serviram para auxiliar na seleção das áreas de estudo, análise das declividades do terreno e no tipo de risco instalado.

Outros mapas, como o geológico da Amazônia (REIS *et al.*, 2006), uso do solo e localização das voçorocas de Manaus (VIEIRA, 2008) e geotécnico (ANDRETTA *et al.*, 2012) foram utilizados para melhores entendimento e descrição do local.

Imagem de 2004 do satélite Quickboard, da empresa DigitalGlobe, com alta resolução, dados com 61 centímetros de resolução espacial; fotografias aéreas ortorretificadas de 2010, cedidas pela prefeitura de Manaus, assim como imagens do satélite Geoeye de 2005, 2007, 2009, 2011 e 2013, retiradas do programa Google Earth, serviram para melhor localizar, descrever, avaliar e analisar os locais de estudo e o avanço ou evolução das feições erosivas, no período de 10 anos, entre 2004 a 2013.

### **2.3 Etapas de Campo**

Foram realizadas etapas de campo para a execução da setorização e do risco geológico com descrição das feições erosivas, e da sondagem a trado com coleta de amostra para os ensaios, conforme metodologias a seguir.

#### **2.3.1 Mapeamento de risco geológico**

Foram realizadas quatro etapas de campo, que se constituíram de visitas aos locais de realização da pesquisa, com o intuito de fotografar, georreferenciar e descrever as feições erosivas e movimentos de massas que ocorrem mediante o desenvolvimento lateral das voçorocas. Também se empreenderam avaliações do tipo de ocupação e uso dos solos do local, visando ao entendimento dos fenômenos de erosão que ocorrem em cada local e setorização do grau de risco geológico.

Conforme a terminologia preconizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT e pelo Ministério das Cidades no documento intitulado “Treinamento de Técnicos Municipais para o Mapeamento e Gerenciamento de Áreas Urbanas com Risco de Escorregamento, Enchentes e Inundações” (IPT, 2004), entende-se por risco (R) a possibilidade da ocorrência de danos causados por eventos físicos, fenômenos da natureza e/ou atividade humana que podem resultar em perdas de vidas ou ferimentos, danos à propriedade, rupturas sociais e econômicas ou degradação ambiental. O risco também pode ser expresso como a probabilidade (P) de ocorrer um acidente associado a um determinado perigo ou ameaça (A) que possa resultar em consequências (C) danosas a pessoas ou a bens, em função da vulnerabilidade (V) do meio exposto ao perigo, e que pode ter

seus efeitos reduzidos graças ao grau de gerenciamento (g) administrado por agentes públicos ou pela comunidade. Ou seja:

$$R = P(f A). C (f V). g^{-1}$$

Áreas de risco geológico consistem em áreas habitadas passíveis de serem atingidas por processos naturais e/ou induzidos que causem efeito adverso, sujeitando as pessoas que nelas residem a danos à integridade física, perdas materiais e patrimoniais. Tais áreas prevalecem em núcleos habitacionais de baixa renda (assentamentos precários), dadas as faltas de planejamento e infraestrutura.

O procedimento metodológico empregado no Mapeamento das Áreas de Risco Geológico de Manaus foi o do zoneamento do risco instalado, que compreende a identificação dos processos destrutivos atuantes, a avaliação do risco de ocorrência de acidentes e a delimitação e distribuição espacial de setores homogêneos em relação ao grau de probabilidade de ocorrência do processo ou mesmo ocorrência de risco. Os setores de risco foram delimitados segundo os critérios de classificação propostos pelo IPT e pelo Ministério das Cidades, que observam os indícios presentes no local, visando a uma hierarquização dos graus de risco representados por quatro níveis: baixo (R1), médio (R2), alto (R3) e muito alto (R4), acordando com os fatores de julgamento e cores indicados na Tabela 3.

As duas áreas selecionadas para esse estudo foram setorizadas e classificadas com base nessas definições e, nos resultados, apresentar-se-ão os mapas com a setorização dos graus de risco das áreas mapeadas.

Tabela 3 - Critérios para definição do grau de probabilidade de ocorrências de processos erosivos e de movimento de massa nas áreas mapeadas. Fonte: IPT, 2004.

Grau de probabilidade de risco	Descrição dos Indícios
<b>R1</b>  <b>Baixo</b>	Não há indícios de desenvolvimento de processos de instabilização em encostas e margens de drenagens Mantidas as condições existentes, não se espera a ocorrência de eventos destrutivos no período de um ciclo chuvoso.
<b>R2</b>  <b>Médio</b>	Observa-se a presença de alguma(s) evidência(s) de instabilidade, porém incipiente(s). Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas no período de um ciclo chuvoso.
<b>R3</b>  <b>Alto</b>	Observa-se a presença de significativa(s) evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes etc). Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas no período de um ciclo chuvoso.
<b>R4</b>  <b>Muito Alto</b>	As evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores ou postes inclinados, cicatrizes de escorregamento, feições erosivas, proximidade da moradia em relação à drenagem etc.) são expressivas e estão presentes em grande número e/ou magnitude. Mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas no período de um ciclo chuvoso.

### 2.3.2 Sondagem a trado e coleta de amostras

As sondagens a trado seguiram as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 09603/86 (NB 1030), para tanto foram utilizados os seguintes materiais: lona, cavadeira, trado, cruzetas, hastes, luvas, chaves de grifo, trena e ponteira. Para a coleta de amostras se usavam sacos plásticos, barbante e caneta permanente para identificação.

A sondagem se iniciou utilizando uma cavadeira para escavação do terreno, podendo ser usada também uma ponteira, se em terrenos duros ou compactos; ou, sempre que necessário, quando o uso da cavadeira se tornar difícil, trocar-se para o trado tipo concha (Figura 04).



Figura 04 - Início da sondagem a trado, no dia 15/07/2013, utilizando cavadeira, trado tipo concha no chão a esquerda. Local: Ponto ST-01, bairro Jorge Teixeira. Foto do Autor

Os materiais retirados do furo de sondagem foram depositados sobre uma lona, para evitar o contato com o solo superficial do lugar. Foram agrupados e coletados de acordo com a profundidade (metro em metro), ou pela classificação tátil visual, quando detectada alguma mudança entre as amostras (Figura 05) - sempre identificando as profundidades de início e término de cada material, gerando assim, a descrição do perfil de sondagem executado em campo.

Efetuaram-se duas sondagens a trado, com profundidade de 10 metros cada. Os materiais coletados - conforme descrição adiante, foram usados em análises físicas e químicas.



Figura 05 – Amostra retirada do furo de sondagem ST-01, no bairro Jorge Teixeira, sobre lona, para análise tátil-visual e coleta. Data 15/07/2013. Foto do Autor.

As amostras foram identificadas por uma sequência alfanumérica, composta por duas letras, do primeiro e último nome do autor (EA), seguida de dois números conforme número da sondagem e de uma letra final para informar a quantidade de amostras coletadas naquele local, seguindo a mudança tátil visual da camada ou a profundidade (Figura 06).



Figura 06 – Amostras coletadas, armazenadas e identificadas corretamente. Foto do autor

## 2.4 Ensaio laboratoriais

Os ensaios executados em laboratório serviram para identificar propriedades físicas e mineralógicas das amostras coletadas em campo.

- Análises físicas:

da textura através de ensaio granulométrico, composto por peneiramento e a laser;

do comportamento mecânico através das análises de Limites de Consistência (Atterberg), composta por limite de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade.

- Análise mineralógica:

Identificação dos minerais pelo método de Difractometria de Raios-X.

### **2.4.1 Ensaios físicos**

As propriedades físicas apresentam-se vinculadas à erodibilidade dos solos. Dentre elas, as que mais se correlacionam à capacidade de resistência à erosão de um solo são a plasticidade e a granulometria (AVILA, 2009).

#### **2.4.1.1 Análise granulométrica**

Na Natureza encontram-se depósitos sedimentares constituídos por elementos com decímetros a metros de diâmetro, até sedimentos compostos por partículas extremamente pequenas, da ordem de alguns microns. Por vezes, a heterogeneidade do tamanho das partículas que constituem um depósito pode ser extremamente elevada, coexistindo elementos com metros de diâmetro numa matriz de partículas pequenas.

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que compõem as amostras, bem como no tratamento estatístico dessa informação. Basicamente, o que se mostra imprescindível é determinar as dimensões das partículas individuais e estudar a sua distribuição.

A textura ou granulometria refere-se à proporção de argila, silte, areia e grânulos do material. Para Montenegro (1976 *apud* AVILA, 2009), a variação do tamanho das partículas configura a característica física mais estável do solo e, ainda, as porções menores e mais finas que determinam o seu comportamento físico, influenciando a maioria dos fenômenos pedológicos.

Destarte, para efetuar a descrição adequada de um sedimento, torna-se essencial proceder a uma análise pormenorizada, utilizando classes granulométricas com pequena amplitude. Quanto menor for a amplitude das classes, melhor será a descrição da variabilidade dimensional das partículas que constituem o sedimento.

O ensaio granulométrico pode ser dividido em duas partes: análise por peneiramento e análise a laser, também conhecido como ensaio de granulometria conjunta. Para os sedimentos coletados utilizou-se este ensaio, seguindo as normas da ABNT NBR 7181 e 5734, na parte de peneiramento. E para execução do peneiramento foram utilizados os seguintes equipamentos: recipientes de amostras, 3 peneiras, agitador magnético, balanças de precisão, e estufa (Figura 07).

Pesaram-se aproximadamente 20 gramas de amostra para esse ensaio; essas foram colocadas em 50 ml de solução defloculante, composta pela dissolução

de 40 gramas de NaOH em 1 litro de água, e agitadas por 5 minutos; posteriormente descansaram por 24 horas na solução, antes do peneiramento.



Figura 07 – Balanças de precisão e estufa usadas nas análises granulométricas. Foto do Autor

A abertura da malha das 3 peneiras utilizadas seguem a Escala de Wentworth (Figura 08), com aberturas de 2,0mm, 1,0mm e 0,5mm, representada respectivamente pelas peneiras 10, 18 e 32 mesh (Figura 09). Antes de passar pelas peneiras, as amostras foram novamente agitadas - por mais 10 minutos. Para ajudar no peneiramento, utilizou-se água na lavagem dos grãos maiores que por acaso estivessem impregnados com material fino.

$\phi$	Português	Inglês	mm
-9	Bloco	Boulder	512
-8			256
-7	Seixo	Cobble	128
-6			64
-5			32
-4	Cascalho muito grosseiro	Very coarse gravel	16
-3	Cascalho grosseiro	Coarse gravel	8
-2	Cascalho médio	Medium gravel	4
-1	Cascalho fino	Fine gravel	2
0	Areia muito grosseira	Very coarse sand	1,000
1	Areia grosseira	Coarse sand	0,500
2	Areia média	Medium sand	0,250
3	Areia fina	Fine sand	0,125
4	Areia muito fina	Very fine sand	0,0625
5	Silte grosseiro	Coarse silt	31,25
6	Silte médio	Medium silt	15,63
7	Silte fino	Fine silt	7,81
8	Silte muito fino	Very fine silt	3,91
9	Argila grosseira	Coarse clay	1,95
10	Argila média	Medium clay	0,98
11	Argila fina	Fine clay	0,49
12	Argila muito fina	Very fine clay	0,24
13	Colóides	Colloid	0,12

Figura 08 – Escala em  $\Phi$  de Wentworth, 1922. Fonte: [www.aprh.pt/rgci/glossario/escala.html](http://www.aprh.pt/rgci/glossario/escala.html)

As amostras que ficaram retidas nas peneiras foram secadas na estufa e, posteriormente, pesadas, calculando-se a porcentagem retida em cada peneira.



Figura 09 – Peneiras utilizadas para ensaio granulométrico por peneiramento. Foto do Autor.

A porção da amostra que passou pela peneira 0,5 milímetros (32 mesh) foi levada para a análise no Granulômetro a laser, e analisada em conformidade com a norma ISO 13320-1, em meio aquoso com defloculante (solução de 40 gramas de NaOH para 1 litro de água), utilizando o Granulômetro a laser da Mastersizer 2000, junto com o aparelho Hidro MU, ambos da marca Malvern Instrument (Figura 10), para a determinação da porcentagem de areia média e finos, silte e argila das amostras.

No programa computacional da análise granulométrica foi possível escolher um modelo pré-determinado de parâmetros, em uma lista, ou alterar esses parâmetros conforme sua escolha, podendo-se alterar os índices de refração, grau de absorção das partículas e tipo de material. Para essa análise foi escolhido o método de Fraunhofer, cujos resultados são mais confiáveis em amostras às quais faltam composição determinada e/ou grande variação no tamanho das partículas (ISO 13320-1 Standard, 1999).

O produto final das análises granulométricas constitui em uma curva de frequência ou de acumulação, que demonstra a distribuição em porcentagem para cada escala de tamanho de partícula.

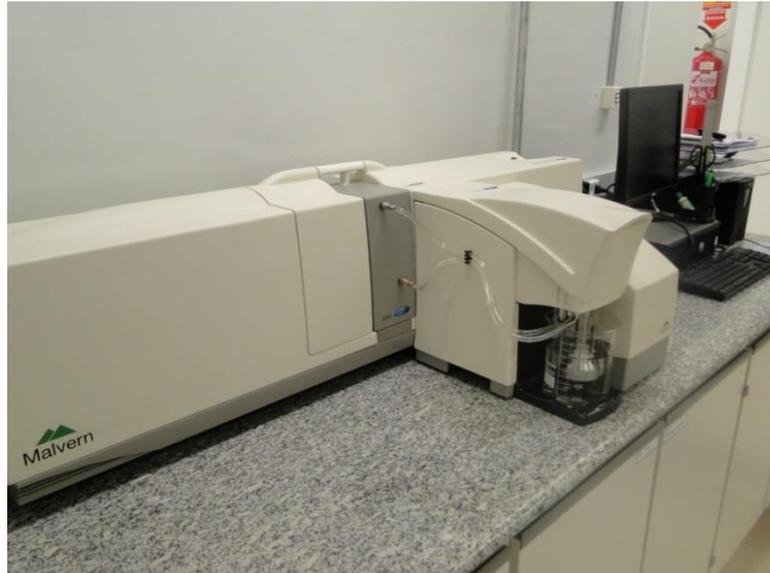


Figura 10 – Conjunto Granulometro a laser e unidade hidro 2000 MU ambas da Malvern. Foto do Autor.

Fazendo uma junção dos resultados obtidos na análise granulométrica por peneiramento com a análise granulométrica a laser, no programa Gradistat (Grain Size Analysis Program), desenvolvido por “Copyright Simon J. Blott” 2010, obtém-se dois resultados:

- a classificação do material de acordo com as porcentagens acumuladas em cada faixa granulométrica: argila, silte, areia e grânulos, usando os diagramas de Folk (1954).
- a construção de curva de distribuição e acumulação granulométrica, em diagrama semi-logarítmica, que tem na abscissa os logaritmos das dimensões das partículas e, na ordenada às porcentagens, em peso, de material com dimensão menor que a dimensão considerada.

Através desses resultados faz-se possível calcular parâmetros como grau de uniformidade, diâmetro efetivo, coeficiente de curvatura, moda e mediana, cujos resultados assumem fundamental importância na caracterização geotécnica do solo.

O grau de uniformidade (U) é adimensional e, conforme a ABNT NBR 6502/95, define-se pela seguinte expressão:

$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Onde:

“D60” é o diâmetro de partículas correspondente aos 60% mais finos na curva granulométrica ( $\mu\text{m}$ ),

“D10” é o diâmetro de partículas correspondente aos 10% nesta mesma curva ( $\mu\text{m}$ ).

O grau de uniformidade demonstra a variação das dimensões das partículas do material, e é diretamente proporcional à inclinação da curva granulométrica. Quanto mais verticalizada, mais uniforme será o material. Segundo a classificação da ABNT NBR 6502 (1995) – Rochas e Solos:

$U < 5$  muito uniforme

$5 < U \leq 15$  uniformidade média

$U > 15$  desuniforme.

Outra metodologia, desenvolvida na França para estudos de drenagem em 1983, citada por Fácio (1991), procura correlacionar a granulometria com a erodibilidade do solo. O método baseia-se em um critério de classificação quanto a erodibilidade em função do grau de uniformidade (U) do solo. Os limites definidos para esse critério são:

$U < 5$  solos erodíveis;

$5 < U < 15$  solos de média erodibilidade;

$U > 15$  solos de baixa erodibilidade.

Com o coeficiente de curvatura (CC) é possível analisar o solo quanto à sua graduação, se bem ou mal graduado, e é obtido pela seguinte fórmula:

$$CC = \frac{(D30)^2}{D10 \cdot D60}$$

Onde:

“CC” é o Coeficiente de Curvatura;

“D30” é o diâmetro das partículas correspondente aos 30% mais finos na curva granulométrica ( $\mu\text{m}$ );

“D10” e “D60” são os mesmos do cálculo do grau de uniformidade.

Materiais bem graduados têm coeficiente de curvatura (CC) entre 1 e 3.

Ressalte-se a textura ou granulometria do solo como um fator importante que influencia a erodibilidade, por afetar os processos de desagregação e transporte, uma vez que, enquanto grandes partículas de areia resistem ao transporte, solos de textura fina (argilosos) também resistem à desagregação, sendo a areia fina e o silte, as texturas mais suscetíveis à desagregação e ao transporte.

Os solos arenosos apresentam poros relativamente grandes e, apesar de pouco porosos, são bastante permeáveis, favorecendo seu arraste pela água de infiltração. Portanto, a distribuição percentual do tamanho das partículas se liga, intimamente, à erodibilidade, pois implica na velocidade de infiltração da água e na

estabilidade do solo, frente ao impacto das gotas de chuva e ao transporte de material pelo escoamento superficial Montenegro (1976 *apud* AVILA, 2009).

Todos estes procedimentos e ensaios foram executados nos laboratórios da CPRM – Serviço Geológico do Brasil, superintendência de Manaus.

#### 2.4.1.2 Limites de consistência (Atterberg)

No início do século XX, o químico sueco Albert Atterberg realizou pesquisas sobre as propriedades dos solos finos. Segundo este autor, os solos finos apresentam variações de estado de consistência em função do teor de umidade. Qual seja, os solos apresentam características de consistência diferentes, conforme os teores de umidade que possuem. Há teores de umidade limite, definidos como limites de consistência ou limites de Atterberg (Figura 11). Os ensaios de limites de consistência ou Atterberg incluem os ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade, e seguem as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 6459/84 e 7180/84, respectivamente.

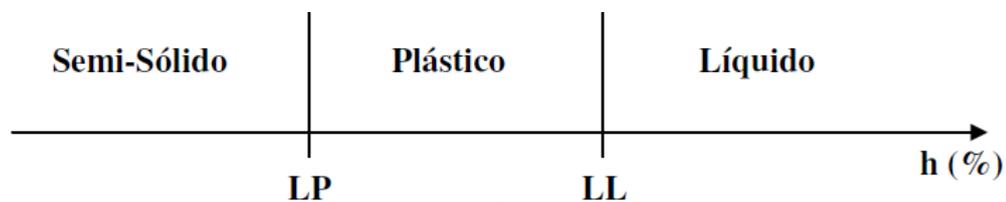


Figura 11 – Limites de consistência e estado físico, em relação ao aumento da umidade  $h(\%)$ .

##### 2.4.1.2.1 Limite de liquidez

No ensaio de limite de liquidez mede-se, indiretamente, a resistência ao cisalhamento do solo para um dado teor de umidade, através do número de golpes necessários ao deslizamento dos taludes da amostra. O limite de liquidez de um solo é o teor de umidade que separa os estados de consistência líquida do plástico, e para a qual o solo apresenta uma pequena resistência ao cisalhamento; passando para o estado líquido o solo fica sem resistência ao cisalhamento, liquefazendo-se. Está também relacionado à capacidade de um solo absorver água.

O ensaio de limite de liquidez segue a norma ABNT 6459. Primeiramente as amostras, uma de cada vez, passam pela peneira com abertura de 0,425 mm ou 35 mesh (Figura 12).

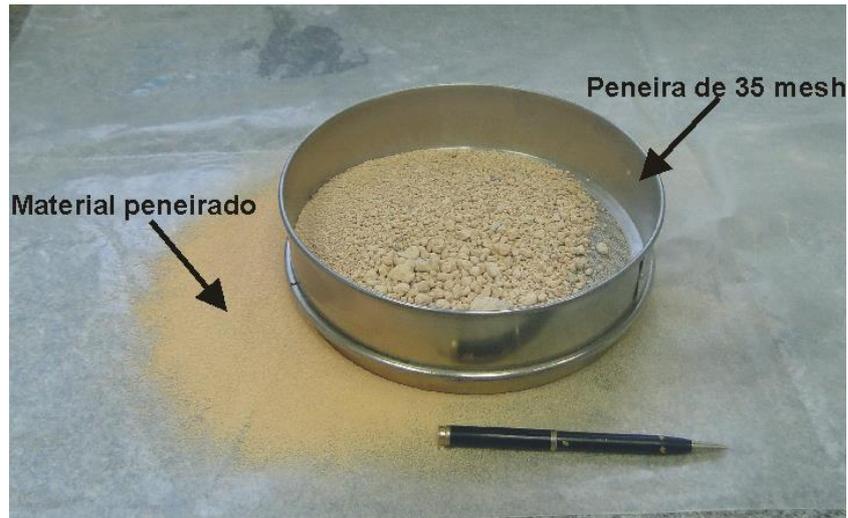


Figura 12 – Amostra passando pela peneira com abertura de 0,425mm (35 mesh). Foto do Autor.

Em seguida, 70 gramas de amostra, aproximadamente, são colocadas em um recipiente de porcelana, adicionando água destilada em pequenos incrementos, sempre amassando e revolvendo a amostra, com auxílio de uma espátula (Figura 13), de forma a obter uma massa homogênea.



Figura 13 –Espátula e recipiente de porcelana, usados nas análises de limite de liquidez e de plasticidade. Imagem alterada do site [www.fortest.com.br](http://www.fortest.com.br).

Ato contínuo transferiu-se parte do material para a concha do aparelho Casagrande (Figura 14), moldando-a de forma a que, na parte central, a espessura ficasse da ordem de 1 centímetro, tomando cuidado para não se juntarem bolhas de ar no interior da mistura.



Figura 14 – Aparelho Casagrande, usado nas análises de limite de liquidez, concha é a parte dourada. Foto do Autor.

Com o auxílio de um cinzel (Figura 15) foi feita uma ranhura na amostra colocada no aparelho, dividindo a massa de solo em duas partes, com espaço de 1 mm entre elas (Figura 16).



Figura 15 – Cinzel utilizado para fazer a ranhura na amostra colocada no aparelho Casagrande, 1 centímetro de espessura . Foto do Autor.

Em seguida girou-se a manivela do aparelho, de maneira a que ocorressem 2 golpes de queda livre por segundo, anotando-se o número de golpes necessários para que as bordas inferiores da ranhura se unissem. Isto feito, pegou-se um pouco da amostra de junto às bordas que se uniram, colocando-a em um recipiente para determinação da umidade.



Figura 16 – Aparelho Casagrande com amostra preparada para a execução do ensaio. Foto do Autor.

Retirou-se o restante da amostra da concha, juntando-o ao restante da massa, no recipiente de porcelana. Lavaram-se cinzel e a concha do aparelho. Adicionaram-se mais 2 ml de água à massa de amostra, revolvendo e amassando por 3 minutos, com o auxílio da espátula. Repetindo-se a operação descrita acima, obteve-se o 2º ponto do ensaio e, assim por diante, até obter 5 pontos requeridos para finalizar o ensaio.

Os dados coletados no ensaio subsidiaram a construção do gráfico de limite de liquidez, no qual a ordenada, em escala logarítmica, representa o número de golpes e a abscissa, em escala aritmética, representa o teor de umidade correspondente da amostra. Ajusta-se uma reta que perpassa os pontos identificados, observa-se na reta o teor de umidade correspondente a 25 golpes - limite de liquidez do solo - o resultado vindo, pois, a se expressar em porcentagem.

#### **2.4.1.2.2 Limite de plasticidade**

Uma explicação para o limite de plasticidade não é tão simples quanto a do limite de liquidez, podendo-se citar, dentre outras, a que sugere que o limite de plasticidade corresponda a um teor de umidade do solo, o qual, para valores menores do que ele, as propriedades físicas da água não mais se igualem às da água livre ou de que o limite de plasticidade configure o teor de umidade mínimo, a coesão sendo pequena para permitir deformação; não obstante, suficientemente alta para garantir a manutenção da forma adquirida. Independentemente das explicações

sugeridas, o limite de plasticidade é o extremo inferior do intervalo de variação do teor de umidade, no qual o solo apresenta comportamento plástico.

O ensaio de limite de plasticidade seguiu a NBR, 7180. Assim como no ensaio de limite de liquidez, primeiramente as amostras foram preparadas, passando uma de cada vez pela peneira com abertura de 0,425 mm ou 35 mesh (Figura 12). A seguir colocaram-se 50 gramas de amostra em um recipiente de porcelana, adicionou-se água destilada à amostra, em pequenos incrementos, amassando e revolvendo-a com auxílio de uma espátula (Figura 13), obtendo-se, em decorrência, uma massa homogênea de consistência plástica. Tomaram-se cerca de cinco gramas de amostra, numa pequena bola; esta foi rodada por sobre uma placa de vidro com a palma da mão, para lhe dar forma de um cilindro.

Se este cilindro fragmentar antes de atingir o diâmetro de 3 milímetros, a amostra deve retornar ao recipiente, adicionando-se mais água e revolvendo e amassando por mais 3 minutos, e repetindo a confecção do cilindro.

Se a amostra atingir 3 milímetros de diâmetro com fragmentos na ordem de 100 milímetros de comprimento, igual ao gabarito (Figura 17), transfere-se a mesma imediatamente para um recipiente adequado para determinação da umidade.

Repetindo-se os procedimentos até obter três valores de umidade que não distem da média em mais de 5%, obter-se-á a média, como resultado. Utilizaram-se 5 medidas para garantir um bom resultado do teor de umidade.



Figura 17 – Gabarito de 3 mm de espessura e 10cm de comprimento com amostra. Foto do Autor.

### 2.4.1.2.3 Índice de Plasticidade

Este parâmetro indica a plasticidade dos solos e fisicamente representa a quantidade de água necessária para que um solo passe do estado plástico para o líquido. Muito útil para a classificação de solos finos. Sabe-se que argila é mais compressível quanto maior for o IP.

É obtida através da expressão:

$$IP = LL - LP$$

Onde:

*IP* é o Índice de plasticidade;

*LL* é o Limite de liquidez;

*LP* é o Limite de plasticidade.

O resultado final foi expresso em porcentagem e quando não é possível determinar o limite de liquidez ou plasticidade o índice de plasticidade fica como NP (não plástico).

Segundo Jenkins (1947 *apud* CAPUTO, 1998), os solos podem ser classificados por suas porcentagens sendo: Fracamente plásticos com IP entre 1 a 7; Medianamente plásticos com IP entre 7 a 15; e Altamente plásticos com IP maior que 15.

Fácio (1991), estudando o comportamento da erodibilidade dos solos em relação à sua plasticidade, concluiu que solos com índice de plasticidade (IP) maior que 15 apresentam boa resistência à erosão, enquanto solos com IP entre 6 e 15 têm média resistência; já com IP abaixo de 6, a resistência à erosão é baixa.

