

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS E LETRAS – ICHL**  
**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOGRAFIA**

Análise da vulnerabilidade erosiva da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo,  
Manaus-AM

ARMANDO BRITO DA FROTA FILHO

Orientador: Prof. Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira

MANAUS  
2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS E LETRAS – ICHL**  
**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO GEOGRAFIA**

Análise da vulnerabilidade erosiva da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo,  
Manaus-AM

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, da Universidade Federal do Amazonas, Área de concentração “Amazônia: Território e Ambiente”. Linha de pesquisa: Domínios da Natureza na Amazônia, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Geografia.

Presidente: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira PPGEOG/UFAM (presidente)

Membro: \_\_\_\_\_

Profa. Dra. Eloiza Elena Della Justina - UNIR (membro)

Membro: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. José Alberto Lima de Carvalho - PPGEOG/UFAM (membro)

## Ficha Catalográfica

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

F941a Frota Filho, Armando Brito da  
Análise da vulnerabilidade erosiva da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM / Armando Brito da Frota Filho. 2016  
199 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira  
Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Mapeamento. 2. Vulnerabilidade. 3. Voçoroca. 4. Bacia Hidrográfica. 5. Bacia Colônia Antônio Aleixo. I. Vieira, Antonio Fábio Sabbá Guimarães II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

Dedico este trabalho a minha querida mãe, Maria Emília, a pessoa que mais me apoiou na escolha da ciência geográfica, incentivou todas as minhas conquistas e me ensinou que através da dedicação e do esforço tudo é possível.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a DEUS pela força para conseguir iniciar e terminar este trabalho.

Agradeço a CAPES pela concessão da bolsa, que foi de vital importância para o desenvolvimento desta pesquisa.

A minha mãe que sempre me mostrou que o estudo e o saber são os bens mais valiosos que existem, e por ter me dado todas as oportunidades possíveis. Além do apoio seja nos momentos de campo em que fazia as refeições e em tantas outras ocasiões.

À minha família que esteve sempre ao meu lado, me apoiando e me dando forças, em especial à Tia Izabel e à prima Isabela (Isa) que na reta final me ajudaram com as últimas correções.

Aos meus primos por “forçarem” sair para me distrair...

Ao prof. Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira, pelos anos de orientação, desde meu primeiro PIBIC, monitoria, artigos... que com sua tranquilidade sempre conseguiu me acalmar quando eu me desesperava ou me perdia ao tentar enriquecer o trabalho.

Agradeço também pela enorme paciência, presteza e dedicação neste período, me ensinando, aconselhando, tendo uma função de pai, conseguindo aumentar meu respeito e admiração não só como pessoa e professor mas também como pesquisador e cientista.

Aos amigos e colegas do programa de pós-graduação em geografia, em especial ao pessoal do “grupo da Europa”, Mônica Cortêz, Anne Dirane, Sandra Pereira (Perê), Juliana Silva, Thaline Fontes e Vinicius Moura, que foram impares nesta jornada, ajudando-me nos momentos de estresse e de desestresse, pelas várias partidas de imagem e ação, jantares, viagens para congresso, pelas valiosas discussões sobre tudo, da ciência ao cotidiano...

Agradeço especialmente a minha amiga Mônica Cortêz (Pinto) pela paciência e tranquilidade ao me ajudar na elaboração dos mapas e me ensinar a usar as ferramentas dos softwares.

Também agradeço especialmente a minha amiga Anne Dirane pelas valiosas discussões sobre formações geológicas e processos erosivos pelas madrugadas, pela ajuda em campo e por ler o trabalho e contribuir para enriquecê-lo.

À grande amiga e irmã de orientação Nádia Rafaela, que tenho muita estima e respeito como pessoa, pelo apoio em campo, pela ajuda com as análises químicas e pelas diversas conversas sobre geomorfologia.

Ao amigo Msc. Weliton Silva, por me ajudar nos campos, nas análises de solo e sempre se mostrar disponível para tirar dúvidas sobre solo.

À amiga Camila Louzada pela ajuda, palavras de apoio e as várias horas de debates sobre a questão ambiental.

À amiga Martha Benfica (Marthinha) pela ajuda na reta final.

À irmã de orientação e amiga Miriliane Judite pela ajuda com os dados de chuva para cidade de Manaus.

Aos colegas de laboratório Jânio e Gabriel Bezerra, pela ajuda em campo e pela companhia e risadas no laboratório.

Ao professor MSc. Rogério Riberio Marinho, pela infinita paciência para me ensinar como manusear o software de SIG para a elaboração dos mapas deste trabalho.

Ao professor Dr. Roberto Prata, departamento de Matemática, pela paciência e presteza ao me ensinar e me ajudar a pesquisar os melhores métodos para as correlações utilizadas neste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia, pelo apoio, em especial às professoras Dr<sup>a</sup> Jaci Bilhalva e Dr<sup>a</sup> Elizabeth Conceição dos Santos pelas valiosas aulas e pelas quebras de paradigma, que muito embasaram este trabalho.

Aos professores, Prof. Dr. Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira, Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Jesuete Pacheco e Prof MSc Deivison Molinari que me fizeram trilhar pelo caminho da geomorfologia.

Ao professor Dr. Clauzionor Lima da Silva que me permitiu assistir suas aulas como ouvinte e que foram de fundamental importância para a fundamentação geológica.

À *maestra* Katerine Haro (Kátia) pela correção do resúmen.

Ao colega de mestrado Valdemir Reis pelo intermédio com a Polícia Ambiental.

À Polícia Ambiental, em especial aos Sgt Luz e Sgt Grande pelo apoio no trabalho de campo realizado.

À Dona Graça da secretaria do PPG-GEO, pela ajuda nas documentações.

À Sammya Judiss, à Leonor Benfica Wink e à Celeste Marreiro de Araújo pela correção da redação para a conclusão do texto.

Agradeço também aos membros da banca de qualificação, prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Neliane Alves de Souza e Dr<sup>a</sup> Edivânia dos Santos Schropfer, pelas valiosas contribuições que ajudaram a nortear o trabalho e melhor delimita-lo. Assim como, à prof Dra. Eloiza Elena Della Justina (UNIR) e prof<sup>o</sup> Dr. José Alberto Lima de Carvalho pelas preciosas contribuições na banca de defesa que com certeza ajudaram a aprimorar este trabalho.

A todos que colaboram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho.

“A Terra como realidade telúrica não é estática. Nós falamos a propósito da superfície continental, de ‘movimentos’ e de ‘ondulações’ do solo, de terreno ‘acidentado’, ‘tormentoso’, ‘deslocado’. É como se a feição da Terra respondesse a nossa mobilidade inquieta que espera que o mundo se anime, se mova, se dobre sobre nossos olhos.”

Eric Dardel (2011, p.18)

## ANÁLISE DA VULNERABILIDADE EROSIVA DA BACIA HIDROGRÁFICA COLÔNIA ANTÔNIO ALEIXO, MANAUS-AM

### RESUMO

O objetivo desta dissertação foi analisar a vulnerabilidade da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo (Manaus – AM) ao voçorocamento, considerando os aspectos naturais e antrópicos da área. A bacia localiza-se na zona leste da cidade de Manaus, tendo área de 23,94 km<sup>2</sup> e composta por 9 bairros. Para alcançar o objetivo principal foram traçados objetivos específicos como: caracterização pedo-geomorfológica da área; a descrição dos atributos naturais e urbanos das áreas de ocorrência das incisões; monitoramento das voçorocas; correlação de características morfométricas da encosta com a as da voçoroca. A metodologia foi dividida em 4 partes: 1) Revisão de literatura; 2) Trabalhos de campo; 3) Trabalhos de gabinete e análises laboratoriais; e 4) Elaboração da dissertação. Os trabalhos de campo visaram caracterizar os aspectos fisiográficos e urbanos que fosse pertinente para o desenvolvimento das incisões, além disso foi realizada uma topossequência em uma vertente representativa da BH Colônia Antônio Aleixo na qual foram analisadas características físicas do solo como Textura, Densidade Real e Aparente e Porosidade Total, características químicas como pH e macro e micronutrientes, além de teste de infiltração e de resistência a penetração. Também foram realizados cálculos sobre as características morfométricas, de drenagem e topográficas da bacia. Foram elaborados mapas altimétricos, de declividade, da forma do terreno e de uso e ocupação do solo da bacia. Com base nestes dados foi elaborado em ambiente de SIG o mapa de vulnerabilidade natural aos processos erosivos, que tem como base a declividade e forma do terreno, e posteriormente o mapa de vulnerabilidade ambiental que tem como base os critérios anteriores associados com o uso e ocupação do solo. Foi observado que as características pedo-geomorfológicas apresentam grande influência no desenvolvimento de processos erosivos visto que o solo é susceptível a processos erosivos e as elevadas declividades colaboraram para o início da erosão. Além disso, o impacto da expansão urbana é visível no desenvolvimento das incisões, ao se observar que o elevado número de voçorocas (n=22) localizadas próximo a vias públicas. De modo geral a bacia apresenta o desenvolvimento dos processos morfogenéticos em detrimento dos pedogenéticos, sendo resultado da vulnerabilidade que a área apresenta frente aos processos erosivos. Sendo representado pelo elevado número de incisões e seus impactos na paisagem e na rede drenagem. Mapeamento

**Palavras-chave:** Mapeamento – Vulnerabilidade – Voçoroca – Bacia Hidrográfica – Geomorfologia – Pedologia

## ANALYSIS OF THE EROSION VULNERABILITY OF THE WATERSHED COLÔNIA ANTÔNIO ALEIXO, MANAUS-AM

### ABSTRACT

The main objective of this dissertation was analyze the vulnerability of the Colônia Antônio Aleixo' watershed (Manaus – AM) to gullies considering human and nature aspects. The watershed is located at Manaus' east zone, has an area of 23, 94 km<sup>2</sup> and is composed of nine neighborhoods. To achieve the main goal, were developed specific objectives: Characterization of area pedo-geomorphological's aspects; description of the natural and urban attributes of the area; monitoring gullies; correlation between slope and gullies morphometric aspects. The methodology divided in 4 phases: 1) Literature revision; 2) Field Work; 3) Cabinet work and lab analyze; and 4) Dissertation writing. The work field aimed to characterize the physiographic and urban aspect, which were pertinent to the development of gully incisions. Further realized one toposequence on a representative slope at the Colônia Antônio Aleixo' watershed, where were analyzed the soil physical characteristics for instance Texture, Bulk and Particle Density and Porosity, soil chemical characteristics such as pH, macro and micronutrients, besides the infiltration and soil resistance test. It were calculated morphometric, drainage and topographic aspects of the basin. Were developed maps of hypsometric, slopes, landform, and land use and land cover. It developed the natural vulnerability map to erosive process based on the landform and slope maps, and then environmental vulnerability map based in the same criteria associated with the map of land use and land cover. It observed that the pedo-geomorphological characteristics show great influence at the development to the erosive process considering the soil susceptibility to erosion. Moreover, the impact of the urban expansion is visible at development of incisions, considering the great number of gullies at the basin (n=22) located next to streets. In general, the basin show development of morphogenetics process over the pedogenetics process, being a result of the vulnerability of the area in face of erosion process. Being represented by the great number of incisions and their impacts at the landscape and the drainage network.

**Keywords:** Mapping – Vulnerability – Gully – Watershed – Geomorphology – Pedology

## ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD EROSIVA DE LA CUENCA COLONIA

ANTONIO ALEIXO, MANAUS-AM

### RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue analizar la vulnerabilidad cuenca Colônia Antônio Aleixo (Manaus - AM) para voçorocamento, teniendo en cuenta los aspectos naturales y humanos de la zona. La cuenca se encuentra en el lado este de la ciudad de Manaus, con una superficie de 23,94 km<sup>2</sup> y consta de 9 barrios. Para lograr el objetivo principal fuera establecidos los siguientes objetivos específicos: caracterización pedo-geomorfológica de la cuenca; descripción de los atributos naturales y urbanos de las zonas próximas a la ocurrencia de cárcavas; seguimiento de cárcavas; correlación de las características morfométricas de la pendiente con la de las cárcavas. La metodología se divide en 4 partes: 1) revisión de la literatura; 2) El trabajo de campo; 3) Trabajo de gabinete y analices de laboratorio; y 4) el desarrollo de la tesis. El trabajo de campo tuvo como objetivo caracterizar la fisiográficos y aspectos urbanos que eran relevantes para el desarrollo de las incisiones también se llevó a cabo una toposecuencia en un aspecto representativo de cuenca Colônia Antônio Aleixo en el que se analizaron las propiedades físicas del suelo tales como la textura, densidad real y aparente y Porosidad total, características químicas tales como el pH y la macro y micronutrientes, además de las testes de infiltración y la resistencia a la penetración. También se realizaron cálculos de las características morfométricas, el drenaje y la topográfica de la cuenca. Fueran elaborados mapas de altimetría, de la pendiente, de la forma del terreno y del uso y ocupación de la cuenca. Basándose en estos datos se preparó en el por medio del GIS el mapa de vulnerabilidad natural a la erosión, que se basa en la pendiente y la forma del terreno, y luego el mapa de vulnerabilidad del medio ambiente que se basa en los criterios anteriores asociados con el uso y ocupación suelo. Se observó que las características pedo-geomorfológicas tienen gran influencia en el desarrollo de la erosión como el suelo es susceptible a la erosión y pendientes altas contribuyó al comienzo del proceso de erosión. Por otra parte, el impacto del desarrollo de la expansión urbana es visible en la incisión, debe observar que la gran cantidad de cárcavas (n = 22) situadas cerca de la vía pública. Generalmente, la cuenca presenta el desarrollo de procesos morfogenéticos en detrimento de pedogenéticos, siendo un resultado de la vulnerabilidad de la cuenta frente a procesos erosivos. Está representado por el gran número de incisiones y su impacto en la red de drenaje y el paisaje

**Palabras- clave:** Mapeamiento – Cárcavas – Cuenca – Geomorfología – Pedología

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>1 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>23</b>
1.1 A CIÊNCIA GEOGRÁFICA E A VULNERABILIDADE .....	23
1.1.1 O conceito de Vulnerabilidade .....	24
1.1.2 Vulnerabilidade Natural .....	25
1.1.3 Vulnerabilidade Social .....	26
1.1.4 Vulnerabilidade Ambiental.....	26
1.1.5 Susceptibilidade.....	27
1.1.6 Risco .....	27
1.2 BACIA HIDROGRÁFICA COMO RECORTE ESPACIAL DA ANÁLISE DE VULNERABILIDADE .....	29
1.2.1 Parâmetros morfométricos de análise.....	31
1.3 O PROCESSO EROSIVO .....	36
1.3.1 Sulcos .....	37
1.3.2 Ravinas .....	37
1.3.3 Voçorocas .....	38
1.3.4 Feições de Retrabalimento.....	41
<b>2 ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>43</b>
2.1 LOCALIZAÇÃO .....	43
2.2 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS .....	44
2.2.1 Geologia .....	44
2.2.2 Geomorfologia.....	45
2.2.3 Solo.....	48
2.2.4 Clima .....	52
2.2.5 Hidrografia.....	56
2.2.6 Vegetação .....	57
2.3 ASPECTOS SOCIAIS .....	59
2.3.1 Ocupação Humana.....	59
<b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>63</b>
3.1 METODOLOGIA .....	63
3.1.1 Descrição das áreas com ocorrência de voçorocamento na bacia Colônia Antônio Aleixo .....	63
3.1.2 Caracterização dos aspectos pedo-geomorfológicos da bacia hidrográfica Colônia Antônio Aleixo .....	64
3.1.3 Caracterização dos aspectos urbanos em locais com ocorrência de voçorocas na bacia.....	74
3.1.4 Monitoramento da morfometria e expansão das voçorocas .....	74
3.1.5 Correlação dos aspectos geomorfológicos aos aspectos morfométricos das voçorocas.....	75
3.1.6 Elaboração do mapa de vulnerabilidade a voçorocamento nas bacias hidrográficas .....	77
<b>4 RESULTADO E DISCURSÕES .....</b>	<b>84</b>
4.1 DESCRIÇÃO DAS ÁREAS COM OCORRÊNCIA A VOÇOROCAMENTO NAS BACIAS COLÔNIA ANTÔNIO ALEIXO .....	84
4.1.1 Solo.....	84

4.1.2	Vegetação .....	88
4.1.3	Vertente .....	90
4.2	<b>CARACTERIZAÇÃO PEDO-GEOMORFOLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA COLÔNIA ANTÔNIO ALEIXO</b> .....	96
1.1.1	Caracterização Geomorfológica da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo	96
4.2.1	Caracterização Pedológica da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo.	112
<b>4.3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS ASPECTOS URBANOS DOS LOCAIS DE OCORRÊNCIA COM VOÇOROCAS</b> .....	129
4.3.1	Traçado das ruas .....	133
4.3.2	Drenagem (urbana) .....	134
4.3.3	Deposição de resíduos sólidos em voçorocas.....	136
4.3.4	Processos erosivos acelerados no Bairro Distrito Industrial II.....	138
<b>4.4</b>	<b>MONITORAMENTO DA MORFOMETRIA E EXPANSÃO DAS VOÇOROCAS</b> .....	141
4.4.1	Monitoramento da Morfometria .....	146
4.5.1	Correlação entre Variáveis Numéricas .....	153
4.5.2	Correlação entre Variáveis Nominais.....	156
<b>4.6</b>	<b>ANÁLISE DA VULNERABILIDADE EROSIVA DA BACIA HIDROGRÁFICA COLÔNIA ANTÔNIO ALEIXO</b> .....	162
4.6.1	Análise da Vulnerabilidade Natural à erosão da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo .....	162
4.6.2	Análise da Vulnerabilidade Ambiental à erosão da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo .....	165
4.6.3	Análise integrada e comparativa dos mapas de Vulnerabilidade Natural e Ambiental .....	168
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	171
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	176

## APÊNDICES

**APÊNDICE 1** – Características físicas dos solos dos perfis da topossequência

**APÊNDICE 2** – Disposição das voçorocas nos Mapas de Vulnerabilidade Natural e Ambiental

## LISTA DE SIMBOLOS

A – Área  
P – Perimetro  
B – Largura  
L – Comprimento  
Dd – Densidade de Drenagem  
Dh – Densidade Hidrográfica  
Eps – Extensão do Percurso Superficial  
Isin – Índice de Sinuosidade  
Cman – Coeficiente de Manutenção  
Rh – Relação do relevo  
G – Gradiente dos Canal Principal  
Ir – Índice de Rugosidade  
Cmas – Coeficiente de Massividade  
Co – Coeficiente Orográfico  
Re – Relação de Enlongamento  
Ic – Índice de Circularidade  
Ik – índice de Compacidade  
Lt – Comprimento total dos canais  
N – Número total de rios ou cursos d'água  
H – Altura Máxima  
h – Altura Mínima  
Am – Altura média da bacia  
 $\Delta a$  – Amplitude altimétrica  
 $\chi^2$  – Qui-Quadrado  
P – Valor de pertinência

## LISTA DE SIGLAS

BH – Bacia Hidrográfica

BH CAA – Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

SEMMAS – Secretária de Municipal de Meio Ambiente e Sustentabilidade

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

UFAM – Universidade Federal do Amazonas

LATOSSOLO – Laboratório de análise e tratamento de sedimento e solos

UmG – Umidade Gravimétrica

## Lista de Figuras

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo: Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo.....	43
Figura 2: Voçoroca com Controle Estrutural na Bacia Colônia Antônio Aleixo. Falha Normal NW-SE.....	45
Figura 3: Mapa das unidades morfoestruturais.....	46
Figura 4: Modelos Digital de Elevação - Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo. ....	47
Figura 5: Representação esquemática dos solos nas vertentes da região norte da Cidade de Manaus. ....	49
Figura 6: Voçoroca no bairro Jorge Teixeira com presença de deposição Tecnogênica <i>Gárbica</i> .....	52
Figura 7: Voçoroca no bairro Distrito Industrial II com presença de deposição Tecnogênica <i>Espólicas</i> .....	52
Figura 8: Comparação dos mapas de pluviometria anual (à esquerda, em mm por ano) e Erosividade (em MJ mm ha <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> ). Círculo vermelho destaca a cidade de Manaus. Fonte. Silva, 2004.....	54
Figura 9: Alterações na cobertura florestal urbana (1977, 1994 e 2011) de Manaus, AM, Brasil Círculo preto destaca a área da bacia Colônia Antônio Aleixo. ....	58
Figura 10: Planta de Manaus, focalizando os principais igarapés que influem na "compartimentação" dos diversos blocos urbanos de Manaus. ....	60
Figura 11: Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno.....	64
Figura 12: Trado holandês usado para coleta das amostras de solo .....	70
Figura 13: Quarteador de Câmara tipo Jones. ....	70
Figura 14: Amostras em processo de decantação da argila. ....	70
Figura 15: Pirâmide Textural.....	71
Figura 16: Infiltrômetro de <i>Hills</i> . ....	74
Figura 17: Tipos de voçorocas OLIVEIRA, (1989). ....	75
Figura 18: Formas de voçorocas (VIEIRA, 2008).....	75
Figura 19: Voçoroca localizada no bairro Distrito Industrial II, BH Colônia Antônio Aleixo.....	84
Figura 20: Local do teste de infiltração, próxima a voçoroca, bairro Distrito Industrial II .....	86
Figura 21: Área de terraplanagem no bairro Distrito Industrial II, BH Colônia Antônio Aleixo. ....	88
Figura 22: Mapa de Forma do Terreno e localização das voçorocas da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM.....	92
Figura 23: Rede de Drenagem da bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo. ....	98
Figura 24: Mapa de Declividade e localização das voçorocas da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM. ....	104
Figura 25: Modelo Digital de Elevação com localização dos Perfis Topográficos da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus – AM. ....	108
Figura 26: Perfil Longitudinal do rio principal da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM. ....	109
Figura 27: Perfil Transversal A-B, localizado no curso superior da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo.....	110
Figura 28: Perfil Transversal C-D, localizado no curso médio da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo. ....	110

Figura 29: Perfil Transversal E-F, localizado no curso inferior da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo .....	111
Figura 30: Mapa de Localização do Perfil Topográfico 01 da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, e pontos de coleta de solo, teste de Infiltração e Resistência a Penetração (P1, P4, P3 e P2). .....	112
Figura 31: Perfil Topográfico 01 da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo com as localizações dos pontos coleta de solo, teste de Infiltração e Resistência a Penetração. ....	113
Figura 32: A – Teste de resistência a penetração; B – Perfil de solo do Ponto 01, no topo da encosta, BH Colônia Antônio Aleixo. ....	114
Figura 33: A – Teste de resistência a penetração; B – Perfil de solo do Ponto 02, na base da encosta, BH Colônia Antônio Aleixo. ....	116
Figura 34: A – Teste de resistência a penetração; B – Perfil de solo do Ponto 03, na seção média da encosta, BH Colônia Antônio Aleixo. ....	118
Figura 35: A – Teste de resistência a penetração; B – Perfil de solo do Ponto 04, na seção média da encosta, BH Colônia Antônio Aleixo. Org. Armando B. da Frota Filho, 2015 .....	120
Figura 36: Diagrama esquemático de transformação de Latossolos em Espodosolos. ....	125
Figura 37: Topossequencia 01 realizada na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, e pontos de tradagem.....	126
Figura 38: Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo com filtro de transparência de 50%. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016. ....	131
Figura 39: Voçoroca em processo de contenção pelo poder público no bairro Jorge Teixeira. A linha preta indica a boda da incisão. As setas vermelhas indicam os patamares. ....	132
Figura 40: Voçoroca contida pelo poder público no bairro Jorge Teixeira. As setas vermelhas indicam os patamares. As setas pretas indicam as ocupações em local inapropriado.....	133
Figura 41: Rua interdita que encontra-se na borda de uma voçoroca. Bairro Jorge Teixeira. ....	134
Figura 42: Voçoroca no Bairro Jorge Teixeira. ....	135
Figura 43: Canaleta com caixa coleta para dissipação de energia. Bairro Jorge Teixeira. Seta preta indica a caixa coletora.....	135
Figura 44: Canaleta com caixa coleta para dissipação de energia. Bairro Gilberto Mestrinho. ....	136
Figura 45: Voçoroca com deposição Tecnogênia Gárbica no bairro Jorge Teixeira. ....	137
Figura 46: Cabeceira de uma voçoroca no Bairro Distrito Industrial II. ....	138
Figura 47: Cabeceira de uma voçoroca no Bairro Distrito Industrial II, com intervenção humana e deposição tecnogênica. Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015 .....	138
Figura 48: Interior de uma voçoroca no Bairro Distrito Industrial II, com intervenção humana e deposição tecnogênica. ....	139
Figura 49: Voçoroca que alcançou a via pública no bairro Distrito Industrial II. ....	139
Figura 50: Voçoroca em processo de contenção no bairro Distrito Industrial II. ....	139
Figura 51: Mapa de localização das voçorocas encontradas na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo. ....	142
Figura 52: Mapa da evolução das voçorocas 07 e 08 com imagens dos anos de 2005, 2007, 2012 e 2013. ..	149
Figura 53: Mapa da evolução da voçoroca 09 com imagens dos anos de 2005, 2007, 2012 e 2013. ....	150

Figura 54: Deposição tecnogênica Gárbica no interior da incisão 09.....	151
Figura 55: Mapa da evolução da voçoroca 12 com imagens dos anos de 2005, 2007, 2012 e 2013. ....	152
Figura 56 Solo encrosta na borda da incisão 12. ....	152
Figura 57: Mapa de Vulnerabilidade Natural aos processos erosivos da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM.....	164
Figura 58: Mapa de Vulnerabilidade Ambiental aos processos erosivos da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM.....	167

## Lista de Gráficos

Gráfico 1: Índice de Erosividade da Chuva média anual de 1961 a 2010 em Manaus. Fonte: Fernandes, 2014 .....	55
Gráfico 2: Teste de Infiltração realizado em área degradadas, no bairro Distrito Industrial II .....	85
Gráfico 3: Teste de Infiltração realizado em área degradadas, no bairro Distrito Industrial II – BH Antônio Aleixo .....	86
Gráfico 4: Distribuição das Formas da vertente. ....	91
Gráfico 5: Correlação da distribuição das Voçorocas nas Formas do Terreno.....	92
Gráfico 6: relação da distribuição das voçorocas e a curvatura horizontal. ....	93
Gráfico 7: Relação da distribuição das voçorocas e a curvatura horizontal. ....	94
Gráfico 8: Relação da distribuição das Voçorocas e Classes de Declividade. Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016. ....	95
Gráfico 9: Teste de Infiltração realizado no topo da vertente, Ponto 01. ....	115
Gráfico 10: Teste de Infiltração realizado na base da vertente. Ponto 02.....	117
Gráfico 11: Teste de Infiltração realizado no terço inferior da vertente, ponto 03.....	119
Gráfico 12: Teste de Infiltração realizado no terço inferior da vertente, ponto 04.....	121
Gráfico 13: Taxa de resistência à penetração do solo, Média da topossequência da BH CAA. ....	128
Gráfico 14: Tipo das voçorocas localizadas na Bacia Hidrográfica Colônia Aleixo.....	144
Gráfico 15: Forma das voçorocas localizadas na Bacia Hidrográfica Colônia Aleixo.....	145
Gráfico 16: Crescimento do comprimento das voçorocas monitoradas. ....	146
Gráfico 17: Crescimento da largura das voçorocas monitoradas.....	147
Gráfico 18: Crescimento da profundidade das voçorocas monitoradas.....	147
Gráfico 19: Crescimento da área das voçorocas monitoradas. ....	148
Gráfico 20: Crescimento do volume das voçorocas monitoradas.....	148
Gráfico 21: Correlação entre a declividade da encosta e o comprimento da voçoroca. ....	153
Gráfico 22: Correlação entre a declividade da encosta e largura da voçoroca. ....	153
Gráfico 23: Correlação entre a declividade da encosta e área erodida. ....	154
Gráfico 24: Correlação entre comprimento da encosta e comprimento da voçoroca. ....	154
Gráfico 25: Correlação entre comprimento da encosta e largura da voçoroca. ....	155
Gráfico 26: Correlação entre comprimento da encosta e área erodida. ....	155
Gráfico 27: Classes de Vulnerabilidade Natural.....	163
Gráfico 28: Classes de Vulnerabilidade Ambiental.....	165

## Lista de Quadros

Quadro 1: Conceitos de Risco, Perigo e Vulnerabilidade. ....	28
Quadro 2: Classificação das voçorocas por tamanho (m <sup>3</sup> ). ....	75
Quadro 3: Exemplos de chave de interpretação de feições representativas em Imagem <i>RapidEye</i> , 3(R) 5(G) 1(B). ....	79
Quadro 4: Escala AHP (Analytic Hierarchy Process) de Comparação Pareada.....	80
Quadro 5: Disposição das vertentes e suas formas em curvatura horizontal e curvatura vertical e seus valores em porcentagem (%) na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo .....	91
Quadro 6: Forma do Terreno e distribuição das voçorocas .....	93
Quadro 7: Síntese das características da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo .....	97
Quadro 8: Classes interpretativas para os valores de Densidade de Drenagem ( <i>Dd</i> ) .....	99
Quadro 9: Classificação dos valores da extensão do percurso superficial.....	100
Quadro 10: Classes de sinuosidade (formas dos canais da rede de drenagem) .....	100
Quadro 11: Classificação do índice de rugosidade e sua relação com a forma de relevo.....	102
Quadro 12: Associação do relevo com a declividade e o grau de suscetibilidade erosiva. ....	102
Quadro 13: Classes interpretativas para os valores de Índice de Circularidade ( <i>Ic</i> ).....	107
Quadro 14: Informações gerais dos pontos da topossequência. ....	113
Quadro 16: Síntese das principais características das voçorocas encontradas na Bacia Hidrográfica Colônia Aleixo. ....	143
Quadro 16: Correlação entre a Curvatura Vertical da Encosta e o Tipo de voçoroca .....	157
Quadro 17: Correlação entre a Curvatura Horizontal da Encosta e o Tipo de voçoroca .....	158
Quadro 18: Correlação entre a Forma do Terreno e o Tipo de voçoroca .....	158
Quadro 19: Correlação entre a Curvatura Vertical da Encosta e a Forma da voçoroca.....	159
Quadro 20: Correlação entre a Curvatura Horizontal da Encosta e o Forma da voçoroca .....	160
Quadro 21: Correlação entre a Forma do Terreno e o Tipo de voçoroca .....	161
Quadro 22: Síntese das características das classes de Vulnerabilidade Natural e de Vulnerabilidade Ambiental da BH Colônia Antônio Aleixo .....	169

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Desmatamento e áreas verdes em Manaus (1986 a 2004) .....	58
Tabela 2: Pesos para a classe declividade.....	82
Tabela 3: Pesos para a classe forma do terreno (forma da encosta) .....	82
Tabela 4: Pesos para a classe uso e ocupação do solo .....	83
Tabela 5: Comparação entre dados de infiltração realizados na Bacia Colônia Antônio Aleixo .....	87
Tabela 6: Classes de Forma do Terreno (forma da vertente) e seus valores em área (km <sup>2</sup> ) e porcentagem (%) na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo .....	90
Tabela 7: Relação da distribuição das Voçorocas e Classes de Declividade .....	94
Tabela 8: Classes de declividade e seus valores em área (km <sup>2</sup> ) e porcentagem (%) na BH Colônia Antônio Aleixo .....	103
Tabela 9: Classes hipsométricas e seus valores em área (km <sup>2</sup> ) e porcentagem (%) na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo .....	107
Tabela 10: Análise do pH dos perfis de solo da Topossequência da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo .....	122
Tabela 11: Análise dos nutrientes dos perfis de solo da Topossêquencia da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo .....	123
Tabela 12: Umidade Gravimétrica superficial dos pontos de coleta de solo. ....	127
Tabela 13: Taxa de resistências a penetração do solo (MPa) dos pontos de análise na topossequência.....	127
Tabela 14: Quantidade de voçorocas encontradas na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo .....	141
Tabela 15: Classes de Vulnerabilidade Natural.....	163
Tabela 16: Classes de Vulnerabilidade Ambiental .....	165
Tabela 17: Comparação entre a distribuição da Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental .....	168

## INTRODUÇÃO

O ambiente, pode ser considerado um sistema resultante das interações de fatores físicos, biológicos e sociais que se relacionam no espaço e no tempo (PASSOS, 2009), e tais interações alteram o relevo e paisagem. Tais alterações são resultados da combinação de fatores naturais e antrópicos. À medida que a sociedade altera a paisagem, há o aumento na fragilidade ambiental, desenvolvendo áreas vulneráveis e intensificando as dinâmicas naturais, tais como os processos erosivos, movimentos de massa, enchentes, dentre outros. A morfodinâmica representada pelos fatores supracitados superpõe à morfoestrutura, seja da paisagem ou do relevo.

A erosão faz parte do ciclo natural da evolução do modelado do relevo, passível de ocorrer em todo o planeta. Os processos erosivos, de forma geral, vêm sendo acentuados pela atividade humana através do desflorestamento, retirada das camadas superficiais do solo e mesmo de sua compactação, dentre outros. Essas alterações fazem a erosão se tornar mais danosa ao ambiente e impactam cada vez mais ao meio, seja este natural ou social (SUERTEGARAY, 1999; MENDONÇA, 2011).

No sítio urbano, o desenvolvimento de processos erosivos resulta da combinação de vários fatores, sejam de âmbito natural tais como: encostas íngremes, características físicas do solo, precipitação elevada, desmatamento, impermeabilização do solo. Enquanto no âmbito social e urbano destacam-se o planejamento da cidade, as formas de ocupações existentes, ou ainda, leis sobre a ocupação de lugares que possam vir a proporcionar o desequilíbrio físico na paisagem devido ao desenvolvimento de erosão.

Quando as bacias hidrográficas estão localizadas em ambientes urbanos, o desencadeamento de processos erosivos é acentuado, uma vez que os caminhos do sistema natural da água são resumidos à infiltração e principalmente ao escoamento (TUCCI e CLARKE, 1997; BOTELHO, 2011). Isso ocorre, porque outros processos referentes ao ciclo hidrológico são interrompidos e/ou reduzidos, tais como a evapotranspiração, fluxo de tronco, percolação e exfiltração. Em razão da ausência do horizonte orgânico do solo, da falta de vegetação e da impermeabilização do solo, as taxas de infiltração são reduzidas, acentuando o escoamento superficial nas bacias hidrográficas e, por sua vez, crescendo os processos erosivos.

Na cidade de Manaus, estudos de Vieira (1998) e (2008) mostraram que as feições do tipo voçoroca se localizavam majoritariamente na Zona Leste da cidade, mais

especificamente na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo que possuía 31 incisões. O fato ocorre por razões naturais do modelado da região que se distingui das demais zonas da cidade, devido às características do relevo como forma e comprimento da encostas, declividade e altimetria superior ao das outras zonas da cidade. Todavia, a forma como a cidade foi ocupada colabora para o acontecimento do número elevado das feições erosivas.

Levando em consideração que a cidade de Manaus passou pelo advento da expansão urbana nos anos 80, o crescimento foi intenso, rápido e sem o planejamento necessário como aponta OLIVEIRA (2003) nas áreas mais afastadas do centro histórico da cidade (Zona Sul), a ocupação ocorreu de forma urbanisticamente desordenada, na qual não houve preocupações no que se refere a impactos ambientais, ocorrendo o desmatamento e ocupação de encostas.

Tomando como exemplo e foco de estudo a Bacia Colônia Antônio Aleixo, surgem alguns questionamentos, tais como: Como as áreas de vulnerabilidades são influenciadas pelos aspectos pedo-geomorfológicos? Como os fatores sociais e urbanos se relacionam com a intensificação das áreas vulneráveis? Quais as áreas mais vulneráveis a voçorocamento nesta bacia?

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo principal analisar a vulnerabilidade da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo em relação ao voçorocamento, considerando os aspectos naturais e sociais da área. Logo, foram estabelecidos objetivos que viabilizassem encontrar as respostas para tais indagações. Tendo como objetivos específicos: 1) Descrever as áreas com ocorrência a voçorocamento nas bacias Colônia Antônio Aleixo. 2) Caracterizar os aspectos pedo-geomorfológicos da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo; 3) Caracterizar aspectos urbanos em locais com ocorrência de voçorocas; 4) Monitorar as voçorocas quanto a sua morfometria e expansão, e; 5) Correlacionar os aspectos geomorfológicos aos aspectos morfométricos das voçorocas.

## **1 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **1.1 A Ciência Geográfica e a Vulnerabilidade**

Leff (2010) argumenta que a sociedade como um todo está em uma crise ambiental, porém não possui causas naturais e sim, de ordem tecnológica, ética, política, econômica e até mesmo social. Isso decorre do fato da ciência, em especial a Geografia Física, se vincular aos métodos baseados no paradigma Newtoniano-Cartesiano, tais como o Positivismo e Neopositivismo, métodos mais usuais (ainda que não únicos) (NUNES et al.,2006), no qual as relações de causa e efeito são lineares, e os aspectos humanos não são aprofundados ou relacionados com os naturais.

Dessa forma, faz-se mister conhecer e compreender a relação dos aspectos naturais e os aspectos humanos, considerando as múltiplas relações existentes entre eles, não somente de uma forma linear, mas para uma análise que englobe todos estes fatores. Observa-se uma necessidade de uma abordagem mais profunda sobre a questão ambiental, uma análise que verse sobre os fatores naturais assim como os fatores sociais, para o entendimento da relação dicotômica entre a sociedade e natureza, e suas relações de causa e efeito.

É a partir desse ponto de vista que uma abordagem geográfica se faz necessária, pois conforme Veyret (2007) a geografia é uma ciência que em seu estudo considera a análise do meio, também conhecido como ambiente e leva em consideração fatores naturais (relevo, clima, solo, vegetação e hidrografia) e, juntamente com os fatores humanos, realiza as suas traduções espaciais. A partir desses aspectos, a geografia faz suas análises e interpretações.

Rodrigues (2001) e Cunha e Freitas (2004) no tocante à aplicação da Geografia e seus métodos, como o Geossistema aos estudos das relações natureza e sociedade e avaliação da qualidade ambiental, apontam o olhar integrador que contribui para o planejamento e gestão ambiental (CHRISTOFOLETTI, 1979; CHRISTOFOLETTI, 1999; MONETRIO,2001). Esse conhecimento não pode ser reducionista ou determinista, possibilitando a classificação de unidades quanto à estabilidade, singularidade, fragilidade e vulnerabilidade no que tange às interferências antrópicas no modelado do relevo.

### 1.1.1 O conceito de Vulnerabilidade

De acordo com Fussel (2007) o conceito mais comum de Vulnerabilidade se refere à capacidade de sofrer danos, contudo o seu uso no âmbito científico tem suas raízes na Geografia e nas pesquisas sobre desastres naturais. Porém, esse termo é usado em uma variedade de pesquisas relacionadas à ecologia, saúde pública, pobreza, desenvolvimento, sustentabilidade, impactos ambientais e mudanças climáticas globais (WEI et al.,2004; ADGER, 2006; FUSSEL, 2007; VEYRET,2007).

Timmermann (1981) e Fussel (2007) indicam que vulnerabilidade é um conceito de utilização tão ampla que é inútil realizar uma descrição minuciosa, exceto como um indicador retórico para áreas de grande preocupação.

Nesse sentido, a Organização das Nações Unidas (2004) desenvolveu diversos conceitos no que tangem à **vulnerabilidade**, como: as condições determinadas por fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade a perda ou dano que uma comunidade pode sofrer.

No entanto, é a Geografia e a Ecologia Humana que, particularmente, teorizam a vulnerabilidade relacionada com as mudanças ambientais, embasando-se nas transformações sociais e tomadas de decisões, ou seja, a dinâmica da vulnerabilidade tem relação com as ações antrópicas, pois como afirma Adger (2006) a vulnerabilidade às mudanças ambientais não existe isolada da economia ou da política.

Adger (2006) mostra que a Vulnerabilidade pode ser representada como a exposição ou sensibilidade às perturbações ou tensões externas, e a capacidade de se adaptar quando há exposição à natureza ou ainda, o grau que um sistema experimenta as tensões por ter sido modificado ou sofreu perturbações, sejam de ordem ambiental ou sócio-política. A capacidade de se adaptar é a habilidade de um sistema em evoluir para poder se acomodar.

Cutter (1996) aponta que o termo apresenta uma multidimensionalidade, tendo em vista a sua evolução conceitual no decorrer dos anos e através dos vários ramos da ciência que se apropriam deste conceito, seja em relação às ciências humanas que são familiares a este conceito, ou às ciências naturais que começam a se utilizar dele, o que por sua vez resulta em diferentes práticas teórico-metodológicas (CUTTER, 1996; ADGER, 2006; ALMEIDA, 2011).

É no contexto da inclusão das relações “sócio-natural-cultural-ambiental”, ou seja, das dimensões socioculturais na problemática ambiental que surge o conceito de

vulnerabilidade (ALMEIDA, 2010), pois os fatores socioeconômicos exercem papel no desenvolvimento de eventos geofísicos extremos, tais como: enchentes, voçorocas e movimentos de massa (WEI et al., 2004).

O propósito da análise da vulnerabilidade é identificar ações que possam reduzir a vulnerabilidade antes que se transformem em risco ou mesmo em dano. É necessária a análise de vulnerabilidade de diferentes regiões para possibilitar que sejam realizadas mudanças (WEI et al., 2004).

Para Silva e Almeida (2012) a análise da categoria espacial da vulnerabilidade busca a compreensão dos territórios através do uso e ocupação do solo e do entendimento dos indicadores socioeconômicos e ambientais, constituindo a relação entre os grupos sociais e as áreas vulneráveis ambientalmente.

A questão Vulnerabilidade é bastante complexa e leva em consideração diversos fatores e processos, pois o próprio tema refere-se a um ponto de conexão entre várias áreas do conhecimento e da ciência. Vulnerabilidade trata da capacidade de um ambiente sofrer um impacto potencial, irreversível ou não, seja este um ambiente natural, social ou socioambiental.

Dentro do próprio contexto de vulnerabilidade há sua fragmentação em vários segmentos, dentre eles os que mais se destacam são a Vulnerabilidade Natural que trata dos aspectos físicos como geologia, geomorfologia, hidrografia, solo e vegetação, ou seja diz respeito ao ambiente à parte da sociedade, a Vulnerabilidade Social, que contempla a escala humana e socioeconômica, e a Vulnerabilidade Ambiental que considera simultaneamente os aspectos socioeconômicos e os físico-naturais.

### 1.1.2 Vulnerabilidade Natural

Apesar dos termos Vulnerabilidade Ambiental e Vulnerabilidade Natural parecerem semelhantes, há uma diferença sutil entre eles, pois a Vulnerabilidade Natural consiste da susceptibilidade do ambiente, considerando os fatores de geomorfologia, geologia, solos e vegetação. Enquanto o segundo, relacionando o mapa de vulnerabilidade natural com o de uso e ocupação do solo, é a susceptibilidade do ambiente a pressões antrópicas (GRIGIO, 2003), abrangendo os aspectos naturais do modelado da paisagem.

Nesse sentido, para a elaboração de qualquer trabalho que aborde a Vulnerabilidade Natural é importante estar baseado em mapas temáticos de

geomorfologia (hipsometria, declividade, forma e orientação da encosta), vegetação, solo, geologia e clima (pluviométrica).

### 1.1.3 Vulnerabilidade Social

Cutter (1996) e Freitas e Cunha (2012) compreendem a Vulnerabilidade Social englobando indicadores socioeconômicos, percepção e capacidade de resposta ao risco, seja de forma individual ou coletiva. Cutter (1996) salienta que vulnerabilidade social é mais frequentemente descrita usando as características individuais de pessoas (idade, raça, saúde, renda, tipo de habitação, emprego), sendo parcialmente o produto do social e das desigualdades.

Portanto, a Vulnerabilidade Social está relacionada a espaços vulneráveis atribuídos à questão do uso e ocupação do solo, inter-relacionada aos impactos ambientais, às desigualdades sócio espaciais com as questões de habitação e à ausência de saneamento básico, contribuindo para a reprodução desigual do espaço, criando territórios de extrema vulnerabilidade socioambiental (SILVA e ALMEIDA, 2012).

### 1.1.4 Vulnerabilidade Ambiental

Pela abordagem de Suertegaray (1999), o conceito de ambiente abrange ao mesmo tempo a questão natural e social, considerando-os uma dimensão **una**. No que tange a questão da vulnerabilidade, Grigio (2003) e Fushimi (2013) aponta que a Vulnerabilidade Ambiental aborda a combinação das variáveis naturais associadas à ação da sociedade, elemento considerado pelo autor como de grande importância em qualquer tipo de análise ambiental.

Há a necessidade da verificação dos fatores ambientais, sociais e econômicos, no intuito de entender as ameaças existentes e os impactos ambientais (naturais e sociais) no território, como destaca Veyret (2007). Essa forma de análise é imperativa, pois no ambiente (urbano) são as inter-relações entre os aspectos naturais e humanos os geradores de mudanças e reestruturações no meio em que coabitam.

Tocante da ocupação humana, autores como Cutter (1996) e Schor e Alves-Gomes (2011) alegam que um forte indicador de vulnerabilidade nas condições de moradia, é a produção de efluentes e o grau de modificações aos habitats ecológicos ocorrido durante o processo de ocupação.

### 1.1.5 Susceptibilidade

Faz-se necessário a distinção de algumas nomenclaturas, em especial quanto a Vulnerabilidade e a Susceptibilidade. O sentido dado ao termo susceptibilidade refere-se à tendência, ou seja a possibilidade, que uma área tem de receber impressões, modificações ou adquirir qualidades diferentes das que já tinha (GRIGIO, 2003)

Lopes (2008) define a susceptibilidade (natural) como a probabilidade de ocorrência de um fenômeno potencialmente destruidor, numa determinada área, e completa que pode ser definida como a probabilidade de ocorrência de um “evento” numa determinada área, probabilidade essa baseada nas condições locais da área, tratando-se de uma probabilidade.

Assim, Garcia e Zêzere (2003) aponta a susceptibilidade como a probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno numa dada área com base nos fatores condicionantes do terreno, independentemente do seu período de recorrência.

Nesse sentido a vulnerabilidade apresenta um conceito mais amplo quanto as características e aspectos analisados para considerar a o risco em potencial de uma área, além de apresentar-se conceitualmente mais madura por ser multidimensional, seja na questão espacial e temporal.

### 1.1.6 Risco

Nessa perspectiva de entender a vulnerabilidade, é importante destacar a questão do risco, apesar de serem conteúdos de diferentes conceitos e abordagens, são complementares.

Convencionalmente o risco pode ser expresso pela noção “Risco = Perigo x Vulnerabilidade” (ONU, 2004), sendo a vulnerabilidade as condições determinadas por fatores ou processos físicos, social ou mesmo econômicos que aumentam a susceptibilidade de um determinado grupo e pessoas. O perigo se caracteriza como o potencial de dano de um evento físico, ou de atividade antrópica causadora de perdas de vidas humanas, interrupção de atividade socioeconômica e degradação ambiental (QUADRO 01).

Quadro 1: Conceitos de Risco, Perigo e Vulnerabilidade.

	Risco ( <i>Risk</i> ) <sup>1</sup>	Perigo ( <i>Hazard</i> ) <sup>1</sup>	Susceptibilidade <sup>2 3</sup>	Vulnerabilidade ( <i>Vulnerability</i> ) <sup>1</sup>
Conceito	A probabilidade de dano ou perda (mortes, danos físicos, perdas de propriedades, interrupção de atividades econômicas e danos ambientais) resultante de interações entre perigos naturais ou induzidos pela sociedade, associados a condições vulneráveis.	Um evento, fenômeno ou mesmo atividade humana que seja potencialmente prejudicial e cause mortes ou danos ao patrimônio (Público ou privado), interrupção econômica e degradação ambiental.	Indica a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em áreas de interesse ao uso do solo, expressando-se segundo classes de probabilidade de ocorrência.	Condições determinadas por fatores ou processos físicos, econômicos, sociais, culturais, políticos ou ambientais que aumentem a susceptibilidade de uma comunidade aos impactos de perigos.
Característica	Além expressar uma possibilidade de dano físico, é crucial reconhecer que os riscos são inerentes ou podem ser criados ou existem dentro de sistemas sociais. É importante considerar os contextos sociais em que ocorrem e riscos que as pessoas, portanto, não necessariamente compartilham a mesma percepções de risco e suas causas subjacentes	Perigos podem incluir condições latentes que podem representar ameaças futuras e pode ter diferentes origens: naturais (geológicas, hidrometeorológica e biológica) ou induzida por processos humanos (degradação ambiental e riscos tecnológicos). Riscos podem ser simples, sequencial ou combinados em sua origem e efeitos. Cada perigo é caracterizado pela sua localização, intensidade, frequência e probabilidade.	Probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno em certa área com base em fatores confinantes, independente do período de recorrência.	Por fatores positivos, que aumentam a capacidade das pessoas de lidar com riscos.

ONU (2004)

<sup>2</sup> BRASIL (2004)<sup>3</sup> Garcia e Zêzere (2003)

Fonte: Garcia e Zêzere (2003); ONU (2004) e BRASIL (2004). Org.; Armando Brito da Frota Filho, 2015

De acordo com Rebelo (2010) “risco é uma palavra ligada inicialmente à navegação marítima”. Como qualquer outro risco, o *Risco Natural* relaciona-se com fenômenos potencialmente perigosos e com a presença do homem. Ainda segundo Rebelo (2010), o risco é um fator inerente e onipresente da vida do ser humano, embora nem todos estejam familiarizados com a sua presença. O risco é a tradução de uma ameaça, de um perigo, para aquele que está sujeito a ele (VEYRET, 2007).

De acordo com a ONU (2004), o risco se caracteriza conceitualmente como a probabilidade de consequências danosas, ou perdas esperadas (mortes, ferimentos, danos a propriedades, dano ambiental e danos econômicos) resultante das interações entre o meio natural ou perigos induzidos pelo homem e condições de vulnerabilidade.

Contudo, para se estudar o risco de uma forma mais plena é necessário que se faça uma análise das múltiplas formas de vulnerabilidade e de uma maneira sistêmica, pois dentre a classificação dos riscos, estão os Riscos Naturais, que Sanches (2008) alega que podem ser subdivididos de acordo com sua origem, em físicos: atmosféricos, hidrológicos, geológicos; e os biológicos associados à fauna e à flora. O referido autor ainda pontua que ao se caracterizar os deflagradores de riscos naturais, deve-se levar em conta a ação do homem. Dessa forma, as chuvas fortes podem ser fatores aceleradores de feições erosivas como voçorocas devido a alterações derivadas do fator antrópico como o desmatamento e a compactação do solo.

## **1.2 Bacia Hidrográfica como recorte espacial da análise de vulnerabilidade**

Conforme Carvalho (2009) uma bacia é também uma demarcação na paisagem, além de ser uma das unidades geomorfológicas mais importantes. A Bacia Hidrográfica de acordo com Christofolletti (1980) é definida como a área drenada por um rio ou sistema fluvial, abrangendo a água oriunda da chuva, assim como a que se encontra no sistema e as perdas por evapotranspiração e infiltração e percolação, delimitada por interflúvios. Guerra e Guerra (2010) expõem que uma bacia se trata do conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, subafluentes e nascentes e divisores de água, no qual as águas das chuvas escoam pelas vertentes se concentrando nas depressões longitudinais, ou seja, fundos de vale.

Rodrigues e Adami (2011) completam que a bacia hidrográfica, como sistema, compreende um volume de materiais, predominantemente sólidos e líquidos,

encontrados na superfície terrestre, influenciando no fluxo de matéria e energia de um rio ou de uma rede de drenagem.

Dessa forma, é necessária uma diferenciação entre **Bacia Hidrográfica** e **Bacia de Drenagem**, pois tratam de conceitos diferentes. Enquanto a Bacia de Drenagem engloba somente a rede de drenagem, os cursos d'água, o conceito de Bacia Hidrográfica é mais abrangente, pois inclui a rede de drenagem assim como as vertentes, compreendendo os efeitos diretos e indiretos das ações da água, como aspectos pedogenéticos e geomorfológicos (RODRIGUES e ADAMI, 2011).

A Bacia Hidrográfica se mostra importante, pois além de uma unidade geomorfológica, é uma unidade ambiental e territorial, sendo compreendida como uma célula básica para a análise ambiental (BOTELHO e SILVA, 2004). Carvalho (2009) argumenta que a mesma é “adequada para o tratamento dos componentes e da dinâmica das inter-relações concernentes ao planejamento e à gestão do desenvolvimento, especialmente no âmbito regional”.

De acordo com a Lei das Águas nº 9 433/97, através do reconhecimento da água como um bem econômico e dos conflitos entre os múltiplos interesses e usos dos recursos hídricos, institui a bacia como unidade físico-territorial de planejamento e gestão ambientais.

Portanto, ao se trabalhar com a bacia como recorte espacial de análise há necessidade implícita de uma análise ambiental com cunho holístico ou mesmo sistêmico (CHRISTOFOLETTI, 1979; CHRISTOFOLETTI, 1999; CUNHA e GUERRA, 2000; MONETRIO, 2001; BOTELHO e SILVA, 2004; CARVALHO, 2009). A Bacia Hidrográfica também é um sistema que engloba outros sistemas, incluindo tanto o sistema fluvial como o sistema das vertentes. Christofolletti (1980) assinala esse caráter (geo) sistêmico, pois se trata de um sistema aberto, onde há entrada de matéria e energia, recebendo influência geológica, geomorfológica, pedológica, climatológica, biológica e antrópica.

E ao se tratar de sistemas, o mesmo pode se encontrar em equilíbrio, sendo um equilíbrio positivo ou negativo (desequilíbrio). Botelho e Silva (2004) destacam que ao se distinguir o estado dos elementos que compõem o sistema hidrológico (solo, água, ar, vegetação, etc.) e os processos relacionados (infiltração, escoamento, inundação etc.) é possível avaliar o equilíbrio do sistema ou ainda a qualidade ambiental nele existente.

No que se refere aos desequilíbrios, ou equilíbrios negativos, no interior de uma bacia em ambientes urbanos, há uma expressiva superfície impermeabilizada, onde ocorre geração de importantes fluxos superficiais com reduzida taxa de infiltração de água no solo (BOTELHO e SILVA, 2004). Assim, Botelho (2011) descreve que as bacias hidrográficas urbanas são marcadas pela diminuição do tempo de concentração de suas águas e consequente aumento de alagações, quando comparadas às condições anteriores à urbanização.

Para Tucci e Clarke (1997) e Tucci (2008), dentro da bacia, a água que entra no sistema pode percorrer diversos caminhos que variam desde o escoamento em tronco, evaporação e evapotranspiração, fluxos superficiais e subsuperficiais e infiltração, enquanto a bacia em ambiente urbano, a diversidade de caminhos possíveis para a água se reduz para o binômio escoamento e infiltração, no qual o primeiro se sobressai (BOTELHO, 2011), e por sua vez acelera os processos de cheias no sistema, uma vez que a água não infiltra com a mesma facilidade, e onde o escoamento é intensificado, em especial, quando associado ao lançamento de efluentes, ou águas cinzas ao sistema, o que colabora para o processo de cheias, podendo ocasionar em encostas o desencadeamento de processos erosivos.

### 1.2.1 Parâmetros morfométricos de análise

A fim de compreender os fenômenos que afetam os processos erosivos e sedimentológicos, a análise da morfometria de bacia hidrográfica, em especial, os aspectos referentes à drenagem, relevo, geologia, pedologia entre outros, auxiliam na elucidação e compreensão de questões associadas à dinâmica da bacia (SILVA et al., 2003), que se caracteriza como uma vital ferramenta para a identificação dinâmica deste sistema hidrogeomorfológico e possibilita um diagnóstico por meio de valores relacionados a um conjunto de parâmetros referentes à bacia.

A análise sobre os parâmetros morfométricos versa sobre o estudo das características dimensionais das bacias hidrográficas, indicadores do comportamento apresentado pela bacia, seja pelo tempo em que a água permanece no sistema, ou pela probabilidade de enchentes, ou ainda, pelo nível de dissecação relevo, dentre outras.

Dentre esses atributos se destacam: **Características morfológicas da bacia:** Área (A), Perímetro (P), Largura (B) e Comprimento (L); **Parâmetros de Drenagem:** Densidade de Drenagem (Dd) , Densidade Hidrográfica (Dh), Extensão do Percurso

Superficial ( $E_{ps}$ ), Índice de Sinuosidade ( $I_{sin}$ ) e Coeficiente de Manutenção ( $C_{man}$ ); **Características Geomorfológicas:** Relação do Relevo ( $R_h$ ), Gradiente dos Canal Principal ( $G$ ), Índice de Rugosidade ( $I_r$ ), Coeficiente de Massividade ( $C_{mas}$ ) e Coeficiente Orográfico ( $C_o$ ) e; **Comparação com o Círculo:** Relação de Enlongamento ( $R_e$ ), Índice de Circularidade ( $I_c$ ) e Índice de Compacidade ( $I_k$ )

### **Características Morfológicas**

- Área e Perímetro

De acordo com Strahler (1957), a área de uma bacia hidrográfica é um aspecto determinante no escoamento superficial total ou produção de sedimento. Para fins de comparação de bacias da mesma ordem ou magnitude, percebe-se que a área de uma bacia aumenta exponencialmente conforme a ordem dos canais, pois havendo similaridade geométrica a medida da área será um indicador do tamanho da unidade de relevo.

É possível caracterizar a bacia no que se refere a sua área, pois de acordo com Porto et al. (1993) bacias pequenas são caracterizadas por áreas inferiores a 2,5 km<sup>2</sup>, médias entre 2,5 e 1000 km<sup>2</sup> e bacias acima de 1000 km<sup>2</sup> são consideradas grandes. O perímetro é o comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas (TEODORO et al., 2007).

### **Parâmetros de Drenagem**

- Densidade de Drenagem ( $Dd$ )

Strahler (1957) afirma que a Densidade de Drenagem é um indicador linear dos elementos do relevo em uma Bacia Hidrográfica, somado ao comprimento total dos canais no interior da bacia dividido pela sua área. Horton (1945) aponta que a erosão influencia uma mudança nos canais, pois eleva a densidade de drenagem devido ao aumento da extensão dos canais e número de tributários de menor escala. Além disso, à medida em que a densidade de drenagem aumenta, os tamanhos das unidades de drenagem individuais decrescem proporcionalmente (STRAHLER, 1957).

Para Christofletti (1969), a finalidade deste índice é a comparação entre a frequência ou ocorrência de canais fluviais existentes na bacia em km<sup>2</sup>, e sua

importância é apresentação de uma relação inversa com o comprimento dos rios. Em proporção ao aumento do valor da densidade de drenagem, há uma diminuição no tamanho dos cursos hídricos da bacia.

- Densidade Hidrográfica ( $D_h$ )

De acordo com Horton (1932) a densidade hidrográfica tende a variar com o modelado do relevo (*land slope*). O fluxo superficial (*runoff*) de várias partes do relevo da bacia hidrográfica é descarregado nos cursos d'água. Dessa forma, o tempo exigido para a água fluir por uma certa distância é diretamente proporcional ao comprimento do canal.

O comprimento de todos os cursos d'água é medido para determinar a densidade de drenagem, pois o número de canais de uma bacia é uma noção básica para demonstrar sua magnitude e representa o comportamento hidrológico da área em questão, mostrando assim sua capacidade de gerar novos cursos d'água (CRISTOFOLETTI, 1980). Horton (1932) faz ressalvas no sentido de que as formações de novos cursos não dependem apenas de aspectos geológico-geomorfológicos, mas também de questões climáticas, como as estações mais chuvosas e umidade no ano. Logo, a densidade é maior em regiões úmidas que em regiões áridas (HORTON, 1932)

- Extensão do Percurso Superficial ( $E_{ps}$ )

De acordo com Christofolletti (1980), a Extensão do Percurso Superficial ( $E_{ps}$ ) é a distância média percorrida pela água entre o interflúvio e o canal permanente. É também considerado um indicador importante para entender a dissecação do relevo.

- Índice de Sinuosidade ( $I_{sin}$ )

Esse parâmetro é uma das maneiras de representar a forma do canal, considerando a carga de sedimentos e estrutura geológica (CHEREM, 2008), além de ser um controlador do fluxo e vazão do canal, pois quanto maior a sinuosidade, maior será a extensão do percurso e menor a velocidade (BORSATO, 2005).

Cunha (1996) afirma que a carga dendrítica influencia na forma do canal, pois canais meandantes relacionam-se com elevados teores de argila e silte, os anastomosados com cargas de areia.

- Coeficiente de manutenção (*C<sub>man</sub>*)

Segundo Christofolletti (1980), esse parâmetro visa fornecer a área mínima necessária para o desenvolvimento de um metro de canal. Além disso, essa constante pode ser aplicada nas partes não dissecadas do sistema de drenagem para auxiliar na previsão de áreas com potencial erosivo (SCHUMM, 1956).

- Relação entre o comprimento do rio principal e a área da bacia (**L de Hack**)

Ocorre uma relação empírica entre o comprimento do canal e a área da bacia hidrográfica, a qual permite que o comprimento geométrico do curso de água possa ser calculado pela expressão proposta por Hack (CHRISTOFOLETTI, 1980), gerando a hipótese do alongamento da bacia como o resultado da procura dos sistemas fluviais por uma configuração de drenagem, cujo consumo de energia seja minimizado (BORSATO, 2005).

### **Característica Geomorfológicas**

- Relação de Relevo ( $R_h$ )

Conforme Carbono (2010) quanto à Relação de Relevo ( $R_h$ ), trata-se da razão entre o desnível total da bacia e o seu comprimento, sendo a relação entre o relevo total da bacia e o maior comprimento da mesma (SCHUMM, 1956). Strahler (1964) apud Borsato (2005) aponta que esse parâmetro indica a declividade geral de uma bacia de drenagem e é um indicador da intensidade da erosão, o qual opera nas vertentes da bacia, que permite comparações entre unidades topográficas e litológicas distintas, mostrando-se útil para estimativas de produção de sedimentos, caso os parâmetros climáticos estejam estabelecidos (SHUMM, 1956).

- Gradiente dos Canal Principal ( $G$ )

O gradiente do canal é a relação entre a diferença altimétrica entre a nascente e a foz do rio com o comprimento do mesmo, e sua finalidade é indicar a declividade do curso principal (CHRISTOFOLETTI, 1980).

- Índice de Rugosidade ( $I_r$ )

Esse aspecto visa analisar a topografia de uma bacia combinando as características de declividade e de extensão das vertentes com a Densidade de

Drenagem ( $D_d$ ) (CHRISTOFOLETTI, 1980). Esse parâmetro é diretamente proporcional à  $D_d$ . Logo, se esse aumentar e a amplitude altimétrica permanece constante, a distância média dos canais diminuirá. Patton e Baker (1976) apud Christofolletti (1980) mostram que índices mais elevados, ou seja, que possuem uma rugosidade mais fina tendem a rápidas cheias.

- Coeficiente de Massividade ( $C_{mas}$ ) e Coeficiente Orográfico ( $C_o$ )

Christofolletti (1980) Frédéric Fournier forneceu elementos para calcular o volume rochoso presente na bacia ( $C_o$ ) e sua massa remanescente ( $C_{mas}$ ), os quais são importantes para a definição do grau de resistência das rochas, que por sua vez definem a relação entre erosão e infiltração de água no solo (SOUZA e RODRIGUES, 2012).

### **Comparação com o Círculo**

Índice de Circularidade é a comparação entre a bacia hidrográfica e um círculo. Esse índice foi desenvolvido por Miller (1953); Relação de Enlongamento, criado por Schumm (1956); e Coeficiente de Compacidade elaborado por Gravelius (1914).

- Relação de Enlongamento ( $R_e$ )

Conforme Schumm (1956), Cardoso et al. (2012) e Macedo et al (2013) esse parâmetro é obtido através da relação entre a largura média e comprimento axial da bacia, sendo medido da foz à cabeceira mais distante. Esse fator permite uma análise no que tange a facilidade de uma bacia de ser inundada, contudo não implica em um formato específico para a mesma (BORSATO, 2005). Christofolletti (1969) indica que este parâmetro é semelhante ao Índice de Circularidade.

A Relação de Enlogamento de Schumm (1956) é a razão entre o diâmetro do círculo com a área da bacia, que pode variar de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1 (um) mais próximo ao círculo ela se encontra.

- Índice de Circularidade ( $I_c$ )

Parâmetro desenvolvido por Müller (1953) e de acordo como Christofolletti (1980) é a relação entre a área da bacia e a área do círculo de mesmo perímetro, onde o valor máximo que pode ser obtido é 1,0. Quanto mais próximo ao valor máximo, mais

próximo será ao formato de um círculo, no qual segundo Teodoro et al. (2007), aproxima-se da forma circular e diminui à medida que a forma torna-se alongada. Essa variação do  $I_c$  é classificada por Müller (1953) e Schumm (1956) de três formas: valores  $< 0,51$  os quais demonstram que a bacia tende a ser mais alongada e tem como tendência o favorecimento do escoamento;  $= 0,51$  que demonstra um nível moderado de escoamento; valores  $> 0,51$  que apresentam forte indício de que a bacia tende a favorecer o escoamento da chuva, o que pouco favorece os processos de enchentes.