O Professor da Harvard, Arthur Casagrande (1947), analisando os índices e o comportamento dos solos, notou que, ao realçar o Índice de Plasticidade do solo em função do Limite de Liquidez no gráfico, denominado de Carta de Plasticidade (Figura 18), os solos de comportamento argiloso eram representados por pontos acima de uma reta inclinada, denominada Linha A. Solos orgânicos e solos siltsos, ainda que argilosos, estarão representados por pontos localizados abaixo da Linha A. No seu trecho inicial, abaixo de 30% nas abscissas (limite de liquidez), esta linha é substituída por duas faixas horizontais correspondentes aos Índices de Plasticidade, (ordenadas) em 4 e 7%.

Para a classificação do solo, bastou inserir a localização do ponto correspondente ao par de valores do Índice de Plasticidade e Limite de Liquidez, na

Carta de Plasticidade (Figura 18). Os solos orgânicos se distinguem dos siltosos pelo seu aspecto visual, apresentando-se com uma coloração escura típica (marrom escura, cinza escuro ou preto).

Como característica complementar dos solos finos, é indicada sua compressibilidade. Sabe-se que os solos costumam ser mais compressíveis quanto maior seu Limite de Liquidez. Assim, o sistema adjetiva secundariamente como de alta compressibilidade (H) ou de baixa compressibilidade (L), os solos, em função do Limite de Liquidez, caso superior ou inferior a 50%, respectivamente, separada pela “Linha B”, conforme se observa na Carta de Plasticidade (Figura18).

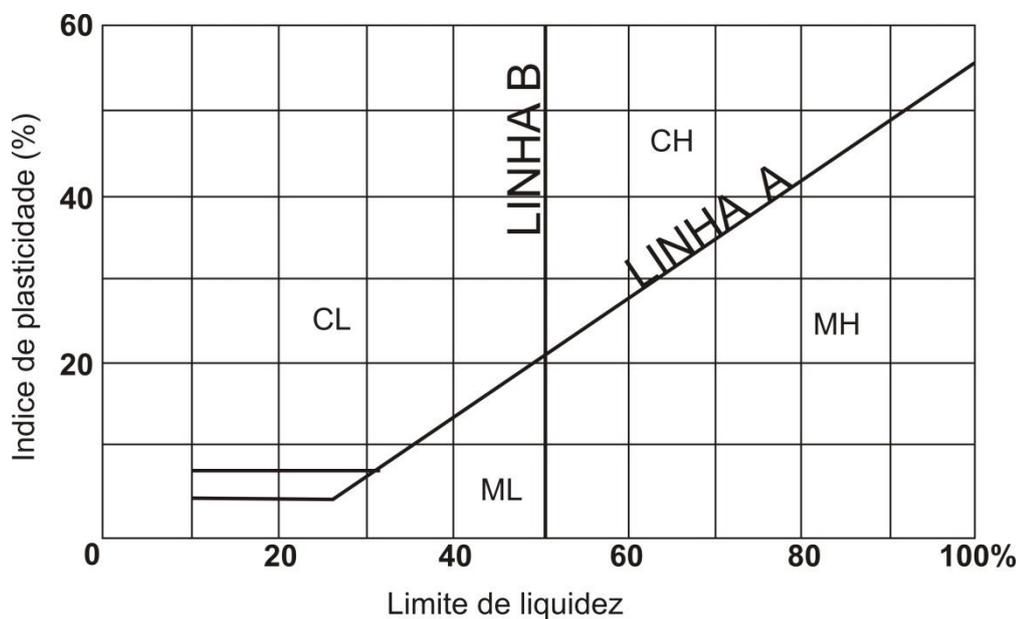


Figura 18 – Carta de plasticidade de Casagrande, onde: C=Argiloso; M=Silte-argiloso; O=Organico; L= Baixa compressibilidade; H= Alta compressibilidade.

Esses ensaios foram executados no Laboratório de Pavimentação (LabPav) no setor de Geotecnia (GEOTEC) da Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

#### 2.4.2 Identificação mineral por difratometria de raios X

A difratometria por raios-X corresponde a uma das principais técnicas de identificação de materiais cristalinos e encontra-se aplicada a vários campos do conhecimento. Equipara-se, simplificadamente, à identificação do material pelo espalhamento e, conseqüentemente, refração de raios X, que atinge os átomos e planos cristalinos. Esta refração forma um ângulo, dependendo do tipo do material, sendo assim viável a identificação por comparação, em um banco de dados.

Para este ensaio foram utilizados, aproximadamente, 10 gramas de amostra. Cada amostra foi pulverizada em gral de ágata, colocada em um porta-amostra, compactada com auxílio de uma placa de vidro (Figura 19) e submetida à análise por difratometria de raios X.



Figura 19 – Gral de ágata, soquete, porta amostra e placa de vidro, utilizados para a preparação da amostra a ser analisada no Difratorômetro de raios-X. Foto do Autor

Utilizou-se nesta operação um difratômetro de raios-x da marca Shimadzu, modelo LabX XRD-6000 (Figura 20) com tubo monocromático de  $\text{CoK}\alpha$ , com velocidade do goniômetro =  $2^\circ/\text{min}$ , tensão de 40 KV e corrente de 30 mA, medindo entre os intervalos de graus  $5^\circ$  a  $60^\circ$ .

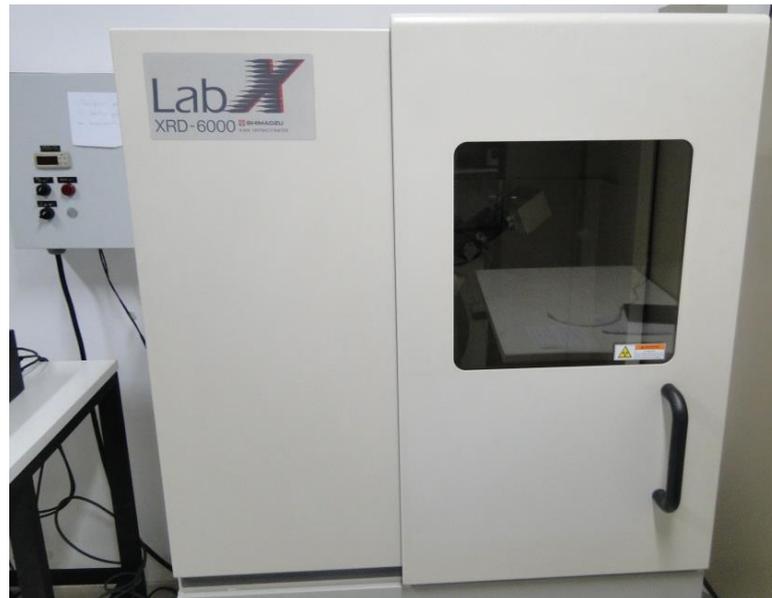


Figura 20 – Difratorômetro de raios-x Shimadzu, do Lab. De Tec. Mineralógicas – UFAM. Foto do autor.

O resultado desta análise se traduz em um gráfico de frequência conhecido como difratograma, em que é possível observar algumas reflexões, conforme os ângulos de refração do material.

Estes resultados são comparados a um banco de dados do programa de análise que comporta diversos tipos de materiais analisados, com suas reflexões identificadas. Assim, é possível identificar os minerais presentes nas amostras.

A análise de DRX foi realizada no Laboratório de Técnicas Mineralógicas na sala de Difração de Raios X no Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas (DEGEO/UFAM).

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Com esta revisão bibliográfica pretende-se discutir com mais detalhes temas específicos para um melhor embasamento dos assuntos abordados nesta dissertação, referentes aos fatores e características internas (endógenas) e externas (exógenas) do material e área de estudo.

#### **3.1 Meio Físico**

##### **3.1.1 Geologia Regional**

Geologicamente a zona urbana de Manaus está implantada sobre a Formação Alter do Chão que foi primeiramente definida por Kistler (1954, *apud* DAEMON, 1975) como sendo composta de arenitos avermelhados, argilitos,

conglomerados e brechas intraformacionais, tradicionalmente atribuídos a sistemas fluvial e lacustre/deltaico. O intemperismo sobre essas rochas geraram um manto de alteração e lateritização das mesmas, resultando em horizontes de solo argilo-siltoso, mosqueado e saprolítico com perfis bem desenvolvidos, além de uma camada de crosta laterítica de espessura e concreções variáveis.

Esta formação caracteriza-se, então, por rochas friáveis, pouco coesas, intercaladas por rochas mais endurecidas e restritas aos níveis de ocorrência do “Arenito Manaus” e de crostas lateríticas e/ou “linhas-de-pedra” que são responsáveis pela preservação tabular do relevo (SILVA, 2005).

### 3.1.2 Formação Alter do Chão

A partir de informações de subsuperfície (dados sísmicos e perfis elétricos), aliadas a informações sedimentológicas e palinológicas, foram reconhecidas duas sucessões sedimentares na Formação Alter do Chão (DINO *et al.*, 1999): sequência 1 (inferior), caracterizada por influxo de terrígenos associados a um sistema fluvial meandrante que evolui para um sistema anastomosado, com retrabalhamento eólico, de idade neoptiana/eoalbiana e; sequência 2 (superior), composta de ciclos progradacionais flúvio-deltáicos-lacustre, de idade cenomaniana. Essa sequência contém arenitos avermelhados com icnofósseis e estruturas pedogenéticas (peds, slickensides), atribuídas a silcretes (NOGUEIRA *et al.*, 1999).

Estudos geoquímicos realizados na Formação Alter do Chão, nas camadas de arenitos vermelhos, indicaram que houve variações de rocha fontes e mudança na seleção granulométrica durante o transporte, deposição e pedogênese pós-deposicional. Estas variações ocorreram em paleoambiente de planícies abandonadas e rios entrelaçados sob condições de clima seco com tendência a úmido no Cretáceo na bacia do Amazonas (HORBE *et al.*, 2006).

Essa unidade é relativamente pobre em fósseis, representados por plantas dicotiledôneas na região de Monte Alegre e vértebras de dinossauros (DINO *et al.*, 1999). Em bacias intracratônicas, a litologia predominantemente é siliciclástica e a deposição, em condições de paleoclima quente, com semiaridez dominante, naturalmente restringiam a preservação dos restos da biota, não oferecendo condições adequadas de preservação fóssilífera.

O contato entre a Formação Alter do Chão e as unidades paleozoicas é representado por uma expressiva discordância erosiva (Figura 21). Na borda norte

da bacia, próxima a Manaus, foram caracterizadas, em seções sísmicas, feições evidentes de corte e preenchimento de canais na base dessa formação (COSTA, 2002). Nesta mesma região, um sistema deltaico, dominado por onda e com influência marinha, tem sido proposto para os depósitos da Formação Alter do Chão (ROSSETTI e NETTO, 2006).

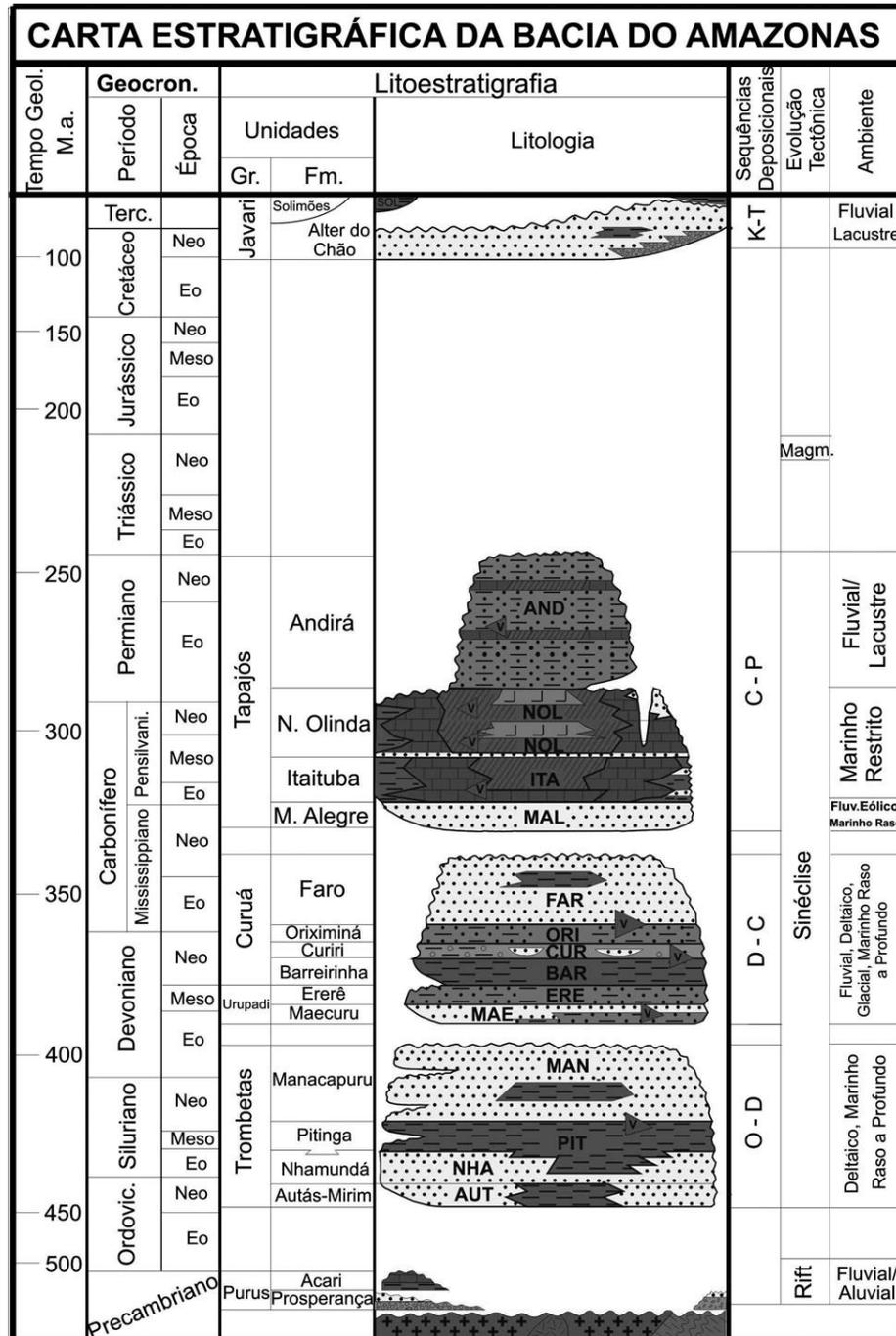


Figura 21 – Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas. (CUNHA, 2007).

### 3.1.3 Coberturas de Alteração

As unidades pedológicas da área consistem de: latossolos amarelados, argilosos a argilo-arenosos; argissolos arenosos a arenoargilosos amarelados e as areias brancas (espodosolos) (RADAMBRASIL, 1978).

A origem para esse horizonte argilo-arenoso, encontrado em Manaus, ainda é controversa, uma vez que alguns autores consideram-na uma unidade sedimentar do período Paleógeno, em que o ambiente era semiárido (KOTSCHOUBEY, 1984; KOTSCHOUBEY e TRUCKENBRODT, 1981; TRUCKENBRODT e KOTSCHOUBEY, 1981; TRUCKENBRODT et al., 1982). Já Sombroek (1996) considera esta unidade como de origem lacustre, no Paleógeno. Outra linha de pensamento define esta unidade como “um horizonte argiloso derivado de alterações “in situ” de sedimentos da Formação Alter do Chão (Irion, 1984; *apud*. Fernandes Filho, 1997). Costa (1991) e Horbe e Costa (1994), consideram que este pacote argilo-arenoso seja resultado do intemperismo de crostas lateríticas ferruginosas e aluminosas.

Os lateritos, encontrados por toda a região Amazônica, são classificados segundo Costa (1991) pelo seu grau de evolução, em: imaturos e maduros (Figura 22); e, por sua natureza, em: autóctone ou alóctone.

Lateritos imaturos formam o relevo jovem e estão distribuídos por toda a região Amazônica. Os perfis de tais lateritos têm baixo grau de evolução, com presença de horizonte ferruginoso concrecionário (COSTA, 1991).

Lateritos maduros restringem-se a algumas regiões específicas, compõem o relevo mais elevado, sob forma de platôs ou morros, são evoluídos, dispõem de maior complexidade de horizontes, texturas, estruturas, mineralogia, feições químicas e minerais associados (COSTA, 1991).

Segundo Costa (1991) a classificação quanto à natureza se processa com base na sucessão dos horizontes e nas respectivas texturas e estruturas. Lateritos alóctones são conhecidos na região pela linha de pedra, e paleopavimentos são mais restritos que os autóctones; lateritos imaturos normalmente são alóctones.

A lateritização das rochas da Formação Alter do Chão propiciou o desenvolvimento de perfis imaturos (Figura 22) (COSTA, 1991, HORBE *et al.*, 2001), que se apresentam truncados e constituídos, de baixo para cima, pelos horizontes saprolítico, mosqueado e solo, com presença local de linhas de pedra (HORBE *et al.*, 2006). A crosta ferruginosa, quando presente, é restrita, em consequência de

intensa desferrificação da área. Apesar de incompletos, os perfis são bem desenvolvidos, com espessura superior a 3 m, os menos espessos situados em áreas onde houve truncamento mais profundo (HORBE *et al.*, 2003).

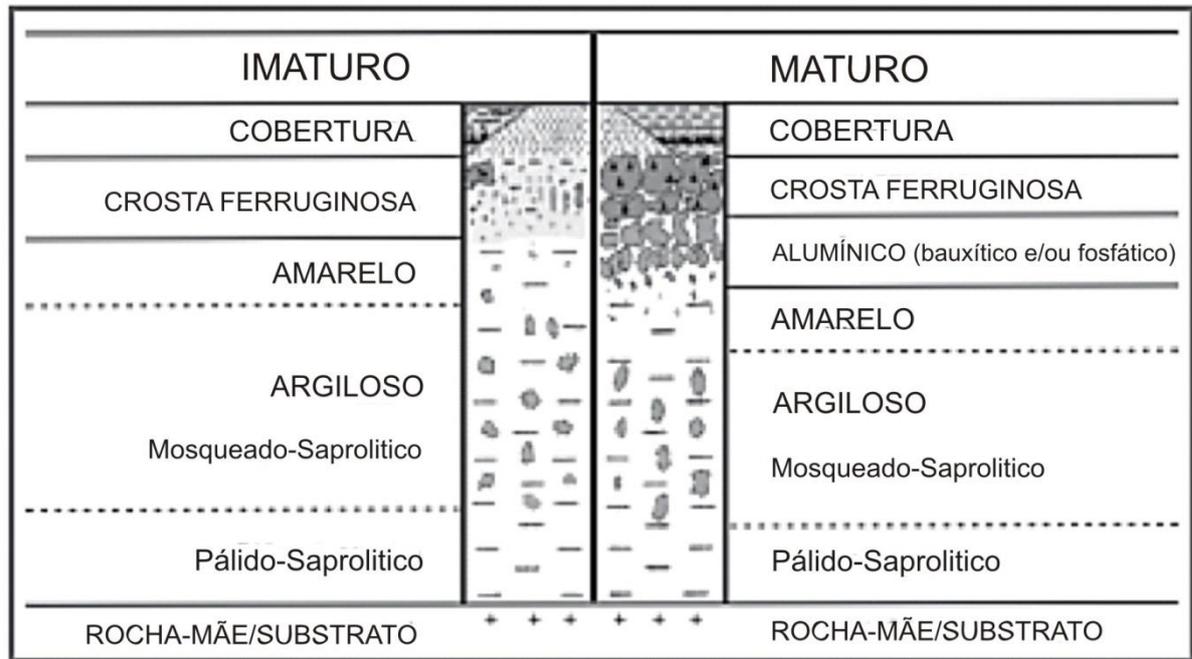


Figura 22 – Perfil geológico simplificado para lateritos imaturo e maturo. Fonte: Costa, 1991.

Segundo Fernandes Filho *et al.* (1997), a região de Manaus apresenta perfis de natureza laterítica dos tipos imaturos autóctones e alóctones, desenvolvidos sobre sedimentos da Formação Alter do Chão. São estruturados, da base para o topo, pelos horizontes: transicional, argiloso, ferruginoso, esferolítico e solo (latossolo), para o perfil do tipo autóctone. O perfil alóctone apresenta a formação da linha de pedra que pode estar truncando o horizonte mosqueado ou argiloso.

### 3.1.4 Clima

Segundo a classificação climática de Köppen (1948), Manaus possui um clima referente ao grupo A, indicando clima tropical subdividido em: Af - Clima tropical úmido ou superúmido; Am - Clima tropical úmido ou subúmido; Aw - Clima tropical, com inverno seco; As – Clima tropical quente e úmido, com estação seca no verão.

Segundo dados obtidos da CPRM, para os últimos 14 anos, a média de precipitação anual é de 2.368,9mm, sendo o período de maior precipitação de Dezembro a Maio, tendo Abril como o mês mais chuvoso e os meses de Julho e Agosto, com o menor índice de chuvas (Figura 23).

Dados coletados do website do INMET (2014) foram tratados e apontaram que, nos últimos 30 anos (1984 a 2014) a média de precipitação anual é de 2.349

mm, chovendo em média 178 dias por ano. Corroborando os dados da CPRM, os meses de Dezembro a Maio são os mais chuvosos, com destaque para o mês de Abril - média de 329 mm, e os meses de Julho a Setembro sendo os mais secos, com precipitação média de 60 mm, em Agosto (Figura 24).

A temperatura média registrada em Manaus é de 26°C. A temperatura máxima absoluta fica em torno de 38°C, a mínima já registrada ficou perto dos 16°C (Nimer, 1989), sendo os meses de Agosto e Setembro, os mais quentes. A umidade relativa do ar (média anual) fica em torno de 83% (INMET, 2014). As maiores umidades relativas foram observadas nos meses de Janeiro a Maio (média de 87%) e, as menores, nos meses de Agosto e Setembro, com 76% (AGUIAR, 1995).

A partir desses dados classifica-se o clima da região de Manaus como pertencendo ao grupo Am de Köppen, descritos como:

- Am – Clima tropical, caracteriza-se por apresentar temperatura média do mês mais frio sempre superior a 18°C, apresentando uma estação seca de pequena duração, que é compensada pelos totais elevados de precipitação, acima de 1500mm por ano.

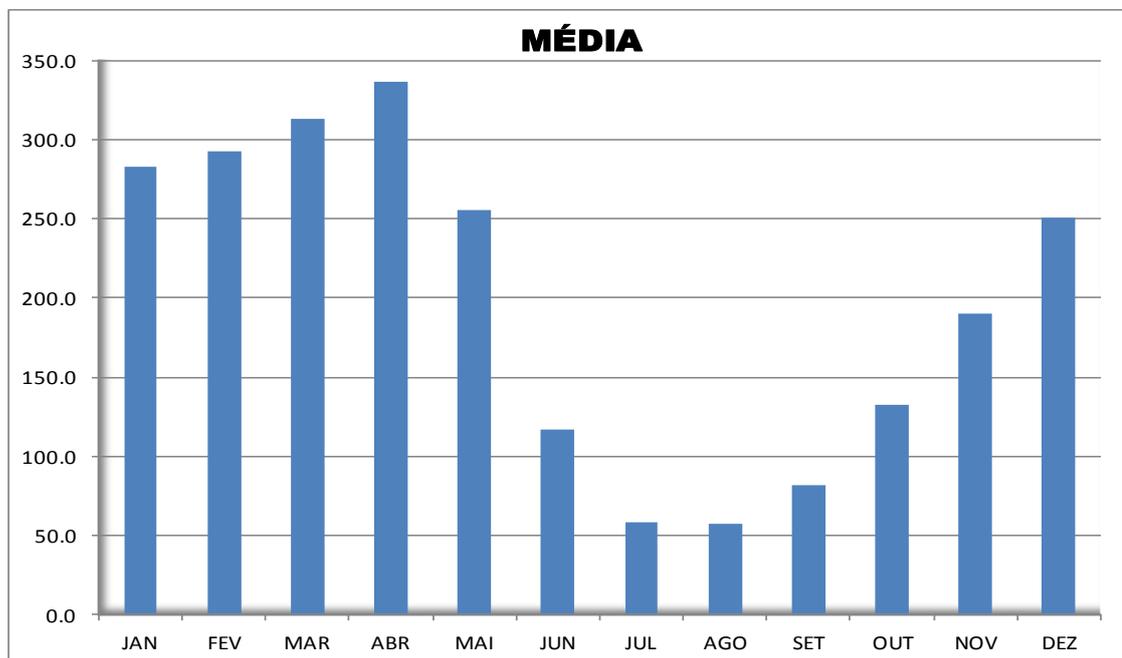


Figura 23 – Gráfico das precipitações médias mensais em milímetros entre os anos de 1998 a 2014, pluviômetro instalado e monitorado pela CPRM.

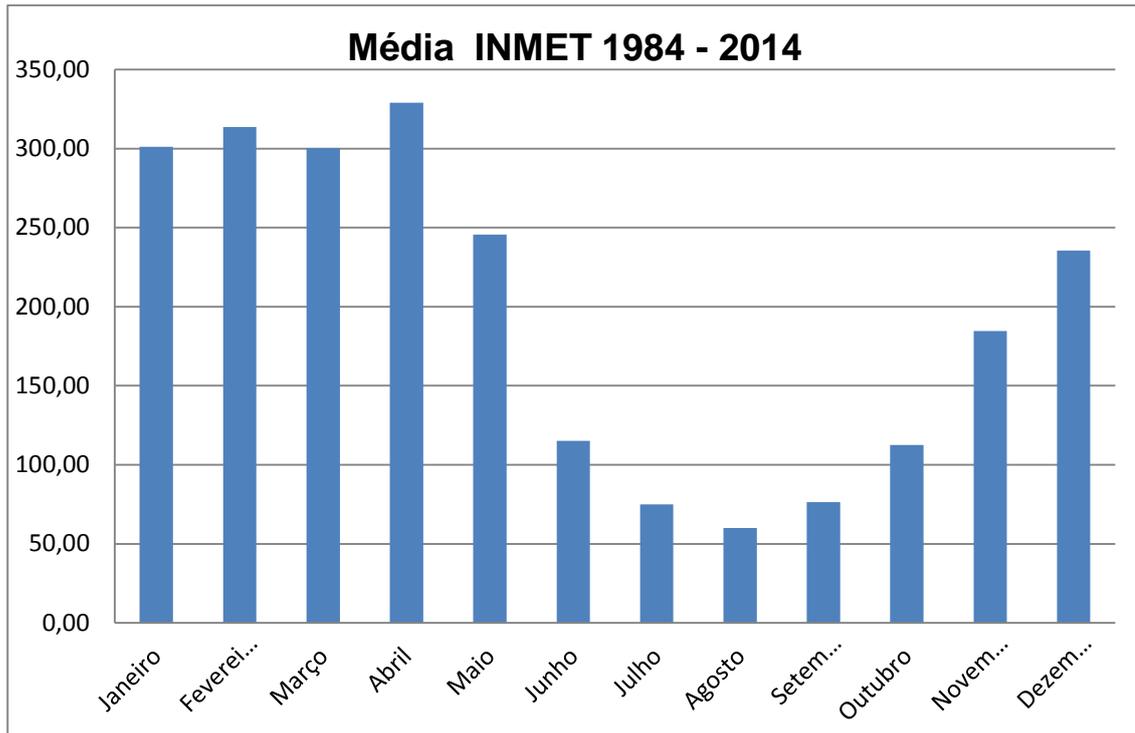


Figura 24 – Gráfico das precipitações médias mensais, de Janeiro de 1984 a Janeiro de 2014. Dados do pluviômetro do INMET estação 82331, localizado em Manaus - AM.