- Coeficiente de Compacidade ( $k_c$ )

De acordo com Borsato (2005) e Cardoso et al. (2012), esse índice foi desenvolvido por Gravelius (1914) e mostra a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de área igual presente na mesma. Quanto mais irregular o formato da bacia, maior será o índice, variando de 1 ao infinito, sendo 1 o círculo perfeito (CARDOSO et al.,2012).

### 1.3 O processo erosivo

A modificação do relevo promove a criação, indução, intensificação ou modificação do comportamento nos processos geomorfológicos (FUJIMOTO, 2008). Ravinas e voçorocas podem ser consideradas como incisões que resultam da tendência de sistemas naturais a atingir um estado de equilíbrio entre energia disponível e eficiência do sistema que dissipa energia resultante de desequilíbrios naturais induzidos pelo homem. (OLIVEIRA, 1999).

Guerra e Guerra (2010) assinalam que a erosão consiste da destruição das saliências e reentrâncias do relevo, sendo um conjunto de ações modeladoras da paisagem. Nesse processo há trabalho mecânico de desagregação do material e, concomitantemente, o processo de intemperismo. Thornes (1984) afirma que a erosão só ocorre quando as forças de arraste e transporte são superiores à de resistência apresentada no solo.

Conforme Horton (1945) há sempre de dois a três processos distintos, porém que se relacionam envolvendo o processo erosivo na superfície do solo: (1) destacamento do material; (2) remoção ou transporte do material erodido por meio do fluxo em lençol (*sheet flow*); (3) deposição do material transportado ou sedimentação, todavia Horton

(1945) aponta que não ocorrendo a deposição do material o mesmo será carregado até o canal mais próximo.

Autores como Suguio (2003), Vieira (2008) e Guerra e Guerra (2010) afirmam que o processo erosivo propriamente dito, consiste de duas etapas o (1) destacamento e o (2) transporte, sendo a deposição um outro processo distinto denominado de sedimentação.

Kirkby (1982) explana que a erosão de solos é a eliminação das partículas inorgânicas do solo e dos de seus nutrientes, contudo solos com altos níveis de argila tendem a ser mais resistentes aos processos erosivos. Além disso, a presença de matéria orgânica e nutrientes, como o nitrogênio, se mostram igualmente importantes nesse sentido.

Quando a precipitação não consegue infiltrar no solo, ela flui pela superfície com uma velocidade mais rápida e capaz de destacar e carregar materiais por meio da força do seu fluxo e esse processo intensificado é associado ao desenvolvimento de sulcos, ravinas e voçorocas (KIRKBY, 1982).

### 1.3.1 Sulcos

Guerra e Guerra (2010) apontam que o sulco é um tipo de incisão formada no solo em decorrência do escoamento superficial concentrado, resultado de pequenas irregularidades na declividade do terreno favorecendo o escoamento, destacamento e transporte de materiais (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

De acordo com Schumm (1956), a primeira manifestação clara da ação do fluxo superficial (*runoff*) concentrado em formato de canais é o sulco (*rill*), os quais são canais rasos erodidos na vertente, sua profundidade está relacionada diretamente à rapidez da degradação, são consideradas feições efêmeras mas podem desempenhar variados papéis no ciclo erosivo, transformando-se em ravinas ou mesmo voçorocas.

### 1.3.2 Ravinas

O escoamento em lençol (*Sheet Wash*), em locais onde haja desníveis e irregularidades topográficas, torna-se o escoamento concentrado, gerando um maior potencial cinético e carregando mais partículas, assim desenvolvendo pequenos canais no solo (SELBY, 1982).

Para Guerra e Guerra (2010), a ravina é um tipo de sulco que foi aprofundado e produzido no terreno devido ao trabalho das águas do escoamento, que se diferem dos sulcos por possuírem formato de **V**, com profundidade superior a 50 cm e inferior a 150 cm. Seu crescimento segue a gravidade, ou seja, crescem de montante a jusante. Guerra (2008) aponta que as ravinas podem ser características efêmeras nas encostas, e formadas por um evento chuvoso, obliteradas por uma nova tempestade. Da mesma forma, Schumm (1956) afirma que as ravinas (*rills*) aparecem e desaparecem com facilidade no relevo. São criadas em uma estação e soterradas por sedimentos em outra.

Para Selby (1982), os sulcos, as ravinas e mesmo as voçorocas podem se desenvolver por uma forma diferente do fluxo superficial concentrado, pois quando a água na subsuperfície do solo está em zonas mais profundas do horizonte pode criar dutos. Se a intensidade da precipitação for forte o suficiente para cisalhar, excederá a tensão do solo, causando o rompimento da cobertura do solo e o canal será formado.

### 1.3.3 Voçorocas

Ab'Saber (1968) assinala que as voçorocas são derivadas de processos de ravinamentos intensificados por fluxos superficiais, além disso aponta que as voçorocas se desenvolvem por um processo de retroalimentação.

Entretanto, estas feições possuem diversas origens desde o desenvolvimento de uma ravina, o desabamento de um duto (*piping*) (GUERRA e GUERRA, 2010), ou ainda podem ser ocasionadas em um único evento como por grandes concentrações de enxurradas, ou pelo processo cumulativo da precipitação de vários anos no mesmo sulco, ampliando-o e entalhando-o pelo deslocamento de grandes quantidades de solo e de sedimentos (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

De acordo com Guerra (2008), Maçal e Guerra (2009) e Guerra e Guerra (2010), voçorocas são escavações no solo ou em rochas decompostas que apresentam paredes laterais íngremes e fundo chato, ocorrendo fluxo de água no seu interior durante eventos chuvosos. Para Guerra (2008), estas incisões podem se aprofundar de tal modo que alcançam o lençol freático.

Voçorocas podem ser formadas em qualquer diferença de declividade ou em áreas de pouca vegetação com material menos coeso ou inconsolidado, sendo mais comuns em depósitos aluviais ou coluviais, areais parcialmente inconsolidados e detritos de movimentos de massa (SELBY, 1982).

Devido ao seu crescimento rápido, Selby (1982) associa seu surgimento com desequilíbrios na paisagem como desmatamento ou queimadas e eventos extremos de precipitação. Segundo o autor, as voçorocas se desenvolvem por duas causas principais: 1) há um aumento na quantidade de água escoada, ou; 2) não alteração na quantidade de água escoada e sim no número de fluxos superficiais devido à falta de vegetação.

Vieira (2008) caracteriza a voçoroca como feição erosiva em formato de **U**, pois apresenta paredes verticais e fundo plano, com profundidade superior a 1,5 m, podendo apresentar afloramento do lençol freático.

O formato em **U**, com fundo plano ou chato de uma voçoroca ocorre devido a dois fatores: o primeiro é resultado do encontro da parte inferior da voçoroca com um plano mais resistente e de difícil erosão; e o segundo, como explanam Augustin e Aranha (2006), os sedimentos que não são carregados na mesma velocidade da deposição ficam retidos no fundo da voçoroca e são aplainados.

Bertoni e Lombardi Neto (2010) apontam que quando a incisão se desenvolve sobre um solo que apresenta horizontes com materiais consistentes, a incisão tende a possuir paredes verticais e estará sujeita a desmoronamentos, caso o solo seja mais friável. Além disso, se o material do subsolo, ou dos horizontes inferiores forem mais resistentes, as paredes tenderão a ser mais estáveis, o que favorecerá o formato em **U**.

Segundo Evans (1984), as voçorocas se formam quando a velocidade do fluxo de água aumenta para velocidade de aproximadamente 30 cm/s e o fluxo se torna turbilhonar, carregando volumes de sedimentos maiores que a erosão laminar. Evans (1984) salienta que o desenvolvimento de voçorocas leva em consideração outros fatores de solo, a velocidade e profundidade do fluxo de água.

Para Thornes (1984), as voçorocas crescem por um processo de retroalimentação e se assemelham a pequenos canais fluviais, exceto pela deposição de materiais oriundos das vertentes, pois podem ser caracterizadas como parte do sistema hidrográfico da bacia, já que durante o período de cheia do rio, dependendo de sua posição, a incisão pode ser inundada.

Augustin e Aranha (2006) assinalam que as voçorocas possuem um processo de retroalimentação, no qual a intensidade do processo erosivo ocorre devido ao processo de erosão concomitantes a movimentos de massa, associados à ausência de coesão do material entre a parede e o fundo da voçoroca. No que se refere ao crescimento desta

feição erosiva, Oliveira (1989) aponta que elas apresentam um crescimento à remontante (*headward erosion*), em direção ao topo da vertente.

Além disso, Oliveira (1989) classifica as voçorocas em Conectada, Desconectada e Integrada e faz referência a sua posição como canal da rede de drenagem, já que esta feição pode ser considerada como um canal de primeira ordem.

Conectada: é quando a voçoroca se encontra ligada ao sistema de drenagem, e a voçoroca cresce à remontante, ou seja, em direção à cabeceira. Oliveira (1989) aponta que este tipo de incisão ocorre devido à erosão por escoamento (*seepage erosion*). O fato de se encontrarem na base da vertente, em locais de deposição coluvial e aluvial, facilita o processo erosivo, em função da baixa coesão destes materiais.

Heede (1975) apud Thornes (1982) assinala que este tipo de voçoroca se inicia próximo a cursos d'água. Além disso, Selby (1982) aponta que estas podem se desenvolver a partir de cicatrizes de movimentos de massa. Esse tipo de voçoroca cresce devido ao desenvolvimento e crescimento de ravinas (*rills*) e esse tipo de incisão normalmente cresce em largura e profundidade à medida que o fluxo superficial aumenta. Em períodos chuvosos podem apresentar um fluxo de água que se conecta do fundo da voçoroca à rede de drenagem (SELBY, 1982).

Desconectada: Originam-se principalmente devido ao fluxo hortoniano, no qual o fluxo tem papel importante na escavação, entalhamento e alargamento da incisão (OLIVEIRA, 1989). De acordo com Selby (1982), esse tipo de incisão tende a se desenvolver no meio da encosta. Ocorrendo em pontos da vertente em que não haja vegetação. Assim, o fluxo começa a formar uma cabeceira que avança no sentido do topo (THORNES, 1982), deixando um “leque” de sedimentos (*debris fan*) na parte inferior da vertente (SELBY, 1982).

Integrada: É a junção das voçorocas Conectada e Desconectada que se conectam em um ponto intermediário da encosta, onde a declividade for menos abrupta em direção a jusante. Este tipo de voçoroca é considerada como o estágio evolutivo final da feição erosiva, significando que este tipo de voçoroca implica na presença dos outros dois tipos na mesma encosta, e essa característica está mais associada a vertentes com altitudes mais elevadas e declividade acentuada (OLIVEIRA, 1989).

Vieira (2008) desenvolveu um modelo para definir as voçorocas por formas, um modelo diferente do clássico de Bigarella e Mazuchowski (1985) baseado em modelos de padrão de drenagem hidrográfica. O modelo de Vieira (2008) considera as formas

mais frequentes de voçorocas existentes na cidade de Manaus, em que cada forma é resultante de processos específicos e de condições ambientais características de seu local de ocorrência, tais como: geologia, geomorfologia (forma e declividade), solo, cobertura vegetal e sistema de drenagem superficial ou subsuperficial. Assim, as formas destacadas pelo referido autor são: linear, bifurcada, ramificada, irregular e retangular.

a) Linear: Forma ligada à existência de uma zona principal de convergência de drenagem, influenciada ainda pelas características de resistência e/ou ocorrência de controle estrutural evidente.

b) Bifurcada: Apresenta duas zonas de contribuição de fluxos superficiais concentrados.

c) Ramificada: Caracterizada pela ocorrência de vários canais de drenagem superficiais, fluxos superficiais difusos ocorrendo geralmente em solo do tipo Espodossolo ou em outros solos onde a declividade do terreno é relativamente baixa.

d) Irregular: Ligada à existência de um ou mais fluxos superficiais concentrados, caracterizando-se como transitória entre outras formas existentes.

e) Retangular: A forma final da expansão das outras formas descritas próximas à estabilização natural.

E no que tange ao tamanho das feições erosivas, Vieira e Albuquerque (2004) classificam-nas de acordo com seu volume erodido, visualizando a intensidade da erosão e avaliando as taxas de deposições realizadas que ocasionam assoreamento em cursos da rede drenagem. O tamanho é dividido em 5 (cinco) classes, desde “muito pequena” com volume erodido de até  $999 \text{ m}^3$ , a “muito grande” com mais de  $40\,000 \text{ m}^3$  erodidos.

#### 1.3.4 Feições de Retrabalramento

As feições de retrabalamento ou feições secundárias consistem de processos erosivos secundários ocorridos no interior de voçorocas, que atestam que a feição erosiva principal se encontra ativa e colabora para o seu crescimento.

- Alcovas de regressão

Como apontam Augustin e Aranha (2006), a ausência de coesão entre o fundo e a parede da voçoroca, possibilita o desenvolvimento de um processo erosivo secundário, por meio de fluxos que escorrem pelas paredes da voçoroca e escoamento superficial, assim como por exfiltração do lençol freático. À medida que estas feições se desenvolvem, podem propiciar o desmoronamento das camadas superiores devido à perda de sustentação (VIEIRA, 2008).

- Marmitas

Cavidades resultantes de águas turbilhonares que aparecem quando há desníveis topográficos abruptos e desenvolvem-se devido às quedas d'águas ou fluxo turbilhonar, sendo produzidas pelo eixo vertical dos turbilhões (GUERRA e GUERRA, 2010). No centro das marmitas podem ser encontrados seixos de areias responsáveis pela erosão que são desenvolvidas em vários pontos da voçoroca: no fundo, com sua superfície plana e nos degraus existentes no interior da feição erosiva.

- Costelas

De acordo com Oliveira (1999) e Vieira (2008), são feições de retrabalhamento que se desenvolvem em materiais de origem diversa (aluvial, coluvial, eólico etc), indicando variações em profundidade, da resistência ao cisalhamento dos materiais de cobertura superficial. Estas feições são produzidas pela ação de filetes subverticais ou por exfiltração.

- Pedestais/ *demoiselles*

Conforme Oliveira (1999) e Vieira (2008), os pedestais se formam quando um material mais resistente, quer seja um grânulo, seixo ou mesmo uma folha, dificulta a ação erosiva do salpicamento. Dessa forma, o fluxo superficial difuso erode o solo ao redor, modela a estrutura e, em alguns casos, é possível observar o desenvolvimento de crostas ferruginosas na parte superior. Vieira (2008) aponta que se formam tanto no interior de feições erosivas, como em qualquer solo sem vegetação.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Localização

O recorte espacial da área de estudo é composto pela Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, localizada na Zona Leste da cidade de Manaus (FIGURA 1). Essa bacia ocupa área de aproximadamente 24,93 km<sup>2</sup>, composta parcial ou integralmente por 8 (oito) bairros, sendo eles: Distrito Industrial II, Puraquequara, Colônia Antônio Aleixo, Mauzinho, São José do Operário, Tancredo Neves, Jorge Teixeira e Zumbi.

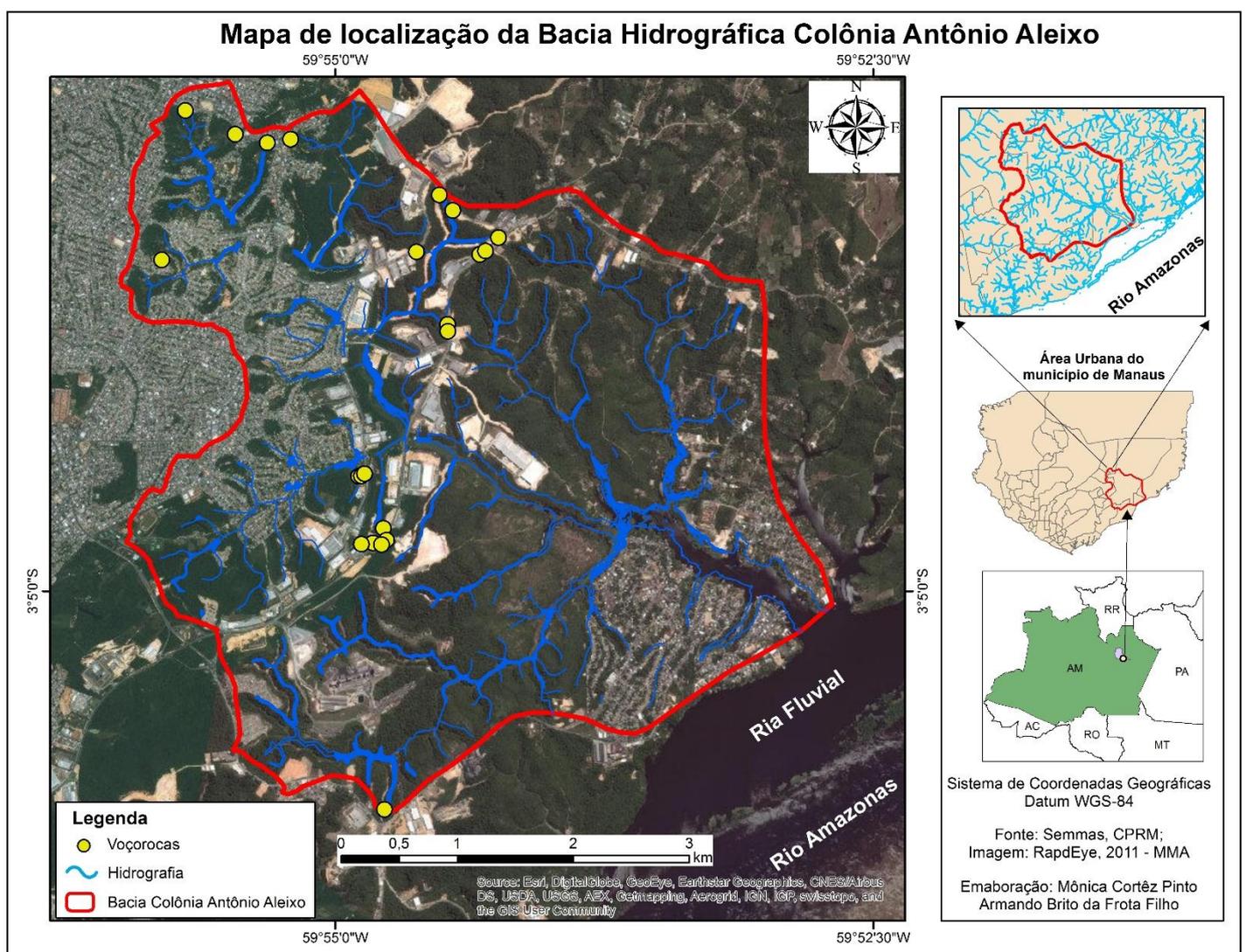


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo: Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo.  
Fonte: SEMMAS. 2015. Elaboração: Mônica Cortéz Pinto. Org. Armando Brito da Frota Filho.

## 2.2 Aspectos Fisiográficos

### 2.2.1 Geologia

A cidade de Manaus está localizada na Bacia Sedimentar do Amazonas, que é uma das 4 (quatro) bacias sedimentares que compõem a Bacia Sedimentar Amazônica e a Província Estrutural Amazônica, uma grande área separando o Escudo Cristalino das Guianas e o Escudo Brasileiro. A bacia comporta sequências predominantemente marinhas do Paleozóico e Continental do Mesozóico e Cenozóico. Consiste de uma fase de transgressão marinha no qual houve processo de deposição na região no período Ordoviciano, com regressão no Siluriano, retornando no Devoniano. Retira-se no Carbonífero Inferior e volta, pela última vez, no fim do Carbonífero e princípio do Permiano (BEZERRA, 1989).

No Cretáceo, a região da Bacia Sedimentar do Amazonas sofreu abatimento que proporcionou um processo de sedimentação clástica flúvio-lacustres de ambiente continental (IGREJA, 2000), constituindo a Formação Alter do Chão, na qual a cidade de Manaus está assentada. Assim Costa et al. (1978) apud Vieira (2008) afirmam que os arenitos apresentam granulação que varia de fina a grossa com coloração branca, rósea, vermelha e cinza-claro, podendo apresentar concreções lateríticas. Mais especificamente em Manaus, predomina o Arenito Manaus, descrito como horizontalmente sobreposto com coloração esbranquiçada podendo ser observado em afloramentos nas margens do Rio Negro, em cursos d'água no interior da cidade (igarapés) e mesmo em voçorocas (VIEIRA, 2008).

Sobre a Formação Alter do Chão, Igreja (2000) aponta que:

Um dos aspectos característicos quando dos estudos dos afloramentos da Sequência Alter do Chão é a frequência da coloração vermelha de variada tonalidade dos arenitos e argilitos, que se interdigitam, entrecortam-se ou mosqueiam-se com nódulos, níveis, camadas, juntas e fraturas amarelo-esbranquiçadas, podendo atingir ao branco leitoso. p 123.

A neotectônica deriva do Mioceno (24 Ma.), é responsável pela geomorfologia da área representada pelos lineamentos e controle estrutural de grandes rios até feições erosivas, apresentando falhas normais predominantemente no sentido ENE-WSW<sup>1</sup> e E-W. Silva (2005) mapeou falhas normais NE-SW na cidade de Manaus correspondente às orientações das principais falhas da região amazônica, que controlam a direção de

---

<sup>1</sup> Este-nordeste – Oeste-sudoeste

canais fluviais assim como de feições erosivas do tipo voçoroca que podem influenciar na direção de crescimento da incisão (ABREU et al., 2012). Na Figura 2, pode ser vista uma voçoroca com controle estrutural com direção NW–SE, percebida pela descontinuidade dos horizontes do solo, com o Horizonte B ao lado do Horizonte C.

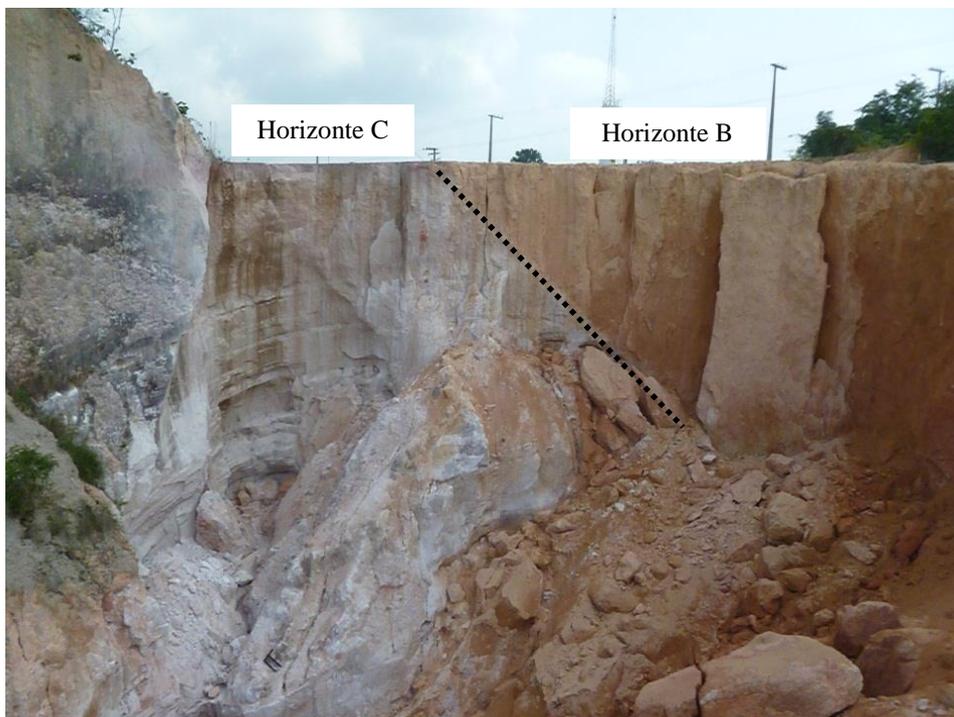


Figura 2: Voçoroca com Controle Estrutural na Bacia Colônia Antônio Aleixo. Falha Normal NW-SE  
Fonte: Nádia Rafaela Pereira de Abreu, 2012.

### 2.2.2 Geomorfologia

A região da cidade de Manaus está na Unidade Morfoestrutural do Planalto Dissecado do Rio Trombetas/Rio Negro (IGREJA, 2000; SILVA, 2005). Apresenta geoestruturas com fácil descrição nas colinas e interflúvios tabulares, fornece exposições neotectônicas nas escarpas fluviais, cachoeiras, e nos cortes íngremes das ruas e avenidas da Cidade de Manaus.

É a maior unidade geomorfológica da região (FIGURA 03), representada por um sistema de colinas pequenas e médias tabuliformes pertencentes a uma vasta seção de um tabuleiro de sedimentos terciários, que varia com cotas entre 50 a 100 metros, com vales fechados, estreitos e encaixados e zonas de interflúvios estreitas e alongadas (NW-SE e NE-SW) que separam amplas bacias de drenagens assimétricas, além de drenagens subdendríticas, desenvolvidas sobre a Formação Alter do Chão (AB'SABER, 1953; SILVA, 2005; VIEIRA, 2008).

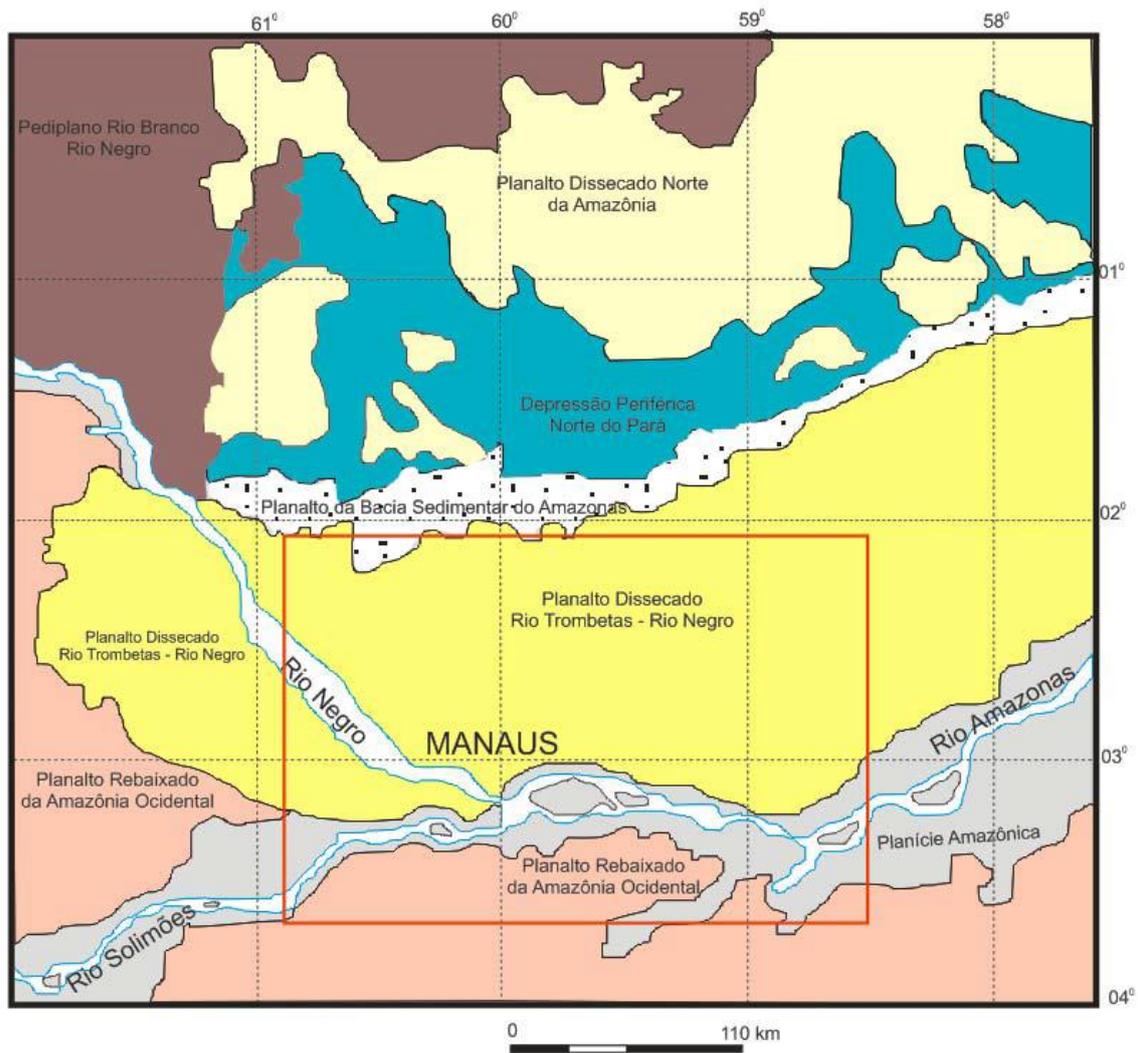


Figura 3: Mapa das unidades morfoestruturais, em destaque a área de Manaus.  
Fonte: Lima (2010)

A Zona Leste da cidade de Manaus se destaca pela existência de platôs que terminam em encostas de grande declividade, curtas e com predominância da forma convexa (VIEIRA, 2008), uma ruptura da declividade da vertente e fundos de vales planos (LUCAS, 1988). Com exceção do ponto mais alto localizado na Reserva Adolfo Duke no setor norte de Manaus, é a região com maior altimetria da cidade, possuindo cotas que variam 24 metros no seu ponto mais baixo a 100 metros nas áreas mais altas, nos interflúvios (FIGURA 4), e apresenta vertentes com forte declividade que possibilitam o desenvolvimento de intensos processos erosivos, resultando em alto nível de dissecação do relevo.

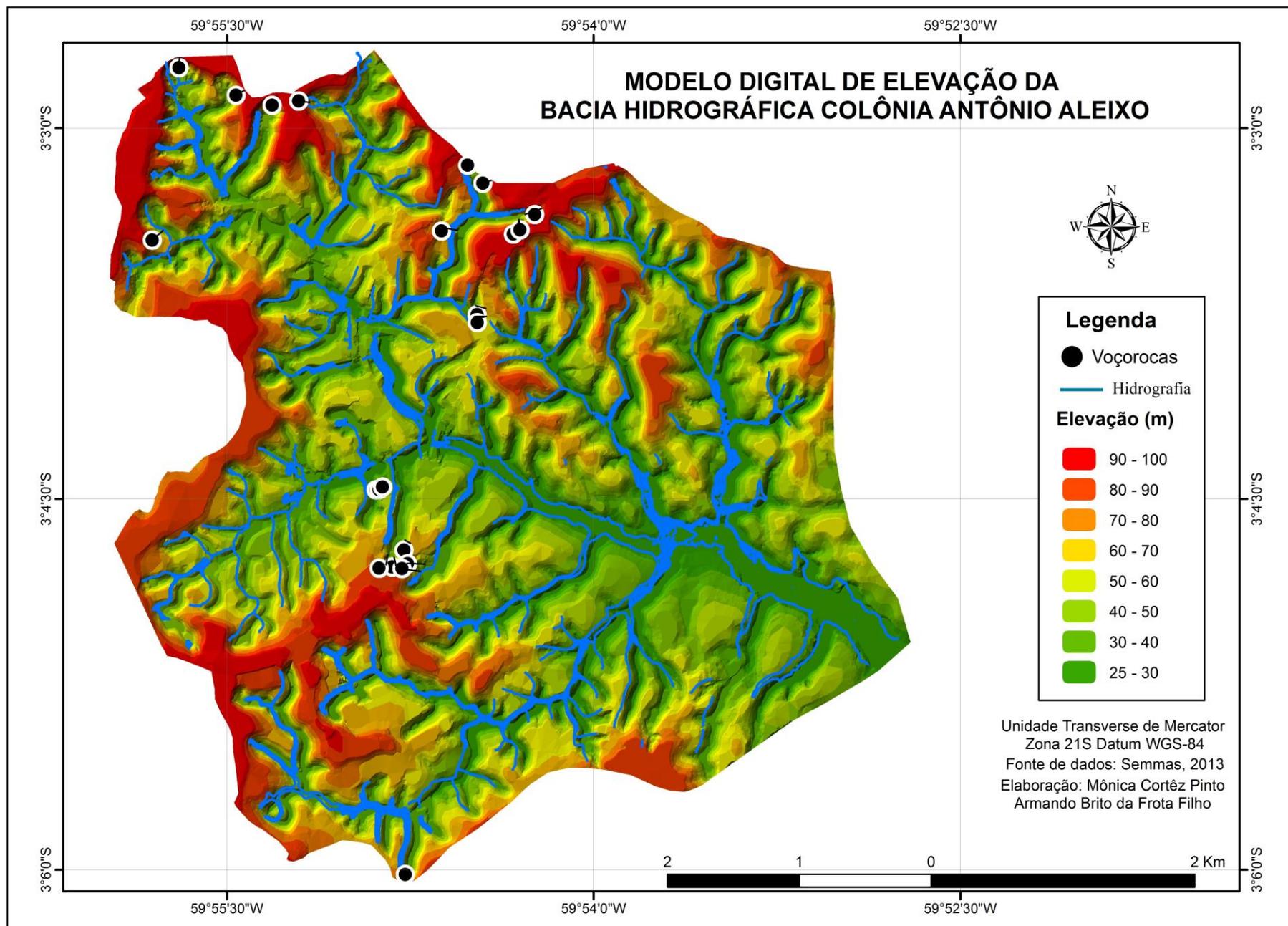


Figura 4: Modelos Digital de Elevação - Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo.  
Fonte: SEMMAS, 2015. Elaboração: Mônica Cortêz Pinto. Organização: Armando Brito da Frota Filho.

Assim, Sarges et al. (2011) apontam que o intervalo altimétrico entre 25 e 65 m coincide com vales e planícies de tributários dos rios Negro e Amazonas, constituído por terraços fluviais e terraços erosivos. Na faixa altimétrica entre 65 e 90 m localizam-se as vertentes dos interflúvios tabulares estreitos e com elevado grau de entalhamento, característica recorrente na Zona Leste de Manaus. O intervalo altimétrico entre 90 e 115 m é representativo dos divisores de drenagens ramificados e alongados na direção NW-SE e N-S, no que se refere ao leste e norte da cidade.

Sarges et al. (2011) assinalam que a região de Manaus e suas adjacências passam por um processo de soerguimento variando entre um estágio intermediário a tardio, e quando a intensidade do processo é menor ou igual a taxa de incisão fluvial, os processos de denudação desencadeiam uma progressiva mudança da forma de relevo inicial mediante o gradual rebaixamento de topos dos interflúvios e suavização da inclinação das vertentes por processos de intemperismo, erosão e movimentos de massa que resultam na elaboração do escalonamento topográfico, num processo de dissecação regional da área.

A Zona Leste da cidade de Manaus também apresenta o maior grau de entalhamento da cidade, onde se verificam encostas com maior declividade, mais curtas, vales mais encaixados, platôs mais estreitos e as maiores cotas altimétricas. Diferente principalmente da zona Oeste, onde há encostas mais longas, vales amplos, menores declividades e menores altitudes (VIEIRA, 2008).

Quanto ao desenvolvimento de processos erosivos, Vieira (2008) aponta que predominam em Manaus voçorocas sobre encostas com bases convexas, que perfaz 66% (n=60), enquanto as restantes distribuem-se nas encostas côncavas incidindo em 8,8% (n=8); 6,5% (n=6) nas encostas retilíneas; 8,8% (n=8) sobre os baixios e 9,9% (n=9) sobre os taludes. A declividade onde ocorre varia de 2° a 44° predominando nas porções de maior declividade do terreno (encosta, baixio ou talude (VIEIRA, 2008).

### 2.2.3 Solo

A cidade de Manaus, conforme Lucas et al. (1984) possui dois polos de diferenciação pedológicas observáveis, o primeiro: Polo Argiloso caracterizado pelos Latossolos muito argilosos (70% de argila a 5 cm de profundidade, 85% a partir de 50 cm) de cor amarela a vermelho-amarela, associados à vegetação de floresta densa; e o

segundo, sendo Polo Arenoso caracterizado pelos Espodossolos<sup>2</sup> que apresentam horizontes de areia branca, atingindo localmente vários metros de espessura, associados a campinas e vegetações baixas e rasteiras. Entre estes dois polos Lucas et al. (1984) afirmam haver um processo de evolução pedogenética caracterizando essa zona, como a interseção de solos Argissolos<sup>3</sup>, também denominadas de “*sandy bleached brown loam*” (argila amarronzada com areia esbranquiçada) ou “*eluviated brown loam*” (argila marrom eluvial).

De acordo com BRASIL<sup>4</sup> (1978) apud Horbe et al. (2003) as unidades pedológicas da área de Manaus consistem de Latossolos amarelados, argilosos a argilo-arenosos, argissolos arenosos a areno-argilosos amarelados e as areias brancas.

Os solos de Manaus são dispostos em Latossolos localizados nos platôs e se estendem até a meia encosta, os solos de transição (Argissolos) nas vertentes (meia encosta à encosta inferior), e nos baixos se encontram os solos ricos em areias, como o Espodossolo (FIGURA 4) (LUCAS, 1989; NEU, 2005; VIEIRA, 2008).

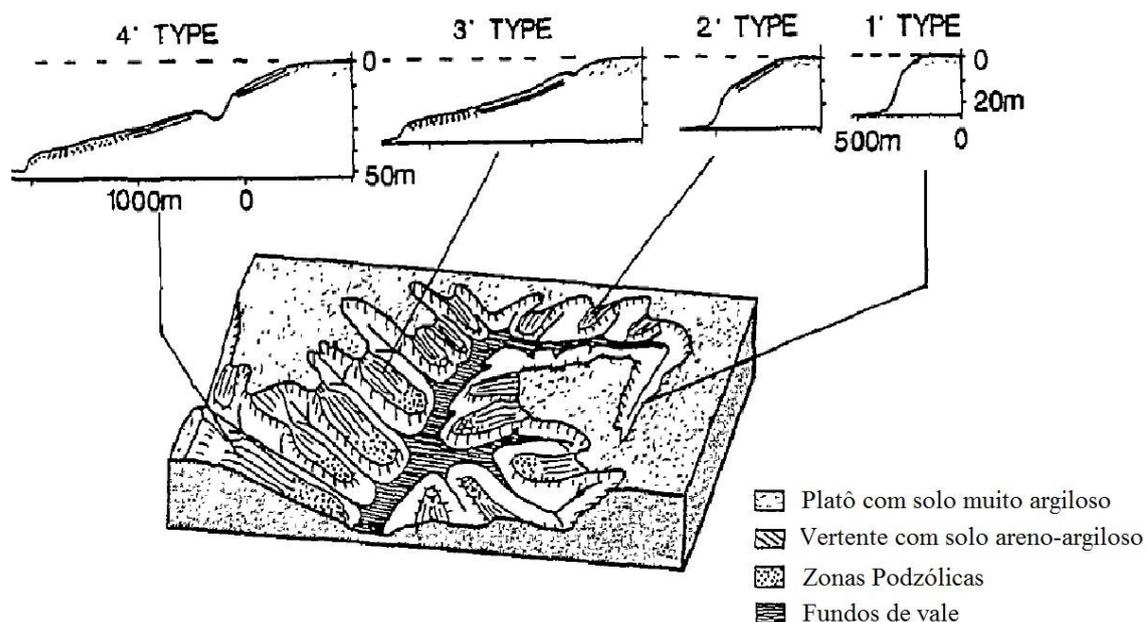


Figura 5: Representação esquemática dos solos nas vertentes da região norte da Cidade de Manaus. Adaptado de Lucas, 1989.

<sup>2</sup> Descrito pelos autores ainda com a antiga nomenclatura de Podzóis, antes da atual classificação da EMBRAPA (2006).

<sup>3</sup> Denominado pelos autores como solos Podzólicos, diferente da usada pela classificação da EMBRAPA (2006)

<sup>4</sup> RADAMBRASIL (1978)

Quanto ao Latossolo, Horbe et al (2003) apontam que esses se desenvolvem sobre os horizontes mosqueados, as linhas de pedra e crostas lateríticas, mais ricos em Fe e Al, e que marcam as cotas mais elevadas. Ker (1997) afirma que Manaus possui Latossolo Amarelo muito argiloso com o segundo horizonte no qual a argila encontra-se praticamente flocculada, resultado da umidade local não permitir a coesão dos grânulos. Lucas (1988) reafirma que são solos ferralíticos profundos.

O Argissolo presente na área urbana de Manaus, conforme Neu (2005) é bem drenado, de textura argilosa (argila  $\pm$  50%). Apresenta horizonte B nodular de aproximadamente 1 m de espessura, encontrado a 1,3 m de profundidade, com cores que variam de bruno forte (7,5YR 5/6) ao amarelo brunado (10YR 6/6) e passando por vermelho (2,5YR 4/6), de consistência muito dura, porosa e moderada drenagem (LEAL, 1996; VIEIRA, 2008). Lucas (1989) assinala que esse tipo de solo na região norte de Manaus apresenta matéria orgânica na superfície, areia branca horizontes Bh raso.

Referente aos Espodossolos, Leal (1996) e Vieira (2008) comentam que esses, com horizontes de areia branca, podem atingir alguns metros de espessura, pois apresentam consistência solta; aparecem nas partes inferiores das encostas, baixios e fundo de vale, os quais acompanham os principais cursos d'água que podem apresentar água no interior do pacote (LUCAS, 1989).

Horbe et al. (2003) apontam que os Espodossolos de Manaus são coincidentes com a região de cotas mais baixas, com frequentes exposições de saprólito e do Arenito Manaus próximo à superfície. O saprólito arenoso é desenvolvido a partir da Formação Alter do Chão, onde é naturalmente menos lixiviado e, portanto, mais rico em quartzo e feldspato que os demais horizontes. A matéria orgânica ataca mais facilmente argilominerais, o que nos leva a pensar que ele reúne as condições favoráveis à formação dos Espodossolos. Sobre este solo, pode-se destacar que a vegetação no local é caracterizada como campinarana, sendo menos densa e exuberante do que a floresta equatorial (VIEIRA, 2008).

Em estudo realizado por Vieira (1998) sobre análise de solos em paredes de voçorocas foi observado que na área da bacia, o solo possui uma variação argiloso no topo do perfil, e perde essa característica à medida que o solo fica mais profundo, diminuindo seu caráter arenoso na parte inferior, próximo ao contato com o Arenito Manaus. Caracteriza-se como muito argiloso a argiloso nos 6 primeiros metros, franco

arenoso de 6 a 10 metros, de 10 a 13 metros apresenta uma característica de areia franca e de 13 a 18 metros, arenoso.

A cidade de Manaus apresenta zonas de Depósitos Tecnogênicos considerados como produtos de deposição humana e um subproduto das fases de tecnificação da sociedade, que são classificados em 4 grupos, de acordo com o material constituinte, conforme classificação de Peloggia (1998) apud Nunes e Silva (2011):

- Materiais “úrbicos” (do inglês *urbic*) – caracterizados por detritos urbanos, materiais terrosos que contêm artefatos manufaturados pelo homem como fragmentos tijolos, vidro, concreto, asfalto, pregos, plástico, metais diversos dentre outros;

- Materiais “gárbicos” (do inglês *garbage*) – são depósitos de materiais como resíduos orgânicos, que podem conter materiais “úrbicos” em menor escala;

- Materiais “espólicos” (do inglês *spoil*) – materiais escavados e redepositados por operações de terraplanagem em minas a céu aberto, rodovias ou outras obras civis, identificados pela expressão geomórfica “não natural”, ou ainda por peculiaridades texturais e estruturais em seu perfil, e;

- Materiais “dragados” – materiais terrosos provenientes da dragagem de cursos d’água e comumente depositados em diques em cotas topográficas superiores às da planície aluvial.

Ao serem depositados e se decomporem são incorporados aos constituintes dos solos, sendo denominados de solos urbanos. Em Manaus, em especial a Zona Leste da cidade, devido à geomorfologia da área ser caracterizada por colinas onduladas e a necessidade de expansão da malha urbana, parte dessa área foi “planificada” (terraplanada) por meio de Depósitos Tecnogênicos *Espólicos* (aterros) para o nivelamento do terreno, que se distinguem do solo original da área por se apresentarem inconsolidados e contrastarem com os atributos granulométricos originais do solo, o que torna fácil a remoção pelos agentes erosivos. Há o desenvolvimento de Depósitos Tecnogênicos *Gárbicos*, em especial por meio de deposição no interior de voçorocas, que apenas corroboram para o seu crescimento (FIGURA 6 e 7).



Figura 6: Voçoroca no bairro Jorge Teixeira com presença de deposição Tecnogênica *Gárbica*.  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015



Figura 7: Voçoroca no bairro Distrito Industrial II com presença de deposição Tecnogênica *Espólicas*.  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015

Estes depósitos tecnogênicos alteram a composição física e química do solo. Quanto aos aspectos físicos, as diferenças entre solos e depósitos faz com que processos erosivos sejam facilitados, pois os materiais depositados são facilmente removidos. Devido à deposição tecnogênica *gárbica* no interior de voçorocas, processos de retrabalhamento como Alcovas de Regressão são desencadeados, desestabilizando o pacote e aumentando a incisão.

Quanto aos aspectos químicos, Aniceto e Horbe (2012) mostram que tais depósitos, em especial os *Gárbicos*, interagem negativamente com o solo, que alteram o pH do solo e quando a carga química é excessiva, os elementos migram por difusão e se tornam fonte de contaminantes para a vegetação, ou por meio da infiltração da água da chuva que os arrasta e contamina a água subterrânea.

#### 2.2.4 Clima

Para Molion (1987) apud Mascarenhas Junior et al. (2009) a precipitação na Amazônia é causada por diversos processos, como a Célula de Hardley e Walker e a Alta da Bolívia (grande escala), em mesoescala. Cohen (1989) aponta que as Linhas de Instabilidade são responsáveis pelas chuvas em períodos secos.

Referindo-se a Manaus, mais especificamente regiões próximas a rios como a BH Colônia Antônio Aleixo, ocorrem as chuvas de origem de **brisas fluviais** devido a proximidade de grandes corpos d'água, como o Sistema Rio Negro-Solimões (AGUIAR, 1995).

Aguiar (1995) destaca que a temperatura média compensada anual para a região urbana apresenta mínimas em torno de 23,2°C, médias de 26,7°C e máximas de 31,5°C. Já no período de agosto a novembro, as médias tornam-se mais altas e médias mais baixas nos meses de fevereiro e março,

Em estudos, Silva (2009) observou que na cidade de Manaus a temperatura máxima foi 33,6° C e mínima de 27,8° C, tendo como média das máximas de 28,1°C e média das mínimas de 24,1°C, no período mais quente do ano (agosto a novembro). No período mais ameno (janeiro a abril) a máxima de 21,6° C e mínima de 29,5° C, as temperaturas mais elevadas se concentram em regiões com menor número de áreas verdes, formando as ilhas de calor. A média de temperatura na BH CAA variou entre 29 e 30° C no período mais quente, e 24° C no período mais ameno.

Segundo Tanaka et al. (2014), o período chuvoso se estende por 7 meses, enquanto o período seco por apenas 5 meses. Apesar da cidade, ser espaço urbano e possuir menos umidade natural, a precipitação anual em área urbana é superior (82%) quando comparada a áreas florestadas (78%). Mascarenhas Junior et al. (2009) indagam que o processo de urbanização da cidade Manaus não reduziu as taxas de precipitação, e sim as aumentou, pois a cidade concentra calor provocando áreas de baixa pressão atraindo e concentrando chuvas.

Para Mascarenhas Junior et al. (2009), um padrão de precipitação, em anos mais chuvosos, não são necessariamente os dias com mais pluviosidade, mostrando através do processo de chuvas intensas, a concentração de precipitação em um período curto de tempo, o que desencadeia o desenvolvimento e aceleração de processos erosivos lineares.

Como ressaltam Aguiar (1995) e Vieira (2014) as chuvas na cidade não se distribuem de forma homogênea, pois no centro da cidade são encontrados os menores índices de precipitação e a taxa pluviométrica aumenta à medida em que se aproxima das áreas periféricas, colaborando para concentração da maior parte das incisões erosivas. Considerando que a bacia Colônia Antônio Aleixo está desagua no rio Amazonas, as chuvas de origem de brisa fluvial tendem a se concentrar a região do curso médio da bacia, a qual apresenta o maior número de incisões.

Em um estudo realizado por Fernandes (2014) observou-se que com relação à distribuição dos totais mensais de chuva cidade, durante o intervalo de 1962 a 2012 (50 anos), o período de Janeiro a Dezembro foi possível identificar como padrão geral uma

oscilação da chuva decrescente nos meses iniciais e crescente no final dos anos, para as distribuições de chuva em Manaus. Quanto as distribuições dos totais de chuva no geral as máximas precipitações estão concentradas de Janeiro a Maio, os picos com menor precipitação concentram-se nos meses de Junho a Outubro, em seguida aumentam com menor intensidade nos meses de Novembro para Dezembro (FERNANDES, 2014).

O período mais chuvoso, de Janeiro a Maio, apresenta precipitação média variando de 150 a 400 mm, alcançando em anos atípicos valores superiores 500 mm (FERNANDES, 2014).

Nesse sentido, Silva (2004) aduz que o potencial erosivo da chuva, ou seja, a erosividade para a região Amazônica é bastante elevada, representando o mais alto índice quando comparada com o restante do Brasil. Mostra que a influência das altas taxas pluviométricas influencia no desencadeamento e desenvolvimento do processo erosivo, em especial quando o solo não possui cobertura vegetal. Silva et al. (2009) assinala um valor elevado para a taxa de erosividade na ordem de  $14.129 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para a cidade de Manaus, considerando que a faixa de variação para no Brasil é de  $3.116$  a  $20.035 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (FIGURA 08)

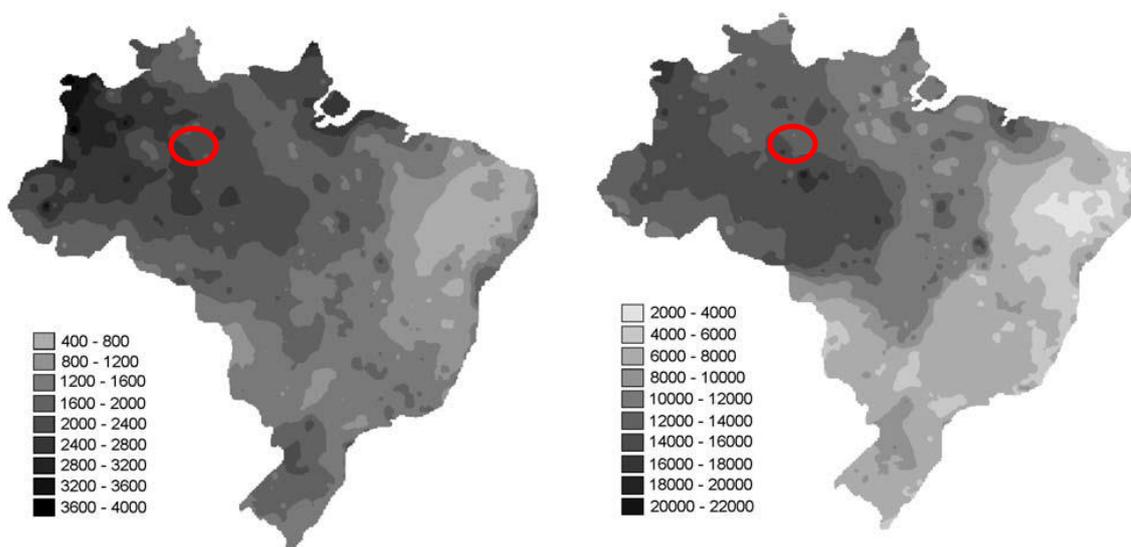


Figura 8: Comparação dos mapas de pluviometria anual (à esquerda, em mm por ano) e Erosividade (em  $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ). Círculo vermelho destaca a cidade de Manaus. Fonte. Silva, 2004

Em uma análise temporal das erosividade da chuva, referente ao intervalo de 1961 a 2010 para a cidade de Manaus, Fernandes encontrou valores entre 8,7 (ano de 1982) e  $21,8 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (ano de 2008), como pode ser observado no gráfico 01.

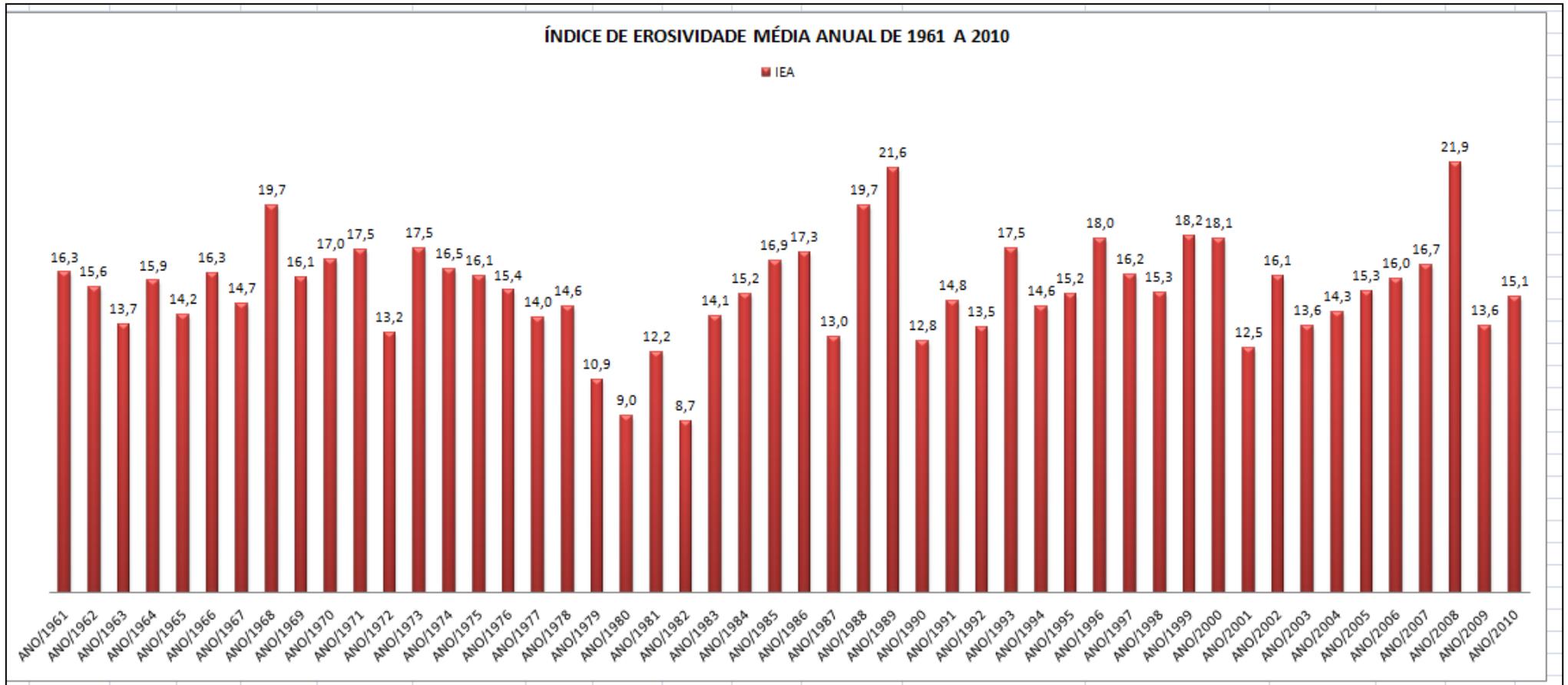


Gráfico 1: Índice de Erosividade da Chuva média anual de 1961 a 2010 em Manaus.  
 Fonte: Fernandes, 2014

### 2.2.5 Hidrografia

Ab'Saber (1953) caracteriza a cidade de Manaus como sendo formada por uma intrincada rede de cursos fluviais, no qual o sistema Rio Negro-Rio Amazonas destaca-se por ser um agente de drenagem e ter seu baixo curso situado na unidade morfoescultural, denominada Planalto da Amazônia Ocidental.

A cidade é delimitada ao sul pelo sistema supracitado, a Leste pelo Rio Puraquequara e a Oeste o Rio Tarumã-Açu, que forma uma barreira natural à expansão urbana (VIEIRA, 2008). De acordo com a divisão das bacias hidrográficas da cidade de Manaus realizada por Vieira (2008), há 19 bacias classificadas em função da localização de suas respectivas desembocaduras em 03 grupos: bacias do Oeste (três bacias), bacias do Sul (nove bacias) e bacias do Leste (sete bacias). Em termos de tamanho médio das áreas ocupadas pelas bacias, verificou-se que as do Oeste apresentam média de 68,4 km<sup>2</sup>. Em segundo lugar estão as bacias do Sul com média de 24,8 km<sup>2</sup> e as bacias do Leste com as áreas em torno de 11,9 km<sup>2</sup>. Em termos de área, destacam-se quatro grandes bacias: bacia do Tarumã, bacia do São Raimundo, bacia do Educandos e bacia do Gigante (VIEIRA, 2008).

A partir desta divisão, a Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo foi delimitada de forma que se apresenta localizada no grupo de bacias do Leste com desembocadura para o sistema do Rio Amazonas.

Apesar da elevada densidade hidrográfica da cidade de Manaus, o processo de ocupação e crescimento da cidade atuou diretamente nos muitos cursos d'água e igarapés, que sofre com a pressão urbana, o que resulta em poluição, seja por projetos que canalizaram e cimentaram as margens e leitos dos rios. Essas modificações interferem no ciclo hidrológico, vários igarapés foram aterrados, em especial na região do centro histórico da cidade.

A BH Colônia Antônio Aleixo é uma bacia de rios de águas negras, notórios pela baixa carga sedimentar, entretanto Barbosa (2013) revela que a bacia apresenta alta concentração de sedimentos em suspensão entre 2 a 2,4 mg/l, um valor considerado elevado em face ao pequeno porte da bacia que comparado ao Rio Negro que apresenta carga de sedimentos de 5 mg/l (MEADE et al., 1979).

Quanto à vazão, Barbosa (2013) ressalta que a velocidade média encontrada foi de 0,0472 m/s e a vazão foi de 79,3 m<sup>3</sup>/s, o que indica uma vazão baixa em comparação com outros rios como o Rio Negro, que apresenta vazão de 28 400 m<sup>3</sup>/s próximo a Manaus (GUYOT et al, 1993) e com o Rio Amazonas com vazão de 209 000 m<sup>3</sup>/s na sua foz

(MOLINIER *et al.* 1995 apud FILIZOLA e GUYOT, 2004). A vazão e a alta carga de sedimento em suspensão podem ser relacionadas ao fato da bacia apresentar uma “foz afogada” resultante de uma ria fluvial no rio Amazonas, gerando um barramento hidráulico na desembocadura da bacia, fazendo com que a velocidade do rio seja reduzida em todos os trechos do curso principal da bacia.

#### 2.2.6 Vegetação

Conforme Bohrer e Gonçalves (1991), Manaus está inserida na Floresta Amazônica (Floresta Ombrófila Densa) e devido à expansão da malha urbana a vegetação nativa vem sofrendo um processo de supressão com a permanência de pequenos enclaves florestais na cidade cercados por barreiras antrópicas. Desses enclaves se destacam: a Área de Proteção Ambiental (APA), referente ao Campus da Universidade Federal do Amazonas (UFAM); a Reserva Florestal Adolpho Ducke e Parque Estadual Sumaúma, além da periferia de Manaus parcialmente vegetada.

Estudos de Lima e Nelson (2003) apud Cavalcante et al. (2010) verificaram uma redução de aproximadamente 9500 ha de cobertura vegetal entre os anos de 1985 e 1999, que corroboram com a análise de Vieira (2008) o qual ressalta que, em estudo realizado pelo SIPAM (2005) apud Vieira (2008), foram detectados aumento de áreas desmatadas nos anos de 1986 com 192,63 km<sup>2</sup>, 1995 com 234,19 km<sup>2</sup> e 2004 com 288,35 km<sup>2</sup>, com uma consequente redução de áreas verdes, passando de 248,66 km<sup>2</sup> em 1986 e 206,12 km<sup>2</sup> em 1995 para 152,65 km<sup>2</sup> em 2004. O que apresenta uma redução de 96,01 km<sup>2</sup>, cerca de 38,61 % de diminuição entre os anos de 1986 a 2004.

Vieira (2008) ainda afirma que:

Em termos de área verde, as Zonas Leste e Norte foram as que apresentaram as maiores perdas no período (1986 a 2004): respectivamente 47,82 km<sup>2</sup> e 26,67 km<sup>2</sup>, configurando aumento na área desmatada de 100,6% para a primeira e de 84,2% para a segunda. De modo geral, o aumento do desmatamento nesse período em toda a cidade ficou em torno de 49,86%, área aproximada de 96 km<sup>2</sup>. (p. 36 e 37)

Vieira (2008) analisa o desmatamento nos anos de 1986, 1995 e 2004, no que se refere à Zona Leste de Manaus, que é possível observar na Tabela 01 a parte da cidade que sofreu a maior perda em porcentagem de áreas florestadas, devido à ausência da cobertura vegetal associada à expansão urbana e às altas taxas pluviométricas da cidade, onde os processos erosivos são facilmente deflagrados.

Tabela 1: Desmatamento e áreas verdes em Manaus (1986 a 2004)

Zona	Área Desmatada (%)			Área Verde (%)			Área		
	1986	1995	2004	1986	1995	2004	Total km <sup>2</sup>	A.D. km <sup>2</sup> *	(%) **
Leste	47,58	69,96	95,4	115,45	93,07	67,64	163,03	47,82	100,6
Norte	31,65	43,96	58,3	36,59	24,29	9,93	68,24	26,67	84,2
Oeste	45,37	48,42	58,9	74,16	71,11	60,58	119,53	13,58	29,9
Centro-Oeste	14,98	15,24	15,38	2,59	2,32	2,19	17,57	0,40	2,7
Centro-Sul	24,51	28,07	31,62	11,99	8,44	4,88	36,50	7,11	29,0
Sul	28,51	28,51	28,96	7,90	7,90	7,46	36,41	0,45	1,6
<b>Total</b>	<b>192,60</b>	<b>234,19</b>	<b>288,63</b>	<b>248,68</b>	<b>206,12</b>	<b>152,65</b>	<b>441,28</b>	<b>96,03</b>	<b>49,86</b>

\* A.D. (Área desmatada) refere-se a diferença entre a área desmatada até 2004 menos a área desmatada até 1986.

\*\* Percentual relativo ao aumento da área desmatada de 1986 para 2004

Fonte: Elaborado por Vieira (2008) a partir de dados modificado de SIPAM (2005).

Pinheiro et al. (2013) colabora com esta análise ao atestar que no período de 1977 a 2011, houve redução drástica na cobertura florestal da cidade (FIGURA 09), em especial na zona leste e na área das BHCAA, onde em 1977 a área era praticamente vegetada e em 2011 grande parte da vegetação foi retirada, o que favoreceu o desenvolvimento de feições erosivas.

Referente a Manaus, restam apenas cerca de 40% da vegetação original, com a principal causa do desflorestamento relacionado ao crescimento urbano e populacional, associado principalmente, à existência da Zona Franca e do Polo industrial.

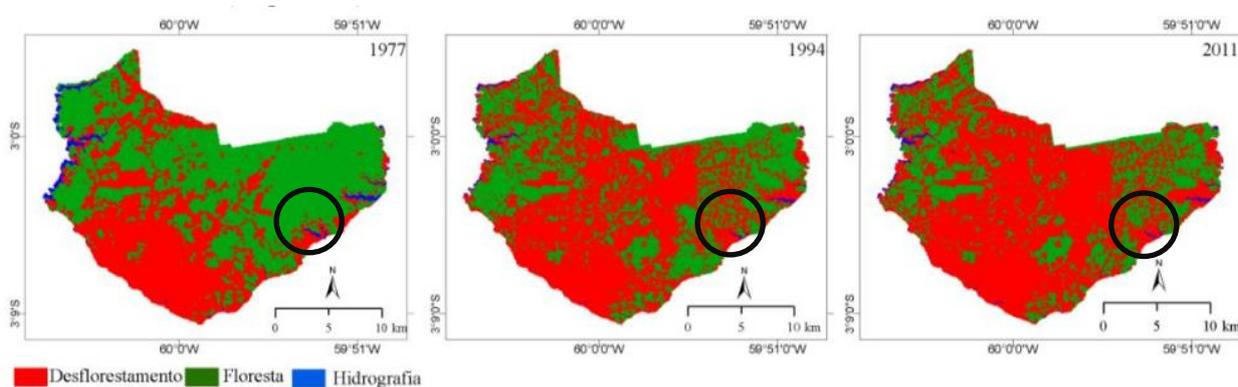


Figura 9: Alterações na cobertura florestal urbana (1977, 1994 e 2011) de Manaus, AM, Brasil. Circulo preto destaca a área da bacia Colônia Antônio Aleixo.