### 3.1.5 Relevo

Dentro do quadro geomorfológico da cidade de Manaus está inserida a rede de drenagem representada por diversos cursos fluviais, dentre os quais se destacam as bacias hidrográficas do Mindu, Bindá, Passarinho e Quarenta (COSTA *et al.* 2008). As planícies de inundação dos referidos igarapés se encontram, muitas vezes, ocupadas por diferentes tipos de construção (canalizações, retificação de cursos fluviais, aterramentos, dentre outros) com diferentes impactos nas margens e na própria planície. Os igarapés das referentes bacias desembocam no rio Negro, que apresenta oscilação no seu nível de cota em torno de 10 metros, entre o período de cheia e o de vazante (ROCHA, 2006).

Três grandes unidades são encontradas no relevo brasileiro: os planaltos, as planícies e as depressões.

Para Ross, 2000, o município de Manaus está inserido no Planalto da Amazônia Oriental, que apresenta intensa atuação de processos erosivos, em contato com a Depressão da Amazônia Ocidental, a oeste, e com a Planície do Rio Amazonas, ao sul (Figura 25).

As cotas máximas desse relevo não ultrapassam os 120 metros, e este é classificado como interflúvio tabular, cortado por uma rede de canais. Esta superfície

tabular serve como elemento de armazenamento da água da chuva. Uma vez excedida a capacidade de armazenamento e infiltração, forma-se um fluxo que segue em direção à encosta, escavando-a e causando o recuo da mesma e as feições erosivas, até chegar aos canais, levando os materiais retirados da encosta e assoreando o mesmo (VIEIRA, 2008).

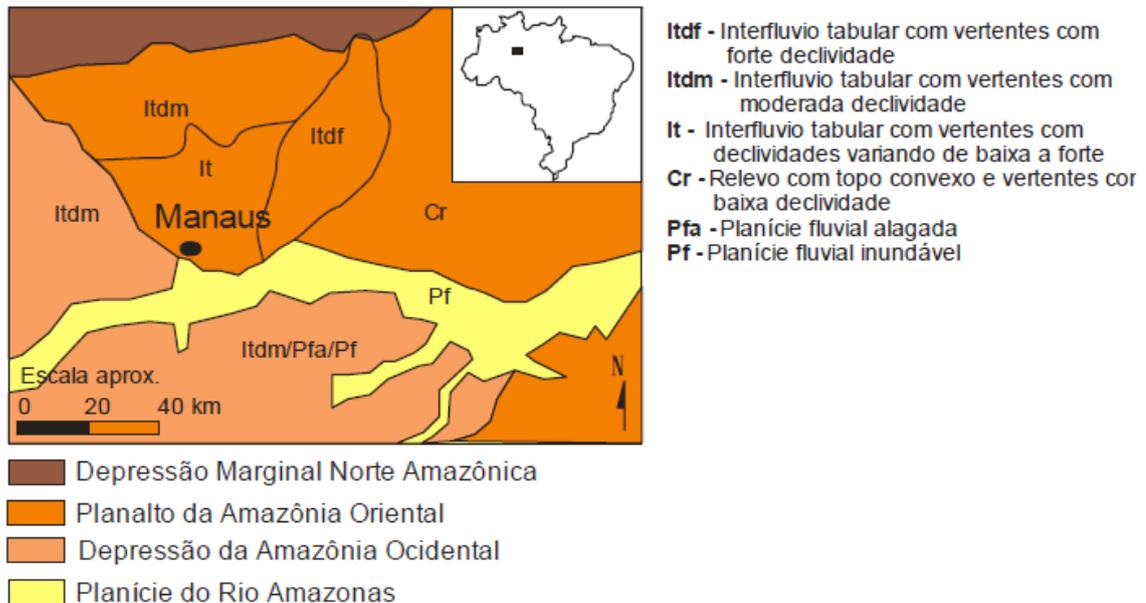


Figura 25 – Esboço geomorfológico da cidade de Manaus e arredores. Fonte: Vieira, 2008; modificado de Ross, 2000.

A zona urbana de Manaus apresenta como principal característica os interflúvios tabulares (platôs) os quais terminam em encostas côncavas, convexas a retilíneas. Ocorrendo uma diferenciação entre as zonas administrativas, no que se refere à declividade, forma e comprimento das encostas e da extensão desses platôs. A zona Leste, onde se encontra a 1ª área de estudo, destaca-se pela existência de platôs que terminam em encostas de grande declividade, curtas e com predominância da forma convexa. A zona Norte, onde está localizada a 2ª área de estudo, tem encostas variando entre côncavas a convexas, declividade variando de grande a baixa e com extensões também variadas (VIEIRA, 2008).

### 3.2 Fenômenos de risco

A relação entre eventos naturais e ação antrópica, causam fenômenos enquadrados como sendo de risco, que causam prejuízos aos componentes do meio biofísico e social (CERRI, 1993; ZUQUETE, 1995).

Os problemas relativos à erosão e a processos de movimentos de massa encontram-se presentes em vários lugares do mundo, mas em países com pluviosidade alta com características do ambiente tropical e cuja situação socioeconômica seja de subdesenvolvimento ou em desenvolvimento. Os problemas tornam-se mais acentuados devido à escassa estrutura para evitar tais fenômenos (GUERRA, 1994).

As áreas de encostas em zonas urbanas podem ser as formas de relevo mais alteradas, principalmente em áreas com crescimento desordenado e acelerado. A maior ou menor segurança das encostas está nas suas características intrínsecas, tais como forma, comprimento e também declividade. Mas a forma de ocupação e o uso do solo talvez sejam ainda mais críticos para favorecer a ocorrência de impactos ambientais do que as próprias características naturais das encostas. Há que se levar em consideração ainda as propriedades químicas e físicas dos solos que compõem as encostas, o regime pluviométrico e a cobertura vegetal (GUERRA, 2011).

Em meio urbano, as voçorocas são originadas pela ampliação do volume e concentração de águas superficiais, e por lançamentos inapropriados das drenagens de águas pluviais. Geralmente o problema se agrava quando da mistura de águas servidas às águas pluviais, em um sistema de drenagem deficiente (CARVALHO, 2006).

### **3.2.1 Erosão**

De acordo com Zachar (1982), a palavra erosão vem do latim, derivada do verbo erodere, que quer dizer comer, escavar, e foi utilizada pela primeira vez por Penck em 1894.

Erosão é o nome dado ao processo de desagregação e transporte de partículas de solo, rocha ou fragmentos causado pela ação da chuva, do vento, de organismos ou do gelo (Salomão e Iwasa, 1995 *apud* Infanti Junior e Fornasari Filho, 1998).

Os fenômenos erosivos podem ser causados por fatores naturais (normal) e por ação antrópica (acelerada), (Infatin Junior e Fornasari Filho, 1998).

Os fatores naturais determinam a intensidade dos processos, destacando-se como mais importantes: a ação da chuva, a cobertura vegetal, o relevo, os tipos de solos e o substrato rochoso.

Já a ação antrópica pode provocar desmatamento, uso inadequado do solo, ocupação em locais impróprios, e o descarte inadequado das águas pluviais, servidas e efluentes, acelerando os processos de erosão, mediante a fragilização do solo e o aumento do poder erosivo da água.

Para Guerra (2011), o processo erosivo abrange praticamente todo o globo, principalmente nas regiões de clima tropical, cujos totais pluviométricos são bem mais elevados, fato que se agrava pela concentração dessas chuvas, em certas estações do ano.

Guerra (2008) ressalta que as gotas de chuva, ao atingirem o solo sem proteção, estarão propensas a causar erosão por salpicamento ou efeito “splash” (salpicar; respingar; destacar-se). Essas gotas de água não encontraram resistência para que se pudesse dissipar a energia cinética, sendo ela toda descarregada diretamente no solo. Cita, ainda, que o efeito “splash” é o estágio inicial do processo erosivo, pois prepara as partículas que compõem o solo, para serem transportadas pelo escoamento superficial. Essa preparação se dá tanto pela ruptura dos agregados, quebrando-os em tamanhos menores, quanto pela própria ação transportadora que o salpicamento provoca nas partículas dos solos (Figura 26).



Figura 26 – Fenômeno de “*Splash*”, impacto da gota e destacamento das partículas do solo. Fonte: Guerra, 1998.

Guerra (2007) ensina que “os solos mais porosos permitem rápida infiltração das águas da chuva, dificultando o escoamento superficial”. Então, materiais arenosos são porosos e permeáveis, e apresentam alta suscetibilidade à erosão. Já

os materiais argilosos, embora possam apresentar porosidade, são praticamente impermeáveis e mostram maior resistência à erosão.

Em estudos realizados por Alcântara (1997) em solos do estado de São Paulo, notou-se a falta da fração argila nos ensaios onde não foram utilizados defloculantes. Conclui-se que os solos por ele estudados não tendem a desagregar apenas com água, o que pode indicar uma maior suscetibilidade à erosão.

Levando em conta a magnitude e a frequência dos processos erosivos, Bastos (1999) quantifica a erodibilidade de solos tropicais e subtropicais, não saturados, em cinco níveis, a partir de quatro perfis representativos dos processos erosivos na região metropolitana de Porto Alegre (Tabela 4).

Ainda para Guerra (2011), as taxas erosivas estão mais relacionadas às características das encostas, levando em conta o tamanho da encosta. Quanto mais longa, maior será o volume de água que se pode acumular durante o escoamento superficial. A declividade pode ser um fator importante, mas não há necessariamente uma correlação positiva à medida que a declividade aumenta, encontrando-se vários exemplos na literatura de que, em encostas muito íngremes, a erosão pode diminuir, devido ao decréscimo de material disponível (LUK, 1979; MORGAN, 1986 e 2005; FULLEN e CATT, 2004; GUERRA e MARÇAL, 2006 *apud* GUERRA, 2011).

Tabela 4 - Classificação relativa da erodibilidade, alterada de Bastos (1999).

<b>ERODIBILIDADE RELATIVA</b>	<b>OBSERVAÇÕES</b>
BAIXA	Solos lateríticos, que quando preservado, mostra resistência a erosão deflagadora de voçorocas
MÉDIA BAIXA	Solos que perderam parte da cimentação de origem e que são compensados pelo enriquecimento em argila
MÉDIA	Solos arenosos finos, que apresentam certa resistência a erosão, devido à cimentação herdada do arenito. Susceptíveis ao processo de ravinamento e erosão interna
MÉDIA ALTA	Solos saprolíticos arenosos de origem granítica, sujeitos a ravinamento e voçorocamento.
ALTA	Solos friáveis com ravinamento e voçorocamento bem desenvolvidos.

Segundo Lima (1999), as erosões de Manaus estariam ligadas aos processos de falhas normais e transcorrentes, ocorridos na região, resultantes de movimentos neotectônicos. Porém isso não foi identificado nos mapas ou visitas de campo.

Nas voçorocas atuam, em separado ou conjuntamente, vários processos erosivos, sendo palco de erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos, escorregamentos de taludes e quedas de blocos. Esses processos se conjugam no sentido de tornar esse estágio da erosão mais complexo, de elevado poder destrutivo, com evolução mais rápida e que se desenvolvam de jusante para montante (CARVALHO, 2006).

Diversas feições erosivas podem se formar em materiais suscetíveis a erosão.

Essas feições têm formas e dimensões variadas, dependendo da natureza do solo ou rocha em que foram desenvolvidas: da origem da água atuante (superficial ou subterrânea), bem como a intensidade do escoamento ou percolação da mesma.

- a) Marmitas ou panelas (*plunging pool*): feições que apresentam normalmente formas circulares produzidas pelo turbilhonamento do fluxo da água.
- b) Alcovas de regressão: cavidades que se assemelham a pequenas cavernas que se formam logo abaixo das camadas mais resistentes do solo ou rochas. A água desce ao longo das paredes; se camadas superiores são menos erodíveis e as inferiores, mais suscetíveis à erosão, estas últimas terão material retirado pelo escoamento e, no local, surgirão alcovas de regressão.
- c) Piping: pode ser considerado um fenômeno de erosão subterrânea, no qual a percolação de água causa a remoção de partículas do interior do solo/rocha, formando cavidades de forma tubular que avançam para o interior do solo/rocha (CARVALHO, 2006).
- d) Sulcos e ravinas: incisões por onde correm as enxurradas e indicam as rotas seguidas pelo escoamento superficial concentrado. Sulcos são pequenos canais de até 10cm de profundidade, gerados pela concentração do escoamento superficial; e ravinas são canais com profundidade entre 10 e 100 cm, onde se inicia a instabilidade dos taludes.
- e) Filetes subverticais: para Lima (1999) essas feições surgem em caminhos preferenciais da água da chuva, sendo considerados fluxos de adesão. Podem contribuir para a evolução das caneluras, alcovas e marmitas já existentes.
- f) Caneluras: oriundas do escoamento superficial vertical por adesão, desencadeada principalmente pela ausência da cobertura vegetal.

- g) Voçorocas: incisões ou canais profundos, com mais de 1 metro, por onde correm as enxurradas, indicando as rotas seguidas pelo escoamento superficial concentrado e ocorrendo a instabilidade e o deslizamento dos taludes laterais.

### 3.2.2 Deslizamentos ou Escorregamentos

Os deslizamentos são movimentos de massa de média a alta velocidade, que assumem enorme importância, devido à sua interação com as atividades antrópicas e a variabilidade de causas e mecanismos (IPT, 1989; FERNANDES e AMARAL, 1996). Os deslizamentos são deflagrados pelo aumento da necessidade de mobilização de material e pela redução da resistência do material.

Os deslizamentos ou escorregamentos produzem cicatrizes; podem ser classificados em planar, rotacional ou em cunha, segundo Cerri (1993):

- Planar: ocorrem em áreas com alta declividade onde o solo é pouco espesso; ou na porção em que o solo coluvionar intercepta o saprólito, ou ainda, junto dos planos de fraqueza (falhas, xistosidades etc); possuem comprimento maior que a largura (Figura 27).

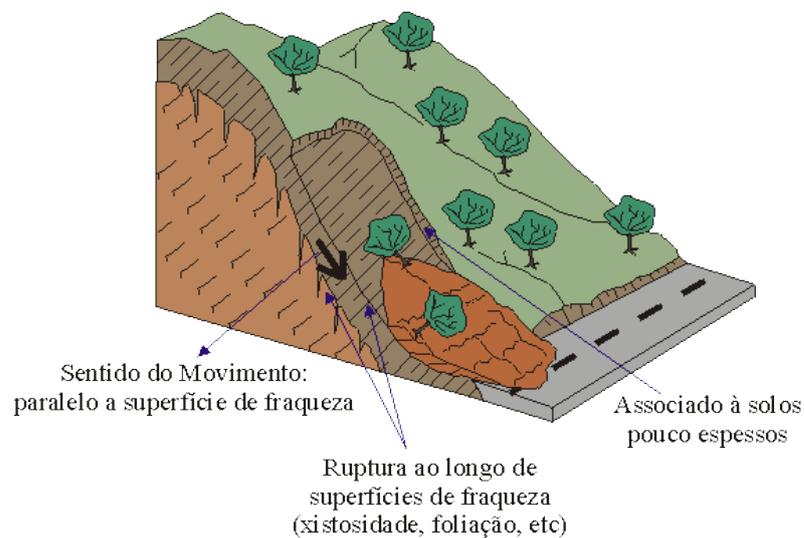


Figura 27 – Escorregamento planar. Fonte: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09b.html>

- Rotacional: ocorrem em taludes com superfície curvada, formada por solo com grande espessura ou por rochas muito fraturadas, localizadas no topo de escarpa ou de morros (Figura 28).

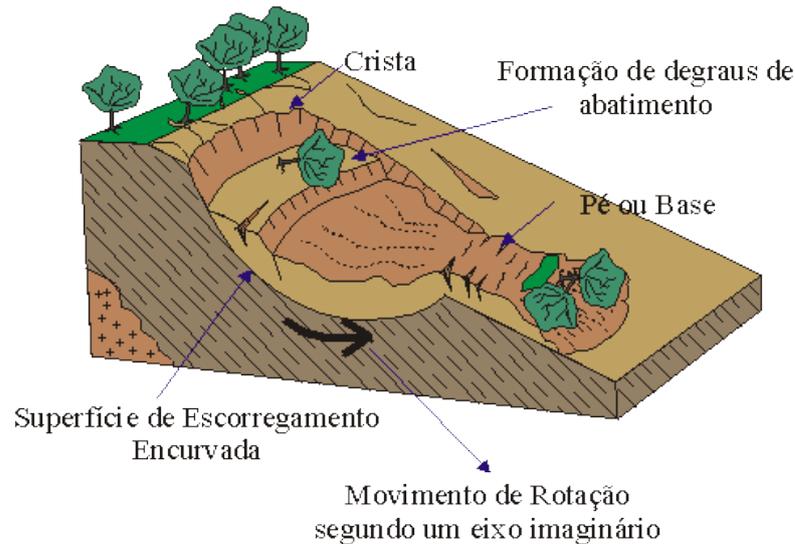


Figura 28 – Escorregamento rotacional.

Fonte: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09c.html>

- **Cunha:** este tipo de escorregamento tem a sua ocorrência associada a saprólitos e a maciços, apresenta dois planos de fraqueza, sendo que o deslocamento ocorre ao longo dos eixos de intersecção desses planos (Figura 29).

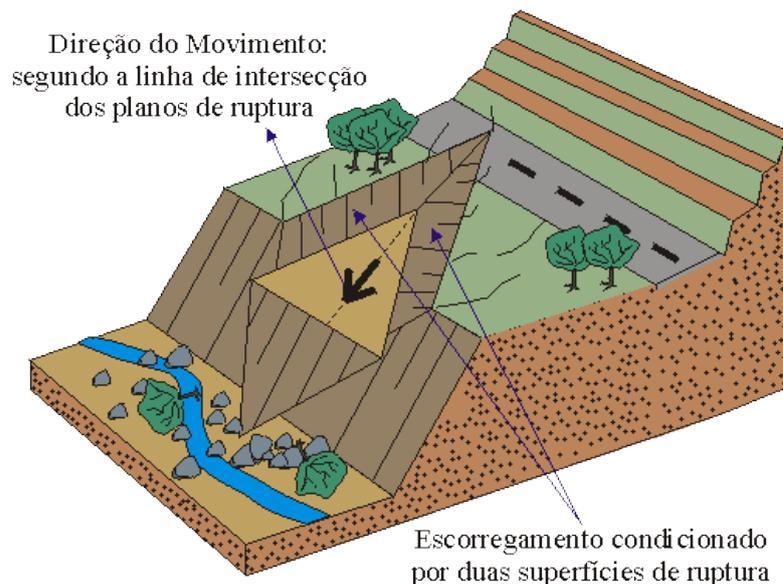


Figura 29 – Escorregamento em cunha. Fonte:

<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09d.html>

O deslizamento é um movimento que envolve material sólido que ocorre ao longo de uma superfície de cisalhamento, apresentando uma fricção constante, depositando o material mobilizado no sopé da vertente. Possui uma geometria definida formada pela cabeceira, onde se inicia o escorregamento; pelo corpo, ao

longo da faixa afetada pela remoção e transporte de material; e, pela base, onde se deposita o material transportado (IPT,1989).

Locais que apresentam registros de deslizamentos são áreas com mais relevante potencial para a ocorrência de novos eventos deste tipo. Conhecendo-se a frequência, características e magnitude dos deslizamentos, podem-se prever as futuras ocorrências.

### **3.3 Natureza das coberturas de alteração**

A degradação das propriedades físicas e químicas do solo configura um dos principais processos responsáveis pela perda da qualidade estrutural e aumento dos processos de instabilização.

Sá (2001) destaca as seguintes propriedades do solo que contribuem para os processos de instabilização: textura, estrutura, densidade, permeabilidade e teor de matéria orgânica. Para Guerra e Cunha (1995), é preciso relacionar estas propriedades a um determinado período de tempo, pois podem evoluir, transformando certos solos mais suscetíveis ou menos resistentes aos processos erosivos.

A textura influi na capacidade de infiltração e de absorção da água da chuva, interferindo no potencial de enxurradas do solo em relação a maior ou menor coesão entre as partículas (SÁ, 2001).

Lal (1990) ensina que a estrutura do solo é uma propriedade importante que determina a resistência de um solo à dispersão e ao destacamento, sendo definida de acordo com o arranjo de partículas sob forma de agregado.

A permeabilidade determina a maior ou menor capacidade de infiltração das águas da chuva, estando diretamente relacionada com a porosidade dos solos.

Para Guerra e Cunha (1995), a densidade dos solos é um fator controlador que deve ser levado em conta quando se tenta compreender os processos de instabilização dos solos, pois se refere a maior ou menor compactação dos solos, sendo que a sua relação com a porosidade se processa de modo inverso. Ou seja, à medida que a densidade de um solo aumenta, a porosidade diminui e, em consequência, ocorre a redução de infiltração de água no solo.

Com relação ao teor de matéria orgânica, Guerra e Cunha (1995) lembram que estudos de diversos autores confirmam que a matéria orgânica é a melhor agente agregadora do solo, aumentando a estabilidade dos agregados.

As diferentes propriedades dos solos podem conferir a eles maior ou menor resistência à ação das águas; a isto se chama erodibilidade. Define-se a erodibilidade de um solo como a sua falta de capacidade de resistir aos processos erosivos e que depende não só das características intrínsecas do solo, como também de fatores subsidiários tais quais os ciclos de umedecimento e secagem, além da composição química da água presente, segundo Vilar e Prandi (1993 *apud* CARVALHO, 2006). Desta maneira, a forma mais comum de se desvendar a erodibilidade dos solos tem ocorrido pela análise de suas características físicas e químicas, e de alguns condicionantes externos.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 Descrição e análise de imagens aéreas e de satélite**

Foram analisados mapas de curvas de nível, uso e ocupação do solo, de risco geológico e imagens aéreas para escolha das áreas e análise da evolução dos fenômenos que atingem as duas áreas de estudo. Aqui, dar-se-á ênfase às imagens de satélites e fotografias aéreas para observar o crescimento urbano, o tipo e a forma de ocupação dos locais de estudo, bem como o desenvolvimento das feições erosivas observadas nas imagens e em campo.

#### **4.1.1 Jorge Teixeira – 1ª área**

Para a primeira área de estudo, localizada no bairro Jorge Teixeira, foram analisadas imagens aéreas e de satélite, do local, nos anos de 2004, 2005, 2007, 2010, 2011 e 2013, para descrever a evolução das feições erosivas e do assoreamento dos canais de drenagem desse local. As imagens de 2005, 2007, 2011 e 2013 do satélite Geoeye, retiradas do Google Earth, foram georreferenciadas com auxílio do programa ArcGis 9.3. As imagens de 2004 e 2010 já se achavam georreferenciadas.

Na imagem do satélite Quickbird, de 2004, a mais antiga e com resolução suficiente para visualização da área, é possível observar as feições erosivas (voçorocas) bem evoluídas, instaladas nos finais das ruas, que estão perpendiculares à encosta e servem de rampa para o escoamento e aceleração da água. Nesta época as voçorocas encontravam-se ativas e em estágio avançado de evolução, assim os igarapés estariam recebendo grande quantidade de sedimentos retirados das encostas e do platô (Figura 30).

Na imagem de 2005, do satélite Geoeye, retiradas do Google Earth, tratadas e georreferenciadas no ArcGis, observa-se uma pequena evolução lateral da voçoroca, onde devem ter ocorrido deslizamentos e solapamentos das bordas da erosão, devido ao alto ângulo da declividade e à fragilização das camadas superiores, levando solo e vegetação para a vertente (Figura 31). A voçoroca, em 2005, ostentava 31 metros de largura, distância medida por uma perpendicular entre as bordas mais afastadas da erosão, com auxílio do programa ArcGis 9.3 e Google Earth.



Figura 30 – Imagem de satélite de 2004 da 1ª área, indicações da voçoroca ativa e do igarapé assoreado. Fonte: Satélite Quickbird, 2004.

Nesse momento, o processo erosivo diminui. Isso é identificado pelo crescimento inicial de vegetação presente no vale do igarapé, devido ao déficit sofrido pelo aporte de sedimentos, com o passar do tempo. Tal fato deve ter ocorrido porque o agente erosivo começou a atingir lixo e entulho, ou solo mais consolidado, materiais menos susceptíveis à erosão. Ou pode, ainda, indicar declividades muito

elevadas, próximas a 90°, nas bordas da voçoroca. Assim, há uma diminuição da erosão e, conseqüentemente, uma redução no assoreamento dos canais, devido à falta de aporte de sedimentos, corroborando alguns estudos (Luk, 1979; Morgan, 1986 e 2005; Fullen e Catt, 2004; Guerra e Marçal, 2006 *apud* Guerra, 2011) citados na revisão bibliográfica deste trabalho. Também pode ter ocorrido a diminuição da área de contribuição de material (Figura 31).



Figura 31 – Imagem do satélite Geoeye de Junho de 2005, retirada do Google Earth com delimitação da 1ª área.

Na imagem de 2007, retirada do Google Earth, verifica-se a evolução a montante, em direção ao arruamento, das voçorocas ao sul e ao norte, da principal

estudada (central). A voçoroca central cessou sua evolução montante, porém observam-se deslizamentos com árvores tombadas, causando evolução lateral da mesma. Nesta imagem, a voçoroca está com 36 metros de largura, distância medida da mesma forma que na imagem de 2005.

Mesmo ante a evolução das feições erosivas da área, no curso cataclinal do igarapé assoreado, ocorre o aumento da vegetação que também evoluiu, se comparado à imagem de 2005 (Figura 32).

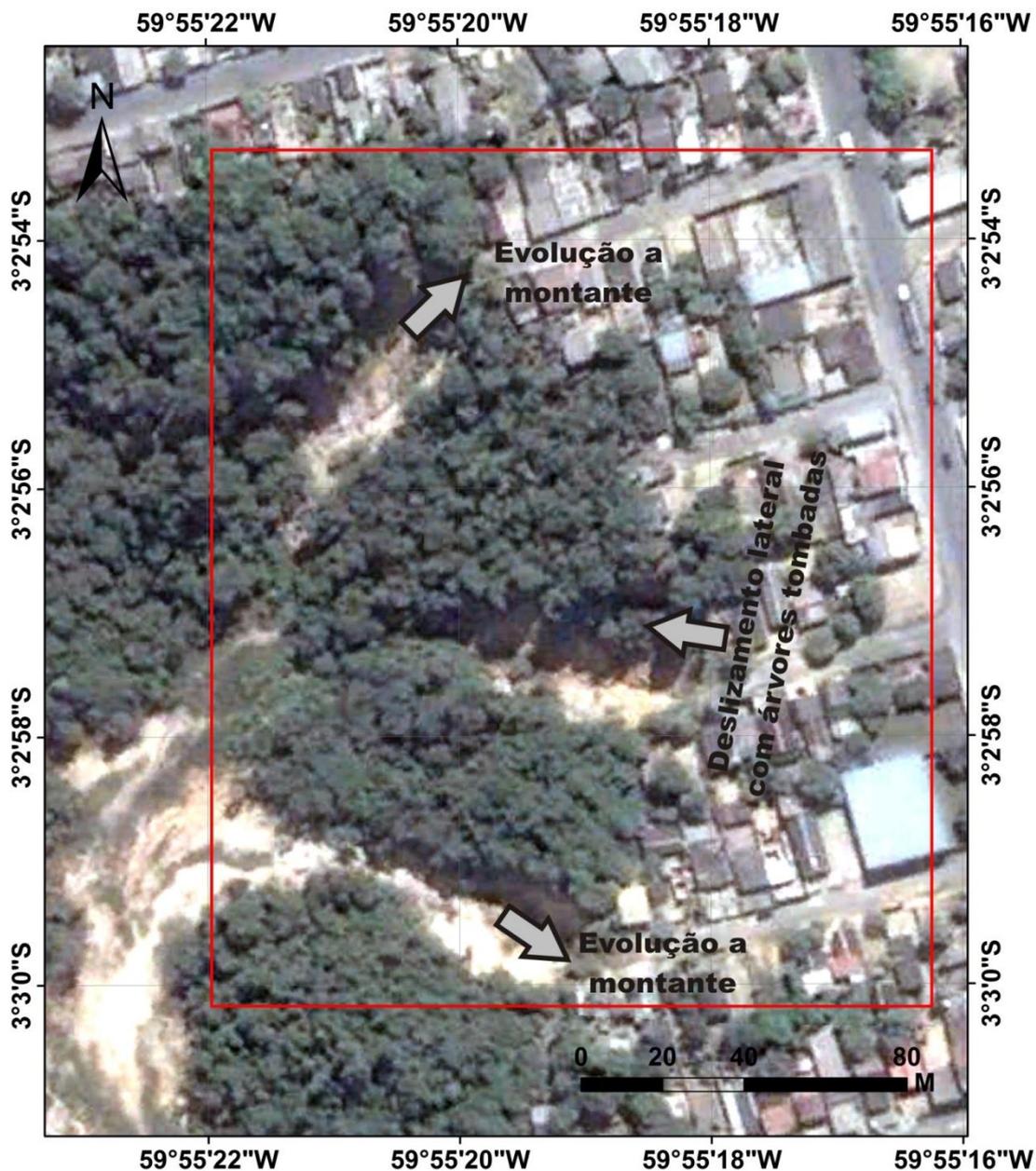


Figura 32 – Imagem do satélite Geoeye de Julho de 2007, retirada do Google Earth com delimitação da 1ª área de estudo e setas indicativas de evolução das feições.