Fonte: Pinheiro et al., 2013

Como apontam Cavalcante et al. (2010) este processo é um reflexo da ineficácia e/ou não execução de planejamento urbano, relacionado à ausência de políticas habitacionais que favoreçam o avanço da população sobre formações e fragmentos florestais e áreas de APPs.

## 2.3 Aspectos Sociais

### 2.3.1 Ocupação Humana

Como afirma Ab'Saber (1953), Manaus é a verdadeira capital da hinterlândia amazônica. Localizada exatamente entre a Amazônia Ocidental e a Oriental, num ponto do principal eixo da navegação fluvial do Brasil, é uma espécie de elo entre a navegação: fluvial, rudimentar e extensiva, e as grandes rotas marítimas. Esse posicionamento geográfico privilegiado possibilitou o surgimento da cidade a partir de um forte construído em 1669 para a Manaus da atualidade.

O povoamento da região da confluência dos rios Negro e Solimões foi motivado por causas econômicas, captura de indígenas e coletas das drogas do sertão, surgindo então, um local de apoio na foz do rio Tarumã (PENNINGTON, 2009). A tropa resgate comandada por Bento Maciel Parente em 1657, oriunda de São Luiz do Maranhão, fixou-se na foz do rio Tarumã, a qual ergueu uma cruz e rezou uma missa, atitudes essas que indicam um ritual de posse. Entretanto em 1958, em passagem temporária, outra tropa se fixou no mesmo local da expedição anterior.

Em 1669 um forte foi construído, “Aos 3° 8’ 7” latitude S. e 60° 61’ 34” longitude O. de Greenwich [...] quadrangular, de pedra e barro, sem fosso” (PENNINGTON, 2009), posteriormente chamado de Fortaleza de São José da Barra. O povoado cresceu, desenvolveu e teve seu nome alterado para Lugar da Barra.

Em 1751, Marquês de Pombal cria o Estado de Grão-Pará e Maranhão. Todavia, devido a sua grande área e dificuldade de delimitação de fronteiras, em 1755, a partir da Carta Régia de D. José I, foi criada a Capitania do São José do Javari, depois capitania de São José do Rio Negro. Em 1791 a sede foi transferida de Barcelos para a Vila da Barra e em definitivo no ano de 1808. Em 1832, elevada à categoria de Vila da Barra e em 1848 tornou-se cidade da Barra de São José do Rio Negro. Em 1850, após a elevação da comarca, à categoria de Província, e em 1856 tomou o nome de Cidade de Manaós (PENNINGTON,2000).

Após a segunda metade do século XIX, teve início o ciclo da borracha, matéria-prima cobiçada no mundo. A Amazônia detinha o monopólio de sua extração e produção no mundo. Devido ao látex houve um intenso fluxo de dinheiro tanto na cidade quanto no país, a ponto de rivalizar com as exportações de café, originando um período de prosperidade e modernização da cidade. Porém a ideia de modernização tinha como referência o modelo

arquitetônico europeu, logo, Manaus foi transformada em representante dos ideais europeus de civilização, ganhando a alcunha de Paris dos Trópicos (MESQUITA, 2009; PENNINGTON, 2009).

Todavia, o crescimento não ocorreu de forma urbanisticamente ordenada, o seu crescimento apresenta características espontâneas, acerca disso, Oliveira (2003) e Pennington (2009) ressaltam que a cidade não teve “adolescência”, ou seja, não teve tempo para a aprendizagem e vivência. Tal fato ocorre devido à tentativa de Manaus em emular os grandes centros urbanos europeus produzindo um espaço em função das novas necessidades de expansão, dando origem a um urbanismo pretensamente moderno. Dessa forma, a cidade começa a apresentar problemas de ordem urbanística pela ausência de marcos como: praças, avenidas, ruas pavimentadas (com paralelepípedos) e outros como problemas ambientais.

Mesquita (2009) mostra que no seu período de crescimento, Manaus perdia elementos naturais originais significativos, à medida que havia mudanças processadas na topografia através de aterramento de igarapés e nivelamento de colinas.

As intervenções antrópicas tinham como finalidade alterar o eixo de crescimento da cidade, que era originalmente o eixo Leste-Oeste, pois se deduz que a orientação inicial da cidade foi feita a partir do sentido do Rio Negro, sendo a rua principal e margeadora, a Rua Brasileira (depois chamada de Rua Municipal e atualmente, Sete de Setembro) (MESQUITA, 2009; PENNINGTON, 2009). A partir dela todas as outras eram traçadas paralelamente, fazendo com que a cidade obtivesse um traçado quadricular definido por meio de linhas amplas e regulares (FIGURA 10).

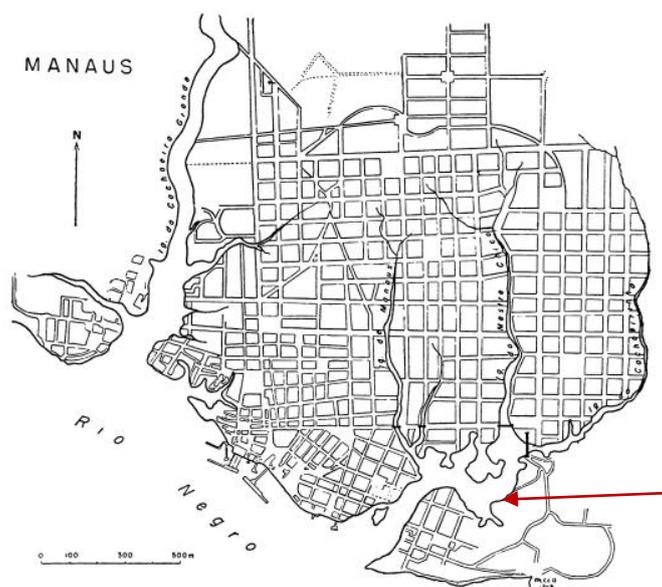


Figura 10: Planta de Manaus, focalizando os principais igarapés que influenciam na "compartimentação" dos diversos blocos urbanos de Manaus.

Seta Vermelha aponta para a Av. Sete de Setembro. Fonte: Ab'Saber, 1953

A fim de regularizar a extensão da rua Municipal foram construídas 3 pontes, uma sobre o Igarapé de Manaós, Bittencourt e sobre o Igarapé da Cachoeirinha, e com isso conectava o centro da cidade com o resto da cidade. O Governador Eduardo Ribeiro ampliava os limites da cidade e deslocava o seu eixo de crescimento.

Ao final do século XIX eram os aspectos naturais que condicionavam a direção do crescimento da cidade. No início do século XX, os fatores foram sendo superados e o sítio urbano de Manaus foi moldado ora por objetos artificiais, ora por ações artificiais como aterramentos (obras estruturais) (OLIVEIRA, 2008).

Devido a essas atitudes, atualmente Manaus segue no sentido de crescimento do eixo Sul-Norte, assim Ab'Saber (1953) descreve que “a cidade foi fundada e cresceu sobre a porção ribeirinha de um sistema de colinas tabuliformes com encostas pouco inclinadas, separadas pelas calhas variavelmente encaixadas dos igarapés” e que “alguns bairros oriundos da fase mais recente de expansão da cidade estão atingindo os níveis mais elevados do tabuleiro” isso decorre do fato dos tabuleiros possuírem forma extensa e esplanada.

Conforme Carvalho (2010), a população saltou de 300 mil em 1970 para aproximadamente dois milhões de habitantes nos primeiros anos do século XXI, fazendo com que crescessem os problemas urbanos da capital, devido à cidade de Manaus ter passado por um processo de urbanização que permitiu o avanço sobre os espaços naturais, associado à ineficiência do poder público que contribuiu para o surgimento de diversos impactos ambientais (COSTA, 2008).

Ratificando os problemas citados por Pennington (2009) ao afirmar que a cidade não possuiu uma adolescência, não souberam como resolver seus problemas de crescimento e conseqüentemente, geraram impactos ao meio natural.

Tendo em vista que Manaus é a 10ª cidade mais populosa do Brasil, é uma cidade de grandes contradições, oriundas da necessidade do desenvolvimento humano e a preservação ambiental (SCHOR e ALVES-GOMES, 2011), isso se reflete em especial nas zonas que sofrem um processo de ocupação mais recente, como as zonas Norte e Leste.

Segundo Pinheiro et.al (2013), a cidade de Manaus, em especial a Zona Leste, tem seu crescimento urbano sobre área de florestas primárias, de forma urbanisticamente desordenada ou por empreendimentos imobiliários autorizados.

A ocupação da Zona Leste ocorreu no final da década de 70 do século XX quando iniciou a expansão para as zonas administrativa Leste e Norte, por meio de ocupações regulares e/ou irregulares. Na década de 1980, ocorreu a criação de um grande número de

loteamentos feitos pelo poder público como os bairros do São José, Zumbi do Palmares, Armando Mendes e Cidade Nova (COSTA e OLIVEIRA, 2008).

O bairro Colônia Antônio Aleixo era conhecido como Hospital-Colônia “Antônio Aleixo”, tinha o objetivo de ser um hospital modelo para o tratamento de hanseníase, porém a falta de informações mais precisas sobre a patologia e a ausência de preparação no sentido de conscientizar a população sobre a estigmatização da doença acarretaram que em 27 de dezembro de 1978, por meio da portaria nº468, foi decretada a extinção do Hospital-Colônia Antônio Aleixo, transformando-o em asilo transitório e posteriormente no bairro Colônia Antônio Aleixo (MONTEIRO,2000 apud ALVES e OLIVEIRA, 2011).

A forma de ocupação dessas regiões é semelhante a ocorrida no começo do século XX, no qual a escolha da área a ser ocupada remete ao histórico de ocupação do início da cidade, procurando as áreas de mais fácil ocupação como os igarapés.

A região Leste de Manaus, como apontou Ab’Saber (1953), possui colinas tabuliformes, cuja ocupação é mais fácil, entretanto, possuem uma fragilidade ambiental que levam ao desencadeamento de diversos processos erosivos e impactos ambientais.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

#### 3.1 Metodologia

O método de análise utilizado para o desenvolvimento do trabalho consiste no uso da abordagem sistêmica. Os dados foram analisados individual e coletivamente, no que tange aos aspectos naturais (Geologia, Geomorfologia, Pedologia, Hidrografia, Vegetação e Clima) e aos sociais (Ocupação Humana), objetivando entender as relações entre todos os componentes e a identificação de áreas vulneráveis à ocorrência de voçorocas.

A metodologia realizada foi a fundamentação teórica do trabalho e atividades práticas (campo e laboratório). As atividades práticas visaram contemplar os seguintes objetivos: 3.1 Descrição das áreas com ocorrência de voçorocamento na bacia Colônia Antônio Aleixo; 3.2. Caracterização dos aspectos pedo-geomorfológicos da bacia Colônia Antônio Aleixo; 3.3. Caracterização dos aspectos urbanos em locais com ocorrência de voçorocas; 3.4. Monitoramento das voçorocas quanto a sua morfometria e expansão, e; 3.5. Correlação dos aspectos geomorfológicos aos aspectos morfométricos das voçorocas.

##### 3.1.1 Descrição das áreas com ocorrência de voçorocamento na bacia Colônia Antônio Aleixo

Essa descrição contemplou os seguintes aspectos: 1) Localização das incisões erosivas; 2) Caracterização da morfometria da vertente, e; 3) Descrição aspectos fisiográficos das adjacências das incisões.

###### 1) Localização das incisões erosivas

As incisões erosivas foram localizadas a partir do cadastro realizado por Vieira (2008) e atualizado por Abreu (2012) e Frota Filho (2012). Além disso, foram observadas imagens do software *Google Earth* dos anos de 2014 e 2015, associadas a trabalhos de campo para confirmar suas localizações.

###### 2) Características morfométricas da vertente

No que tange às características morfométricas da vertente, foram analisadas em campo e em gabinete de acordo com o modelo proposto por Dikau (1990) apud Valeriano (2008) (FIGURA 11), no qual a encosta combina as características das curvaturas horizontais (convergente, planar ou divergente) e verticais (côncavo, retilíneo ou convexo). Ainda foram obtidos comprimento da encosta e declividade por meio de geoprocessamento.

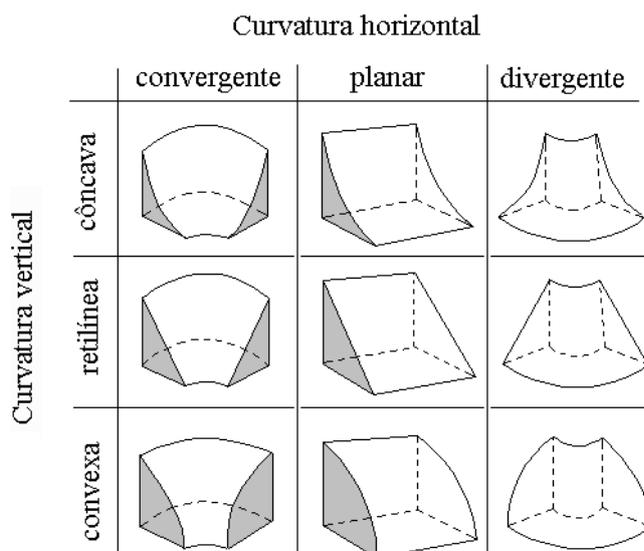


Figura 11: Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno. Curvaturas horizontais (convergente, planar ou divergente) e Verticais (côncavo, retilíneo ou convexo).  
Fonte: Adaptada de Dikau (1990) apud Valeriano (2008)

### 3) Descrição aspectos fisiográficos das adjacências das incisões erosivas

O entorno das voçorocas foi analisado a fim de caracterizar aspectos que potencializam o processo erosivo, como influentes na forma e direção do crescimento da incisão, tais como: a presença de vegetação, presença de crostas no solo, proximidades a canaletas entre outros.

#### 3.1.2 Caracterização dos aspectos pedo-geomorfológicos da bacia hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

- Caracterização Geomorfológica da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

Foi utilizada a delimitação das bacias hidrográficas realizada por Vieira (2008), em que foi delimitado polígono em ambiente de SIG da Bacia Colônia Antônio Aleixo, em que foram extraídos dados de área, perímetro, média da largura e extensão do canal principal.

Foi realizado um MDE (Modelo Digital de Elevação) para a obtenção da altimetria da bacia, o qual serviu de base para a elaboração de um mapa com as declividades (em porcentagem) que ocorrem na bacia.

Além disso, foram traçados os perfis topográficos transversais em três pontos da bacia (montante, meio e jusante) e o perfil longitudinal do rio principal por meio de SIG.

Quanto ao comprimento das bacias, Christofolletti (1980) afirma que há várias formas de calcular o comprimento de uma bacia, e isto acarreta uma diversidade de dados a serem obtidos. Dentre as maneiras propostas pelo autor foi escolhida a distância medida em linha

reta que acompanha paralelamente o rio principal. A largura foi medida em três pontos da bacia (montante, meio e jusante).

Para o perímetro do polígono foi delimitado por meio dos divisores de água da bacia, pois o mesmo trata-se de uma linha ao longo do divisor de águas (CHRISTOFOLETTI, 1980; TEODORO et al., 2007).

A partir desses dados foram calculados os demais parâmetros como: Densidade de Drenagem (Dd), Densidade Hidrográfica (Dh), Extensão do Percurso Superficial (Eps), Índice de Sinuosidade  $I_{sin}$ , Coeficiente de Manutenção (Cman), L de Hack; Relação do Relevo (Rh), Gradiente dos Canal Principal (G), Índice de Rugosidade (Ir), Coeficiente de Massividade (Cmas); Coeficiente Orográfico (Co); Relação de Enlongamento (Re), Índice de Circularidade ( $I_c$ ) e Índice de Compacidade ( $I_k$ ), cujos cálculos e interpretações seguem abaixo.

a) Densidade de Drenagem (Dd)

De acordo com Christofolletti (1980) o cálculo para a Densidade de Drenagem é:

$$Dd = L_t / A$$

Onde:

$L_t$  = comprimento total dos canais

A = Área da bacia

b) Densidade Hidrográfica (Dh)

Conforme Christofolletti (1980) o cálculo para a densidade hidrográfica é:

$$Dh = N / A$$

Onde:

N = Número total de rios ou cursos d'água

A = Área da bacia

c) Extensão do Percurso Superficial (Eps)

Calculado da seguinte maneira por Christofolletti (1980):

$$Eps = 1 / 2Dd$$

Onde:

Dd = Densidade de Drenagem

d) Índice de Sinuosidade (*Isin*)

O Índice de Sinuosidade é definido por Souza e Soares (2012) como:

$$Isin = L / Lt$$

Onde:

L = Comprimento do canal principal

Lt = Comprimento do eixo da bacia

e) Coeficiente de manutenção (*Cman*)

Christofoletti (1980) define como cálculo para este parâmetro:

$$Cman = 1 / Dd \times 1000$$

Onde:

Cman = Coeficiente de Manutenção

Dd = Densidade de Drenagem

f) L de Hack

Se *L* é o comprimento do maior canal da bacia e *A* é a área da bacia hidrográfica, a

Lei de Hack pode ser escrita como:

$$L \text{ de Hack} = C \cdot A^h \quad (\text{em unidades métricas})$$

Onde:

L = Comprimento do canal pelo cálculo de Hack

A = área da bacia

*h* o termo denominado constante de Hack e é de 0,6

C tem valor constante de 1,5.

Hack definiu que há variância desse padrão por Cardoso et al,(2012):

$$L - L \text{ Hack} / L$$

Onde:

L = comprimento do canal

L Hack = Comprimento do canal calculado pela fórmula de Hack

g) Relação do Relevo (Rh)

Segundo Schumm (1956), onde a amplitude altimétrica é dividida pela maior distância de drenagem da bacia:

$$R_h = \Delta a / L \quad (\text{medida adimensional})$$

Onde:

$R_h$  = Relação de Relevo,

$\Delta a$  = Amplitude altimétrica da bacia

L = Comprimento do eixo principal (km)

h) Gradiente dos Canal Principal (G)

A fórmula para a obtenção desse parâmetro foi descrita por Soares e Souza (2012) como:

$$G = [(H - h) / L] \times 100$$

Onde:

H = Altitude da nascente (m)

h = Altitude da foz (m)

L = Comprimento da canal principal (m)

i) Índice de Rugosidade (Ir)

$$I_r = H \times D_d$$

Onde:

H = Altura média da bacia

$D_d$  = Densidade de Drenagem

j) Coeficiente de Massividade (Cmas) e Coeficiente Orográfico (Co)

$$C_m = A_m / A$$

Onde:

$A_m$  = Altura média da bacia

A = Área da bacia

$$Co = Am \times Cm$$

Onde:

Am = Altura média da bacia

Cm = Coeficiente de Massividade

k) Relação de Enlongamento (Re)

Determinado pela seguinte equação de Borsato,2005; Cardoso et al., (2012):

$$Re = 1,128 \cdot A^{0,5} \cdot L^{-1}$$

Onde :

Re = Relação de Enlogamento

A = Área da Bacia (km<sup>2</sup>)

L= Comprimento da Bacia (km)

l) Índice de Circularidade (Ic)

A equação referente utilizada para determinação desse parâmetro conforme (Schumm,1956) é:

$$Ic = 12,57 \cdot A \cdot P^{-2}$$

Onde:

Ic = índice de Circularidade (Valor adimensional)

A = Área da bacia

P = Perímetro da bacia

m) Índice de Compacidade (I<sub>k</sub>),

Definido pela seguinte equação de Borsato,2005; Cardoso et al., (2012):

$$Kc = 0,2821 \cdot P \cdot A^{-0,5}$$

Onde:

0,2821 é constante

P = Perímetro da bacia

A = área da bacia

Através das análises das características morfométricas da bacia hidrográfica, verificou-se como estas podem influenciar no processo erosivo e se, por ventura, tais características podem ser influenciadas pelo referido processo.

- Caracterização Pedológica da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

O solo não é mapeado pedologicamente em escala detalhada para a cidade de Manaus (1:25 000), apenas para o município realizado pela CPRM, que justifica a necessidade de amostragens de solo da área de estudo como referência para o quesito pedologia. Foi realizada uma topossequência em uma vertente da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo para diferenciar o relevo e características físicas do solo, caracterizar o solo presente na bacia e sua vulnerabilidade ao processo erosivo.

A topossequência contou com 4 pontos de tradagem e cada um com pelo menos, um 01 (um) metro de profundidade, realizados em pontos distintos da vertente, no topo da vertente, outra no meio e uma na base da encosta, conforme realizado em trabalho semelhantes por Pelerin et al.(1997).

Os aspectos do solo identificados em campo foram cor e textura. As cores do solo foram identificadas através da comparação das amostras coletadas com os matizes da tabela *Munsell Color Charts* Foram realizados testes de infiltração e resistência à penetração do solo. Os aspectos superficiais do solo foram anotados de acordo com sua ocorrência, como presença de raízes, fendas de tração, caminhos preferencias, nódulos e concreções ferruginosas, entre outros.

Foram realizadas análises granulométricas, densidade real, densidade aparente, porosidade, umidade gravimétrica do solo, pH, macro e micronutrientes pelo método da EMPRABA (1997).

- Granulometria

Coletaram-se 42 amostras de solo através de tradagem em uma encosta na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo (FIGURA 12), até um (01) metro de profundidade. Em seguida, as amostras foram identificadas e encaminhadas para análise em laboratório (LATOSSOLO). Posteriormente, as amostras passaram pelo processo de secagem conhecido como Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), depois fragmentadas e passadas em peneira com malha de 2 mm para serem quarteadas (FIGURA 13), separando-se 20 gramas em um béquer.



Figura 12: Trado holandês usado para coleta das amostras de solo  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho  
05/02//2011



Figura 13: Quarteador de Câmara tipo Jones.  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho.  
20/02//2015

A quantidade de argila foi aferida por meio do método pipetagem (EMBRAPA, 1997) (FIGURA 14). As areias foram fracionadas através do peneirador mecânico e do jogo de peneiras sendo utilizado um total de quatro peneiras de malhas de tamanhos diferentes (1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; e, 0,125 mm) correspondendo respectivamente, às frações de areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina, pesando cada porção retida nas peneiras separadamente. A quantidade de silte é determinada através da subtração da quantidade de argila e areia do total analisado.



Figura 14: Amostras em processo de decantação da argila.  
Método da EMPRABA (1997).  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015

Após a obtenção dos percentuais de argila, silte e areia classificou-se a amostra pela sua textura por meio do Diagrama Triangular proposto pelo U.S.D.A. (*United States Department of Agriculture*) (FIGURA 15).

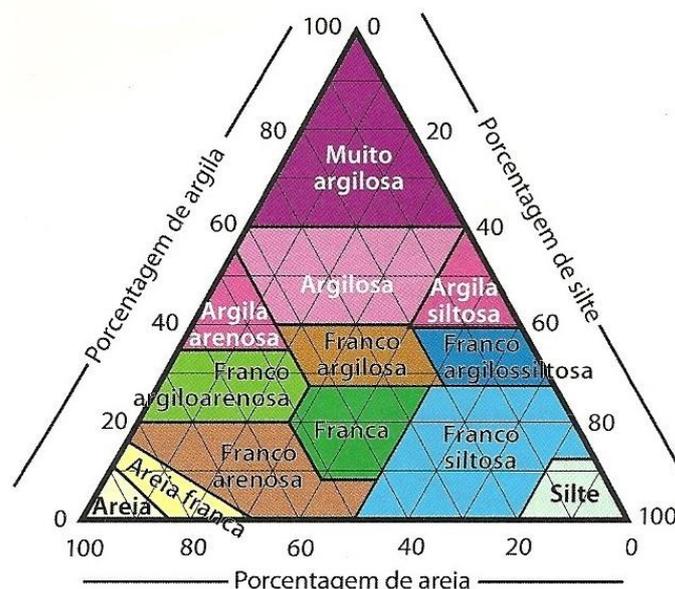


Figura 15: Pirâmide Textural  
Fonte: Lesph, 2010

➤ Densidade Real ( $D_r$ )

Na Densidade Real ( $D_r$ ) foi utilizado o mesmo material coletado para as análises granulométricas. A determinação da Densidade Real ( $D_r$ ) dos solos se deu pelo método do balão volumétrico, no qual é pesado 20g de solo e o mesmo é posto na estufa por um período de 6 a 12 horas, a fim de obter o peso da amostra seca a 105°C. A amostra é transferida para o balão volumétrico de 50 ml, onde é adicionado álcool etílico agitando-o para eliminar as bolhas de ar formadas. Prossegue-se com esta operação até a ausência de bolhas e completar o volume do balão (EMBRAPA, 1997). Calcula-se Densidade Real a partir da seguinte fórmula:

$$\text{Densidade Real (g/cm}^3\text{)} = a / 50 - b$$

Onde:

a = peso da amostra seca a 105°C

b = volume de álcool gasto

➤ Densidade Aparente ( $D_a$ )

Conforme descrito pela EMBRAPA (1997), quanto ao procedimento para o cálculo da Densidade Aparente é necessário colocar 35ml de amostra de solo em um balão volumétrico de 50ml, em seguida compactar o solo batendo a proveta em um lençol de borracha. Repete-se essa operação até que o nível da amostra fique nivelado com traçado do aferimento do balão. Posteriormente, afere-se o peso da amostra no solo. Calcula-se Densidade Aparente a partir da seguinte fórmula (EMBRAPA, 1997):

$$\text{Densidade aparente (g /cm}^3\text{)} = a / b$$

Onde:

a = peso da amostra seca a 105°C

b = volume da proveta

➤ Porosidade Total (Pt)

Foi aferida por meio do cálculo da Densidade Real (*Dr*) e da Densidade Aparente (*Da*) (EMBRAPA, 1997).

Cálculo:

$$Pt = 100 (a - b) / a$$

Onde:

a = Densidade Real

b = Densidade Aparente

➤ Umidade Gravimétrica (UmG)

A Umidade Gravimétrica consiste da umidade do solo em determinado momento. A amostra para a UmG foi coletada nas proximidades do local de cada tradagem e dos testes de infiltração. É necessário colocar uma quantidade de amostra com peso conhecido na estufa com temperatura entre 105-110°C, por 24 horas (EMBRAPA, 1997), para determinar o teor de umidade presente na amostra, que é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$\text{Umidade Gravimétrica} = 100 (a - b) / b$$

Onde:

a = peso da amostra úmida (g)

b = peso da amostra seca (g)

➤ pH do solo

A verificação do pH do solo foi realizada pelo método da EMPRABA (1997), a partir da solução de 10ml da amostra com o reagente. Foram usados H<sub>2</sub>O e KCl, depois a solução foi homogeneizada e em seguida permaneceu em repouso por uma hora, onde os eletrodos ficaram submersos e a leitura foi realizada.

➤ Macro e Micronutrientes

Para os macronutrientes foi utilizada a solução KCl, sendo pesada 5g de solo seco, adicionando-se 50ml da solução. Então a amostra foi agitada por 15 minutos e filtrada por 12 horas. Nesse processo foram obtidos os valores de cálcio e magnésio.

Quanto ao valor do alumínio, foi pipetado 25ml da solução do filtro, adicionado 3 gotas de azul Bromotimol e Hidróxido de Sódio (NaOH) até que a cor da solução fosse modificada.

Os micronutrientes do Solo (P, K, Fe, Zn e Mn) foram determinados com a extração de duplo ácido (método de Melinch).

Foram pesadas 5g de amostra seca de solo seco, adicionadas 50ml da solução extratora de duplo ácido (25ml de Ácido Clorídrico-HCl mais 25ml de Ácido Sulfúrico-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, diluídos em 1L de água destilada). Em seguida, a amostra foi agitada por 15 minutos e filtrada.

Com o material filtrado, foi organizado o processo para a leitura do Fósforo; dessa forma, foi adicionado 5ml da solução extratora de duplo ácido, 1ml de Molibdato de Amônio e 1ml de ácido ascórbico (vitamina C). agitou-se a amostra, que ficou em repouso por 30 minutos para realizar a leitura de fósforo.

Os demais micronutrientes (Fe, Zn e Mn) foram aferidos por meio da diluição de 2ml do extrato com 8ml de água destilada, posteriormente agitados e a medição foi realizado pelo aparelho leitor de nutrientes.

➤ Resistência do solo à penetração

Os testes de resistência à penetração do solo foram realizados com penetrômetro de impacto, também ocorreu a coleta de material para umidade do solo no mesmo local das tradagens e do teste de infiltração.

O teste foi efetuado aplicando-se verticalmente a haste metálica que recebe os impactos de uma massa com valor conhecido (3Kg), imprimindo quantos impactos fossem necessários para penetrar a cada 5cm (ROSS et al., 2011).

➤ Avaliação da capacidade de infiltração do solo

Para medir a taxa de infiltração utilizou-se um cilindro de anel simples (Infiltrômetro de *Hills*) (FIGURA 16), fixado a cerca de 3 cm de profundidade no solo. O teste foi realizado inicialmente, umedecendo o solo na parte exterior do cilindro para haver equilíbrio hidrostático, que permite melhor acurasse do teste. Finalmente, foi inserida a água no interior do cilindro.

A taxa de infiltração é considerada constante quando o valor da leitura da lâmina infiltrada se repete pelo menos três vezes após, no mínimo, 20 minutos (BRANDÃO et al., 2003).



Figura 16: Infiltrômetro de *Hills*.  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015

### 3.1.3 Caracterização dos aspectos urbanos em locais com ocorrência de voçorocas na bacia

Na caracterização dos aspectos urbanos que influenciam o desencadeamento ou aceleração de processos erosivos, considerou-se o traçado da rua e a forma de ocupação, localização da casa em relação à encosta e o direcionamento do sistema de águas servidas e pluviais.

Foi feita a análise do tipo de drenagem urbana e sua contribuição no processo erosivo, considerando as saídas das águas servidas vindas das residências e a ausência de bueiros. Foi também analisado o escoamento de águas pluviais e se os caixas coletoras e canaletas apresentam dissipadores de energia para não desencadearem o processo erosivo na área.

### 3.1.4 Monitoramento da morfometria e expansão das voçorocas

O monitoramento das voçorocas consistiu de dois monitoramentos no período de um ano. Foram monitoradas 4 voçorocas na Bacia Colônia Antônio Aleixo e escolhidas 04 voçorocas as mais representativas, em ambiente altamente degradado, outras voçorocas

foram desconsideradas devido à dificuldade em se realizar os monitoramentos seja pela grande quantidade de vegetação em suas bordas, ou mesmo pela presença de habitações que deixavam visível apenas a cabeceira da incisão.

As voçorocas foram classificadas quanto ao tipo, através do modelo de Oliveira (1989) (FIGURA 17), quanto à forma pelo modelo de Vieira (2008) (FIGURA 18) por ser um modelo calibrado para a característica da região e quanto ao tamanho pelo modelo de Vieira e Albuquerque (2004) (QUADRO 02).

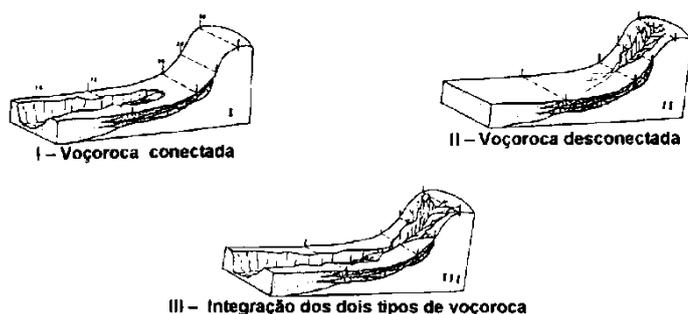


Figura 17: Tipos de voçorocas OLIVEIRA, (1989).

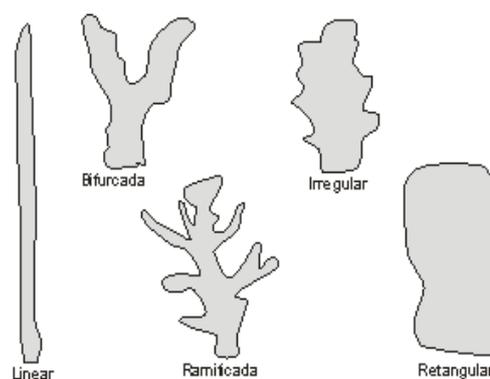


Figura 18: Formas de voçorocas (VIEIRA, 2008)

Quadro 2: Classificação das voçorocas por tamanho (m<sup>3</sup>).

Ord.	Volume erodido	Tamanho
01	Até 999 m <sup>3</sup>	Muito pequena
02	De 1.000 m <sup>3</sup> até 9.999 m <sup>3</sup>	Pequena
03	Entre 10.000 e 19.999 m <sup>3</sup>	Média
04	Entre 20.000 e 40.000 m <sup>3</sup>	Grande
05	Mais de 40.000 m <sup>3</sup>	Muito grande

Fonte: Vieira e Albuquerque (2004)

Através de imagens disponibilizadas pelo Software *Google Earth* dos anos de 2005 a 2015, assim como *in situ* juntamente com a aferição dos dados de comprimento, largura e profundidade, foi realizado o caracterizado o “Tipo” e a “Forma” das voçorocas. Também foi observada a presença de feições de retrabalhamento, tais como alcovas de regressão, painelas, marmitas, costelas e pedestais.

### 3.1.5 Correlação dos aspectos geomorfológicos aos aspectos morfométricos das voçorocas

A fim de correlacionar os aspectos geomorfológicos das vertentes (forma, declividade e comprimento) com aspectos morfométricos das voçorocas (comprimento,

largura, profundidade, área e volume) foi realizado o levantamento das voçorocas existentes, com base nos dados de Vieira (2008) e as atualizações em campo.

Os referidos dados foram comparados de forma pareada, de maneira que pudesse ser observado o nível de correlação. Este processo se deu em etapas, em que a primeira refere-se à correlação entre variáveis numéricas e a segunda, a correlação entre variáveis nominais.

#### A) A Correlação entre Variáveis Numéricas

A correlação entre variáveis numéricas consistiu da correspondência entre as características morfométricas da vertente (declividade e comprimento da encosta) com as características morfométricas da voçoroca (comprimento, largura e profundidade).

Para que uma correlação apresente relevância seu valor de  $r^2$  deve ser igual ou superior a 0,6; se inferior, a correlação entre as duas características pode ser considerada como baixa ou até mesmo inexistente (VIEIRA, 2015).

#### B) Correlação entre Variáveis Nominiais

Para a correlação entre variáveis nominais foi utilizado o teste Qui-Quadrado<sup>5</sup> ( $\chi^2$ ), conforme Bassanezi (2012), este um teste de hipóteses destinado a encontrar um valor da dispersão para duas variáveis nominais, avaliando a associação existente entre variáveis qualitativas. Não é caracterizado como um teste paramétrico, ou seja, não depende de parâmetros populacionais como média e variância, tem como princípio a comparação de proporções por meio das divergências entre as frequências observadas e as esperadas de um certo evento.

O “evento” em questão para este trabalho, é o Tipo de voçoroca descrito por Oliveira (1989) e as Formas de Vieira (2008). As frequências observadas tratam-se das características observadas em campo.

Bassanezi (2012) aponta que quando se faz alguma pesquisa o pesquisador trabalha com duas hipóteses:

**Hipótese nula  $H^0$ :** As frequências observadas não são diferentes das frequências esperadas. Não existe diferença entre as frequências (contagens) dos grupos.

**Hipótese alternativa  $H^1$ :** As frequências observadas são diferentes das frequências esperadas, portanto existe diferença entre as frequências.

---

<sup>5</sup> Também denominado de Chi-Quadrado

Ou seja, a hipótese nula infere que não existe relação entre as formas da encosta e o Tipo (ou Forma) da voçoroca, enquanto a hipótese alternativa sugere que existe relação entre estas duas características.

Quanto à interpretação do resultado, o referido autor aponta que ao consultar a tabela de  $\chi^2$  há determinada probabilidade de ocorrência do “evento”, rejeitando-se uma hipótese quando a máxima probabilidade de erro dela for baixa (alfa baixo) ou, quando a probabilidade dos desvios ocorrerem pelo simples acaso, é baixa.

Quando o valor de  $P$  se refere ao nível de relevância do teste, se o valor for superior a 0,025 e inferior a 0,05 significa que a hipótese nula deve ser rejeitada. Contudo, à medida que esse valor se aproxima de 1, significa um maior nível de relevância do teste, e que a hipótese nula é verdadeira para este contexto. Após a análise dos dados, foi realizado o Teste de Fisher, onde foram encontrados resultados semelhantes, validando os resultados encontrados via o Teste  $\chi^2$ .

### 3.1.6 Elaboração do mapa de vulnerabilidade a voçorocamento nas bacias hidrográficas

Em ambiente de SIG (Sistema de Informações Geográficas) foram ponderadas as características fisiográficas que contribuem para o desencadeamento e desenvolvimento de voçorocas, como declividade e forma da encosta, e o uso e ocupação do solo.

Dessa forma, foram usados os seguintes dados cartográficos:

- Mapa de declividade gerado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) com cotas de 5 em 5 metros. Fonte: Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Sustentabilidade de Manaus (SEMMAS);
- Mapa de Formas do Terreno Fonte: TOPODATA: Banco de dados geomorfométricos do Brasil – 2008.
- Imagens do *software Google Earth* do ano de 2014;
- Imagem do satélite RapidEye, ano de 2012, com resolução de 5 metros. Fonte: Ministério de Meio Ambiente;
- Imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite *LANDSAT-5* resolução espacial de 30 metros, com as bandas 3, 4 e 5 (*Red, Green e Blue*). Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Com base nos dados, foram desenvolvidos mapas temáticos para os aspectos que contribuem para indicar quesitos de vulnerabilidade, como mapas Clinográficos e Hispométricos, mapas de forma da encosta, declividade e orientação da vertente, mapas de uso e ocupação da terra.

Os mapas referentes à clinografia e à hipsometria foram elaborados em ambiente de SIG, através dos dados da base digital fornecida pela SEMMAS (Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Manaus), em escala de 1:10.000.

Considerando a altimetria máxima na cidade de Manaus de 109 metros, e na bacia em estudo a altimétrica varia entre 24 e 100 metros, esta foi dividida em 8 classes (24-30; 31-40; 41-50; 51-60; 61-70; 71-80; 81-90; e 91-100) compondo o mapa altimétrico da bacia.

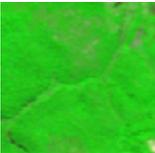
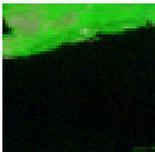
No que se refere ao quesito solo, deve-se salientar que não existe mapeamento pedológico em escala detalhada para a cidade de Manaus (1:25 000), apenas para o município realizado pela CPRM, o que justifica a necessidade de amostragens de solo da área de estudo. Portanto, foi realizada uma topossequência, em uma vertente da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo para caracterizar o relevo e características físicas do solo, bem como caracterizar o solo que está presente na bacia e sua vulnerabilidade ao processo erosivo.

Para a elaboração do mapa de uso e cobertura do solo foi utilizada interpretação de imagens ópticas com base em imagem do satélite RapidEye referente ao ano de 2012, com composição colorida 3(R) 5(G) 1(B).

Tendo os seguintes elementos: água, vegetação, área urbana e solo exposto, foram escolhidas a partir da configuração da paisagem da bacia hidrográfica em razão da resolução espacial da imagem RapidEye, não foi possível discernir e discriminar os tipos e extratos da cobertura vegetal, e este não é o objetivo do trabalho, porém considerando-se as dimensões da bacia em estudo, tais imagens possibilitam a análise e caracterização de elementos-chave no que concerne ao uso e cobertura do solo alcançando o intuito de elaborar um mapa do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica Colônia Antônio Aleixo.

Para tanto, foi utilizado o quadro 03 para a interpretação das características fisiográficas da bacia com o auxílio da imagem original e de imagens do Google Earth referentes aos anos de 2012 a 2015. Florenzano (2008) enfatiza que é importante lembrar que as cores dos objetos indicados são válidas para esse tipo de composição colorida.

Quadro 3: Exemplos de chave de interpretação de feições representativas em Imagem *RapidEye*, 3(R) 5(G) 1(B).

Imagem	Objeto	Chave de interpretação
	Solo exposto	Cor bege (dependendo do tipo de solo do tipo de solo, pode ser bem claro, tendendo ao branco); textura lisa; forma regular, localizado junto a área urbana (área terraplanadas para instalação de empreendimentos, áreas próximas a voçorocas e locais de deposição)
	Área urbana	Cor cinza; textura ligeiramente rugosa; forma irregular
	Vegetação	Cor verde (dependendo do tipo de vegetação, pode ser bem claro, tendem ao verde-claro); textura rugosa; forma irregular
	Água	Cor preta (água limpa) ou cor verde (material em suspensão e processo de eutrofização); textura lisa; forma irregular; linear retilínea ou curvilínea para rios

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

- Elaboração do Mapa de Vulnerabilidade

Os procedimentos metodológicos utilizados para a indicação das áreas que são vulneráveis aos processos erosivos lineares, foram baseados no método Suporte a Decisão AHP (*Analytic Hierarchy Process*) que consiste no cruzamento de variáveis através de pesos. De acordo com Câmara et al. (2001):

A AHP é uma teoria com base matemática que permite organizar e avaliar a importância relativa entre critérios e medir a consistência dos julgamentos. Requer a estruturação de um modelo hierárquico, o qual geralmente é composto por meta, critérios, sub-critérios e alternativas; e um processo de comparação pareada, por importância relativa, preferências ou probabilidade, entre dois critérios, com relação ao critério no nível superior. Com base na comparação, a AHP pondera todos os sub-critérios e critérios e calcula um valor de razão de consistência entre [0, 1], com 0 indicando a completa consistência do processo de julgamento. (CÂMARA, 2001, p,268)

Moreira et al. (2001) afirmam que dentre as diversas técnicas, o AHP se apresenta como sendo o mais promissor no contexto do processo de tomada de decisão.

Para Saaty (2003) o AHP também usa um princípio de composição hierárquica para derivar compostos de prioridades alternativas em relação a multi-critérios de sua prioridade e a respeito de cada critério. Isso talvez seja a forma mais simples para a decomposição de prioridades. A abordagem aditiva é crucial na realização de composição usando características limitantes de prioridade, no lugar de uma matriz de julgamento que considera a dependência e retorno na tomada de decisão. Diferentes métodos para a derivação de prioridades dentro da mesma hierarquia podem levar para diferentes valores finais as alternativas.<sup>6</sup>

Para o uso dessa técnica, é preciso a elaboração de relações de importância relativa entre os fatores a serem estudados, pois estes serão comparados de forma pareada, dois a dois. Um critério de importância é atribuído a estes fatores, conforme quadro 04, em que se obtém uma “medida relativa do mérito”. Essas relações são utilizadas como dados de entrada em uma matriz de comparação par a par, onde são calculados os autovalores e autovetores da matriz. Os pesos de cada membro *fuzzy* ponderado *equivalem*, então, aos autovetores da matriz de comparação par a par (MOREIRA et al., 2001).

Quadro 4: Escala AHP (Analytic Hierarchy Process) de Comparação Pareada

Intensidade da Importância	Definição e Explicação
1	<b>Importância igual</b> – os dois fatores contribuem igualmente para o objetivo
2*	<b>Importância Igual – moderada</b>
3	<b>Importância moderada</b> – um fator é ligeiramente mais importante que o outro
4*	<b>Importância moderada – essencial</b>
5	<b>Importância essencial</b> – um fator é claramente mais importante o outro
6*	<b>Importância essencial – demonstrada</b>
7	<b>Importância demonstrada</b> – um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática
8*	<b>Importância demonstrada – extrema</b>
9	<b>Importância extrema</b> – a evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível
*	Valores intermediários entre julgamento – possibilidade de compromissos adicionais

Fonte: Moreira et al. (2001) p. 40. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2015

<sup>6</sup> Tradução do autor

De acordo com Moreira et al. (2001) em comparação aos demais, o modelamento *Fuzzy* Ponderado foi o que apresentou os melhores resultados. A distribuição dos valores dos membros *fuzzy* foi a mais uniforme, não apresentou concentrações em pontos que pudessem dificultar o fatiamento dos valores associados à técnica AHP. A lógica da comparação par a par é uma análise decomposta por comparação dois a dois dos elementos, que finaliza com uma síntese de recomposição, pela agregação dos valores membros dos elementos, em um método de avaliação unificado (BANAI, 1993 apud. MOREIRA et al., 2001)

A partir do estabelecimento dos critérios a serem comparados para o tema, é possível estabelecer os pesos a serem utilizados para a combinação dos diferentes mapas temáticos para a análise da vulnerabilidade na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo.

De acordo com Lima (2013), é aconselhável que o índice de consistência seja sempre menor que 0,1. Quando maior que 0,1, sugere-se refazer o procedimento de comparação pareada entre os indicadores.

A designação dos valores das variáveis dos temas Declividade, Forma do Relevo e Uso e Ocupação do solo é fundamentada em trabalhos de:

a) Crepani et al. (2001), no qual é apresentada a metodologia para elaboração de mapas de vulnerabilidade em relação à perda do solo, com o objetivo de subsidiar o Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial, e proposta de pesos ao tema geomorfologia; b) Faria et al. (2003), quando se trata de análise da susceptibilidade à erosão na bacia hidrográfica Ribeirão do Espírito Santo, Juiz de Fora (MG); c) Vieira (2008) defende a tese sobre o desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM) considerando os principais fatores controladores e impactos urbanos ambientais; d) Fushimi (2012) refere-se ao mapeamento de áreas vulneráveis a processos erosivos no município de Presidente Prudente (SP); e) Deodoro e Fonseca (2014) trabalham a análise em escala de bacia hidrográfica para o potencial erosivo, com apoio de Sistema de Informações Geográficas.

O teste foi calibrado para a realidade da região, baseando-se em suas características fisiográficas, assim foram atribuídos pesos para cada uma das classes, para os valores de declividade foram adaptados os intervalos com base na classificação feita pela EMBRAPA (1999), no qual a declividade é medida em porcentagem. Para aplicar o peso, ou seja, quais seriam o valor de cada intervalo observou-se em qual deles as incisões do tipo voçoroca são mais recorrentes, gerando a tabela 02.

Tabela 2: Pesos para a classe declividade

Declividade	
Classe	Valor
0-3%	1
3-8%	2
8-13%	5
13-20%	7
20-45%	8
>45%	9

Org: Armando Brito da Frota Filho, 2015

Quanto à forma do terreno ou forma da encosta, foi utilizado a classificação realizada por Valeriano (2008) com base no modelo de Dikau (1990), derivado da combinação das classes de curvaturas horizontais (convergente, planar ou divergente) e verticais (côncavo, retilíneo ou convexo). Os valores atribuídos para esse tema levaram em consideração a ocorrência de feições erosivas na bacia assim como na cidade de Manaus, dessa forma, a classe que mais apresentou voçorocas obteve o maior valor, enquanto a que apresentou menos quantidade ou nenhuma recebeu o menor valor (TABELA 03).

Tabela 3: Pesos para a classe forma do terreno (forma da encosta)

Forma do relevo	
Classe	Valor
Convergente-côncava	5
Convergente-retilínea	2
Convergente-convexa	8
Plana-côncava	4
Planar-retilínea	1
Planar-convexa	7
Divergente-côncava	6
Divergente-retilínea	3
Divergente-convexa	9

Org: Armando Brito da Frota Filho, 2015

O tema uso e ocupação do solo foi dividido em 4 classes, variando da sua potencialidade em apresentar feições erosivas, mas como não ocorre erosão abaixo do nível de base, a água recebeu o menor valor, as demais classes receberam valores conforme a sua predisposição à erosão, como pode ser visto na tabela 04.

Tabela 4: Pesos para a classe uso e ocupação do solo

Classe Uso e Ocupação do solo	
Classe	Valor
Água	1
Vegetação	3
Área Urbana	6
Solo Exposto	10

Org: Armando Brito da Frota Filho, 2015

Foram elaborados dois mapas de vulnerabilidade, um com cunho natural abrangendo somente declividade e forma do terreno, o primeiro aspecto recebeu uma relevância de 60% enquanto o segundo de 40%.

Um mapa de vulnerabilidade ambiental foi feito e a declividade recebeu relevância de 50%, enquanto a forma do terreno de 30% e o uso e ocupação do solo de 20%. Esses valores consideram a importância de cada um desses aspectos para o desenvolvimento do processo erosivo.

## 4 RESULTADO E DISCURSÕES

### 4.1 Descrição das áreas com ocorrência a voçorocamento nas bacias Colônia Antônio Aleixo

As características que mais se destacam no desenvolvimento e aceleração do processo erosivo são o solo, a cobertura vegetal e o tipo de vertente.

Algumas incisões iniciaram em decorrência do impacto antrópico, seja pelo desmatamento e terraplangem, ou através da implementação da rede de drenagem urbana (pluvial ou de água servidas).

#### 4.1.1 Solo

Rodrigues e Gouveia (2013) explicita que a taxa de erosão varia de acordo com a fase de urbanização, pois além da retirada da cobertura vegetal, há intensa movimentação de volumes de terra e desestruturação da camada superficial do solo que fica exposto à erosão. Esse aspecto pode ser observado em parte da BH Colônia Antônio Aleixo, especificamente no bairro Distrito Industrial II, no qual há pontos com terraplangem (FIGURA 19). Na figura abaixo pode ser observada a quantidade de solo que foi retirada, constituído pelo Horizonte O e A, e parte do Horizonte B. Além disso, a seta preta aponta o acúmulo de ferro no solo.

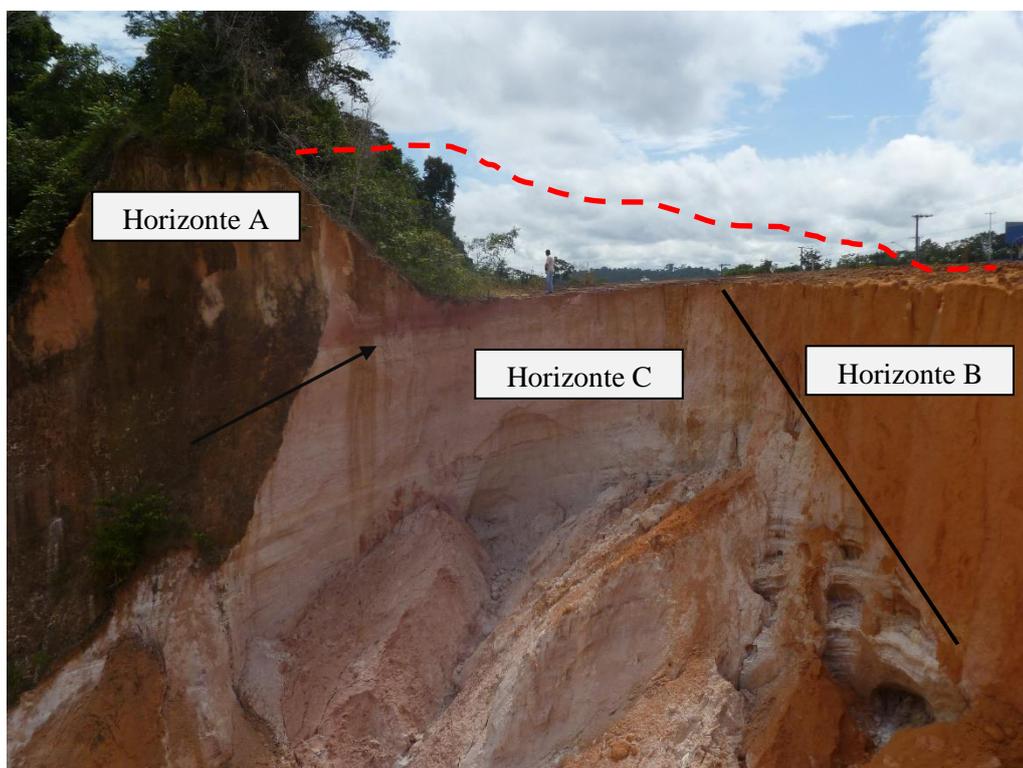


Figura 19: Voçoroca localizada no bairro Distrito Industrial II, BH Colônia Antônio Aleixo. Linha tracejada vermelha representa o volume de solo removido. Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2012

Como explanado por Tucci (1997), Tucci (2008), Vieira (2008) e Rodrigues e Gouveia (2013) a erosão aumenta em sitio urbano, pois a taxa de infiltração é reduzida pela impermeabilização do solo, o que favorece o processo de escoamento.

Com base em 2 testes e infiltração realizados no bairro Distrito Industrial II, ambos em áreas com intervenção antrópica, sendo o primeiro em área sem vegetação (GRÁFICO 02) o segundo em área sem vegetação e com encrostamento na borda (GRÁFICO 03), se observa a discrepância em relação às taxas de infiltração obtidas em área com vegetação.

O gráfico 02 mostra maior taxa de infiltração nos três primeiros minutos e apresentou o valor inicial em torno de 0,5 mm/min. Em seguida a taxa caiu, se estabilizou próximo ao 10º minuto com taxa de 0,15 mm/min., e finalizou aos 25 minutos com taxa de 0,11mm/min. e com taxa média de 0,17 mm/min.

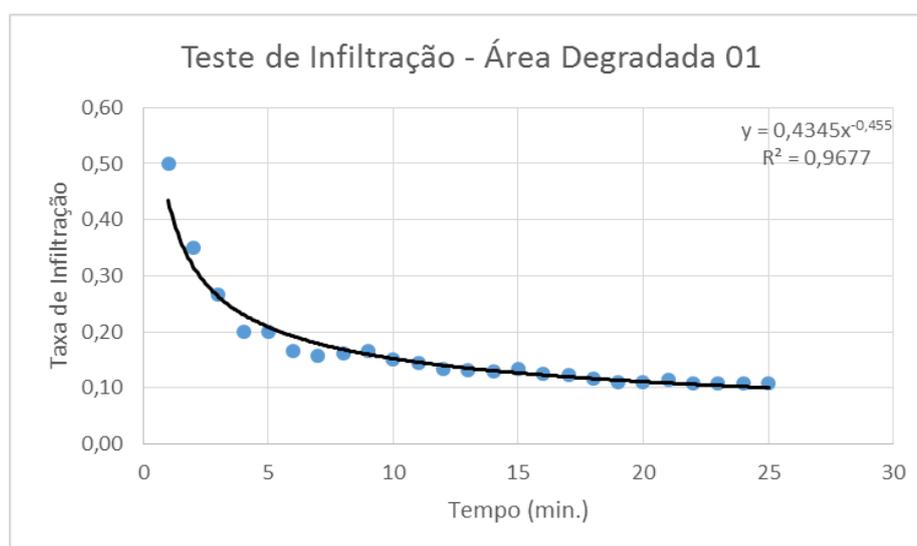


Gráfico 2: Teste de Infiltração realizado em área degradada, no bairro Distrito Industrial II  
Fonte: Leitão (2014).

O segundo teste de infiltração (GRÁFICO 03) também foi realizado em área degradada, o qual o solo foi terraplanado, compactado e com presença de crostas lateríticas (FIGURA 20) e com uma feição erosiva do tipo voçoroca nas adjacências.



Figura 20: Local do teste de infiltração, próxima a voçoroca, bairro Distrito Industrial II  
 Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 13/08/2015

Apresentou taxa inicial de 0,05 mm/min. e se estabilizou a partir do 14º minuto com taxa de 0,01. O teste teve duração de 20 minutos apresentando taxa média de 0,02 mm/min. que é uma taxa muito baixa, porém condizente com as características físicas da área, tais como a ausência da cobertura vegetal e dos horizontes superiores do solo (horizontes O, A e parte do B), alto nível de compactação e presença de crostas ferruginosas.

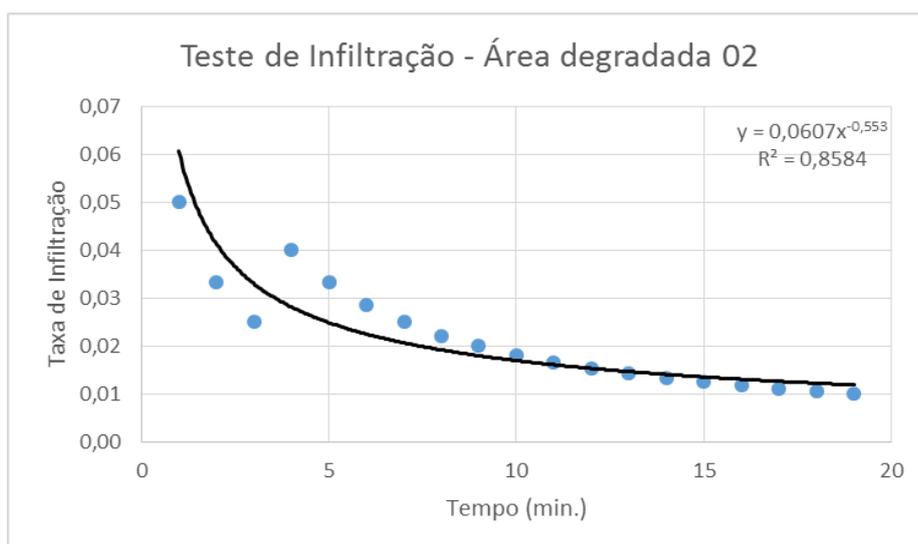


Gráfico 3: Teste de Infiltração realizado em área degradada, no bairro Distrito Industrial II – BH Antônio Aleixo  
 Fonte: Fonte: Leitão (2014).

Estes testes quando comparados com o realizado no topo de uma vertente<sup>7</sup> vegetada da Bacia Colônia Antônio Aleixo, apresentam grandes diferenças (TABELA 05). Além dos testes mostrarem que as áreas degradadas apresentam taxas de infiltração reduzida em comparação com áreas vegetadas, também precisam de menos tempo para alcançar a estabilização. Essas características auxiliam no desenvolvimento do escoamento superficial (*runoff*) propiciando o processo erosivo.

Tabela 5: Comparação entre dados de infiltração realizados na Bacia Colônia Antônio Aleixo

	Área vegetada <sup>1</sup>	Área sem vegetação <sup>2</sup>	Área sem vegetação, terraplanada e com presença de crostas lateríticas <sup>2</sup>
Taxa Inicial (mm/min.)	2,5	0,5	0,05
Taxa Final (mm/min.)	1,2	0,11	0,01
Taxa Média (mm/min.)	1,5	0,17	0,02
Duração do teste (min)	29	25	20

<sup>1</sup> Teste realizado em 02/02/2015; <sup>2</sup> Teste realizado em 14/05/14  
Org. Armando Brito da Frota Filho.

Devido às propriedades físicas e químicas do solo, em especial do Alumínio ( $Al^{3+}$ ) e Fe que dificulta o processo de regeneração da vegetação, além das argilas silicatadas que facilitam o desenvolvimento de crostas ferruginosas, quando associado a processos de desmatamento e/ou terraplanagem o desenvolvimento de processos erosivos é inevitável.

O bairro que apresenta o maior número de incisões erosivas do tipo voçoroca na BHCAA é o bairro Distrito Industrial II. A maioria das voçorocas teve seu desenvolvimento inicial entre o horizonte B e C, desencadeado pela terraplanagem que faz parte do processo de ocupação do bairro.

A figura 21 exibe um exemplo de terraplanagem ocorrida no bairro Distrito Industrial II, onde pode ser observado que a cobertura vegetal, os Horizontes O e A foram removidos. Também nota-se a presença de falhamento dispendo os horizontes B e C lado a lado.

<sup>7</sup> Teste realizado durante o ponto 01 (GRÁFICO 08) da topossequência descrita no resultado 4.2.2 Caracterização pedológica da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

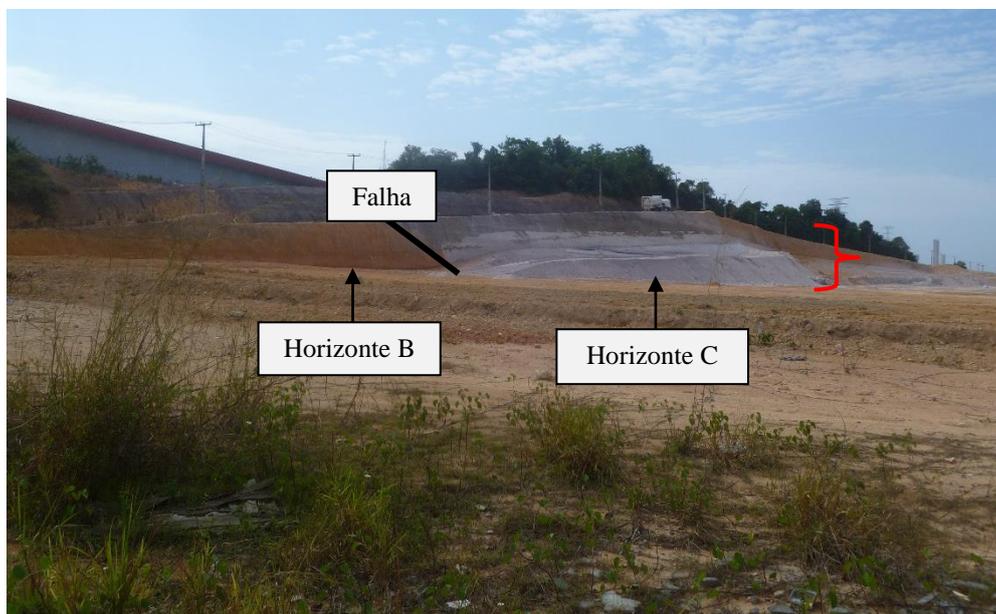


Figura 21: Área de terraplanagem no bairro Distrito Industrial II, BH Colônia Antônio Aleixo. Chave vermelha representa o volume de solo removido. Presença de falhamento  
 Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015

O processo de terraplanagem expõe o solo diretamente à precipitação, e considera-se que as características do solo da bacia, como o elevado pH que dificulta a regeneração da vegetação e a alta concentração de argilas silicatadas, é uma característica facilitadora para a ocorrência do *splash* e por conseguinte, de encrostamento do solo.

O processo de encrostamento do solo propicia o escoamento superficial concentrado e/ou difuso que associado ao relevo declivoso da bacia desencadeia o processo erosivo.

Nos demais bairros que compõem a Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, por se tratarem de ocupações mais antigas e consolidadas, as voçorocas apresentam seu desenvolvimento no horizonte A, e tem seu processo de desencadeamento ligado à associação da declividade elevada com a perda de vegetação ao escoamento de águas pluviais e/ou servidas.

#### 4.1.2 Vegetação

Quanto à vegetação, a área da BHCAA teve seu crescimento urbano sobre área de florestas primárias, de forma urbanisticamente desordenada ou por empreendimentos

imobiliários autorizados (PINHEIRO et al., 2013). Portanto, a área apresenta apenas enclaves de sua vegetação nativa, sendo atualmente composta por vegetação secundária, vegetação rasteira, campinarana e algumas áreas com plantio.

Todavia, as incisões erosivas mapeadas tendem a se desenvolver próximas a vias públicas, onde a vegetação é incipiente ou mesmo inexistente. Considera-se que a vegetação é a camada protetora do solo contra o desenvolvimento de processos erosivos e que à medida que essa camada é reduzida, o solo é exposto às intempéries e dessa forma torna-se mais vulnerável.

Observou-se ainda, que algumas espécies vegetais apresentaram um potencial protetor maior que outras, e isso pode ser identificado onde a urbanização é mais consolidada na BHCAA, como os bairros Jorge Teixeira e Zumbi, onde foram detectadas áreas com presença de bananeiras nas bordas das incisões. Coelho Netto (2008) explicita que espécimes vegetais que apresentam um tronco convergente, como as bananeiras, tendem a criar o chamado fluxo de tronco, no qual a água converge das folhas para o tronco e em seguida com força cinética chega ao solo, desencadeando o destaque e transporte do solo próximo a planta. Em relação a esses bairros, essas espécies colaboram para o aceleração de incisões já existentes e promovem o reaparecimento de incisões que haviam sido obliteradas pelo poder público.

A campinara também apresenta problemas no que se refere à proteção do solo em relação ao impacto cinético das gotas de chuva, pois possui um tipo de vegetação espaça com folhas que pouco a protegem do impacto direto e que não propiciam o desenvolvimento da serapilheira, eficaz para a proteção do solo.

A campinara é caracterizada por árvores mais baixas, com troncos finos e espaçados, e desenvolve-se em áreas arenosas bastante lixiviadas, por isso é também denominada de "caatinga do Rio Negro" (ROQUE, 2006).

Quanto a isso, Coelho Netto (2008) alega que “o maior adensamento de vegetação ou um aumento na demanda de água pela vegetação propicia menores quantidade de chuvas atravessadas”. Logo, os tipos de vegetação que mais apresentam capacidade de proteção do solo é a Vegetação Primária, seguida da Vegetação Secundária, devido ao porte, composição de serapilheira e a sobreposição de extratos.

### 4.1.3 Vertente

Valeriano (2008) ressalta que a Forma do Terreno pode ser dividida em 9 classes conforme as combinações entre a curvatura horizontal da encosta (convergente, planar e divergente) e a curvatura vertical da encosta (côncava, convexa e retilínea), variam entre a forma côncava-convergente (máxima concentração e acúmulo do escoamento) a convexa-divergente (máxima dispersão do escoamento), e as demais combinações têm características hidrológicas intermediárias.