A Figura 33 expõe as curvas de nível e o arruamento sobre a fotografia aérea ortorretificada de outubro de 2010, cedida pela prefeitura da cidade de Manaus. Nesta imagem pode-se observar o agrupamento das curvas de nível, indicando a

alta declividade da encosta estudada. A cerca de 50 metros de diferença entre o platô e o vale do igarapé, as curvas também demonstram as incisões das voçorocas.



Figura 33 – Fotografia aérea da 1ª área de estudo, de Outubro de 2010, com curvas de nível de metro em metro em branco e arruamento em vermelho. Fonte da imagem: Prefeitura de Manaus.

Na imagem de 2011, retirada do programa Google Earth, há uma grande evolução lateral da voçoroca central e sul. Comparando-a às imagens de 2007, a voçoroca central atinge, aproximadamente, 44 metros de largura (Figura 34).

Estipulando uma média da evolução lateral da voçoroca central, de 2005 a 2011, temos um crescimento lateral de aproximadamente 2 metros por ano. Mesmo ocorrendo a evolução lateral das voçorocas, com deslizamentos e solapamento das suas bordas, as vegetações nos cursos cataclinal e ortoclinais continuam a crescer. Com os processos erosivos diminuindo, não ocorre evolução a remontante da feição erosiva, e o aporte de sedimento no igarapé torna-se estável (Figura 34).



Figura 34 – Imagem do satélite Geoeye de Novembro de 2011, retirada do Google Earth com delimitação da 1ª área de estudo e indicação da largura da voçoroca central.

Na imagem mais recente - outubro de 2013 (Figura 35), do satélite Geoeye, retirada do programa Google Earth e georreferenciada no programa ArcGis, verifica-se o aumento da vegetação por todo o curso do igarapé, assim como nas vertentes

da voçoroca. Com isso, aparentemente a voçoroca encontra-se estabilizada, apesar de serem descritas trincas no terreno, a indicar risco de movimentos de massa próximos às bordas das feições erosivas.

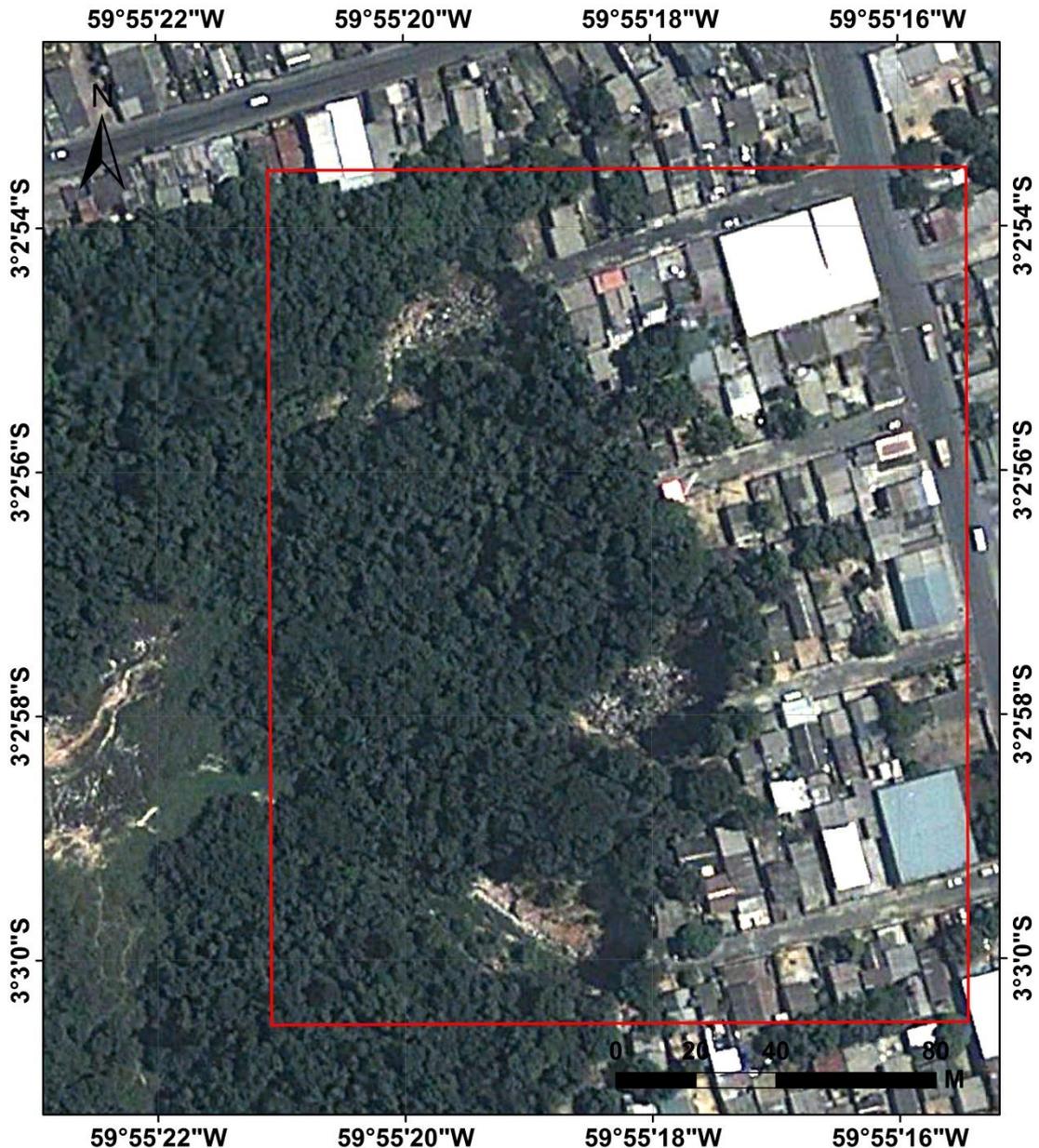


Figura 35 – Imagem do satélite Geoeye de Outubro de 2013, retirada do Google Earth com delimitação da 1ª área de estudo.

#### 4.1.2 Cidade Nova – 2ª Área

Igualmente à primeira área, para a descrição da segunda área foram analisadas as imagens de satélite e fotografias aéreas georreferenciadas dos anos de 2004, 2005, 2007, 2010, 2011 e 2013.

Na imagem do satélite Quickbird, de 2004, observa-se que o Conjunto Cidadão I, área desmatada da imagem, está em fase de implantação. A ocupação

dessa área aparentemente foi projetada e planejada, e, diferentemente da primeira área, na mesma época, não expõe feições erosivas instaladas (Figura 36).

Tratando-se de uma comunidade planejada, existe toda uma infraestrutura básica, com bocas de lobo, meios-fios e área verde preservada, desde o começo da ocupação, o que, juntamente com a estrutura do arruamento planejado, reduz em muito o princípio e a evolução das feições erosivas e os movimentos de massa no local.

Na porção norte da imagem Quickboard, de 2004, há um vale, no qual já se encontra instalada a Comunidade Campo Dourado I. Essa área foi assoreada por sedimentos provenientes da obra de implantação do Conjunto Cidadão I (Figura 36).

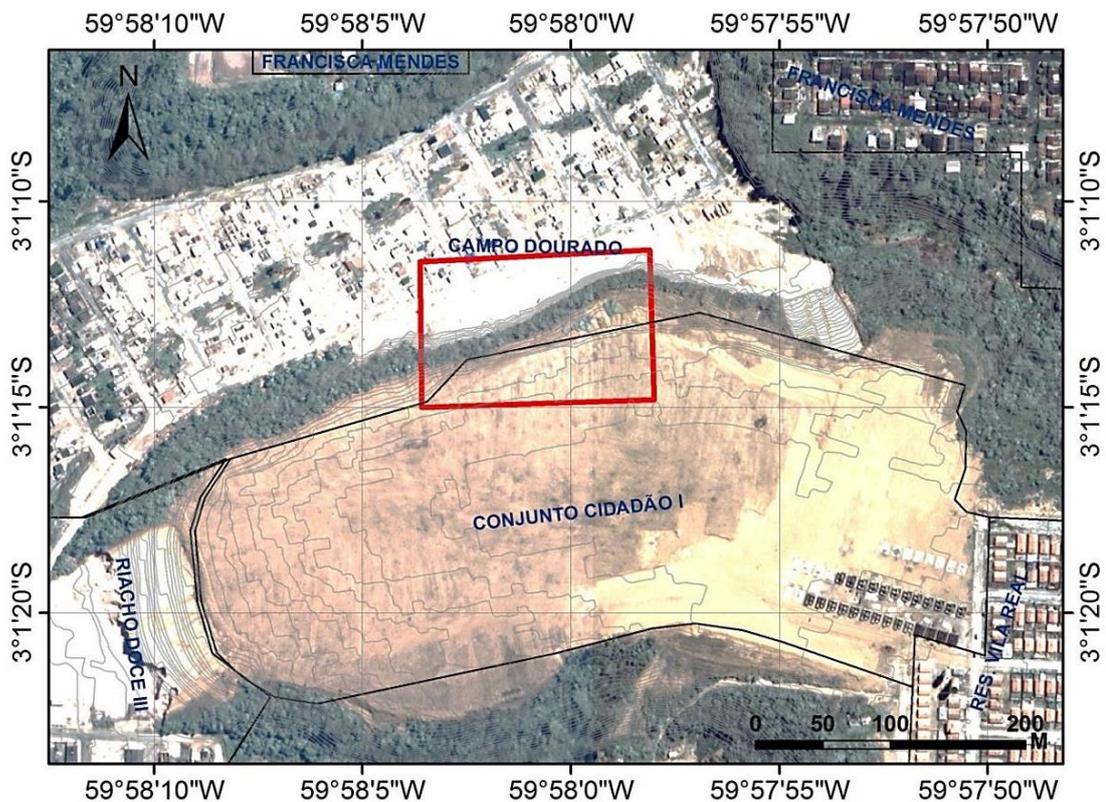


Figura 36 – Imagem de satélite Quickbird de 2004, 2ª área de estudo em destaque vermelho.

Na imagem de Junho de 2005, coletada do programa Google Earth e georreferenciada no programa ArcGis 9.3, não se observam grandes feições erosivas ou movimentos de massa na região (Figura 37). Ocorre a ocupação do platô, Conjunto Cidadão I, por moradias que aparentam o mesmo padrão construtivo. No Campo Dourado, veem-se moradias no pé da encosta, com risco de soterramento, devido aos cortes para construção das casas e a declividade do talude.



Figura 37 - Imagem do satélite Geoeye de junho de 2005, retirada do programa Google Earth, com a delimitação da 2ª área de estudo.

Analisando a imagem do satélite Geoeye, retiradas do programa Google Earth, do ano de 2007, confirma-se que a base da encosta estudada ficou habitada pelo menos até este ano (Figura 38). Na imagem de 2009, do Google Earth, com baixa resolução - a qual não foi inserida no trabalho - as residências já haviam sido suprimidas. A desocupação do local pela defesa civil ocorreu devido a eventos de deslizamentos da encosta e a início de feições erosivas, que colocam a área em risco de soterramento.

Na Figura 39 temos a Aerofotografia de outubro de 2010, cedida pela prefeitura de Manaus, sobreposta pelas curvas de nível de metro em metro e pelo arrumamento. Pode-se observar a alta declividade da encosta, com uma diferença de altitude de 26 metros, da base para o topo. Confirma-se também a retirada das moradias, após 2007, da base da encosta, sob risco de soterramento, apesar de outras ainda resistirem, nas proximidades, em igual situação (Figura 39).



Figura 38 - Imagem do satélite Geoeye de junho de 2007, retirada do programa Google Earth, com a delimitação da 2ª área de estudo.



Figura 39 – Fotografia aérea ortorretificada de outubro de 2010, cedida pela Prefeitura Municipal de Manaus, da 2ª área de estudo, com curvas de nível e arruamento.

Observa-se nas figuras 40 e 41 que entre os anos de 2011 a 2013 ocorreu uma estabilização no processo erosivo, evidenciado pelo crescimento da vegetação e a redução dos deslizamentos e processos erosivos.



Figura 40 - Imagem do satélite Geoeye de novembro de 2011, retirada do programa Google Earth, com a delimitação da 2ª área de estudo.

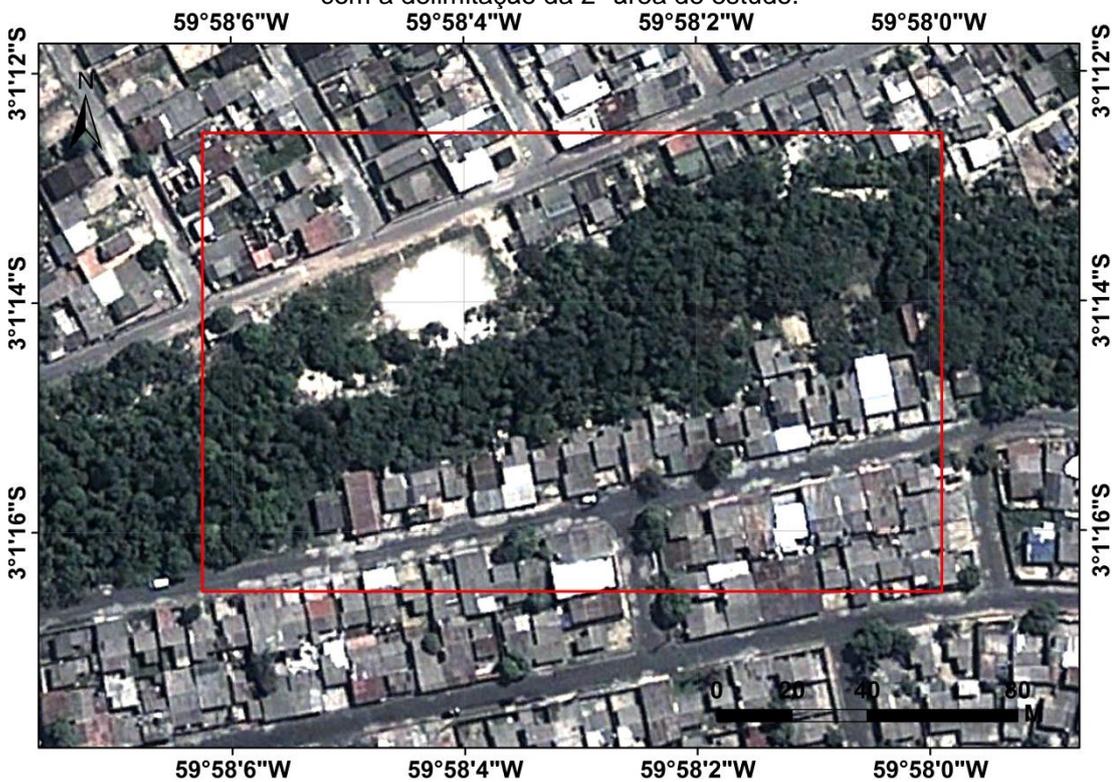


Figura 41 - Imagem do satélite Geoeye de agosto de 2013, retirada do programa Google Earth, com a delimitação da 2ª área de estudo.

## 4.2 Mapeamento de risco geológico

### 4.2.1 1ª Área – Jorge Teixeira

Foram descritos três pontos com os riscos geológicos, com a caracterização das feições erosivas e identificação dos indícios de movimentação do terreno, dessa forma foi possível delimitar e classificar os setores de risco, nesses locais foram capturadas 40 fotos. Nesse mapeamento de risco identifica-se varias casas em risco alto a muito alto, nas proximidades das feições erosivas (Figura 42).

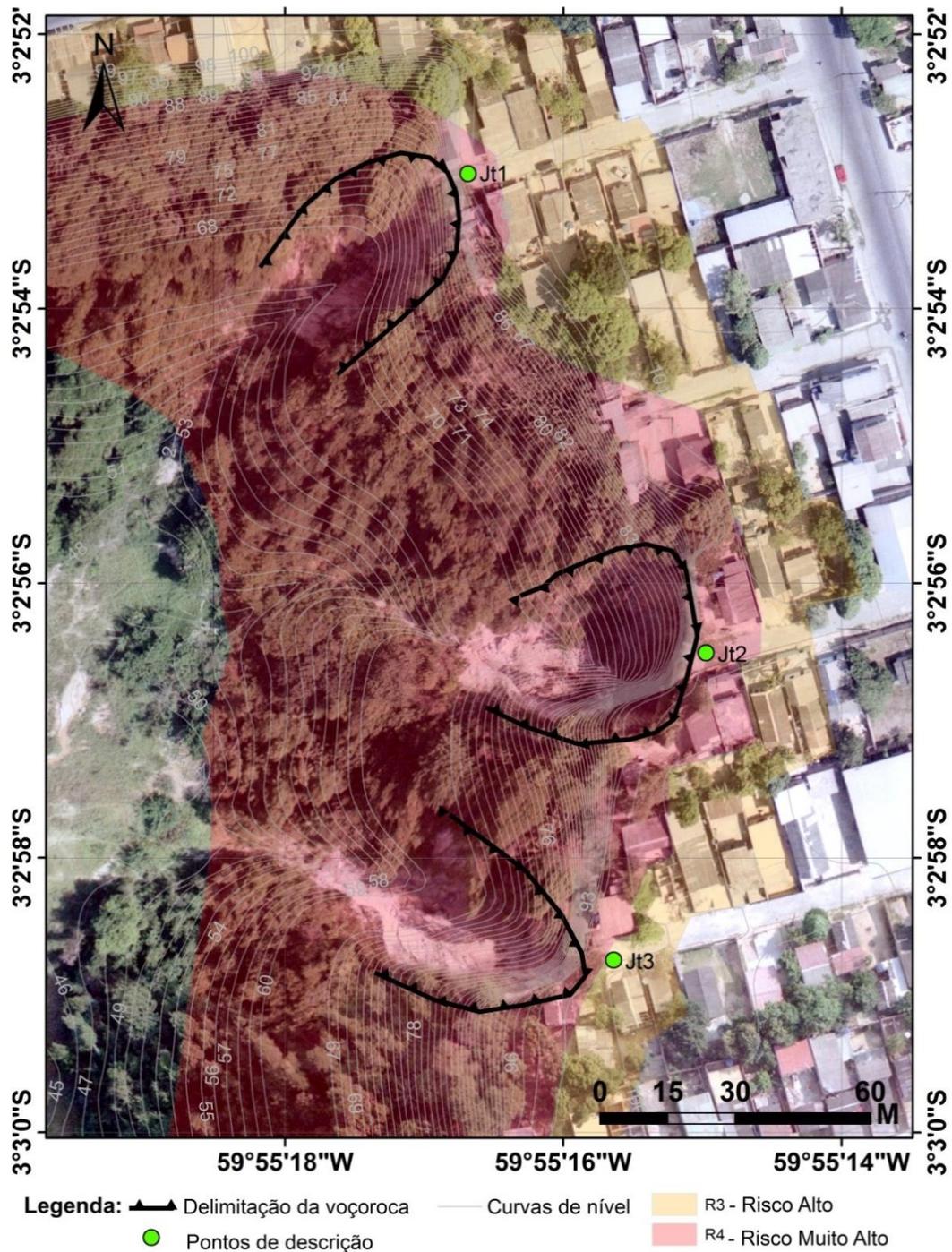


Figura 42 – Delimitação das áreas de risco na 1ª área de estudo. Com as curvas de nível e arruamento.

Para delimitação dos setores, utilizou-se a metodologia que preconiza o Ministério das Cidades, proposto inicialmente pelo IPT e descrito na metodologia.

A seguir há as descrições sucintas dos pontos visitados e descritos:

Ponto Jt1 - No final da Rua F, foi identificada uma voçoroca, com aproximadamente 25 metros de largura, com trincas no platô do terreno, desmatamento com solo exposto na encosta, lançamento de águas pluviais e esgoto diretamente na superfície do talude, vazamento nas tubulações de água, rua em rampa com inclinação para a encosta, infraestrutura deficiente e presença de lixo e entulho no local (Figura 43). Este local foi identificado como risco alto (R3) a muito alto (R4) (Figura 42).



Figura 43 – Composta por 4 fotos do ponto Jt1. 1 – Imagem lateral de uma voçoroca. Observam-se restos da base de uma casa. 2 – Voçoroca na direção do fluxo, com igarapé assoreado no vale. 3 – Topo da voçoroca com lixo e entulho despejados pela população local. 4 – Obras de infraestrutura subdimensionadas, danificadas e ineficientes. Fotos do Autor.

Ponto Jt2 - Final da Rua J, uma enorme voçoroca, com aproximadamente 35 metros de profundidade, 40 metros de largura e 60 metros de extensão, na qual a inclinação do talude chega a 90° próximo às casas. É a maior voçoroca descrita em campo. Encontram-se trincas e fraturas próximas às bordas da voçoroca (Figura 44).

As tubulações pluviais e de esgoto estão danificadas, e apresentam vazamentos. Juntamente com a drenagem deficiente da rua e a mesma em rampa, no sentido da feição erosiva, pode suceder avanço ou crescimento da voçoroca a montante, no sentido da rua. Em episódios de chuvas intensas, a rua em rampa serve como acelerador dos processos erosivos dessa área (Figura 44). Há um depósito de lixo e entulho na cabeceira da encosta (Figura 44).

Esta área foi identificada com um grau de risco alto (R3) a muito alto (R4), e escolhida para a execução da sondagem a trado e coleta de amostra, para a identificação das características da área de estudo (Figura 42).



Figura 44 – Fotos ponto JT2. 5 – Casa próxima da voçoroca. 6 – Direção do fluxo de escavação da voçoroca com igarapé assoreado. 7 – Voçoroca com lixo e entulho na encosta, casa próxima. 8 – Laje de casa já removida do local, caminho preferencial da água e tubulação danificada. Fotos do Autor.

Ponto Jt3 - No final da Rua M, tem-se uma voçoroca com cerca de 30 metros de altura e 80 de extensão. Nesta, observam-se inclinações negativas por baixo de moradias locais, e identificadas trincas no terreno e moradias, presença de lixo na

encosta, lançamento de esgoto em superfície, vazamentos nas tubulações de águas, drenagem deficiente. Tudo junto acarreta uma aceleração do processo erosivo do local (Figura 45). Este local também foi identificado com grau de risco alto (R3) a muito alto (R4) (Figura 42).



Figura 45 - Fotos 9 e 10 – Imagem do ponto JT3. 9 – Voçoroca com paredes íngremes, visualização dos horizontes argiloso e saprolítico. 10 – Voçoroca com cicatrizes na parede, indicando um próximo deslizamento. Fotos do Autor

#### 4.2.2 Conjunto Cidadão I - 2ª área de estudo

Neste mapeamento de risco foram avaliados dois pontos de descrição (Cn) (Tabela 2), com tomadas de fotos e coordenadas do local, observando-se as cicatrizes de deslizamentos e as feições erosivas encontradas no afloramento, principalmente da porção intermediária até a base da encosta. As casas incluídas dentro do setor de risco acham-se no sopé do talude, com risco de soterramento por material erodido ou deslizado da encosta, além de as casas estarem muito próximas ao talude. O mapeamento de risco geológico desse local foi setorizado como de risco alto (R3), utilizando a metodologia que preconiza o Ministério das Cidades.

As casas do topo do talude, Conjunto Cidadão I, não se encontram em risco geológico, não sendo encontradas quaisquer evidências de movimento de massa ou feições erosivas no local, além de contar com boa infraestrutura, cinturão verde e planejamento do local (Figura 46).



**LEGENDA:** ● Pontos de descrição      — Curvas de nível      R3 - Risco Alto  
 ● Sondagem - ST2      — Arruamento

Figura 46 – Foto aérea ortoretificada de 2010, cedida pela Prefeitura de Manaus, com risco geológico e pontos de descrição da 2ª área de estudo.

Nos pontos de descrição do risco foram observadas feições erosivas na parte inferior do talude, esse local aparentando ser mais suscetível à erosão (Figura 47).

Foi possível observar sulcos e ravinas, que indicam o caminho preferencial da água que escoar pelo talude (Figura 48 e 49); filetes sub-verticais que também sugerem caminhos preferenciais da água da chuva por fluxo de adesão (Figura 48); caneluras, oriundas do escoamento superficial vertical por adesão, desencadeado pela ausência de cobertura vegetal (Figura 48); alcovas de regressão, que constituem feições erosivas que podem ocorrer em diferentes climas e litologias, tanto por escoamento superficial quanto por exfiltração do lençol freático ou também, pela combinação de ambos (Figura 48); marmitas ou panelas que se formam pela queda da água na base ou em degraus do talude, e pequenas *demoiselles* que ocorrem quando o solo erodível é protegido do salpicamento por um seixo ou concreção laterítica, formando pequenos pináculos. Os locais de ocorrência dessas feições demonstram a existência de camadas menos resistentes à erosão, isto é, mais erodíveis.



Figura 47 – Ponto Cn-01, feições erosivas aparentes na base da encosta. Foto do autor em 09/11/2012

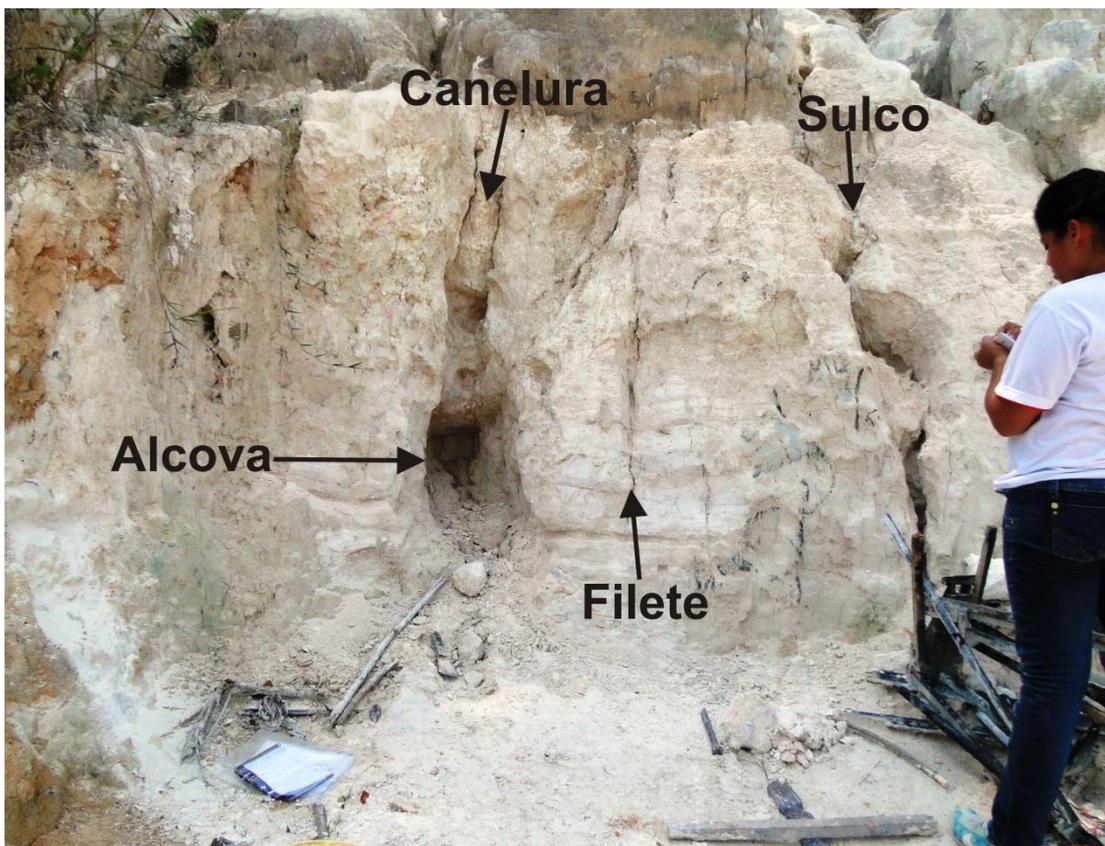


Figura 48 – Foto de detalhe da base do talude, com indicações de algumas feições erosivas encontradas na segunda área de estudo. Foto do autor em 09/11/2012.

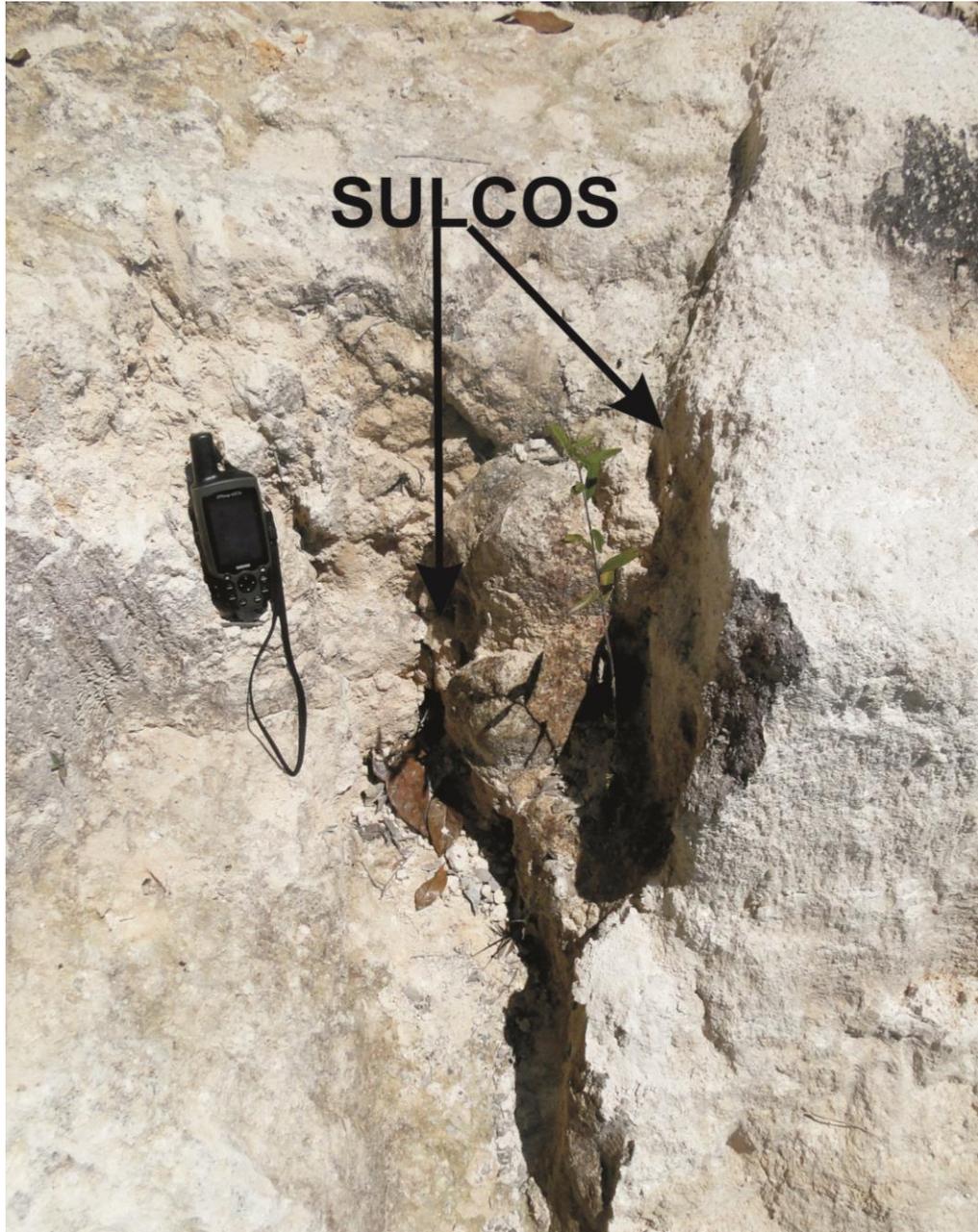


Figura 49 – Foto em detalhe de sulco erosivo encontrado na segunda área de estudo. Foto do auto em 09/11/2012.

#### **4.3 Descrição e análise dos perfis a trado**

Foram feitas duas sondagens a trado com 10 metros de profundidade cada, uma em cada área de estudo, com dois objetivos, o primeiro para descrição tátil-visual com medida das espessuras das camadas e horizontes, o que gerou um perfil de sondagem, descritos a seguir, e o segundo para a coleta de amostras dos diferentes materiais encontrados, utilizadas para execução dos ensaios físicos e mineralógico em laboratório.

As coletas ocorreram de metro em metro ou conforme houvesse uma mudança na coloração ou textura de material escavado, seguindo a norma da NBR 9603/86, específica para sondagem a trado.

Ao todo foram coletadas e identificadas, conforme descrito na metodologia, 21 amostras; sendo 10 amostras coletadas na sondagem ST1, locada na 1ª área (Figura 2) - estas foram nomeadas pela sigla alfanumérica EA-01, seguida por uma letra identificando a profundidade ou camada. Para o perfil de sondagem ST2, locada na 2ª área de estudo (Figura 3) foram coletadas 11 amostras, identificadas pela sigla alfanumérica EA-02, seguida de uma letra para informar a mudança de profundidade ou de textura da camada.

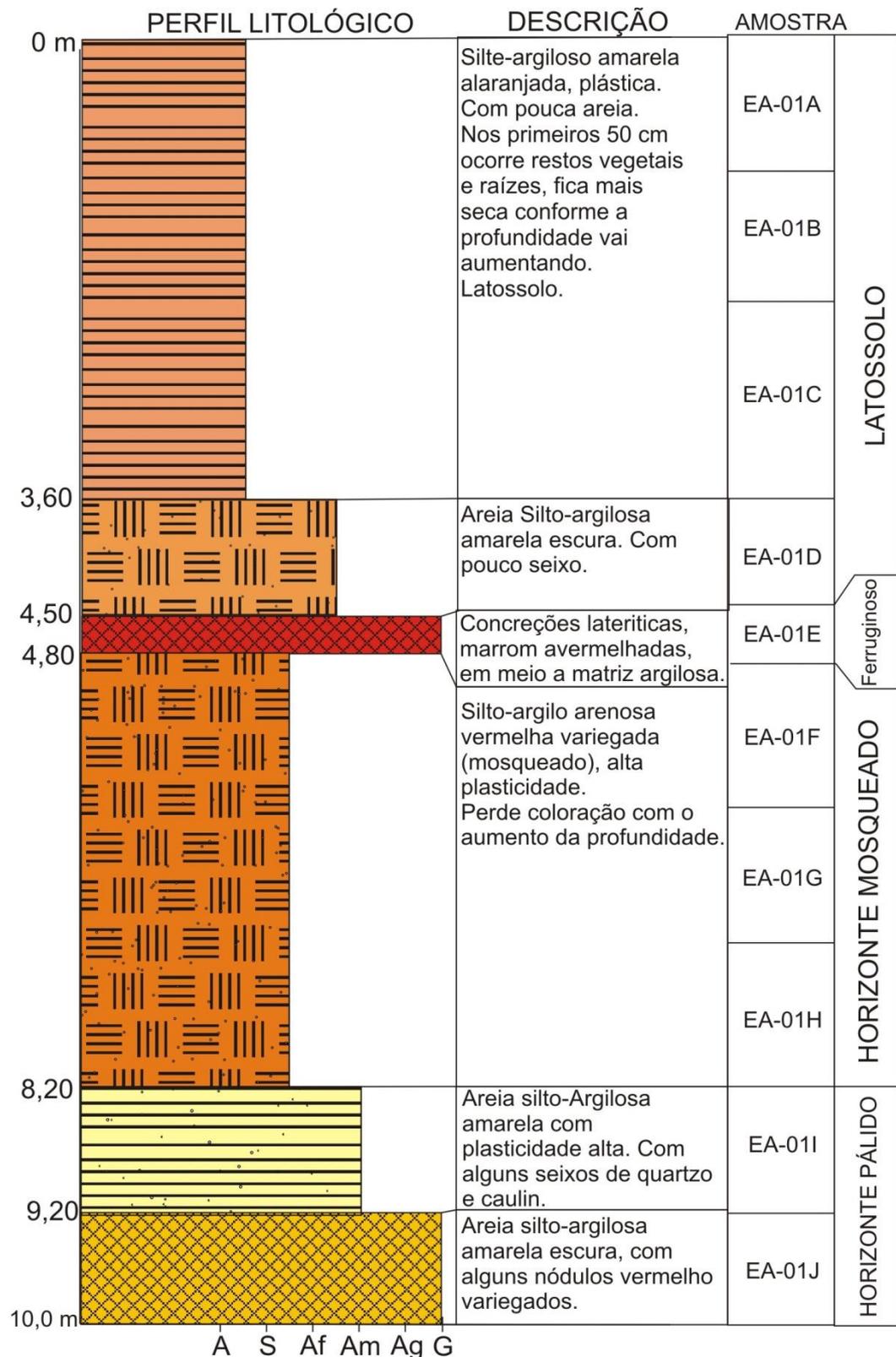
Gerou-se, para cada furo, um perfil litológico de sondagem (Figura 50 e 51). Através dos perfis foi possível observar as mudanças de camadas, sua descrição, identificação e as profundidades de coletas de cada material, que servirão para embasar as análises posteriores.

Analisando os dois perfis, observaram-se certas semelhanças nos primeiros metros. Ambos são compostos pelo solo de cobertura (Latossolo) e horizonte ferruginoso composto por camada laterítica, com concreções e nódulos em meio a matriz argilosa. Nas duas sondagens, o Latossolo se assemelha e, possivelmente, formou-se *in situ*, pela alteração ou desferruginação do horizonte laterítico.

No primeiro furo (ST1) após a camada laterítica inicia-se gradativamente o horizonte mosqueado iniciando em 5,8 metros, chegando até a profundidade de 8,20 metros. De 8,20 a 10 metros de profundidade, observa-se o horizonte pálido com a camada argilosa caulinítica até 9,20 metros de profundidade. Abaixo disso voltam a aparecer algumas concreções e nódulos lateríticos, dispersos em meio a uma matriz amarela escura (Figura 50). Essa descrição pode ser comparada ao perfil imaturo alóctone descrito por Fernandes Filho *et al.* (1997).

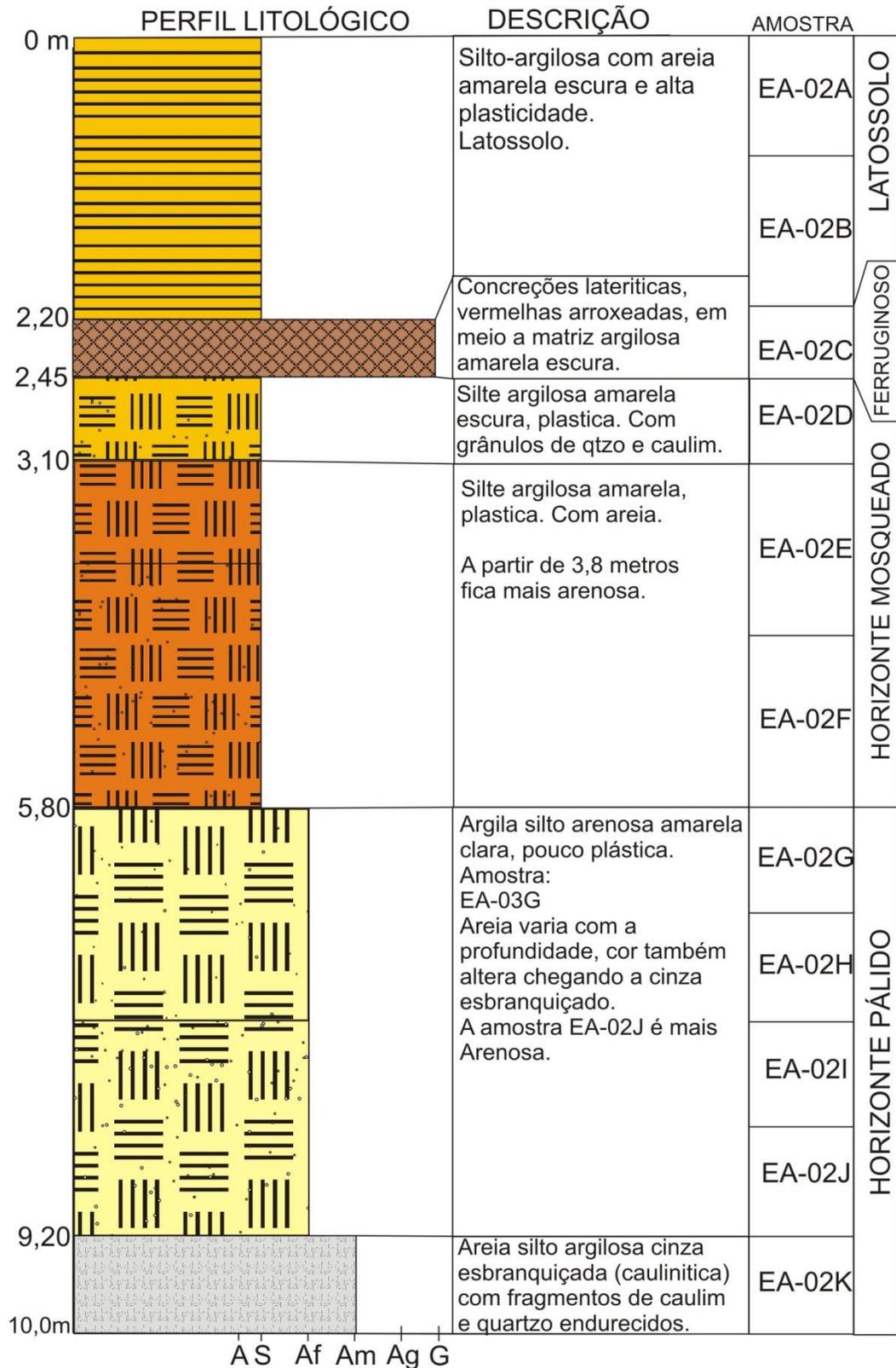
Já para o segundo furo de sondagem, pode-se compará-lo ao perfil laterítico imaturo autóctone (de Costa-1991). Passa-se pelo latossolo ou cobertura com 2,2 metros de espessura, logo após pelo horizonte ferruginoso (laterítico) e depois, horizonte argiloso mosqueado que vai clareando com a profundidade, tornando-se caulinítico e arenoso. Atinge-se o horizonte pálido ou transicional a 5,80 metros de profundidade, na sondagem. O perfil vai ficando mais arenoso com a profundidade e, ao chegar ao último metro, a quantidade de areia torna-se mais abundante que a

argila e o silte. Também se observam pequenos clastos de caulim, com quartzo endurecidos (Figura 51).



**Legenda: A= Argila; S= Silte; Af= Areia fina; Am= Areia média; Ag= Areia grossa; G=Grânulos.**

Figura 50 – Perfil litológico, táctil-visual, com descrição do material e profundidades de coletas, do furo de sondagem **ST1**, na 1ª área de estudo.



**Legenda: A= Argila; S= Silte; Af= Areia fina; Am= Areia média; Ag= Areia grossa; G=Grânulos**

Figura 51 – Perfil litológico, com descrição táctil-visual, profundidades de coletas, do furo de sondagem **ST2**, na 2ª área de estudo.

#### **4.4 Análises físicas – descrição dos resultados de laboratório**

As análises físicas são importantes para se determinar a susceptibilidade do material estudado quanto à erodibilidade: se ele é friável, poroso, plástico, compressível, qual a dimensão de suas partículas, se estas estão bem arranjadas, se são de tamanhos regulares ou variáveis. Essas propriedades ajudam a definir se as camadas estão mais ou menos sujeitas à ação erosiva da água, e se essa água irá infiltrar ou escoar no terreno.

##### **4.4.1 Granulometria**

Foram analisadas as curvas de acumulação granulométrica conjunta e, posteriormente, realizada a classificação nos diagramas triangulares de Folk (1954), usando as porcentagens acumuladas em cada faixa granulométrica: argila, silte, areia e grânulos. Esses resultados de curvas acumulativas e diagramas foram obtidos com a junção dos dados a laser e peneiramento, no programa Gradstat versão 8.0.

Posteriormente foram calculados os graus de uniformidade (U) e os coeficientes de curvatura (CC), conforme metodologia e os resultados inseridos nas tabelas 5 e 6, respectivamente uma para cada furo de sondagem.

Na tabela 5, contendo amostras da sondagem ST1, observa-se que todas as amostras são bem graduadas com o resultado do coeficiente de curvatura entre 1 e 3, demonstrando que há uma distribuição proporcional dos tamanhos das partículas, indicando um empacotamento no qual os espaços entre as partículas maiores são ocupados pelas menores.

Ainda na tabela 5, as amostras EA-01 C e D do horizonte de cobertura, latossolo, e as amostras F, G e H que representam o horizonte argiloso mosqueado têm um grau de uniformidade (U) médio, indicando uma curva granulométrica mais ortogonal e, conseqüentemente, uma uniformidade maior que no restante do perfil, cujo grau de uniformidade (U) é superior a 15, sugerindo falta de uniformidade, também indicando, segundo Fácio (1991), uma baixa erodibilidade. Este resultado não era esperado devido às feições erosivas evidenciadas e descritas em campo, pelo mapeamento de risco geológico.

Tabela 5 – Grau de uniformidade e coeficiente de curvatura, para amostras da sondagem ST1.

Amostras	Profundidade	D10 (%)	D60 (%)	D30 (%)	U	CC
EA-01 A	0 a 1	3,718	56,12	17,378	15,094	1,447
EA-01 B	1 a 2	3,951	62,35	22,908	15,781	2,130
EA-01 C	2 a 3,6	5,951	81,76	30,086	13,739	1,860
EA-01 D	3,6 a 4,5	7,897	118,02	39,72	14,945	1,693
EA-01 E	4,5 a 4,8	7,97	205,87	53,17	25,831	1,723
EA-01 F	4,8 a 6	6,265	79,432	31,96	12,679	2,053
EA-01 G	6 a 7	7,269	81,68	34,1	11,237	1,958
EA-01 H	7 a 8	6,067	76,11	29,76	12,545	1,918
EA-01 I	8 a 9,2	5,132	104,48	39,18	20,359	2,863
EA-01 J	9,2 a 10	7,905	140,89	49,97	17,823	2,242

Na tabela 6, que contém resultados das amostras coletadas no perfil de sondagem ST2, observa-se que essas são todas desuniformes (U) superiores a 15, indicando uma curva com baixo ângulo no gráfico semi-logarítmico. Então, quanto maior o valor do grau de uniformidade (U), maior será a distribuição granulométrica do material, assim aumentando a possibilidade de existir um hiato granulométrico na amostra. Destaque para a amostra EA-02 K, muito desuniforme (U=135,5), segundo Fácio (1991) solos com grau de uniformidade maior que 15, baixa erodibilidade.

As amostras EA-02 A, B, C, D, E e G, do segundo furo de sondagem demonstram um coeficiente de curvatura (CC) entre 1 e 3, fornecendo a informação de que esses materiais são bem graduados, o que sugere uma distribuição proporcional no tamanho das partículas (Tabela 6), sendo menos erodíveis.

As amostras, a partir de 6,5 metros de profundidade, EA-02 H, I, J e K representantes do horizonte pálido, têm um coeficiente de curvatura (CC) abaixo de 1, mostrando assim que são mal graduados, isto é, apresentam irregularidade na distribuição do tamanho das partículas, o que pode indicar uma maior porosidade e permeabilidade do material e, portanto, mais susceptibilidade à erosão (Tabela 6).

Tabela 6 – Grau de uniformidade e coeficiente de curvatura, para amostras da sondagem ST2.

Amostras	Profundidade	D10	D60	D30	U	CC
EA-02 A	0 a 1	3,758	60,255	20,35	16,034	1,829
EA-02 B	1 a 2,2	3,331	60,057	20,27	18,030	2,054
EA-02 C	2,2 a 2,45	3,731	138,038	26,302	36,998	1,343
EA-02 D	2,6 a 3,1	2,785	61,73	20,78	22,165	2,512
EA-02 E	3,1 a 3,8	2,194	64,21	19,952	29,266	2,826
EA-02 F	3,8 a 5,8	3,512	81,76	29,92	23,280	3,118
EA-02 G	5,8 a 6,5	2,288	103,62	23,18	45,288	2,266
EA-02 H	6,5 a 7	2,283	119,37	13,185	52,286	0,638
EA-02 I	7 a 8	1,586	32,35	3,68	20,397	0,264
EA-02 J	8 a 9	1,754	79,56	4,367	45,359	0,137
EA-02 K	9 a 10	2,061	279,26	10,09	135,497	0,177

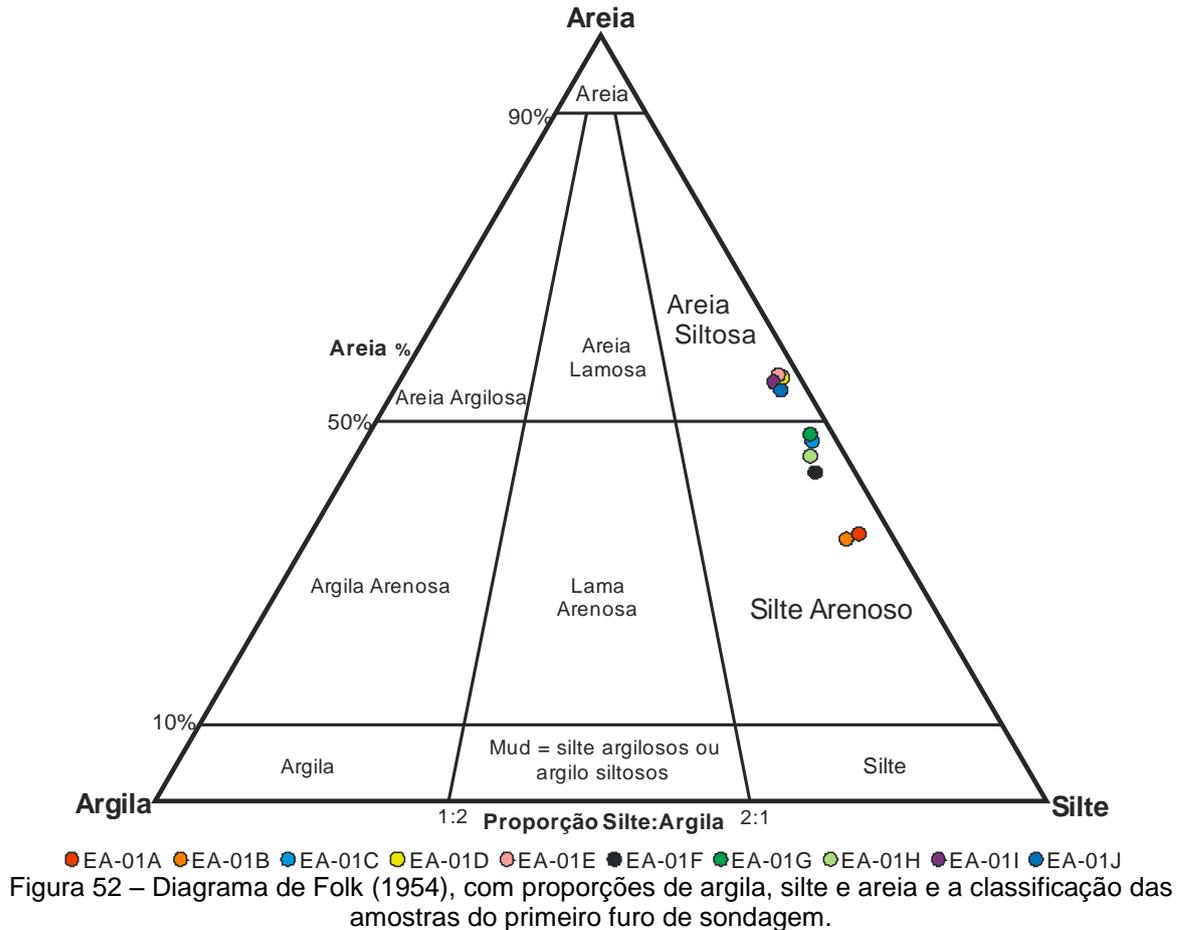
Os resultados com as curvas granulométricas acumuladas são encontradas no ANEXO A.

As amostras coletadas pelas sondagens foram classificadas de acordo com suas porcentagens de argila, silte, areia e grânulos (cascalho) e dispostos em diagramas de Folk (1954).

Analisando as amostras do primeiro furo de sondagem no diagrama triangular que avalia as porcentagens de areia, silte e argila, observa-se que as amostras desse local se distribuem em três agrupamentos, dois desses se concentrando no campo do silte arenoso, e o terceiro no campo da areia siltosa, sempre com baixa porcentagem de argila (Figura 52).

As amostras EA-01 A, B e C do latossolo são classificadas como silte arenosas. O horizonte mosqueado, representado pelas amostras EA-01 F, G e H também as tem classificadas como silte arenosas, ainda que com porcentagem maior de areia que as amostras A e B (Figura 52).

As camadas EA-01 D, E, I e J são classificadas como Areia siltosa (Figura 52). A amostra EA-01 D ainda pode ser classificada como areia lamosa com vestígios de cascalho segundo a Figura 53, que compara as porcentagens de areia, finos e grânulos. Isto se deve a proximidade dessas com o horizonte laterítico representado pela amostra EA-01 E.