Valeriano (2008) ainda explana que a curvatura vertical da encosta expressa:

É definida com a segunda derivada da altitude, o que pode ser descrito como a variação da declividade ao longo de uma determinada distância. Traduzindo tais definições para a percepção comum, refere-se ao caráter convexo/côncavo do terreno, quando analisado em perfil(p.37).

Quanto à curvatura horizontal da encosta, o autor afirma que:

Definida como uma derivada de segunda ordem, porém, não da elevação, mas das curvas de nível. Em analogia à relação entre curvatura vertical e declividade, a curvatura horizontal pode ser descrita como a variação da orientação de vertentes ao longo de uma determinada distância. Na nossa percepção comum, a curvatura horizontal se traduz no caráter de divergência ou convergência das linhas de fluxo (p. 40)

Na BH Colônia Antônio Aleixo, há a predominância de encosta com forma convexa Divergente que abrange cerca de 30,13% da área bacia e em seguida, a forma côncava Convergente com 29,09% (TABELA 6) (GRÁFICO 04). De forma comparativa, o Quadro 05 mostra a disposição das vertentes e suas formas em curvatura horizontal e curvatura vertical.

Tabela 6: Classes de Forma do Terreno (forma da vertente) e seus valores em área (km<sup>2</sup>) e porcentagem (%) na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

Número	Forma de Vertente	Área km <sup>2</sup>	(%)
1	Convexa Divergente	7,51	30,13
2	Côncava Convergente	7,25	29,09
3	Retilínea Divergente	2,02	8,11
4	Convexa Convergente	1,98	7,95
5	Côncava Divergente	1,81	7,27
6	Retilínea Convergente	1,31	5,26
7	Côncava Planar	1,22	4,90
8	Convexa Planar	1,21	4,86
9	Retilínea Planar	0,61	2,43
Total		24,93	100

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

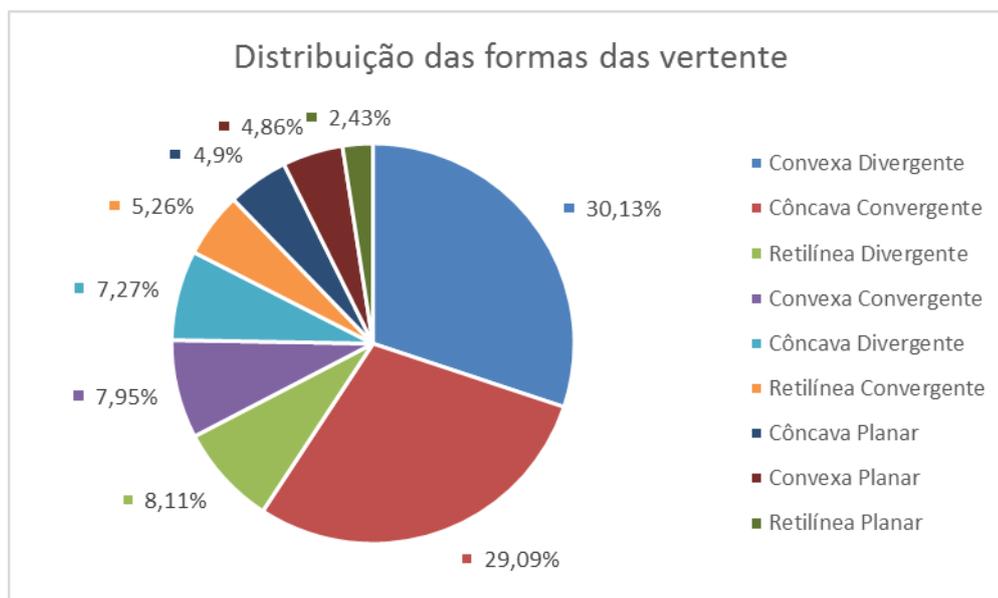


Gráfico 4: Distribuição das Formas da vertente.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Quadro 5: Disposição das vertentes e suas formas em curvatura horizontal e curvatura vertical e seus valores em porcentagem (%) na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

Forma do Terreno		Curvatura Horizontal			Total
		Convergente	Planar	Divergente	
Curvatura Vertical	Cônica	29,09 %	4,90 %	7,27 %	41,26 %
	Retilínea	5,26 %	2,43 %	8,11 %	15,8 %
	Convexa	7,95 %	4,86 %	30,13 %	42,94 %
Total		42,3 %	12,19 %	45,51 %	100 %

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

A figura 22 mostra o mapa de Forma do Terreno da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo e a localização das voçorocas encontradas na bacia. Com base nesse critério, observou-se que a distribuição das voçorocas (n=22) nas encostas da bacia estão assim distribuídas: 09 estão em encostas convexas divergentes; 06 estão em encostas convexas convergentes; 05 estão em encostas côncavas convergentes; 01 está em encosta retilínea divergente; e 01 está em encosta côncava planar.

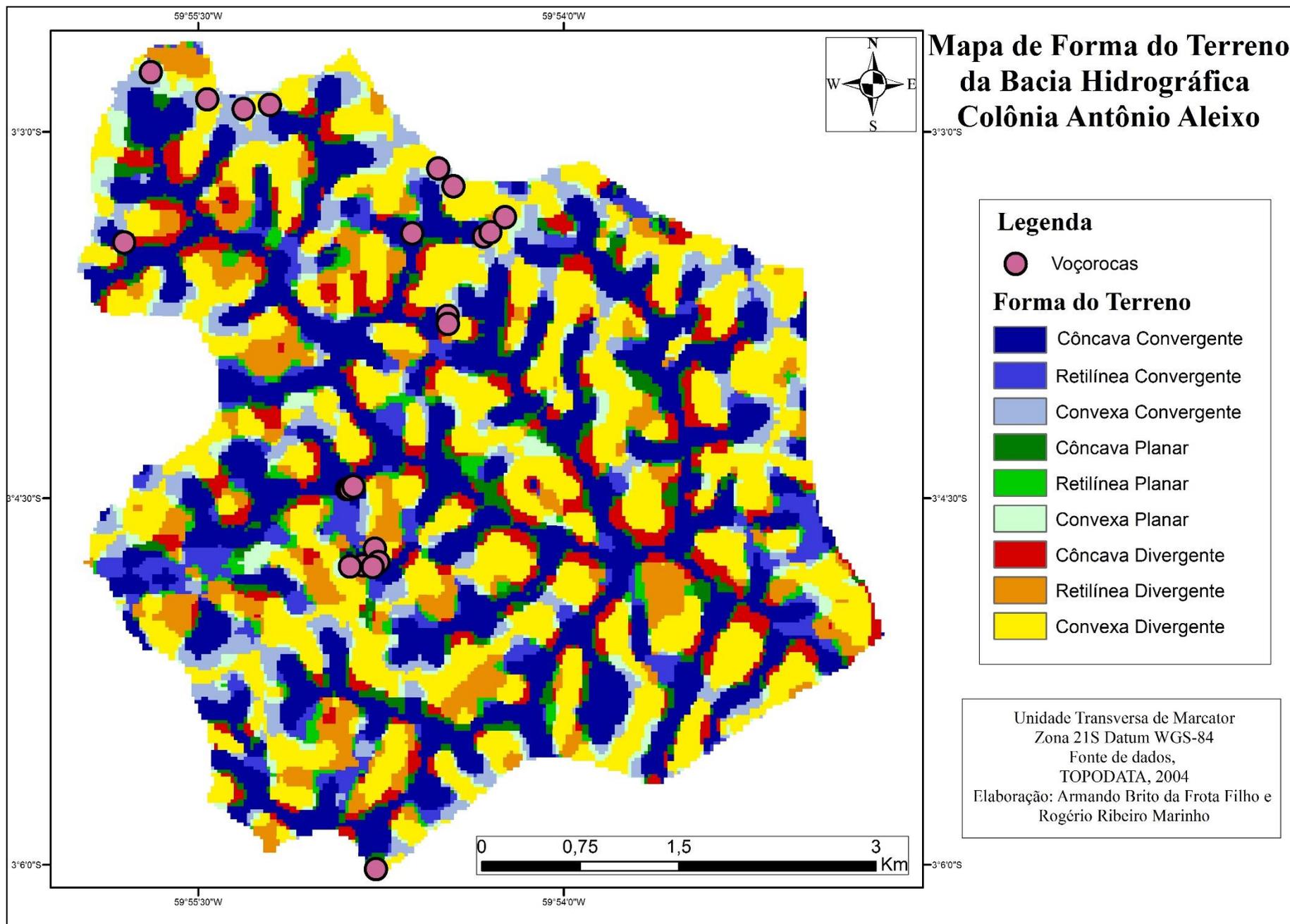


Figura 22: Mapa de Forma do Terreno e localização das voçorocas da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM.  
Org. Armando Brito da Frota Filho e Rogério Ribeiro Marinho, 2016.

Autores como Stabile e Vieira (2009) afirmam que a ocorrência de voçorocas é facilitada em encosta do tipo côncava e está associada à cabeceira de drenagem e anfiteatros de encosta. A maior convergência de fluxos hídricos permite o incremento da força de retirada e de transporte. Enquanto que Bloom (1970 apud Silva Neto, 2013) define que as encostas convexas são dominadas por rastejo e pelo predomínio de escoamento superficial.

No entanto, no gráfico 10 nota-se que as voçorocas da BH Colônia Antônio Aleixo ocorrem, principalmente, em encostas Convexas. Esse resultado, corrobora com os dados de Vieira (2008), que mostrava que 66% das voçorocas foram encontradas em vertentes Convexas na cidade de Manaus, diferente do que foi mencionado por Stabile e Vieira (2009).

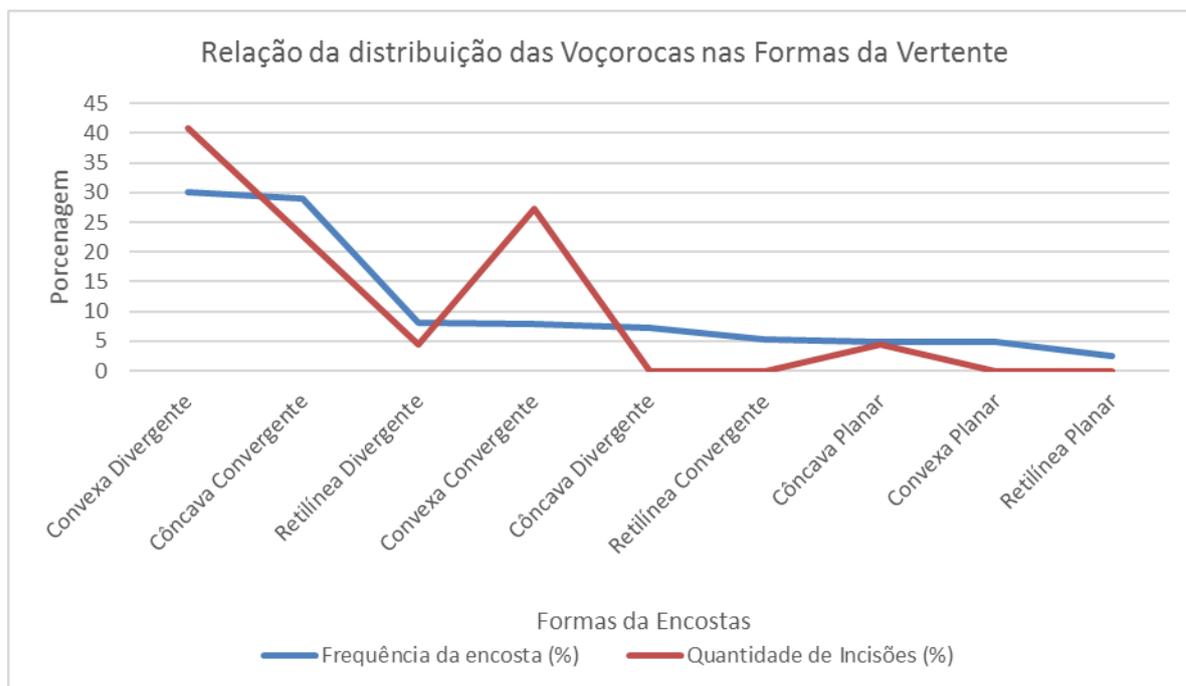


Gráfico 5: Correlação da distribuição das Voçorocas nas Formas do Terreno.  
Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

No Quadro 06 pode ser observada a distribuição das incisões tanto no que tange a curvatura horizontal da encosta (convergente, planar e divergente), quanto à curvatura vertical da encosta (côncava, convexa e retilínea).

Quanto à distribuição das incisões entre a curvatura horizontal da vertente, observa-se que o maior número de incisões se concentrou nas encostas convergentes, seguida por quantidade, também expressiva, nas encostas divergentes.

O fato de uma vertente apresentar características convergentes contribui para que o fluxo ganhe mais energia cinética e haja capacidade de destacamento maior dos componentes do solo. Os gráficos 6 e 7 exibem a relação da distribuição das incisões das curvaturas horizontal e vertical respectivamente.

Quadro 6: Forma do Terreno e distribuição das voçorocas

Forma do Terreno		Curvatura Horizontal			Total
		Convergente	Planar	Divergente	
Curvatura Vertical	Côncava	5	1	-	6
	Retilínea	-	-	1	1
	Convexa	6	-	9	15
Total		11	1	10	22

Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

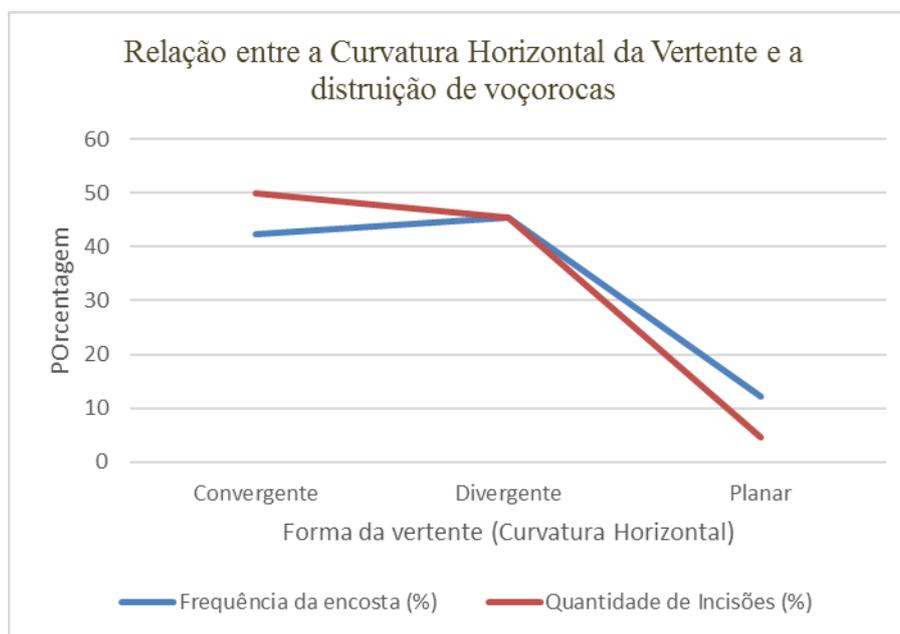


Gráfico 6: relação da distribuição das voçorocas e a curvatura horizontal.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

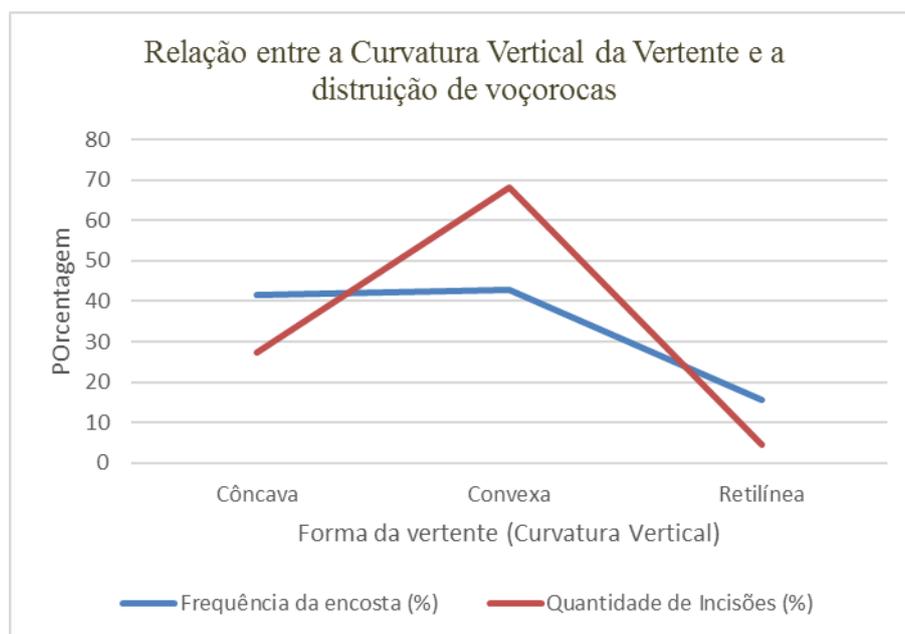


Gráfico 7: Relação da distribuição das voçorocas e a curvatura horizontal.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016

Vieira (2008) afirma que a forma da encosta apresenta menor influência que a declividade no desenvolvimento das incisões, pois como a declividade na BH Colônia Antônio Aleixo é bastante elevada, os fluxos ainda que não converjam para o mesmo ponto, como em encostas Convergentes, a declividade faz o fluxo ganhar energia cinética suficiente para retirar e transportar as partículas de solo.

Observando o Gráfico 8 e Tabela 7, nota-se a distribuição das voçorocas de acordo com a declividade da bacia. Apesar do intervalo entre 9 e 20%<sup>8</sup> de declividade apresentar a maior área (39,07%), o número mais elevado de voçorocas se desenvolveu no intervalo de 21 e 45%<sup>9</sup>, que apresenta 35,22 % da bacia.

Tabela 7: Relação da distribuição das Voçorocas e Classes de Declividade

Intervalo de Declividade	Área (%)	Quantidade de Voçorocas
0-8%	23,08	1
9-20%	39,67	6
21-45%	35,22	13
>45%	2,03	2
Total	100	22

Org: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

<sup>8</sup> Equivalente ao intervalo de 5,14° a 11,85° de declividade

<sup>9</sup> Equivalente ao intervalo de 11,85° a 24,22° de declividade

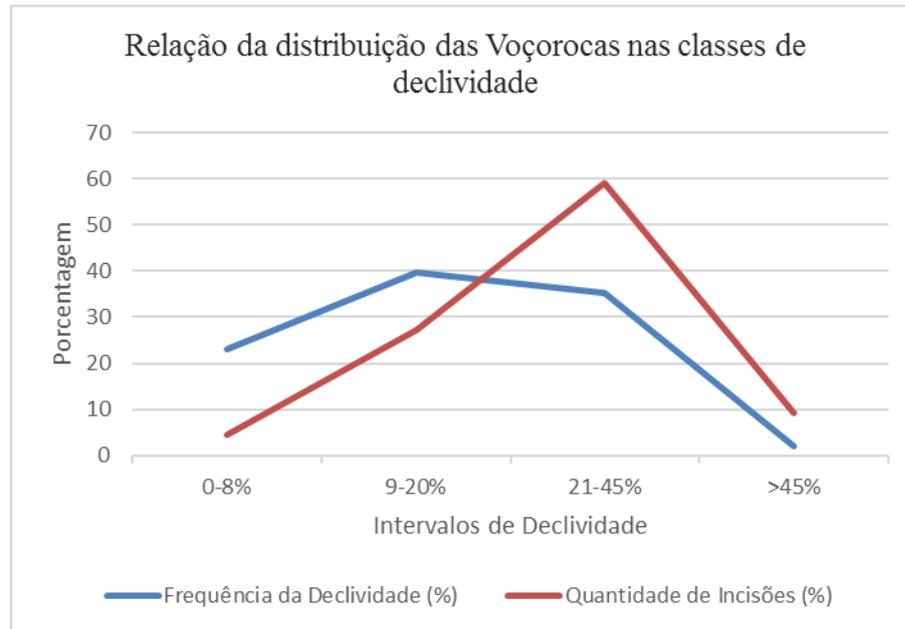


Gráfico 8: Relação da distribuição das Voçorocas e Classes de Declividade.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

O que corrobora com autores como Ab'Saber (1968), Evans (1984), Thornes (1984), Oliveira (1989), Tucci e Clarke (1997), Valentin et al. (2005), Guerra (2008), Guerra e Maçal (2009), Guerra (2014) que o processo erosivo tende a ocorrer principalmente em encosta com declividade superior a 20%, ou seja vertente com elevadas declividades.

## 4.2 Caracterização pedo-geomorfológica da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

### 1.1.1 Caracterização Geomorfológica da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

Para entendimento da dinâmica geomorfológica em um sistema como uma Bacia Hidrográfica é necessária uma caracterização desta unidade geomorfológica, bem como a identificação dos padrões ou mesmo características que colaboraram com o processo erosivo.

A análise de bacias hidrográficas, por meio de características geomorfológicas associadas à rede de drenagem, possibilita a identificação de particularidades e de processos formadores dessa unidade do relevo.

Foram delimitadas algumas questões no que concerne à morfometria e morfologia da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, tais como, **Características morfológicas da bacia:** Área (A), Perímetro (P), Largura (B) e Comprimento (L); **Parâmetros de Drenagem:** Densidade de Drenagem (Dd) , Densidade Hidrográfica (Dh), Extensão do Percurso Superficial (Eps), Índice de Sinuosidade  $I_{sin}$ , Coeficiente de manutenção ( $C_{man}$ ) e L de Hack; **Características Geomorfológicas;** Relação do Relevo ( $R_h$ ), Gradiente dos Canal Principal (G), Índice de Rugosidade ( $I_r$ ), Coeficiente de Massividade ( $C_{mas}$ ) e Coeficiente Orográfico ( $C_o$ ) e; **Comparação com o Círculo:** Relação de Enlongamento ( $R_e$ ), Índice de Circularidade ( $I_c$ ) e Índice de Compacidade ( $I_k$ ) (QUADRO 07).

Quadro 7: Síntese das características da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

	Parâmetros	Cálculo	Unidade	Valor
Características Morfológicas	Área (A)	$A = L \cdot B$	Km <sup>2</sup>	24,93
	Perímetro (P)	P	Km	22,97
	Comprimento (L)	L	Km	7,455
	Largura (B)	B	Km	4,366
Parâmetros de Drenagem	Densidade de Drenagem (Dd)	$Dd = L_t / A$	Km/Km <sup>2</sup>	6,12
	Densidade Hidrográfica (Dh)	$Dh = N / A$	Km/Km <sup>2</sup>	5,14
	Extensão do Percurso Superficial (Eps)	$Eps = 1 / 2Dd$	Km	0,026
	Índice de Sinuosidade $I_{sin}$	$I_{sin} = L / L_t$	-	1,04
	Coefficiente de manutenção (Cman)	$Cman = 1 / Dd \times 1000$	m/Km <sup>2</sup>	163,398
Lei de Hack	L de Hack	$L = 1,5 \cdot A^{0,6}$	Km	10,33
	Variação	$(L - L_{Hack}) / L$	(%)	-38,39
Características Geomorfológicas	Amplitude Altimétrica ( $\Delta a$ )	$\Delta a = H - h$	m	75
	Relação do Relevo ( $R_h$ )	$R_h = \Delta a / L$	-	0,0100
	Gradiente dos Canal Principal (G)	$G = [(H - h) / L] \times 100$	%	0,9672
	Índice de Rugosidade (Ir)	$Ir = H \times Dd$	m	593,64
	Coefficiente de Massividade ( $C_{mas}$ )	$C_m = Am / A$	-	2,290
	Coefficiente Orográfico ( $C_o$ )	$C_o = Am \times C_m$	m	130,586
Relação com o Círculo	Relação de Enlongamento ( $R_e$ )	$R_e = 1,128 \cdot A^{0,5} \cdot L^{-1}$	-	0,755
	Índice de Circularidade ( $I_c$ )	$I_c = 12,57 \cdot A \cdot P^{-2}$	-	0,593
	Índice de Compacidade ( $I_k$ )	$I_k = 0,2821 \cdot P \cdot A^{-0,5}$	-	1,297
Feições Erosivas	Nº de voçorocas Vieira (2008)	-	unidade	50
	Nº de voçorocas Frota Filho (2012)	-	unidade	31

Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2015

- Área e Perímetro

É possível caracterizar a bacia no que se refere ao seu tamanho, com uma área igual a 24,93 km<sup>2</sup>. Esse tamanho, na classificação de Porto et al. (1993), indica um tamanho “médio”, fato confirmado por características morfométricas como Perímetro (22,97 Km), Comprimento do eixo da bacia (7,45 Km) e a Largura média (4,36 Km).

- Ordem da Bacia e Padrão de Drenagem

O canal principal e eixo da bacia possuem orientação NW-SE, sentidos predominantes dos cursos fluviais e vales na região, devido ao controle estrutural neotectônico. Na Bacia Colônia Antônio Aleixo, o rio principal da bacia é de 5º ordem, classificado a partir do modelo de Strahler (1952).

A bacia apresenta Padrão de Drenagem Dentrítico e, conforme Christofolletti (1980), é um padrão também conhecido como Arborescente, pois assemelha-se à configuração de uma árvore, onde o rio principal é o tronco em que seus tributários são seus ramos e os tributários de menor categoria são os ramos das folhas. Neste tipo de padrão de drenagem, as junções dos canais fazem ângulos agudos com graduações variadas, sem chegar a ângulos retos (FIGURA 23).

Entretanto, muitos cursos da bacia apresentam ângulos retos, resultado de controle estrutural, e no tocante a isto Suguiu e Bigarella (1990) apontam que quando há a presença de ângulos retos no padrão dentrítico é caracterizado como uma variação do padrão, sendo denominado de **Retangular-dentrítico**

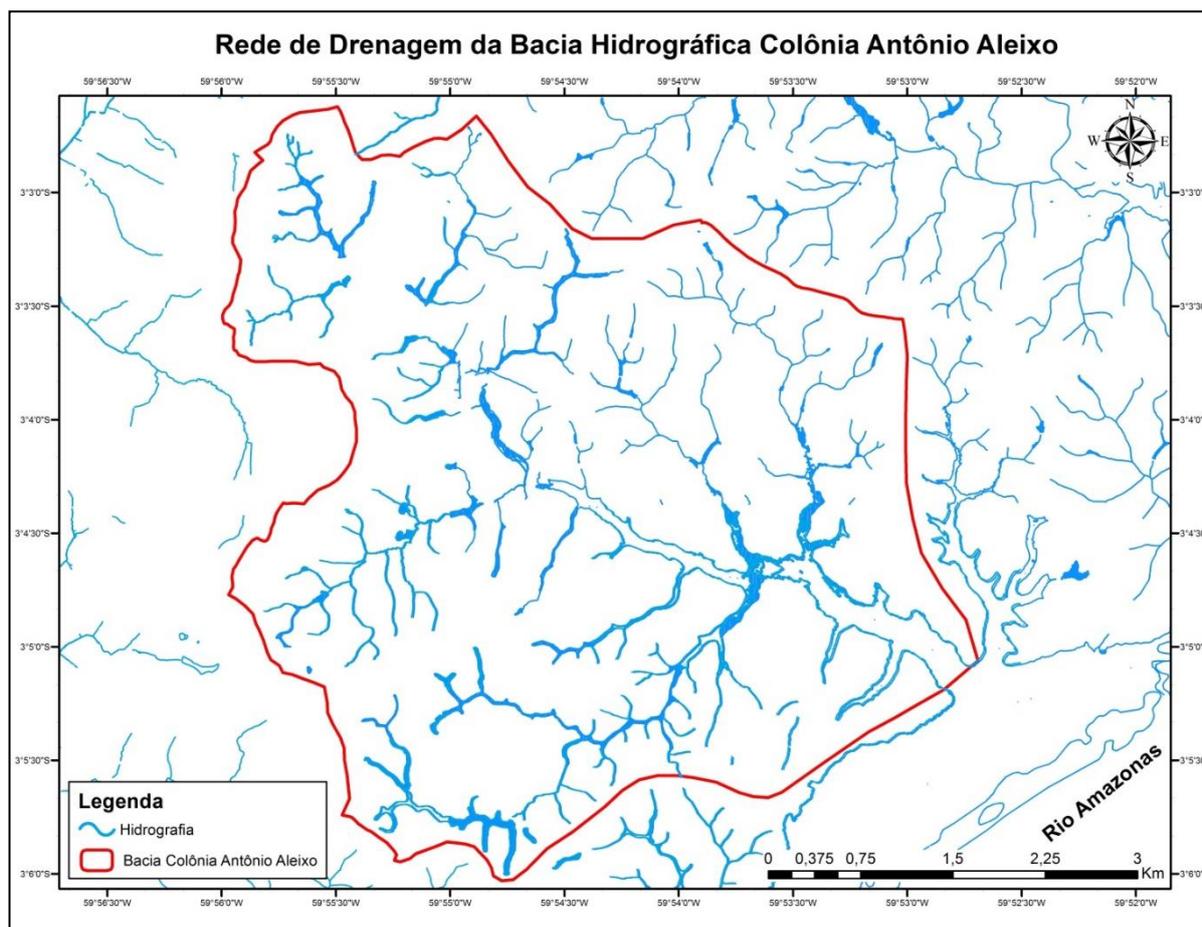


Figura 23: Rede de Drenagem da bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo.

Fonte: ArcGIS Online, Unidade Transversa de Mercator, Zona 21S, Datum WGS-84. Elaboração: Mônica Cortêz Pinto. Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2015

- Densidade Hidrográfica (Dh)

Na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo a Densidade Hidrográfica é 5,14 Km/Km<sup>2</sup>. Estudos de Vieira (2008) informam que nas bacias da cidade de Manaus, os valores de Dh variam entre 1,32 a 11,45 Km/Km<sup>2</sup>. Conforme Macuzzo et al. (2012), uma bacia é considerada bem drenada quando tem 01 (um) canal por km<sup>2</sup>.

Ao considerar uma voçoroca como um canal de ordem Zero ou de primeira ordem e que a Bacia Colônia Antônio Aleixo possui o maior número de incisões erosivas da cidade, entende-se que quanto maior a capacidade de gerar novos cursos d'água, maior será a susceptibilidade aos processos erosivos.

- Densidade de Drenagem (Dd)

A Densidade de Drenagem é uma variável morfométrica que retrata a disponibilidade de canais para o escoamento linear das águas e materiais detríticos, assim como o grau de dissecação do relevo resultante da atuação da rede de drenagem (SIQUEIRA, 2001 apud BARBOSA e FURRIER, 2011).

O resultado dos cálculos obtidos para a Bacia Colônia Antônio Aleixo aponta para uma Dd de 6,12 Km/Km<sup>2</sup> e de acordo com o Quadro 8 que a classifica como tendo baixa densidade de drenagem, apesar de possuir uma forte dissecação.

Quadro 8: Classes interpretativas para os valores de Densidade de Drenagem (Dd)

Classe de Densidade de Drenagem (Dd)	Razão da Densidade Média (km/km <sup>2</sup> )
Baixa Densidade	< 7,5
Média Densidade	7,5 a 10
Alta Densidade	> 10

Fonte: Christofolletti (1969). Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

- Extensão do Percurso Superficial (Eps)

Representa o percurso das enxurradas do interflúvio até a rede de drenagem, o qual interfere na maior ou menor infiltração da água que tem uma relação direta com a densidade de drenagem (CHRISTOFOLETTI,1980), assim como com o processo de escoamento superficial, que tem relação com desenvolvimento de processos erosivos.

O resultado do cálculo revela que a Extensão do Percurso Superficial (Eps) é de aproximadamente de 26 metros (0,026km). E ressalta que este é um valor médio para a

bacia. Nesse sentido, Silva et al. (2003) afirmam que quando ocorre um espaçamento estreito entre os canais fluviais, como no caso da Bacia Colônia Antônio Aleixo, é considerada com uma textura topográfica “fina”.

Sousa e Rodrigues (2012) apresentam uma forma de classificação (Quadro 09) e assim, a Extensão do Percurso Superficial (Eps) é “Muito Alta”, o que indica que, conforme os autores, valores elevados favorecem o escoamento superficial.