A camada lateritizada (horizonte ferruginoso) e a camada com nódulos e concreções lateríticas, representadas pelas amostras EA-01 E e J respectivamente, são melhores classificadas no diagrama triangular da Figura 53 que compara as porcentagens de grânulos (cascalho), areia e finos (silte+argila), justamente por essas conterem porcentagens significativas de cascalho (grânulos), as quais foram classificadas como Areia lamo cascalhenta (Figura 53).

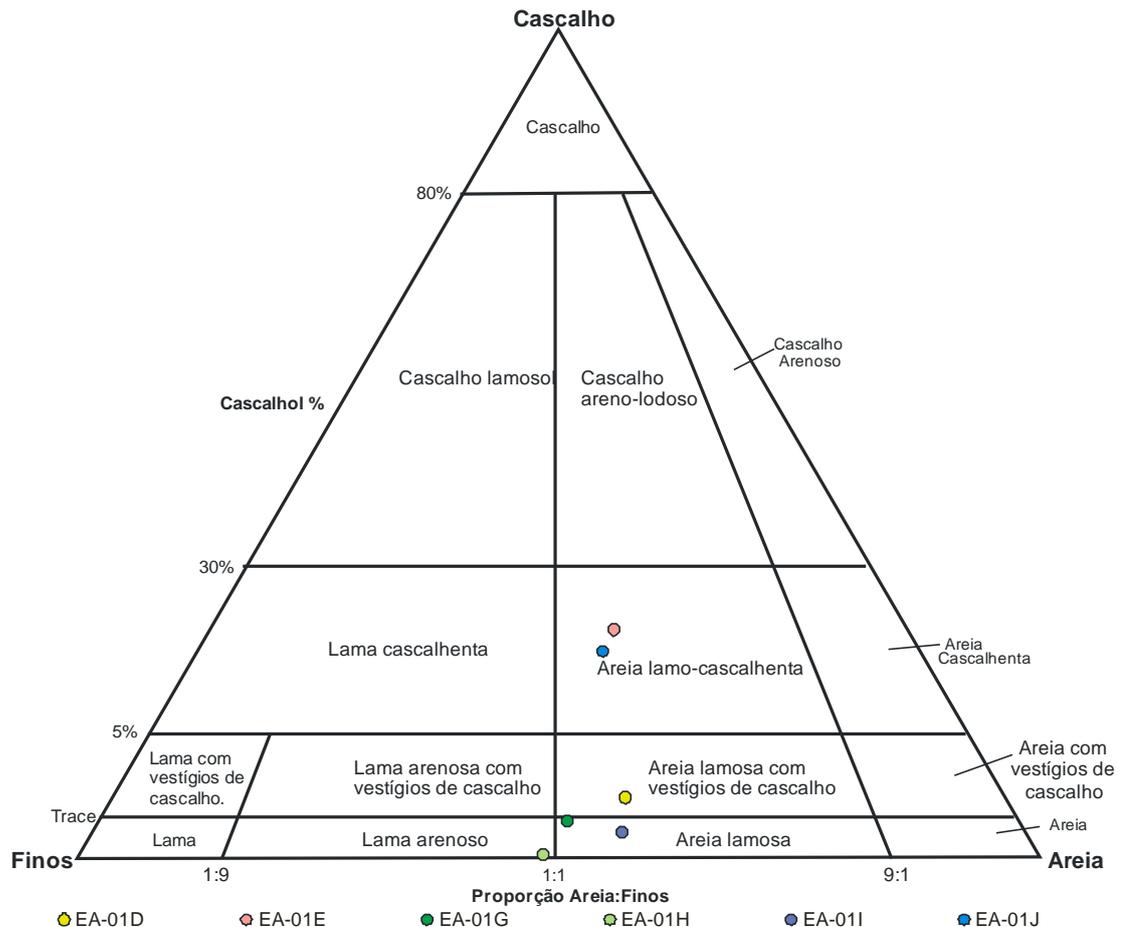


Figura 53 – Diagrama de Folk (1954), com proporções de finos (argila + silte), areia e cascalho (grânulos) e a classificação das amostras, com quantidade significativa de grânulos, do primeiro furo de sondagem.

As amostras do segundo perfil de sondagem (ST2), executado no Conjunto Cidadão I, foram classificadas no diagrama triangular de Folk (1954), que avalia as distribuições das porcentagens de areia, silte e argila (Figura 54), exceto a amostra EA-02 C, do horizonte ferruginoso, por conter porcentagem significativa de grânulos.

Observa-se que as amostras coletadas nesta sondagem são classificadas como Silte Arenosa excetuando-se a amostra EA-02 K que está no campo da Areia Siltosa (Figura 54). Cruzando uma reta pelos pontos das amostras EA-02 I, J e K observa-se que há um aumento gradual na porcentagem de areia das amostras conforme aumenta a profundidade (Figura 54), corroborando com o que foi descrito em campo durante o perfil de sondagem executado (Figura 51).

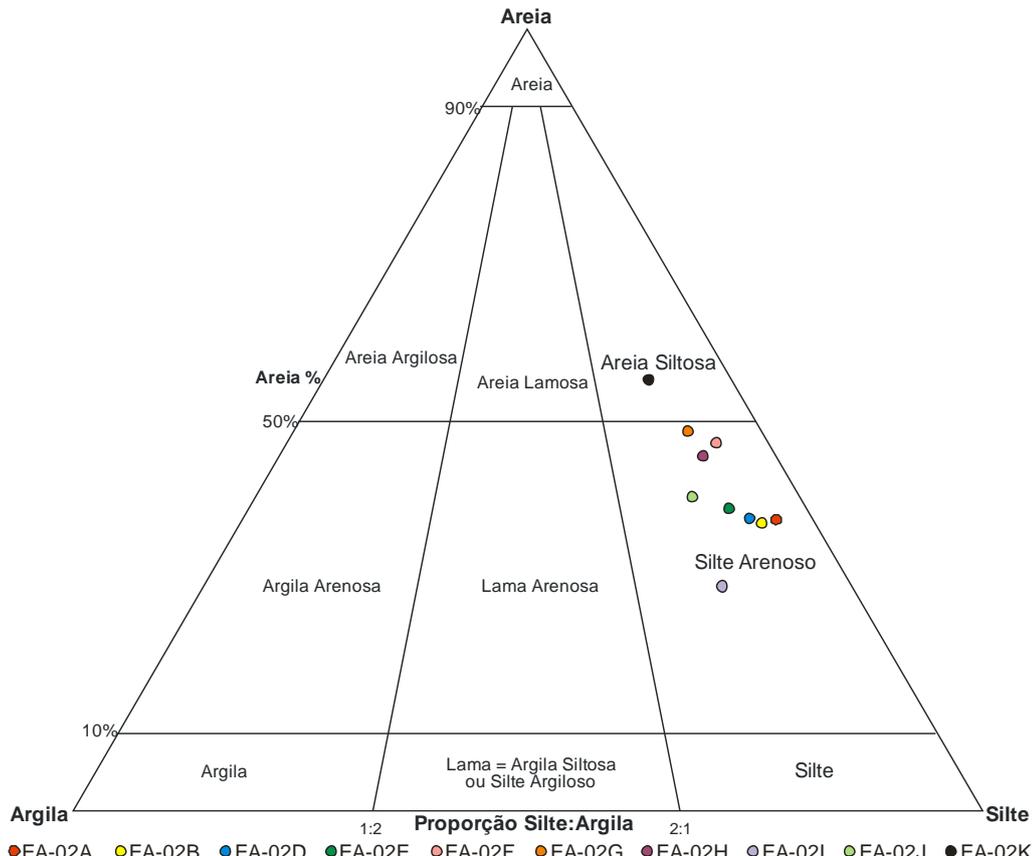


Figura 54 – Diagrama de Folk (1954), com proporções de argila, silte e areia com a classificação das amostras, do segundo furo de sondagem.

Já a amostra EA-02 C é classificada no diagrama como Lama Cascalhenta, no diagrama triangular de Folk (1954) (Figura 55). As amostras EA-02 D e K também podem ser classificadas no diagrama com porcentagem de cascalho, possuindo aproximadamente 1%, sendo classificadas com vestígios cascalho, como lama arenosa e areia lamosa respectivamente (Figura 55).

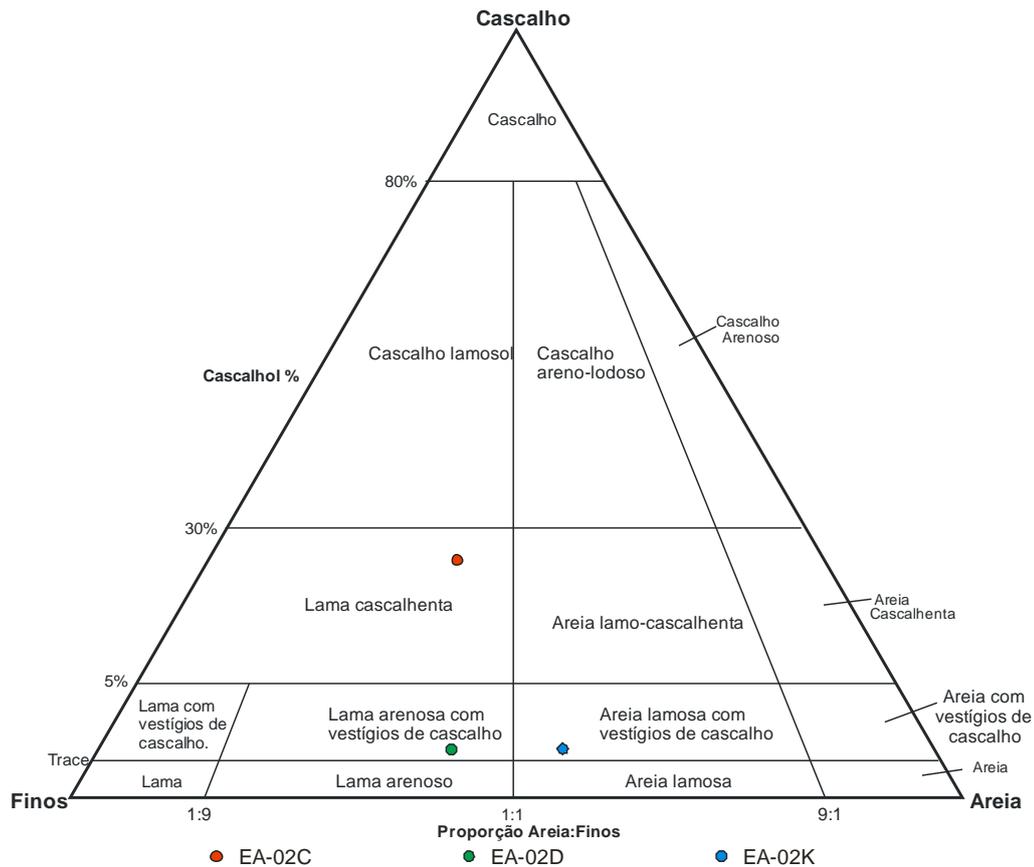


Figura 55 – Diagrama de Folk (1954), com a classificação e as quantidades de cascalho, areia e finos das amostras do segundo furo de sondagem, que contém quantidade significativa de cascalho.

#### 4.4.2 Limites de Consistência

Em todas as amostras coletadas foram realizadas as análises de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP), conforme metodologia descrita anteriormente. O índice de plasticidade é calculado subtraindo-se os valores de LL e LP, ou seja;  $IP = LL - LP$ .

Podem-se visualizar os relatórios completos das análises, no Anexo B.

As tabelas 7 e 8 mostram, em resumo, os resultados obtidos nas análises dos limites de consistência.

Na tabela 7, que contém os resultados para as amostras coletadas no primeiro furo de sondagem (ST1), observa-se pouca variabilidade entre as amostras coletadas até a profundidade de 9,2 metros, com o LL entre 78% a 93,5%, e com o LP entre 44,35% a 48,68%. A amostra EA-01J coletada em profundidade abaixo dos 9,2 metros, tem LL de 71,5% e LP de 26,7%, diferenciando-se das anteriores. Para a amostra EA-01J, fazem-se necessários 20% menos umidade que as outras amostras para torná-la plástica, e 6,5% menos umidade que as demais, para liquefazê-la. Também denuncia que essa tem menor capacidade de absorver água,

assim como menor resistência ao cisalhamento, sendo então a camada mais suscetível aos processos de erosão superficial pela água (Tabela 7).

Apesar do IP demonstrar certa variabilidade entre as amostras, esses valores são sempre superiores a 15%, demonstrando que todas as amostras têm plasticidade alta (CAPUTO, 1998) e, portanto, alta compressibilidade (Tabela 7). Segundo estudos de Fácio (1991), solos com IP maior que 15 acusam uma boa resistência à erosão, portanto, baixa erodibilidade, o que também contraria o cenário visto em campo, onde foram identificadas voçorocas ao longo do mapeamento de risco.

Tabela 7 – Resultados das análises dos limites de consistência, para as amostras coletadas na sondagem a trado ST1, realizada na primeira área de estudo - onde LL é o Limite de Liquidez; LP é o Limite de Plasticidade, e IP é o Índice de Plasticidade.

AMOSTRAS		Profundidade	LL	LP	IP
EA-01	A	0 a 1	87.00%	44.35%	42.65%
EA-01	B	1 a 2	93.50%	48.68%	44.82%
EA-01	C	2 a 3,6	80.00%	48.35%	31.65%
EA-01	D	3,6 a 4,5	86.50%	48.34%	38.16%
EA-01	E	4,5 a 4,8	91.20%	47.60%	43.60%
EA-01	F	4,8 a 6	91.50%	47.34%	44.16%
EA-01	G	6 a 7	89.20%	47.49%	41.71%
EA-01	H	7 a 8	86.00%	47.66%	38.34%
EA-01	I	8,0 a 9,2	78.00%	47.66%	30.34%
EA-01	J	9.2 a 10	71.50%	26.70%	44.80%

Na Tabela 8 observa-se uma redução gradual de todos os parâmetros com a profundidade a partir da amostra EA-02D, logo abaixo do horizonte ferruginoso, camada laterítica.

Como anteriormente visto, essa redução dos limites sugere um menor poder de compressibilidade, menor capacidade de absorção de água e menor resistência ao cisalhamento; com a diminuição da absorção de água, o fluxo superficial aumenta, inclusive, o poder erosivo da água.

Nas camadas a partir de 6,5 metros de profundidade, referente aos horizontes argiloso pálido ou transicional, representados pelas amostras EA-02 H, I, J e K (Tabela 8), o índice de plasticidade fica entre 6 e 15, indicando uma redução na resistência à erosão para média, segundo estudos de Fácio (1991). Esses dados corroboram o que foi verificado em campo, no mapeamento de risco, no qual as feições erosivas são descritas nas camadas inferiores e também com os dados

granulométricos, que indicam redução no coeficiente de curvatura e aumento na quantidade de areia com a profundidade.

Tabela 8 – Limites de consistência para as amostras coletadas na sondagem a trado ST2, realizado na segunda área de estudo - onde LL é o Limite de Liquidez; LP é o Limite de Liquidez; e IP é o Índice de Plasticidade.

AMOSTRAS		Profundidade	LL	LP	IP
EA-02	A	0 a 1	65.25%	35.83%	29.42%
EA-02	B	1 a 2	79.60%	39.27%	40.33%
EA-02	C	2,2 a 2,45	69.00%	37.54%	31.46%
EA-02	D	2,6 a 3,1	74.85%	36.59%	38.26%
EA-02	E	3.1 a 3.8	60.00%	32.53%	27.47%
EA-02	F	3,8 a 5.8	51.80%	32.65%	19.15%
EA-02	G	5,8 a 6,5	45.10%	28.51%	16.59%
EA-02	H	6,5 a 7	35.75%	24.23%	11.52%
EA-02	I	7 a 8	34.00%	23.61%	10.39%
EA-02	J	8 a 9	31.50%	20.36%	11.14%
EA-02	K	9 a 10	25.50%	16.91%	8.59%

A carta de plasticidade cruza os valores dos limites de liquidez (LL) com os índices de plasticidade (IP). Essas cartas estão separadas por furo de sondagem e os pontos plotados são os dados analisados. Estes gráficos (Figuras 56 e 57) classificam as amostras em alto ou baixo poder de ser comprimido (compressibilidade) e, quanto à textura argilosa ou silto-argilosa.

Observando o gráfico da Figura 56, que apresenta a carta de plasticidade com as amostras perfil de sondagem ST1, percebemos um isolamento do ponto referente a amostra EA-01J, sendo o único a ficar acima da linha A, o que determina uma textura argilosa, o restante dos pontos se aglomeram abaixo da linha A no campo MH, indicando textura silto-argilosa, todas com alta compressibilidade (H).

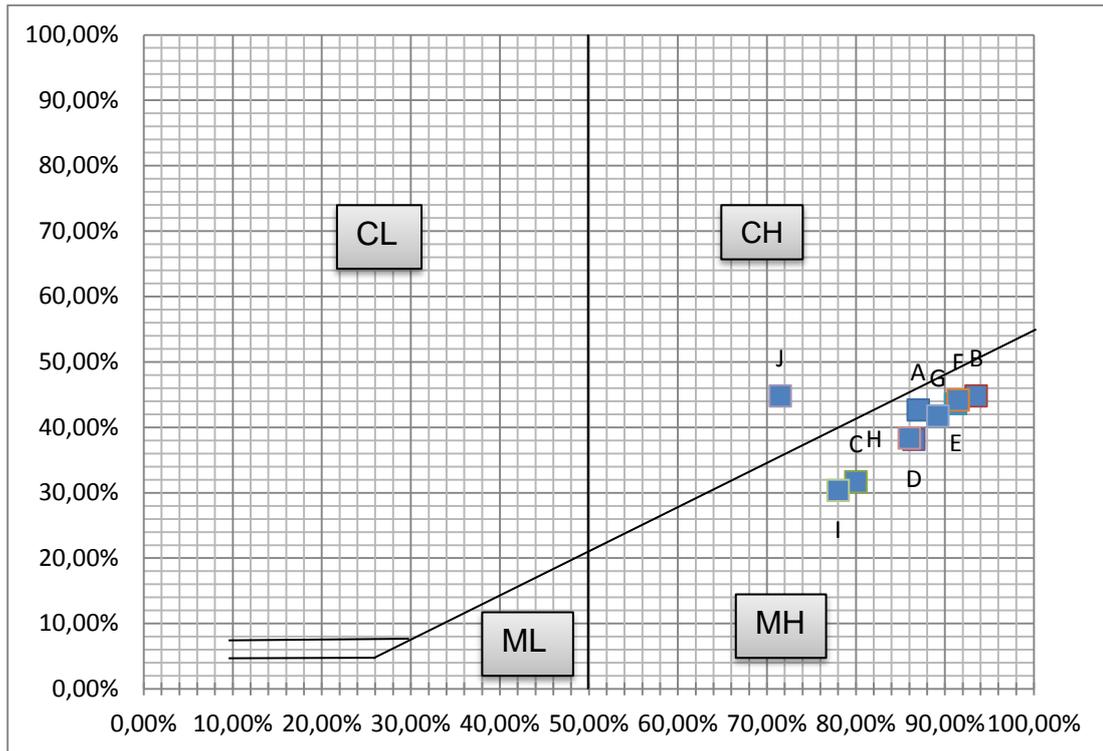


Figura 56 – Gráfico mostrando distribuição das amostras do primeiro furo de sondagem (ST1), na carta de plasticidade de Casagrande, 1948. Na abcissa temos os valores de Limite de Liquidez e na ordenada os valores de Índice de Plasticidade (IP), dados retirados da Tabela 7.

O gráfico da Figura 57 representa muito bem os resultados da tabela 8, demonstrando a redução gradual dos parâmetros com o aumento da profundidade das amostras retiradas do perfil de sondagem ST2.

Retirando as 3 primeiras amostras, EA-02 A, B e C do gráfico, fica fácil a visualização desse padrão decrescente dos parâmetros das amostras EA-02 D até a EA-02 K. Interessante e pertinente também observar que os pontos seguem a linha A, demonstrando uma textura composicional parecida, em todo perfil, porém com redução da compressibilidade, da plasticidade, da absorção de água e da resistência ao cisalhamento. Sugere, por conseguinte, que as camadas superiores são mais resistentes à erosão, isto é, têm menor erodibilidade (Figura 57).

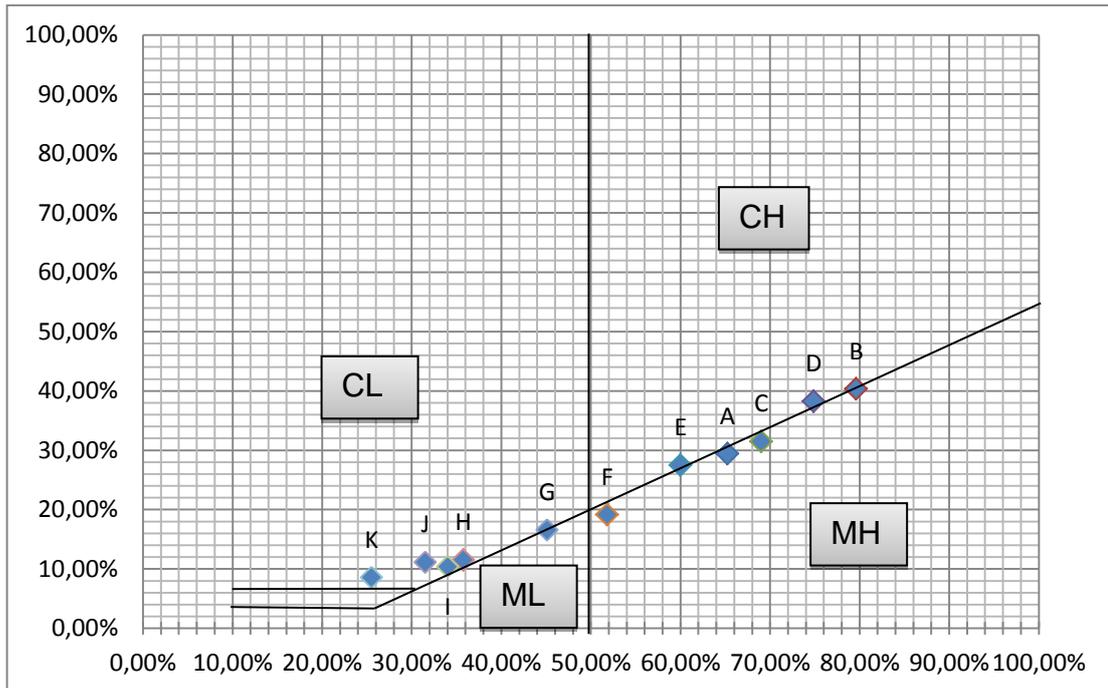


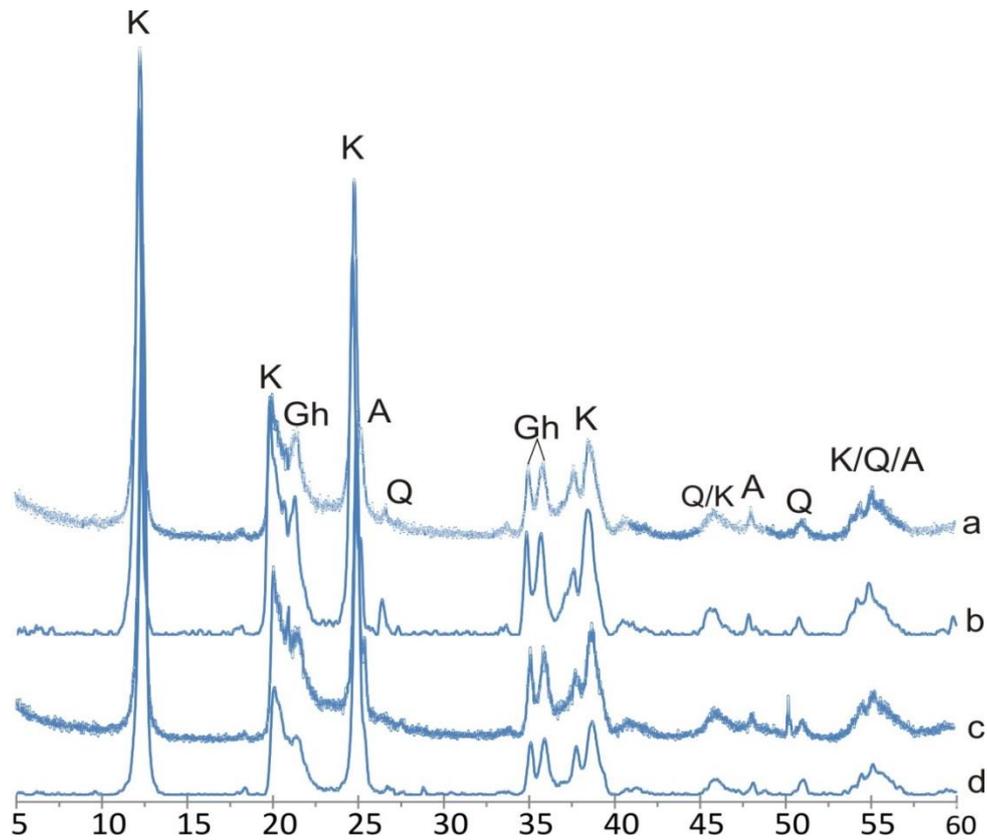
Figura 57 – Gráfico mostrando distribuição das amostras (EA-02), do primeiro furo de sondagem (ST2), na carta de plasticidade de Casagrande, 1948. Na abcissa temos os valores de Limite de Liquidez e na ordenada os valores de Índice de Plasticidade (IP), dados retirados da Tabela 8.

#### 4.5 Análise mineralógica – descrição dos resultados – DRX

Vários autores (COSTA, 1991; HORBE E COSTA, 1994; FERNANDES FILHO, 1997; HORBE et. al., 2001) empreenderam estudos sobre perfis lateríticos na região Amazônica. Muitos usaram o método de difração de raios-X para identificação mineralógica. Os difratogramas estão agrupados por horizontes, conforme descrito na sondagem, para uma melhor identificação das fases minerais e das modificações, dentro e entre os horizontes.

Analisando os difratogramas da Figura 58, que representa a camada de latossolo, do ST1 (EA-01 A, B, C e D), verifica-se que o solo é formado predominantemente por caulinita, além de quartzo, goethita e anatásio. A coloração amarelada característica do latossolo é consequência da presença de goethita.

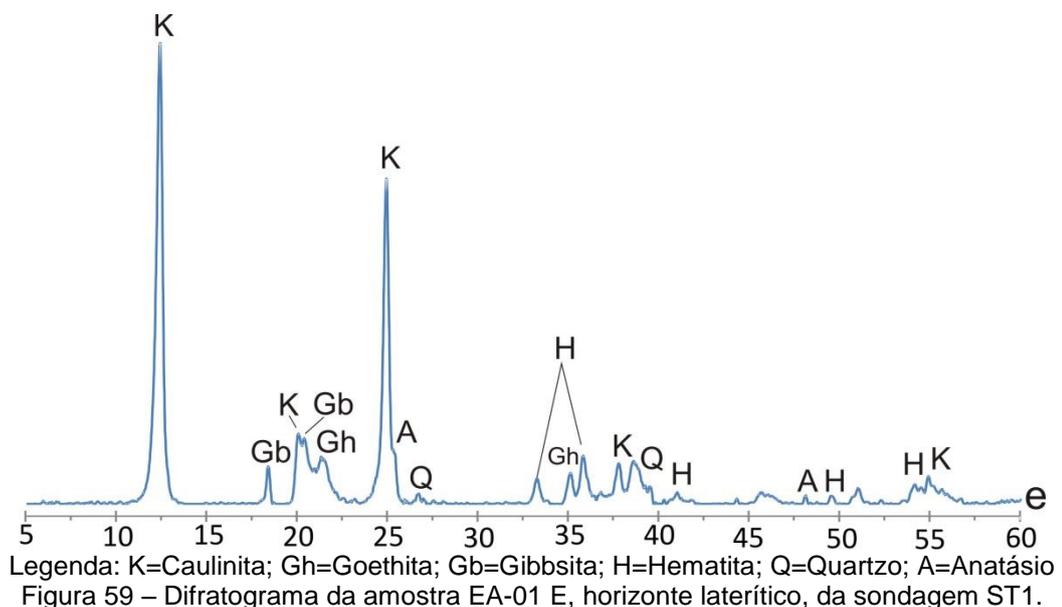
Segundo Horbe *et. al.* (2001) este latossolo origina-se pela alteração da crosta laterítica *in situ*, por possuir composição mineralógica semelhante. Provavelmente ocorre devido a um intenso processo de desferruginação, associado a um clima úmido e percolação de soluções fluídas, fragilizando a crosta laterítica. À medida que a crosta é alterada pelo processo, a hematita e a gibbsita, presentes na camada laterítica, em sua maior parte são dissolvidas, gerando resíduos na matriz silto-argilosa caulinítica, do latossolo.



Legenda: K=Caulinita; Gh=Goethita; Q=Quartzo; A=Anatásio.

Figura 58 – Difratogramas da camada de latossolo encontradas no perfil ST1, amostras EA-01 a, b, c e d, profundidade de 0 a 4,5 metros

No difratograma do horizonte laterítico (Figura 59), além dos minerais presentes na camada de latossolo, identificam-se a hematita e a gibbsita, aumentando a concentração de ferro e alumínio da amostra em relação à camada superior.



Legenda: K=Caulinita; Gh=Goethita; Gb=Gibbsita; H=Hematita; Q=Quartzo; A=Anatásio  
Figura 59 – Difratograma da amostra EA-01 E, horizonte laterítico, da sondagem ST1.

A Figura 60 mostra os difratogramas representando o horizonte mosqueado. Nesta camada, identificaram-se os seguintes minerais: caulinita, quartzo, goethita e anatásio, aparentemente similares ao latossolo; porém, o pico 26,8 ( $2\theta$ ) representativo do quartzo apresenta-se com mais intensidade, devido a um maior teor ou a uma melhor cristalização desse mineral.

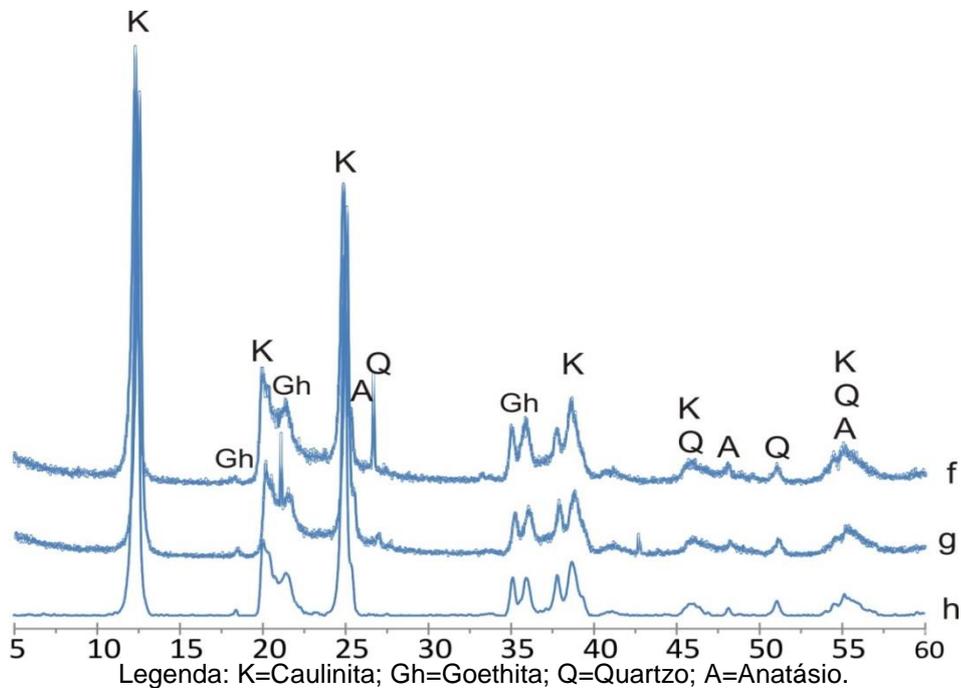
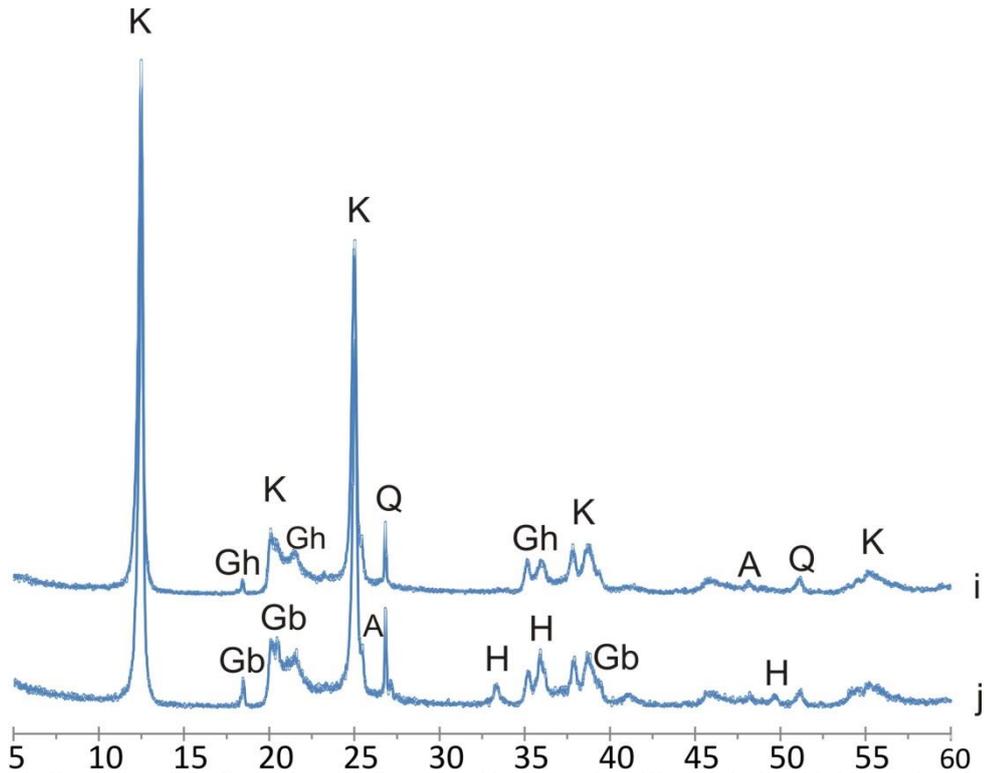


Figura 60 – Difratogramas (f, g, h) do horizonte mosqueado, perfil ST1.

Nos difratogramas representantes do horizonte argiloso pálido do ST1 (Figura 61), nota-se uma diferença entre as camadas EA-01 I e J.

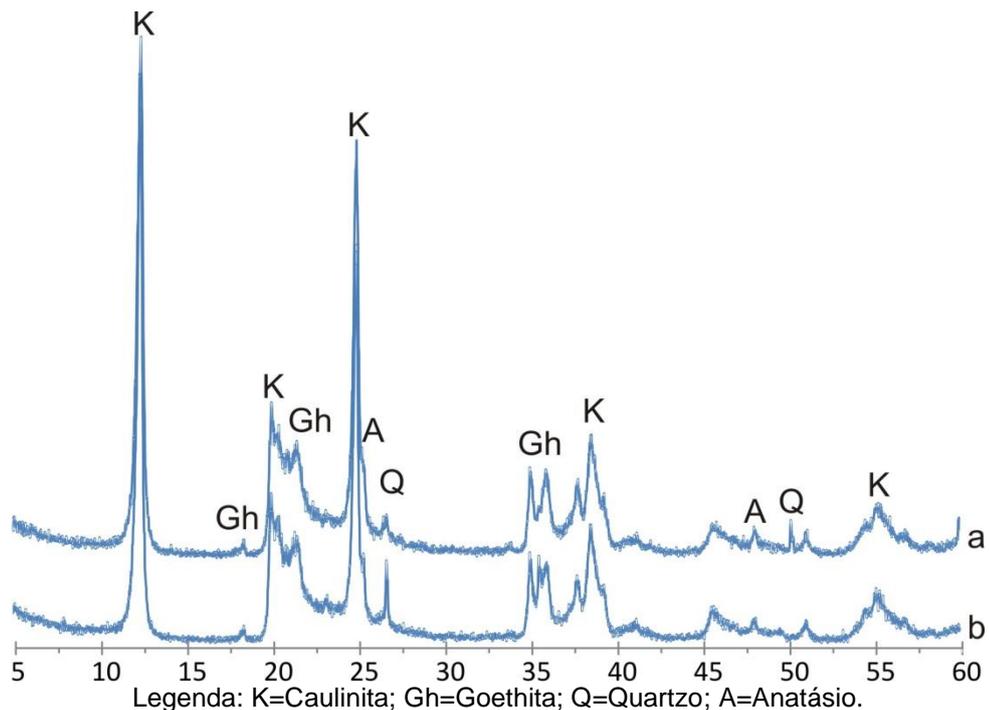
Na camada I são identificados os mesmos minerais das camadas anteriores, horizonte mosqueado (Figura 60), porém, com textura e cor diferenciadas, conforme descritas no perfil de sondagem (Figura 50).

Para a amostra EA-01 J, que foi coletada a partir da profundidade de 9,2 metros, são identificados os minerais de gibbsita e hematita, em cuja ocorrem as concreções e nódulos vermelhos arroxeados, descritos em campo durante a execução do perfil de sondagem (Figura 50).



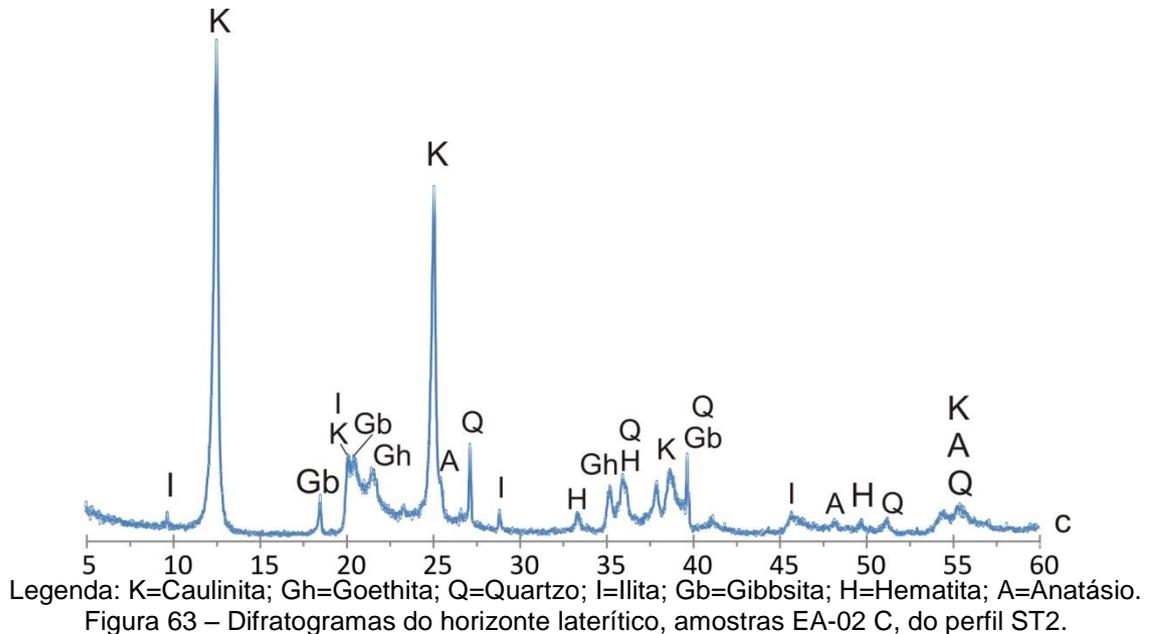
Legenda: K=Caulinita; Gh=Goethita; Q=Quartzo; H=Hematita; Gb=Gibbsita; A=Anatásio  
 Figura 61 – Difratomogramas do horizonte pálido, amostras EA-01 I e J, da sondagem ST1.

Analisando os difratogramas da camada de cobertura ou latossolo do perfil ST2 (Figura 62), foram identificados caulinita, além de quartzo, goethita e anatásio. Assim como no perfil ST1 esta camada provavelmente foi formada da alteração *in situ* da crosta laterítica subjacente, através da desferruginação, conforme descrito por Horbe *et. al.* (2001).



Legenda: K=Caulinita; Gh=Goethita; Q=Quartzo; A=Anatásio.  
 Figura 62 – Difratomogramas do latossolo, amostras EA-02 a e b, do perfil ST2.

No difratograma do horizonte ferruginoso foram identificados os minerais de illita, caulinita, gibbsita, goethita, anatásio, hematita e quartzo (Figura 63). Esta foi a amostra com maior número de minerais identificados; muitos minerais têm refrações muito próximas ou sobrepostas, por isso, em alguns picos nos difratogramas, aparecem com mais de uma identificação mineral.



Na Figura 64, eis os difratogramas representativos do horizonte argiloso mosqueado. Neste horizonte, foram identificados os seguintes minerais: caulinita, quartzo, goethita, anatásio e gibbsita; todavia, não se reconheceram todos os minerais no mesmo difratograma.

Na amostra EA-02 D, mais próxima ao horizonte laterítico, há gibbsita, enquanto nas outras amostras esse mineral não é identificado, e fica mais fácil a identificação da goethita, por apresentar maior intensidade em suas refrações, o que sugere melhor cristalização desse mineral, nessa camada. Nos difratogramas das amostras EA-02 E e F, fica mais fácil a identificação do quartzo, devido à melhor cristalização desse mineral, o que gera refrações mais intensas para este mineral, identificando proximidade com a rocha-mãe (Figura 64).

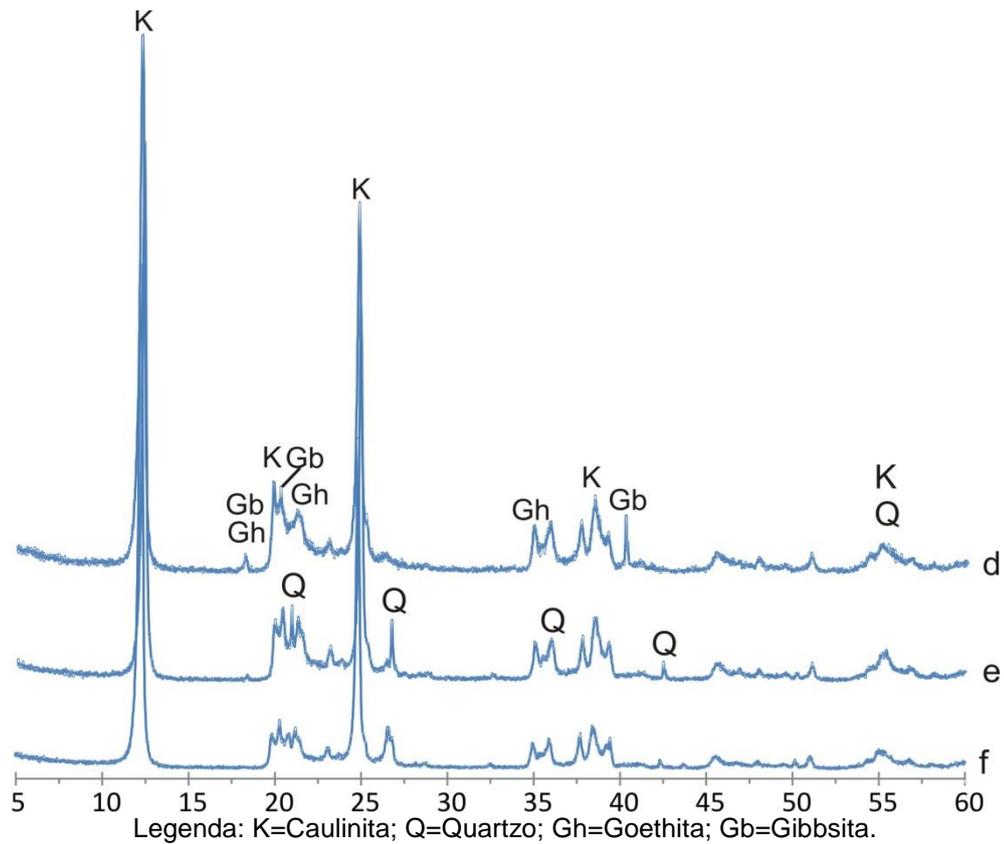


Figura 64 – Difratoformas do horizonte mosqueado, amostra D, E e F, do perfil ST2.

Nos difratogramas do horizonte pálido, do perfil ST2, foram identificados os minerais de caulinita, quartzo e goethita, em todas as camadas, porém, com diferenças nas intensidades dos picos. O aumento dessas intensidades indica melhor cristalização do mineral e, dependendo do mineral, pode indicar proximidade com a rocha-mãe. As refrações de identificação do mineral de quartzo são bem evidenciadas, consoante o aumento da profundidade (Figura 65). Esse aumento na cristalinidade do quartzo já foi apontado, pela descrição em campo do perfil de sondagem e pelas análises, com a granulometria e o índice de plasticidade.

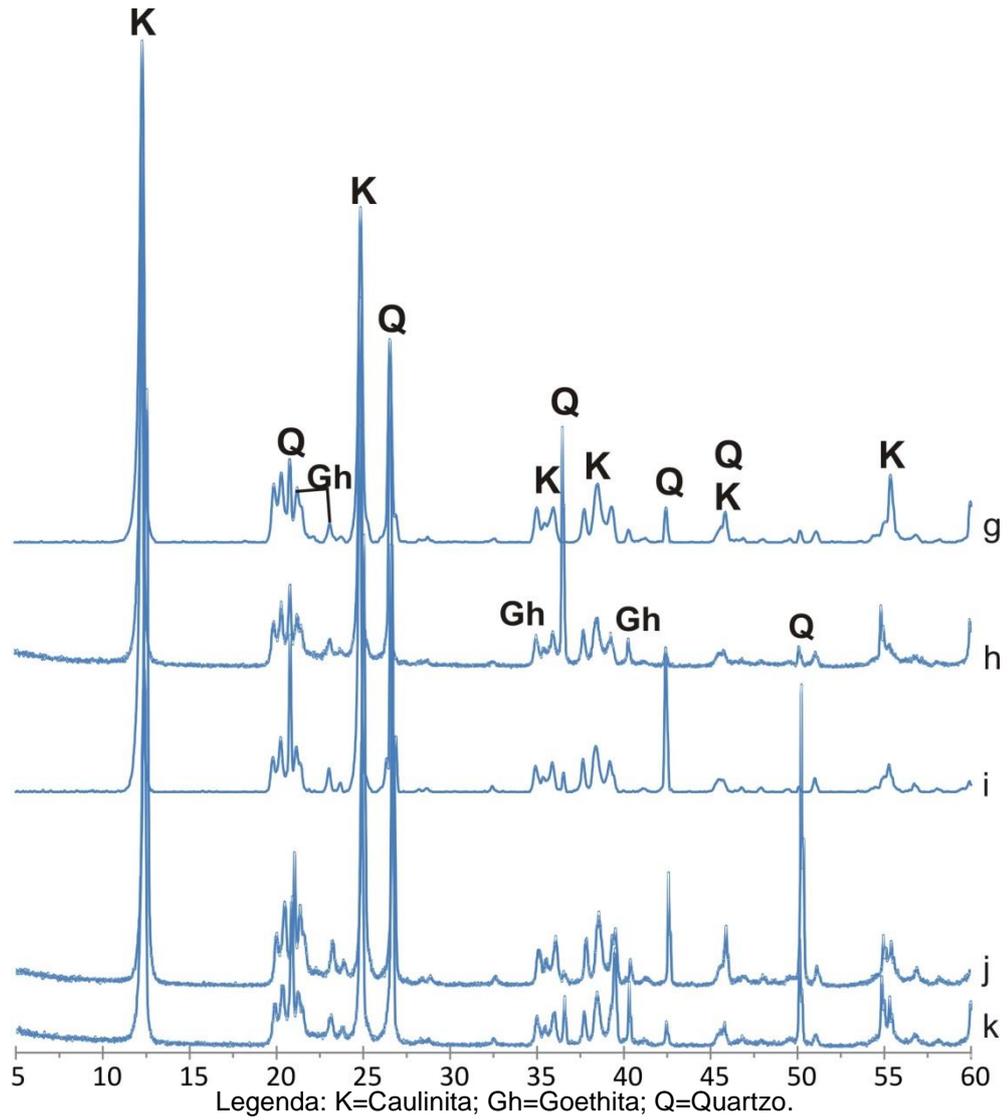


Figura 65 – Difractogramas do horizonte pálido, coletado no perfil de sondagem ST2.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Primeira Área

Ao analisar-se, conjuntamente, os dados do IP, distribuição granulométrica e mineralogia das amostras do perfil ST1 (Figura 66) observa-se, na camada de latossolo, uma maior concentração de finos relacionados à identificação dos argilominerais e apresentando alta plasticidade. O índice de plasticidade para o horizonte laterítico é desconsiderado devido a vasta porcentagem de grossos, ocorrendo um aumento na quantidade de óxidos de ferro e alumínio. Dentro do horizonte mosqueado, desvela-se uma quantidade semelhante de areia e finos, com plasticidade considerada alta, levando a predominar os argilominerais sobre o quartzo e óxido de ferro e alumínio. No horizonte pálido a areia predomina ligeiramente sobre os finos, os picos de quartzo sendo melhor identificados, e a plasticidade se reduzindo em relação aos horizontes subjacentes. Contudo, continua a ser classificada como alta.

Ao analisar as amostras individualmente, observa-se que a porcentagem da granulação da partícula tamanho areia avoluma-se a partir do 2º metro, amostra EA-01 C (Figura 66). A areia é mais friável e erodível, donde as camadas inferiores se mostram mais suscetíveis à erosão. O grau de uniformidade (U) pouco varia ao longo do perfil, sendo a mais desuniforme, a camada laterítica (EA-01 E), com  $U = 25,83$ . A camada mais uniforme é da amostra EA-01 G, uma das representantes do horizonte mosqueado, com  $U = 11,24$ . Esta é considerada medianamente uniforme, o que demonstra que todas as amostras do perfil ST1 apresentam uma grande variação no tamanho dos seus grãos.

O coeficiente de curvatura (CC) indica que todas as amostras do perfil ST1 são bem graduadas, o que predisporia a uma melhor distribuição e arranjo das partículas; e, conseqüentemente, uma resistência mais nítida à erosão, porém, não condizendo com o que é identificado no campo, onde ocorrem várias voçorocas.

Os resultados de limites de consistência, ou Atterberg também fogem do esperado. Observa-se que as amostras do perfil do primeiro furo de sondagem (ST1), os parâmetros (LL e LP) pouco variam, e determinam um alto poder de compressibilidade e absorção de água. O que pode ocorrer é que esse poder de absorção venha a causar aumento do peso das camadas, fazendo com que essas escorreguem ou solapem, principalmente nas laterais da voçoroca - quando essas estão sem a sustentação da base mais arenosa e friável, já erodida.

As análises mineralógicas, por difração de raios-x, pouco dizem sobre as causas da erosão das camadas. A mineralogia não varia muito em todo perfil e, mesmo as camadas ferruginosas ou que apresentam concreções - que seriam mais resistentes por conter maior quantidade de minerais de ferro - não aparecem como uma superfície diferenciada ou resistente aos agentes erosivos. Segundo Fernandes Filho (1997) o horizonte argiloso pálido com a linha de pedra sugere que esta área foi mais soerguida que as da zona sul da cidade, pois trata-se de uma estrutura que surge, comumente, no horizonte mosqueado.

Observa-se uma lixiviação dos elementos químicos e diminuição das classes minerais com o aumento de profundidade do perfil, até chegar na camada mais profunda coletada, com profundidade entre 9,2 a 10 metros, e onde se encontram algumas concreções e nódulos, daí voltando a aparecer a gibbsita e a hematita, nos difratogramas. Uma desferruginação (alteração) da crosta laterítica *in situ*, com a lixiviação dos minerais de ferro e alumínio, explica a formação do latossolo encontrado na área.

Através das imagens de satélite e de visitas de campo, atenta-se para uma melhor explicação para a origem das voçorocas da primeira área de estudo. Todas estão em final do arruamento, encontrando-se perpendiculares e em declive com a encosta. Este facilita a concentração do fluxo da água, aumentando sua velocidade e, conseqüentemente, seu poder erosivo. Além disto, a falta de infraestrutura no local, como: escadas hidráulicas, bocas de lobo, caixa de dissipação de energia etc., e a falta de consciência ambiental da população, mais a impermeabilização de seus terrenos, lançamento de águas servidas e pluviais na direção e sobre a encosta, lançamento de lixo e entulho no talude e desmatamento do local, causam um aumento no poder dos agentes erosivos, aumentando a erodibilidade do solo e horizontes de intemperismo, presentes no local.

Assim, a melhor explicação para as grandes feições erosivas da primeira área passa pelo clima, com altas pluviosidades de, aproximadamente, 2.400 milímetros por ano, pela fragilização dos horizontes de intemperismo, devido à sua caracterização arenosa em todo perfil, o que, segundo Avila (2009) faz crescer a porosidade e facilita a remoção dos grãos; conseqüentemente, a erosão também passa pela antropização dos locais, com desmatamento, impermeabilização do solo, concentração com aumento do fluxo de água, falta de políticas públicas e

conscientização ambiental da população, acelerando os processos erosivos através da fragilização do solo e do aumento no poder erosivo da água.

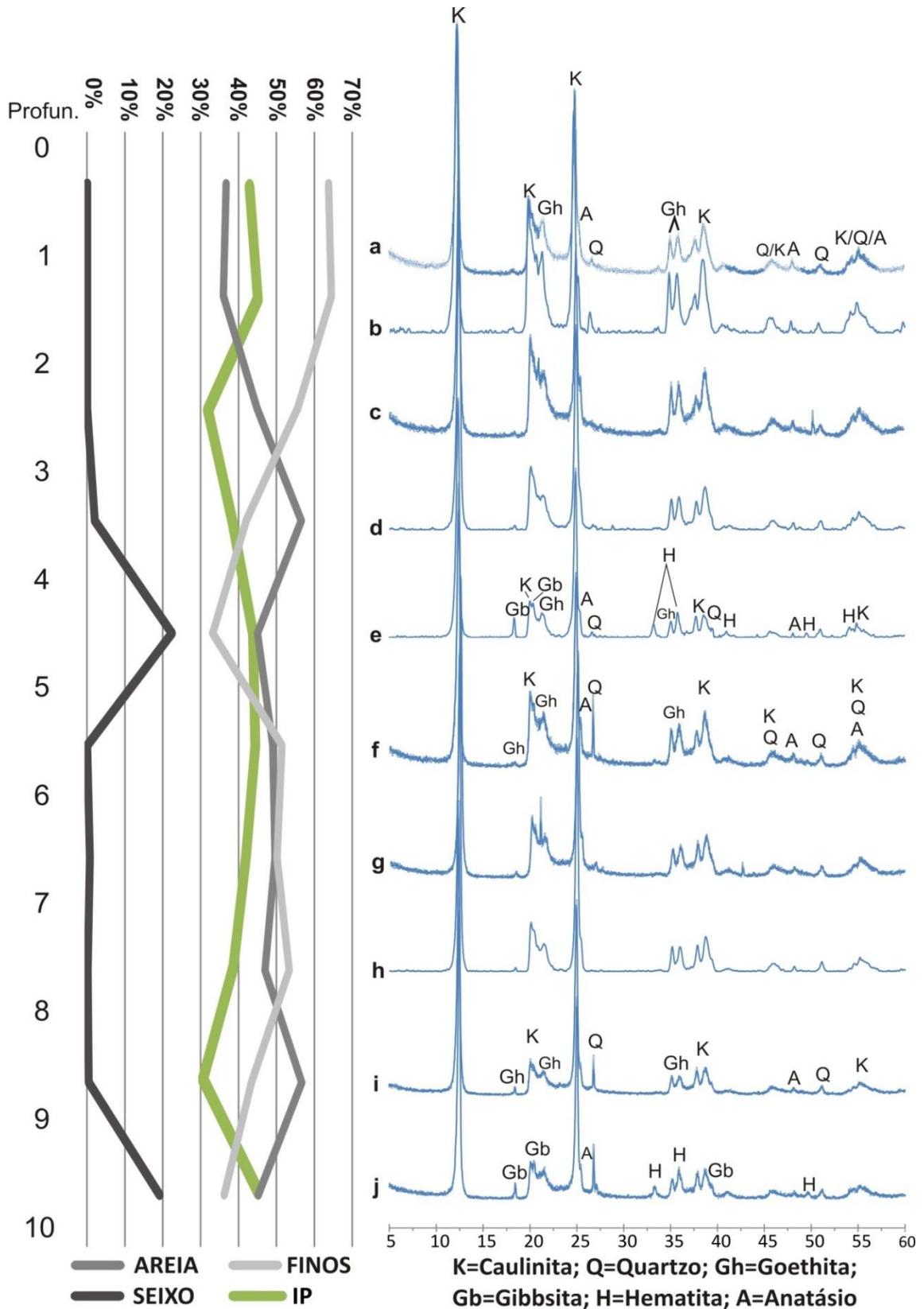


Figura 66 – Composta pela sobreposição dos índices de plasticidade com as distribuições granulométricas a esquerda e os difratômetros de raios-X com identificações dos minerais a direita, referente a amostras do 1º perfil de sondagem (ST1).

Sobrepondo os gráficos das porcentagens granulométricas, com porcentagens de areias, finos e grânulos, sobre o gráfico de porcentagem do índice de plasticidade (IP), ao lado dos difratogramas de raios-x para as amostras retiradas do 2º perfil de sondagem (ST2), observa-se uma correlação entre essas propriedades, descritas a seguir.

Para a camada de latossolo, vislumbra-se maior porcentagem de finos, com alta plasticidade e devida identificação de argilominerais. No horizonte ferruginoso, a plasticidade é desconsiderada pela grande porcentagem de material grosso, o que prejudica a análise, uma vez ocorrendo concentração de óxidos de ferro e alumínio. Analisando o horizonte mosqueado, verifica-se que as porcentagens de finos e areia são semelhantes. Isto faz com que a plasticidade decresça em relação aos valores no latossolo, porém, ainda assim é considerada alta, em vista de estar relacionada à presença de caulinita e baixo teor de quartzo identificados. Para o horizonte pálido, observa-se uma redução na plasticidade, indicando local mais suscetível à erosão, em que a porcentagem de areia é superior à de finos, os picos de quartzo bem identificados, sugerindo proximidade com a rocha-mãe (Figura 67).

Analisando a distribuição percentual da granulação areia, ao longo do perfil, observa-se um aumento conforme a profundidade, ao mesmo tempo em que o índice de plasticidade diminui e os picos identificadores do quartzo aumentam de intensidade (Figura 67). Estes parâmetros indicam que as camadas inferiores são mais suscetíveis à erosão.

Todas as amostras do segundo perfil acusam valor acima de 15 para o grau de uniformidade (U), sendo assim desuniformes granulometricamente, e garantindo uma considerável distribuição granulométrica das amostras.

Já o coeficiente de curvatura (CC) é variável para as amostras das camadas de solo. Horizontes ferruginoso e mosqueado são bem graduados; já para amostra do horizonte pálido, ocorre irregularidade na distribuição de tamanhos das partículas, sendo mal graduadas e apontando porosidade e permeabilidade mais relevantes. Então, pondera-se que os materiais das camadas inferiores são mais suscetíveis à erosão que os das camadas superiores, corroborando os resultados do índice de plasticidade.

Observa-se um decréscimo de todos os limites de consistência a partir de 2,4 metros de profundidade, amostra EA-02 D, indicando que as camadas inferiores têm baixa capacidade de compressão e absorção de água, sendo mais susceptíveis a

movimentos de massa e erosão, o que se confirma em campo, pois nestas profundidades é onde se encontram os filetes, sulcos, ravinas, alcovas e painéis. Também a corroborar, os resultados das análises de granulometria, de índice de plasticidade e coeficiente de curvatura, discutidos acima.

As análises mineralógicas por difração de raios X sugerem que ocorre um empobrecimento mineral, com a lixiviação dos elementos químicos a partir da camada EA-02 D, e um sobresalto na cristalização de quartzo a partir da amostra G, demonstrando a proximidade com a rocha-mãe.

Pelas análises das imagens de satélite, fotos aéreas e investigação de campo da segunda área, não se distinguem arruamentos adentrando ao talude, qualquer sinal de erosão ou movimento de massa na parte superior do talude; não ocorrem, pois, voçorocas no local, tão somente algumas feições erosivas na base da encosta, consoante descrito no mapeamento de risco.

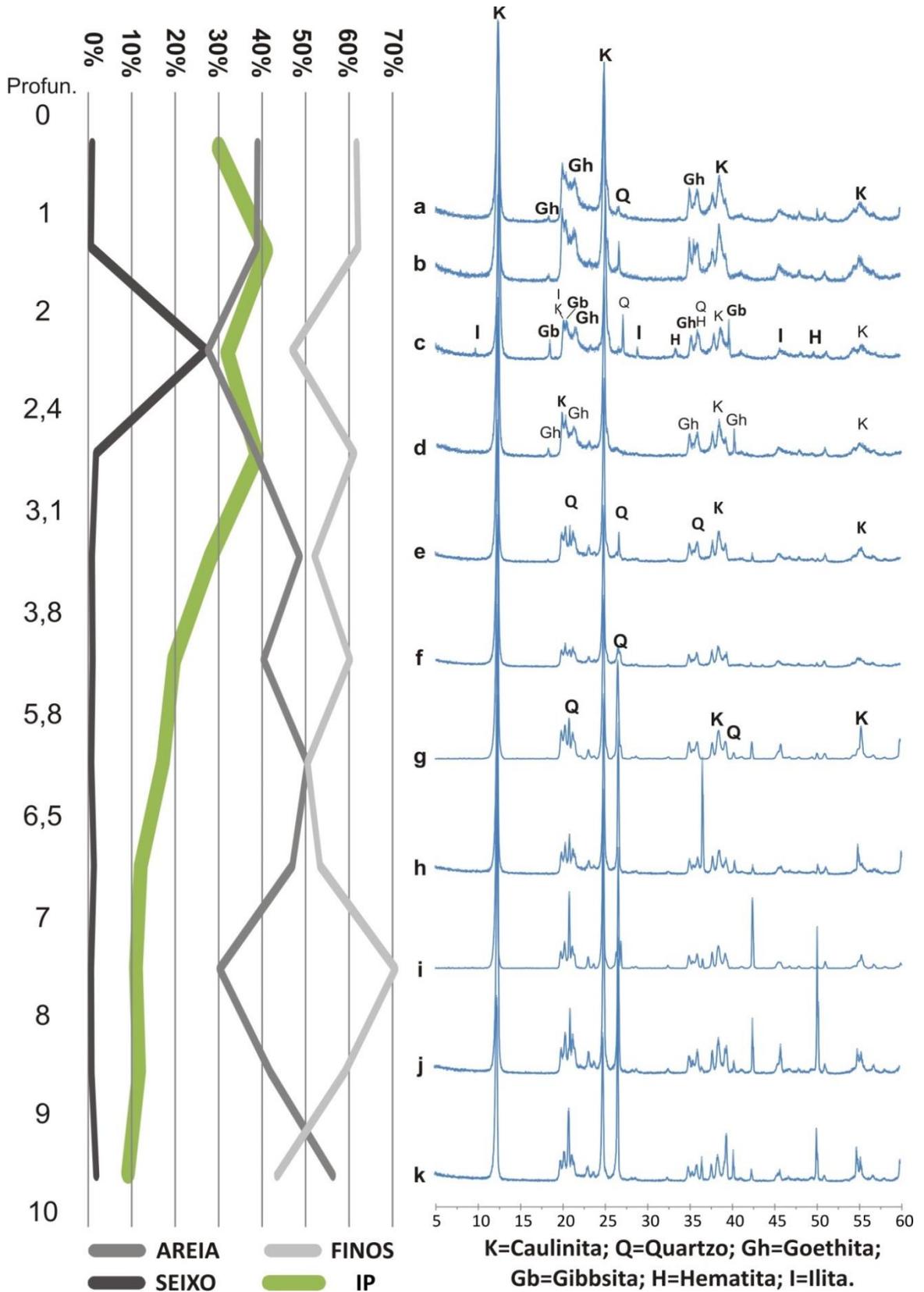


Figura 67 – Composto pelo gráfico comparativo entre o índice platicidade e os intervalos granulométricos a esquerda, e difratômetros de raios-X com identificações dos minerais a direita, referente ao 2º perfil de sondagem.

## 6. CONCLUSÕES

Segundo o IBGE 2008, a cidade de Manaus se localiza no nordeste do estado do Amazonas ou, mesoregião Centro Amazonense. A capital do estado agrega 90% da população, com quase 2 milhões de habitantes. Adiante-se que houve um aumento populacional nos últimos 50 anos, devido à implementação da Zona Franca de Manaus. Tal fato ocasionou a ocupação de lugares impróprios, como vales de igarapés e encostas declivosas.

Manaus está assentada sobre a Formação Alter do Chão, constituída por arenitos, argilitos e conglomerados, rochas que sofreram alteração (Lateritização) formando os horizontes intempéricos e latossolos, hoje presentes na superfície. Geomorfologicamente encontra-se inserida no Planalto da Amazônia Ocidental, sua cota máxima não ultrapassando os 120 metros. Formada por platôs com encostas de formas variadas, cortada por uma rede de canais de drenagem, a zona leste da cidade é o local onde são encontradas as maiores declividades. Essa região é considerada como de clima tropical úmido, com precipitação média anual em torno de 2.400 mm, sendo os meses de Janeiro a Maio, os mais chuvosos, e Julho a Setembro, os mais secos.

Com relação a primeira área de estudo, no bairro Jorge Teixeira observam-se voçorocas nos finais dos arruamentos. Com o estudo de imagens via satélite, conclui-se que essa área, totalmente antropizada, já possuía estas feições erosivas antes de 2004, data da 1ª imagem. Alguns anos depois estas feições diminuíram sua evolução, que à montante cessou, ocorrendo apenas o aumento lateral das mesmas, por movimentos de massas nas suas bordas. Ao analisar o risco geológico, conclui-se que várias moradias no local estão em risco alto a muito alto, devido à sua proximidade com as feições erosivas. Mesmo as voçorocas estando menos ativas, em episódios de chuvas intensas podem ocorrer movimentos de massa, que atingiriam as moradias, fazendo-as desmoronar.

Pelas análises de laboratório das amostras do perfil ST1, tem-se que as texturas são classificadas como silto-arenoso a areno-siltoso, com algumas camadas com grânulos; são desuniformes a medianamente uniformes, bem graduadas e com os limites de consistência com altos valores, indicando boa resistência à erosão ou baixa erodibilidade desses materiais. A camada laterítica encontrada é consistente e maciça, o que também retardaria a evolução das voçorocas do local. Porém, esses fatores endógenos não foram suficientes para

evitar a erosão causada pela força dos agentes erosivos efetivados pelos fatores exógenos.

Em relação à mineralogia dos materiais estudados, neste perfil foram identificados, através da difratometria: caulinita, quartzo, goethita, gibbsita, hematita e anatásio. Conclui-se que esta constituição litológica não interferiu para a formação e evolução das feições erosivas.

Conclui-se, também, que os agentes responsáveis pela erosão acentuada e formação das voçorocas, na primeira área de estudo, são os agentes exógenos: clima, antropização e infraestrutura precária.

As características da região, com alta umidade e índices pluviométricos elevados, associados ao desmatamento, impermeabilização do solo, juntamente com o padrão de arruamento perpendicular à encosta, favorecem a concentração e aceleração do fluxo das águas, inclusive aumentando a erosividade, ou seja, o poder erosivo das águas, principal agente formador das voçorocas. Outros fatores que podem contribuir para a formação das feições erosivas é o descarte de resíduos sólidos e águas servidas na encosta, a falta de meios-fios, bocas de lobo, caixas de distribuição e escadas hidráulicas.

Observa-se que na segunda área não ocorrem voçorocas; somente algumas feições erosivas pequenas são encontradas na parte inferior do talude de alta declividade. Visualizando as imagens aéreas do local, infere-se que o Conjunto Cidadão I foi devidamente planejado, está locado no platô onde foi erguida toda a infraestrutura necessária para a ocupação do local. Também se preservou um cinturão verde na encosta, a fim de minimizar os fatores erosivos exógenos. Não se observa evolução na paisagem local com o passar dos anos, apenas a remoção de algumas moradias do sopé da encosta.

Pelo mapeamento efetuado na segunda área, conclui-se que não há risco para as moradias locadas no platô, pois não foram evidenciadas feições erosivas, movimentações no terreno e nas moradias. Porém, as moradias no sopé da encosta encontram-se em risco alto de soterramento, durante episódios de chuvas extremas. Nesse local, observam-se feições erosivas como sulcos, ravinas, filetes, caneluras, panelas, alcovas de regressão e pipping.

Os resultados de laboratório, para o perfil ST2, condizem ao que foi visto e descrito em campo: as amostras até 6,5 metros de profundidade apresentam resultados de um comportamento resistente a erosão, ou seja, de baixa

erodibilidade. Já as amostras abaixo dessa profundidade ficam menos resistentes à erosão, conforme aumenta a profundidade, devido à redução dos limites de consistência e índice de plasticidade, e também por serem mal graduadas, com um coeficiente de curvatura (CC) abaixo de 1.

Pela difratometria de raios X, foram identificados os minerais: caulinita, quartzo e gohetita, em todo o perfil. No horizonte ferruginoso foram também identificadas a illita, a gibbsita, a hematita e o anatásio. Nas amostras do horizonte pálido ou transicional percebe-se um aumento nos picos do quartzo, sugerindo proximidade da rocha-mãe.

Constatou-se dificuldade nas duas áreas, ao preparar alguns ensaios para medir a erodibilidade dos terrenos; estes necessitavam de amostras indeformadas, sendo necessária a escavação de poços ou trincheiras para retirada de material profundo. Acabaram não sendo realizados, uma vez que havia moradias próximas, o que poderia ocasionar novas situações de risco ou agravar o risco já existente.

Comparando-se os resultados das duas áreas, é possível determinar que a atuação dos agentes erosivos e da erodibilidade dos materiais sejam diferentes nesses dois locais. Enquanto na primeira área, os principais fatores para a ocorrência da voçoroca são o agente erosivo e os fatores exógenos, na segunda, os fatores endógenos é que marcam os locais mais suscetíveis à formação das feições erosivas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, F. E. O. **As alterações climáticas em Manaus no século XX**. Rio de Janeiro. UFRJ: Instituto de Geociências: Departamento de Geografia, 1995. 182 p.
- ÂLCANTARA, F.E.O. **Estudo da erodibilidade de alguns solos do Estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, USP, São Carlos, SP, 1997. 129p.
- ANDRETTA, E.R; LADEIRA, L.F.B.; LUZARDO, R.; MARMOS J.L.; SOUZA, A.G.H. **Mapeamento das Áreas de Risco Geológico da Zona Urbana de Manaus (AM)**. Manaus: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2012. 93p.
- AVILA, L.O. **Erosão na microbacia do arroio Sarandi: Voçoroca do buraco fundo, Santa Maria/RS**. Dissertação de Mestrado. Santa Maria – RS. Universidade Federal de Santa Maria. 2009. 114p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Peneiras de malhas quadradas para análise granulométrica de solos: NBR 5734**. Rio de Janeiro, 1972. 14p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Determinação do Limite de Liquidez: Método e ensaio: NBR 6459**. Rio de Janeiro, 1984. 6p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Determinação do Limite de Plasticidade: Método e ensaio: NBR 7180**. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Análise granulométrica: Método de ensaio: NBR 7181**. Rio de Janeiro, 1984.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Sondagem a trado: NBR 9603**. Rio de Janeiro, 1986. 6p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Rochas e solos: NBR 6502**. Rio de Janeiro, 1995. 18p.
- BASTOS, C.A.B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 251f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- BASTOS, C.A.B.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W.Y.Y. **A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico-pesquisas e tendências. Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande/RS, v. 1, p. 17-26, 2000.
- CARVALHO, J.C.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO, M.T.S. (organizadores). **Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro**. Brasília, Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. 464p.
- CAPUTO, H.P. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações – Fundamentos**. Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro, 1998.
- CASAGRANDE, A. **Classifications and identification of soils**. In: Annual Meeting of the American Society of Civil Engineers, 1947. p. 783-810.
- CASSIANO, K.R.M. e COSTA, R.C. **Análise Geográfica das Áreas de Risco de Manaus**. In: VI Seminário Latino-Americano de Geografia Física e II Seminário Ibero-Americano de Geografia Física, 2010, Coimbra – PT.
- CERRI, L. E. S., **Riscos geológicos associados a escorregamentos: Uma proposta para a prevenção de acidente**. Rio Claro. Tese de Doutorado IGCE/Unesp – Rio Claro, 1993. 197p.

- COSTA, M.L. **Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia.** Rev Bras Geoc., 1991. 21: 146-160.
- COSTA, A.R.A. **Tecônica Cenozóica e a Movimentação Salífera na Bacia do Amazonas e suas Relações com a Geodinâmica das Placas da América do Sul, Caribe, Cocos e Nazca.** 2002. 238f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.
- COSTA, R.C. **Áreas de Risco no Sítio Urbano de Manaus: Geossistema e Formação Social como Fundamentos de Análise.** In: II Encontro Latinoamericano de Geomorfologia, 2008, Belo Horizonte MG. Dinâmica e Diversidade de Paisagens. Belo Horizonte: UFMG, 2008. V. 1.
- DAEMON R.F. **Contribuição à datação da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas.** Rev. Bras. Geociências. 1975, 17:382-403.
- DALLA ROSA, A. **Práticas mecânicas e culturais na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo, Solo Santo Ângelo (Latossolo Roxo distrófico).** Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1981. 138p. (Tese de Mestrado)
- DINO R., SILVA O.B., ABRAHÃO D. **Caracterização palinológica e estratigráfica de estratos cretáceos da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas.** In: Simp. Cretáceo do Brasil, 5, Rio Claro, 1999. Boletim de resumos. Rio Claro, p.557-565.
- FÁCIO, J.A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 1991. 107p.
- FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. **Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica.** (1996). In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (org) Geomorfologia e Meio Ambiente. Bertrand, Rio de Janeiro. p. 123-1994.
- FERNANDES FILHO, L.A.; COSTA, M.L.; COSTA, J.B.S. **Registros neotectônicos nos lateritos de Manaus-Amazonas.** Geociências, UNESP, São Paulo. 16(1): 1997. p 9-33.
- FOLK, R.L. **The distinction between grain size and mineral composition in sedimentar rock nomenclature.** Journal of Geology, 1947, 62 (4). p 344-359.
- GOOGLE EARTH PLUS v. 5.1. **Imagens de satélite das áreas de estudo nos anos de 2005, 2007, 2009, 2011 e 2013.** Programa de computador.
- GUERRA, A.J.T. **A erosão de solos no contexto social.** Anuário do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, v. 17, 1994.
- GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S.B. da. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995.
- GUERRA, A.J.T. **Processos erosivos nas encostas.** In: Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Orgs.: A.J.T. Guerra e S.B. da Cunha. 3a ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.
- GUERRA, A,J,T. e CUNHA, S.B. da. **Impactos Ambientais Urbanos no Brasil.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.
- GUERRA, A.J.T.; BOTELHO, R.G.M. **Erosão e Conservação dos solos.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.

GUERRA, A.J.T. **Encostas e a questão ambiental**. In: CUNHA, S.B. e GUERRA, A.J.T. (organizadores). **A questão ambiental – diferentes abordagens**. Rio de Janeiro, Editora Bertrand Brasil, 2008, p. 191-218.

GUERRA, A.J.T. (organizador) **Geomorfologia urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. 280p.

HORBE, A.M.C.; COSTA, M.L. **A Formação de Solos na Amazônia a partir de Crostas Lateríticas**. In: Anais do Cong. Bras. Geologia. Camboriú: Sociedade Brasileira de Geologia 1994. 1: p.146-147.

HORBE A.M.C., NOGUEIRA A.C.R., HORBE M.A., COSTA M.L., SUGUIU K. **A lateritização na gênese das superfícies de aplanamento da região de Presidente Figueiredo-Balbina, nordeste do Amazonas**. In: Contribuições a Geologia da Amazônia, 2001. p 148-176.

HORBE, A.M.C. **Efeitos do Intemperismo nos Sedimentos Terciários-Quaternários da Bacia do Solimões na região de Coari-AM**. In: Simpósio de Geologia da Amazônia; 2003. VIII Simpósio de Geologia da Amazônia; Manaus.

HORBE A.M.C., VIEIRA L.C., NOGUEIRA A.C.R. **Geoquímica de camadas vermelhas bioturbadas da Formação Alter do Chão, Cretáceo da bacia do Amazonas**. Revista Brasileira de Geociências., 36:13-20, 2006.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico de 2000**. Rio de Janeiro, 2000. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico de 2006**. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br).

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico de 2012**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br).

IDE, D.M. **Investigação geotécnica e estudo de um processo erosivo causado por ocupação urbana**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2009. 129p.

IMPLAN – Instituto Municipal de Planejamento Urbano e Informática, CPRM – Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. **Base cartográfica da área urbana de Manaus-AM**. (cd rom). Manaus: Sonopress, 1996.

INFANTI JUNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. **Geologia da Engenharia**. Capítulo 9. Processos de Dinâmica Superficial Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, 1998.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Dados climáticos de Manaus-AM**. (1984 – 2014) Disponível em: [www.inmet.gov.br](http://www.inmet.gov.br) (acessado em: 14/03/2014).

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Estudo das instabilizações de encostas da Serra do Mar na região de Cubatão objetivando a caracterização do fenômeno “corrida de lama” e prevenção de seus efeitos**. São Paulo, 1985. 185p

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo/CPEPD. **Treinamento de Técnicos Municipais para o Mapeamento e Gerenciamento de Áreas Urbanas com Risco de Escorregamento, Enchentes e Inundações**. Brasília: Ministério das Cidades. 2004. 222p.

IRION, G. **Clay minerals of Amazonian soils**. In: The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin. SIOLI, H., ed. Dordrecht, Dr. W. Junk Publishers, 1984. p.537-579 (Monographiae biologicae, v. 56).

ISO 13320-1 Standard. **Particle size analysis Laser diffraction methods** -- Partie 1: General principles, 1999. 51p.

KÖEPPEN, W. **Climatologia**: con um estudio de los climas de la Tierra. México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478p.

KOTSCHOUBEY, B. **Bauxitas do Baixo Nhamundá, região do Médio e Baixo Amazonas - natureza e gênese**. In: CONGR. BRAS. GEOL., 33. Rio de Janeiro, 1984. Anais. Rio de Janeiro, SBG. v. 8, p. 3926-3940.

KOTSCHOUBEY, B.; TRUCKENBRODT, W. **Evolução poligenética das bauxitas do Distrito de Paragominas - Açailândia**. Revista Brasileira de Geociências, 1981. 11(3): 192-202.

LAL, R. **Soil Erosion in the Tropics: Principles and management**. McGraw-Hill, Inc, 1990, 580p.

LAL, R. **Land Degradation and Development**. Soil Degradation by erosion. 12: 519-539, 2001.

LIMA, M. C. **Contribuição ao estudo do processo evolutivo de boçorocas na área urbana de Manaus**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, 1999. 150p.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Climatologia da Região Norte. 2ª edição. Rio de Janeiro: IBGE – Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989. p. 363-392

NOGUEIRA, A.C.R.; VIEIRA, L.C.; SUGUIO, K. **Paleossolos da Formação Alter do Chão, Cretáceo-Terciário da Bacia do Amazonas, regiões de Presidente Figueiredo e Manaus**. In V SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL. Serra Negra, v. 1, p. 261-266. 1999.

PEJON, O. J. **Mapeamento Geotécnico Regional da Folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de aspectos Metodológicos, de Caracterização e de Apresentação de Atributos**. São Carlos. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1992.

RADAMBRASIL. **Projeto RADAMBRASIL, Folha AS-20, Manaus**. DNPM/MME. Rio de Janeiro. 567p. 1978.

REIS, N.J.; FERREIRA, A.L.; ALMEIDA, M.E.; OLIVEIRA, M.A.; LUZARDO, R.; PINHEIRO, S.S.; RIKER, S.R.L. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas**. Manaus: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2006. 125p.

ROCHA, W.V. **Mapeamento geoambiental da área urbana de Manaus-AM**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Brasília, 2006.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. 5ed. São Paulo: Ed. Contexto. 85p. 2000.

ROSSETTI D.F. e NETTO R.G. **First evidence of marine influence in the Cretaceous of the Amazonas basin, Brazil**. Cretaceous Res., 27:513 528.

SANTOS JÚNIOR, E. V. da C. **Identificação e Análise Geoambiental de Processos Erosivos em uma Porção da Área Urbana de Manaus –Am** (Bairros Cidade Nova E Mauazinho), 2000. 172p. (Dissertação de Mestrado).

SÁ, J.C.M. **Dinâmica da matéria do solo em sistemas de manejo convencional e plantio direto**. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2001. 141p.

SILVA, 2005.

SOMBROEK, W.G. **Amazon Soils. A reconnaissance of soils of the Brazilian Amazon region**. Wageningen: Center for Agriculture, 1996. 292p.

TRUCKENBRODT, W. **Alguns aspectos microfaciológicos das bauxitas na parte leste da região Amazônica**. In: CONGR. BRAS. GEOL., 32. Salvador, 1982. Anais... Salvador, SBG. v. 2, p. 695-701.

TRUCKENBRODT, W. e KOTSCHOUBEY, B. **Argila de Belterra Cobertura terciária das bauxitas amazônicas**. Rev. Bras. Geoc., 1981. 11(3):203-208.

VIEIRA, A.F.G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): Principais fatores controladores de impactos urbano-ambientais**. Tese de doutorado. UFSC, 2008. 310p.

ZACHAR, D. (1982). **Soil erosion**. Elsevier Scientific Publishing Company, 548 p.

ZUQUETTE, L. V.; PEJÓN, O. J. **Considerações básicas sobre a elaboração de cartas de zoneamentos de probabilidade ou possibilidade de ocorrer eventos perigosos e de riscos associados**. Geociências, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 9 – 39. 1995.