Quadro 9: Classificação dos valores da extensão do percurso superficial

Valores da Eps (km)	Qualificação
> 1	Baixa
1 a 0,249	Mediana
0,248 a 0,142	Alta
< 0,142	Muito alta

Adaptado de Sousa e Rodrigues (2012)

- Índice de Sinuosidade  $I_{sin}$

O índice de Sinuosidade ( $I_{sin}= 1,04$ ) indica que os rios da bacia apresentam uma tendência transicional mais voltada para o padrão retilíneo (QUADRO 10), em especial o curso principal da Bacia, tais canais são considerados com pequena capacidade de acúmulo de sedimentos (JESUS, 2004; SOARES e SOUZA, 2012).

Quadro 10: Classes de sinuosidade (formas dos canais da rede de drenagem)

Intervalos	Forma
Is próximos a 1,0	Retilíneos
Is entre 1,0 e 2,0	Transicionais
Is > 2,0	Tortuosos

Fonte: Lana (2001) apud Landin Neto et al., 2014

Apesar de Leopold e Wolman (1957) afirmarem que os rios retilíneos são extremamente raros, considerados quase não existentes, os pequenos segmentos podem ter essa classificação. Outros fatores influenciam na forma do canal, como a estrutura geológica, compartimentação litológica, declividade dos canais e a carga de sedimentos.

No que concerne a este último aspecto, Vieira (2008) e Barbosa (2013) mostram a Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo com número elevado de feições erosivas e seus sedimentos são carreados para os canais, o que aumenta sua carga de sedimentos e, conseqüentemente, tem a capacidade de alterar a forma e tipo de canais de transicionais-retilíneos para tortuosos.

- Coeficiente de manutenção ( $C_{man}$ )

Esse parâmetro mostra a área mínima e necessária para que um metro do canal de drenagem seja mantido. O  $C_{man}$  da Bacia Colônia Antônio Aleixo foi de 163,398  $m^2/Km$ , logo na bacia temos para cada quilômetro quadrado 1,639 metros de canal de drenagem, característica de relevo ondulado a muito ondulado e com densidade de drenagem baixa.

- L de Hack

Cardoso et al. (2012) afirmam que a Lei de Hack é um bom estimador para bacias hidrográficas de tamanho inferior a 25  $km^2$ , pois apresenta alta correlação entre o valor calculado e o real comprimento do canal. No entanto, a variação entre esses dois parâmetros cresce progressivamente com o tamanho da bacia, pois segundo o autor, em uma bacia com 66  $km^2$  a variância entre os dois valores é de 18%.

Enquanto na Bacia Colônia Antônio Aleixo, o comprimento encontrado pela Lei de Hack foi de 10,33 km, foi um valor de variação negativa de 38,39%.

Esse valor, conforme Cardoso et al. (2012), representa um erro que ocorre devido ao processo de alongamento da bacia, pois a mesma tende a se alongar à medida que aumenta de tamanho, mesmo que no momento a bacia tenha um formato circular. Logo, o canal principal também cresce e isso ocorre pelo fato do sistema fluvial apresentar tendência a uma configuração na qual a rede de drenagem tenha seu consumo de energia minimizado (BORSATO, 2005).

- Relação do Relevo ( $R_h$ )

A relação de relevo mostra relação da altura entre os pontos de maior e menor altitude ao longo do perímetro, indicando a intensidade da erosão que opera nas vertentes (BORSATO, 2005). Schumm (1954) apud Strahler (1957) relaciona a Relação de Relevo com a produção de sedimentos anual em pequenas bacias no estado do Colorado (EUA).

Quando comparado com valores de Schumm (1956), a Bacia Colônia Antônio Aleixo apresenta valores muito baixos ( $R_h=0,01005$ ), enquanto os valores deste parâmetro variaram de 0,008 a 0,267 para bacias de quarta e quinta ordem.

Borsato (2005) converteu os valores de Schumm (1954) para unidades métricas, na qual a variação de perda de sedimento anual é cerca de 47,6 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup> para uma Relação de Relevo de 0,1, e para valores de 0,6 apresenta relação de até 1429,4 m<sup>3</sup>/ km<sup>2</sup>.

Logo com um R<sub>h</sub> igual a 0,01005 pode-se concluir que a perda de sedimentos BH Colônia Antônio Aleixo está em torno de 47,6 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>. Todavia, devido à alta taxa de feições erosivas do tipo voçoroca na Bacia a carga de sedimento é maior, ocasionando processo de assoreamento de canais como exposto por Barbosa (2013).

- Índice de Rugosidade (Ir)

O índice de Rugosidade (Ir) é a relação entre a amplitude altimétrica e a densidade de drenagem (SOUSA e RODRIGUES,2012). No que tange a BH Colônia Antônio Aleixo foi encontrado um valor de 593,64 m, e conforme o Quadro 11 pode se afirmar que a bacia de maneira geral apresenta um relevo ondulado com declividade média entre 9 e 20%.

Quadro 11: Classificação do índice de rugosidade e sua relação com a forma de relevo

Classe	Valor	Forma de relevo
Fraca	0 - 150	Plano com declividade média até a 3%
Média	151 - 550	Suave ondulado com declividade média entre 3 e 8%
Forte	551 - 950	Ondulado, com declividade média entre 9 e 20%
Muito Forte	> 950	Forte ondulado a montanhoso a escarpado com declividade média superior

Fonte: Sousa e Rodrigues, 2012.

A partir desses dados também pode-se interpretar, de acordo com o Quadro 12, que a bacia apresenta susceptibilidade que varia de moderada a forte aos processos erosivos.

Quadro 12: Associação do relevo com a declividade e o grau de suscetibilidade erosiva.

Tipo de Relevo	Classes de Declividades	Susceptibilidade Erosiva Associada
Suave ondulado	0-8%	Não susceptível a pouco susceptível.
Ondulado	9-20%	Moderada a Forte
Forte Ondulado	21-45%	Muito Forte
Montanhoso a escarpado	>45%	Severa

Fonte: Adaptado de Ramalho Filho e Beek (1995) apud Sousa e Rodrigues (2012).

Ao observar a Figura 24, é possível notar a preponderância de declividades mais elevadas, reafirmadas pelo apresentado através de cálculos. A declividade que mais se sobressai varia entre 8 a 20%, correspondente a 39,67% da área da bacia, o que a classifica nessa porção, com susceptibilidade erosiva moderada a forte (TABELA 08).

Na parte superior da BH CAA, assim como na margem esquerda ocorrem declividades mais elevadas que variam de 20 a mais de 45%, e apresenta “forte ondulado” o que, por sua vez, corresponde a uma área de susceptibilidade “Muito Forte” que vem justificar o elevado número de incisões erosivas.

Tabela 8: Classes de declividade e seus valores em área (km<sup>2</sup>) e porcentagem (%) na BH Colônia Antônio Aleixo

Declividade (%)	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)	Categoria de relevo	Susceptibilidade Erosiva
0-3	1,63	6,54	Suave ondulado	Não suscetível a pouco suscetível
3-8	4,12	16,54		
8-13	4,34	17,42	Ondulado	Moderada a Forte
13-20	5,55	22,25		
20-45	8,78	35,22	Forte Ondulado	Muito Forte
>45	0,51	2,03	Montanhoso a escarpado	Severa
Total	24,93	100	-	-

Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Pode-se observar que a maior parte da bacia apresenta declividade que é considera “Moderada a Forte” com 39,67% a “Muito Forte” com 35,22%, que caracteriza a bacia de forma geral como muito susceptível aos processos erosivos.

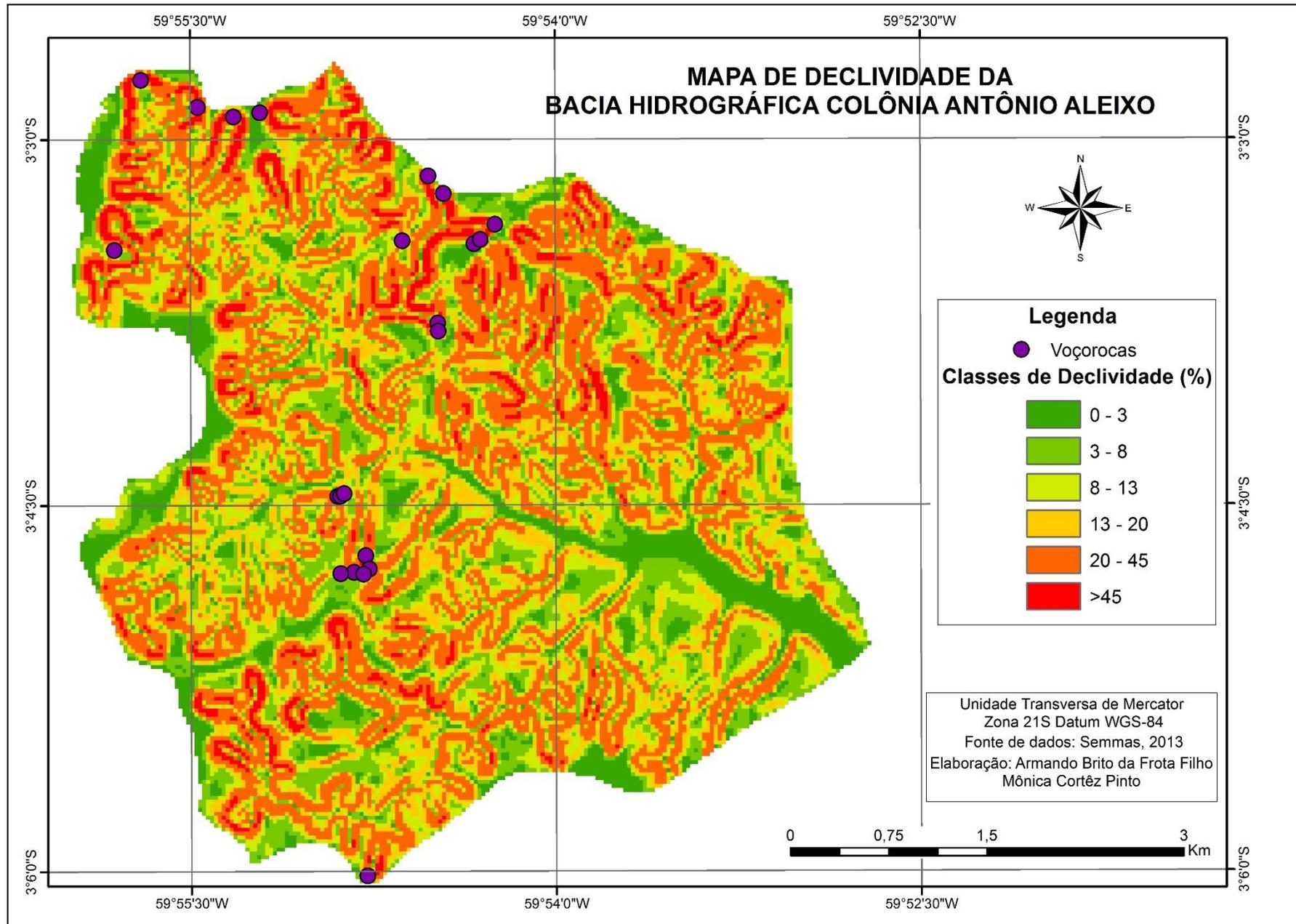


Figura 24: Mapa de Declividade e localização das voçorocas da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM.  
Elaboração: Armando Brito da Frota Filho e Mônica Cortêz Pinto, 2016

- Coeficiente de Massividade ( $C_{mas}$ ) e Coeficiente Orográfico ( $Co$ )

O Coeficiente de Massividade e Coeficiente Orográfico representam o volume rochoso e a massa rochosa remanescente da bacia hidrográfica que colaboram para entendimento do grau de dissecação da área, assim como relações entre erosão e infiltração da água (CHRISTOFOLETTI, 1980 e SOUSA e RODRIGUES, 2012).

Conforme Borsato (2005), valores que variam até 1,0 definem o valor da integral hipsométrica. Bacias que apresentam valores inferiores a 0,5 correspondem a bacias com distribuição de terras baixas; as de valores superiores, correspondem a bacias com maior distribuição de terras altas.

Os resultados encontrados na BH CAA para o  $C_{mas}$  foi de 0,76, o que corresponde a uma bacia com terras mais elevadas, as quais dificultam a infiltração e facilitam o escoamento superficial. O Coeficiente Orográfico (43,32m) é relativamente alto devido valores de altitude média e do Coeficiente de Massividade.

Os dados de  $C_{mas}$  e  $Co$  são semelhantes com os encontrados por Scheidegger (1987) apud Borsato (2005), logo, infere-se que é uma bacia geologicamente madura, devido a sua distribuição equilibrada de altitudes, a qual pode ser considerada uma bacia de média atividade de processos de degradação e formação.

Bras (1990) apud Borsato (2005) explicita que bacias que apresentam resultados semelhantes a estes estão em equilíbrio, onde a erosão provoca redução no relevo de forma homogênea. No entanto, deve se considerar que a BHCAA possui intervenção antrópica, que colabora para o desenvolvimento e aceleração do processo erosivo.

- Gradiente do Canal Principal ( $G$ )

Este parâmetro indica o grau de inclinação do canal principal da bacia. A BH Colônia Antônio Aleixo, tem sua nascente a altitude de 100 e sua foz a altitude de 25 m, e apresenta um gradiente de 0,9672%, que indica um decaimento não tão suave, que tende a ser levemente abrupto e com declividade média, o que confirma a análise do Índice de Rugosidade.

Como apontam Sousa e Rodrigues (2012) esse parâmetro analisado isoladamente, permite verificar a capacidade erosiva do rio principal. Em estudos dos referidos autores encontrou-se um índice de 0,53% considerado baixo, comparado com valor encontrado de 0,9672% na BH Colônia Antônio Aleixo. Pode-se considerar que este é um índice mais elevado e o potencial erosivo do rio principal é maior.

O Gradiente (G) varia de acordo com a seção da Bacia, seja o curso superior, médio ou inferior do rio. Na BH CAA a concentração das declividades mais fortes ocorre na parte superior da bacia, onde localizam-se as maiores altitudes e também a maior fragilidade.

- Relação de Enlongamento ( $R_e$ ) e Coeficiente de Compacidade ( $I_k$ )

De acordo com Schumm (1956) a Relação de Enlongamento revela a razão entre o diâmetro do círculo com a área da bacia, que pode variar de 0 a 1. Quanto mais aproximado a 1 (um), mais semelhante ao formato de um círculo. A Bacia Colônia Antônio Aleixo apresenta valor de 0,755 caracterizado como relativamente mais próximo ao formato de um círculo.

O Coeficiente de Compacidade mostra a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de área igual. Quanto mais irregular o formato da bacia, maior será o índice, variando de 1 ao infinito, sendo 1 o círculo perfeito. A Bacia Colônia Antônio Aleixo apresenta valor de 1,297, o que a caracteriza como mais próxima ao círculo.

Como pode ser observada pela Relação de Enlongamento e Coeficiente de Compacidade, a Bacia Colônia Antônio Aleixo apresenta uma forma que tende ao formato de um círculo. Além disso, há relação entre o formato da bacia com o Tempo de Concentração da água, desde a precipitação a sua saída pelo exutório, pois quanto mais circular, menor será esse tempo. Propiciando tendência de cheias no canal principal.

Schumm (1956) aponta que há certa relação entre a forma da bacia e a densidade de drenagem, pois quanto mais próxima ao círculo, mais rápido é o crescimento na densidade de drenagem, o que aumenta a rede drenagem.

- Índice de Circularidade ( $I_c$ )

Este índice é a relação entre a área da bacia e de um círculo de mesmo perímetro e tem como finalidade mostrar se uma bacia tem tendência maior ao escoamento ou a enchentes. A Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo apresentou o valor do  $I_c$  de 0,593, que segundo Müller (1953) e Schumm (1956) (QUADRO 13) indica uma bacia circular favorável aos processos de inundação.

Quadro 13: Classes interpretativas para os valores de Índice de Circularidade (Ic)

Intervalos	Razão de Circularidade
< 0,51	Indicam bacias mais alongadas favorecendo o processo de escoamento
= 0,51	Indicam bacias com escoamento moderado e pequena probabilidade de enchentes rápidas
> 0,51	Indicam bacias circulares favorecendo os processos de inundação

Fonte: Müller (1953) e Schumm (1956). Org: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

- Caracterização Topográfica da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

A análise da hipsometria da BH Colônia Antônio Aleixo associada aos seus perfis Longitudinal e Transversal auxiliam no estudo da forma e espacialização da área da bacia.

No que se refere à análise hipsométrica, a equidistância escolhida foi a cada 10 metros, gerando 8 classes (TABELA 09). Isso ocorre devido à pouca variação altimétrica apresentada na bacia. O ponto mais elevado está a 114 metros e o de menor altitude a 17 metros, o que resulta em uma amplitude altimétrica de 97 metros, que tem como cota média 57 metros.

A BH CAA teve como classe hipsométrica mais representativa o intervalo de 40 a 50 metros, o que corresponde a 20,71% da área da bacia. Em seguida, o intervalo de 50 a 60 com 19,51% da bacia. O intervalo com menor área foi de 24 a 30m, com 7,02 % localizada na região próxima à foz do canal principal da bacia e sua nascente localiza-se no intervalo de 70 a 80m. A figura 25 mostra a localização dos perfis topográficos (transversais) traçados na BH CAA, no Alto, Médio e Baixo curso a partir das maiores altitudes. O perfil topográfico (longitudinal) é traçado no ponto mais elevado próximo da nascente à foz do rio principal.

Tabela 9: Classes hipsométricas e seus valores em área (km<sup>2</sup>) e porcentagem (%) na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

Classes Hipsométricas	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
24-30	1,75	7,02
30-40	3,33	13,36
40-50	5,16	20,71
50-60	4,86	19,51
60-70	3,45	13,84
70-80	2,51	10,06
80-90	1,97	7,91
90-100	1,89	7,59
Total	24,93	100,00

Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016

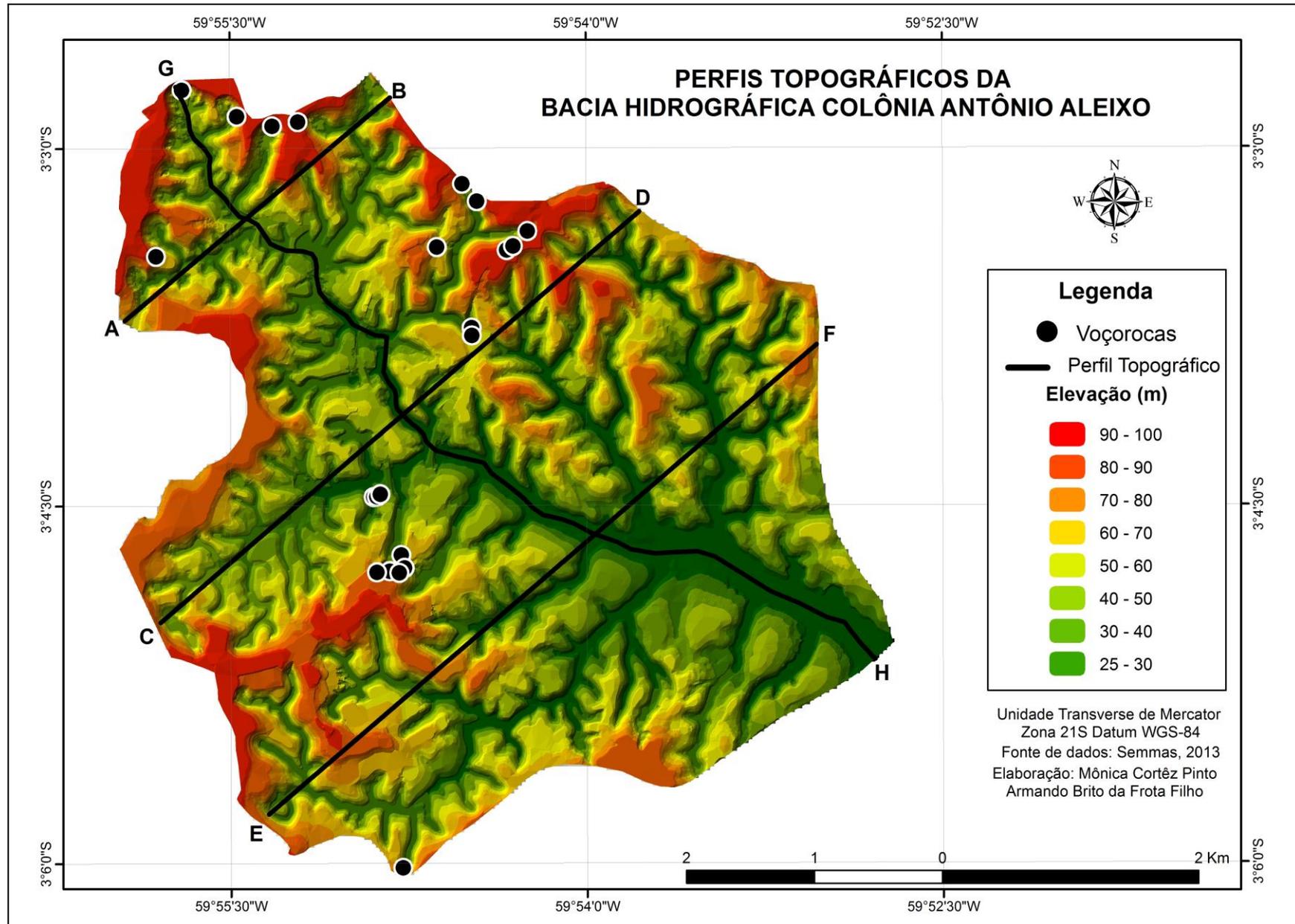


Figura 25: Modelo Digital de Elevação com localização dos Perfis Topográficos da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus – AM.  
Fonte: SEMMAS, 2013. Elaboração: Mônica Cortêz Pinto e Armando Brito da Frota Filho, 2015.

Na figura 26 pode ser observado o desnível altimétrico do terreno de 49 metros em que a nascente se encontra na cota de 74 metros, enquanto que sua foz em 25 metros, e apresenta comprimento de 7,775 km (7754,09 metros) da nascente à foz, com orientação NW-SE.

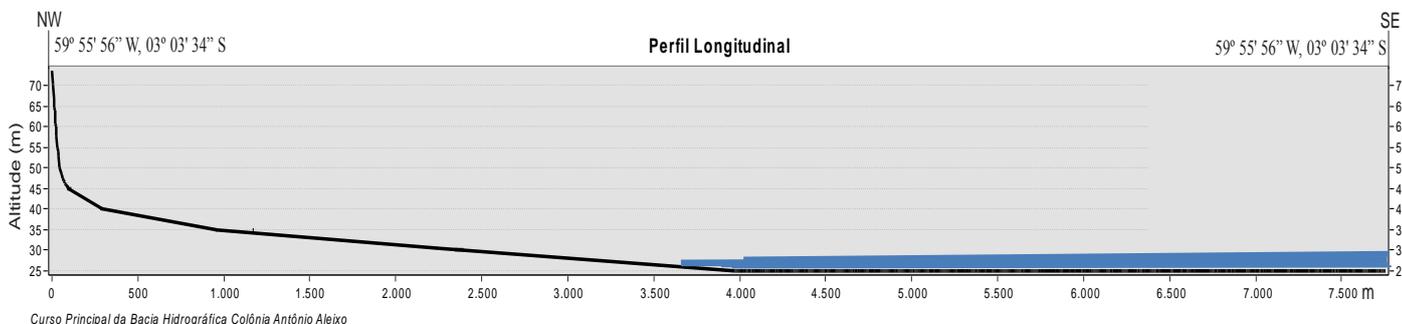


Figura 26: Perfil Longitudinal do rio principal da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM.  
Fonte: SEMMAS, 2013. Org: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

Em azul, destaca-se o trecho de cheia do canal principal da bacia Colônia Antônio Aleixo, levando em consideração a maior cheia registrada do rio Amazonas, que ocorreu em 2012, tendo alcançado 29,78m.

A dispersão hidráulica é maior na área do curso superior da BH CAA que diminui gradativamente no curso médio e baixo e favorece vazão lenta na jusante em função da baixa altimetria neste trecho e ao barramento hidráulico causado pelo rio Amazonas.

Para Christofoletti (1981), o perfil longitudinal de um rio mostra a sua declividade ou gradiente, o que constitui a representação visual da relação entre a altimetria e o comprimento de um determinado canal, apresentando a forma parabólica como curva representativa dessa relação. O perfil típico é côncavo para o céu, com maiores declividades na nascente e com valores mais suaves em direção à jusante.

Sobre a declividade e o Gradiente do canal, Bauling (1950) apud Christofoletti (1981) aponta que:

- A declividade variará em função inversa da velocidade;
- A declividade variará em razão da resistência do leito: ela será tanto mais fraca quanto os materiais constituintes do leito forem mais finos e oferecerem menos resistência ao transporte

Estudo de Barbosa (2013) mostra que a velocidade do rio principal de BH Colônia Antônio Aleixo na parte mais à jusante é de 0,0472 m/s com vazão de 79,3m<sup>3</sup>/s, considerados valores baixos em relação ao rio em que deságua (Rio Amazonas),

resultado da declividade pouco elevada nesta parte da bacia, que contribui no processo de enchentes. Porém, a bacia apresenta um Gradiente (G) elevado na parte superior associado à altimetria e declividade mais elevada. Tais características também contribuem para a maior fragilidade natural aos processos erosivos lineares.

Quanto aos perfis topográficos transversais, foram realizados 03 para a BH CAA: um no curso superior da bacia denominado de A-B; um no curso médio denominado de C-D e outro no curso inferior da bacia denominado E-F.

A figura 30 apresenta o perfil topográfico transversal A-B, traçado no curso superior da Bacia Colônia Antônio Aleixo, o qual apresenta 2,698 Km de extensão. O ponto A encontra-se em uma elevação aproximada de 72m, enquanto o ponto B encontra-se a 82m e apresenta desnível topográfico de 10 metros entre esses pontos. Ainda nota-se que a margem direita apresenta um nível maior de dissecação quando comparada à margem esquerda.

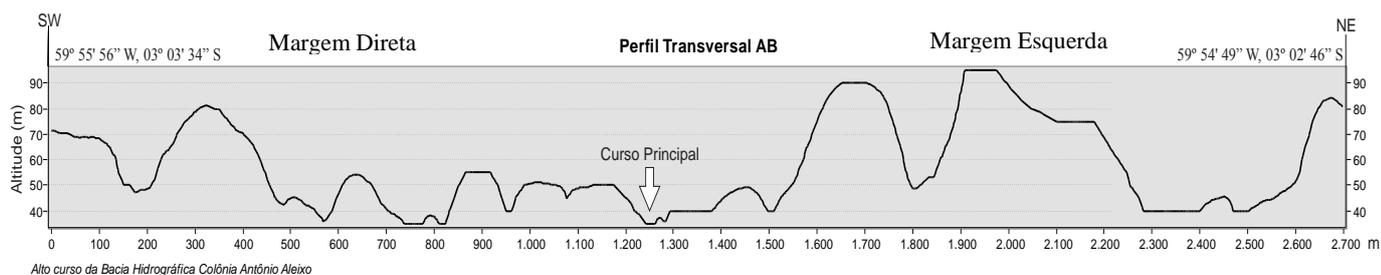


Figura 27: Perfil Transversal A-B, localizado no curso superior da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo  
Fonte: SEMMAS, 2013. Org: Armando Brito da Frota Filho, 2015

No Perfil Transversal A-B, percebe-se que além da margem esquerda possuir as maiores altitudes e as maiores declividades, no perfil são representadas pelos vales no formato de “V”, em especial próximo ao canal principal da bacia.

A figura 31 apresenta o perfil topográfico transversal C-D, traçado no curso médio da BH CAA, tendo 4,909 Km. O ponto C encontra-se a uma altitude aproximada de 70m enquanto o ponto D está a 75m, há desnível topográfico aproximadamente de 5 metros entre eles. Entretanto, há a presença de platôs mais elevados na margem esquerda que ultrapassam 90m de atitude, enquanto na margem direita os pontos mais altos são de 70m.

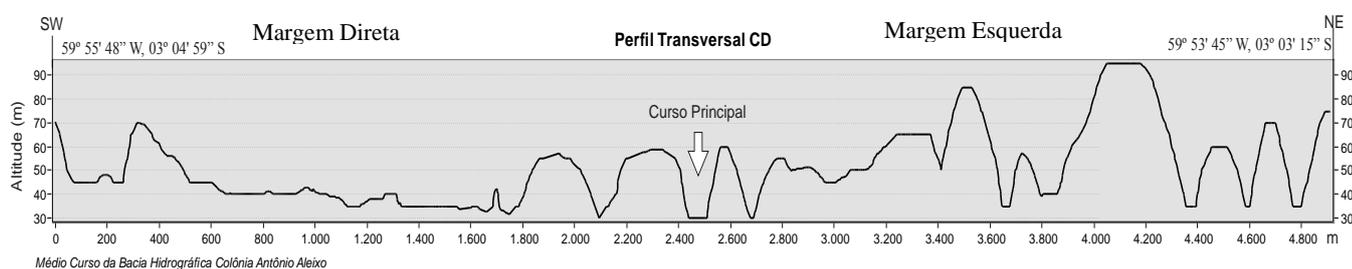


Figura 28: Perfil Transversal C-D, localizado no curso médio da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo.  
Fonte: SEMMAS, 2013. Org: Armando Brito da Frota Filho, 2015

No perfil Transversal C-D, a margem direita apresenta um nível de dissecação elevado, sendo caracterizada pelas baixas altitudes, vales em formato de “U” característicos de regiões de baixas declividades, enquanto a margem esquerda apresenta altitudes elevadas e vales em formato “V” que podem ser caracterizados como vales encaixados.

O perfil transversal E-F (FIGURA 29) traçado no curso inferior da BH CAA tem 5,615 km de comprimento. O ponto E encontra-se em uma altura cerca de 53 m e o ponto F está a 78m, apresentando um desnível topográfico de 25 metros entre eles. Neste ponto (baixo curso) da bacia, o nível de dissecação do relevo é baixo em ambas as margens, e apresenta grande quantidade de vales com formato em “V”, que resultam das elevadas declividades.

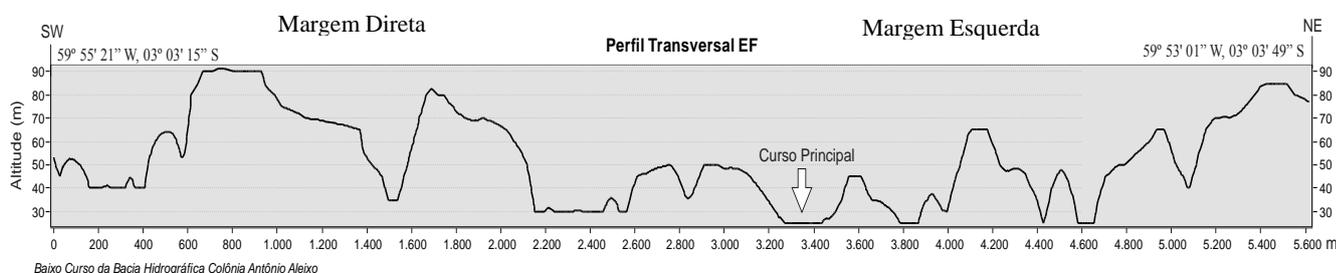


Figura 29: Perfil Transversal E-F, localizado no curso inferior da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo  
Fonte: SEMMAS, 2013. Org: Armando Brito da Frota Filho, 2015

Apesar dos critérios acerca da forma da bacia (Relação de Enlongamento, Índice de Circularidade e Índice de Compacidade) apontarem que esta tende aos processos de enchentes em detrimento dos processos erosivos, ao ponderar outros parâmetros pode-se observar que a Bacia Colônia Antônio Aleixo tem características geomorfológicas e topográficas que colaboram para o desenvolvimento de processos erosivos, fato este corroborado pelo seu nível de dissecação.

Ao analisar a BH CAA por seções, nota-se que as altimetrias mais elevadas e as declividades mais acentuadas concentram-se no curso superior e na margem esquerda. Logo, pode-se considerar que as características geomorfológicas e topográficas apontam para uma maior sensibilidade e fragilidade para o desencadeamento do processo erosivo, destoando da análise geral da bacia.

#### 4.2.1 Caracterização Pedológica da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

Por haver falta de dados mais detalhados sobre os solos da Bacia Colônia Antônio Aleixo, foi realizada uma topossequência em uma encosta representativa, com extensão de 692 m de comprimento e 54 m de desnível entre o topo e a base da vertente (FIGURA 30 e 31) (QUADRO 6). Os solos variam do topo para a base da vertente: de Latossolo Amarelo no topo a Argissolo Amarelo no terço inferior da vertente, e Neossolo Quartzarênico Hidromórfico na base da vertente, denominados de acordo com a classificação da EMBRAPA (2006).

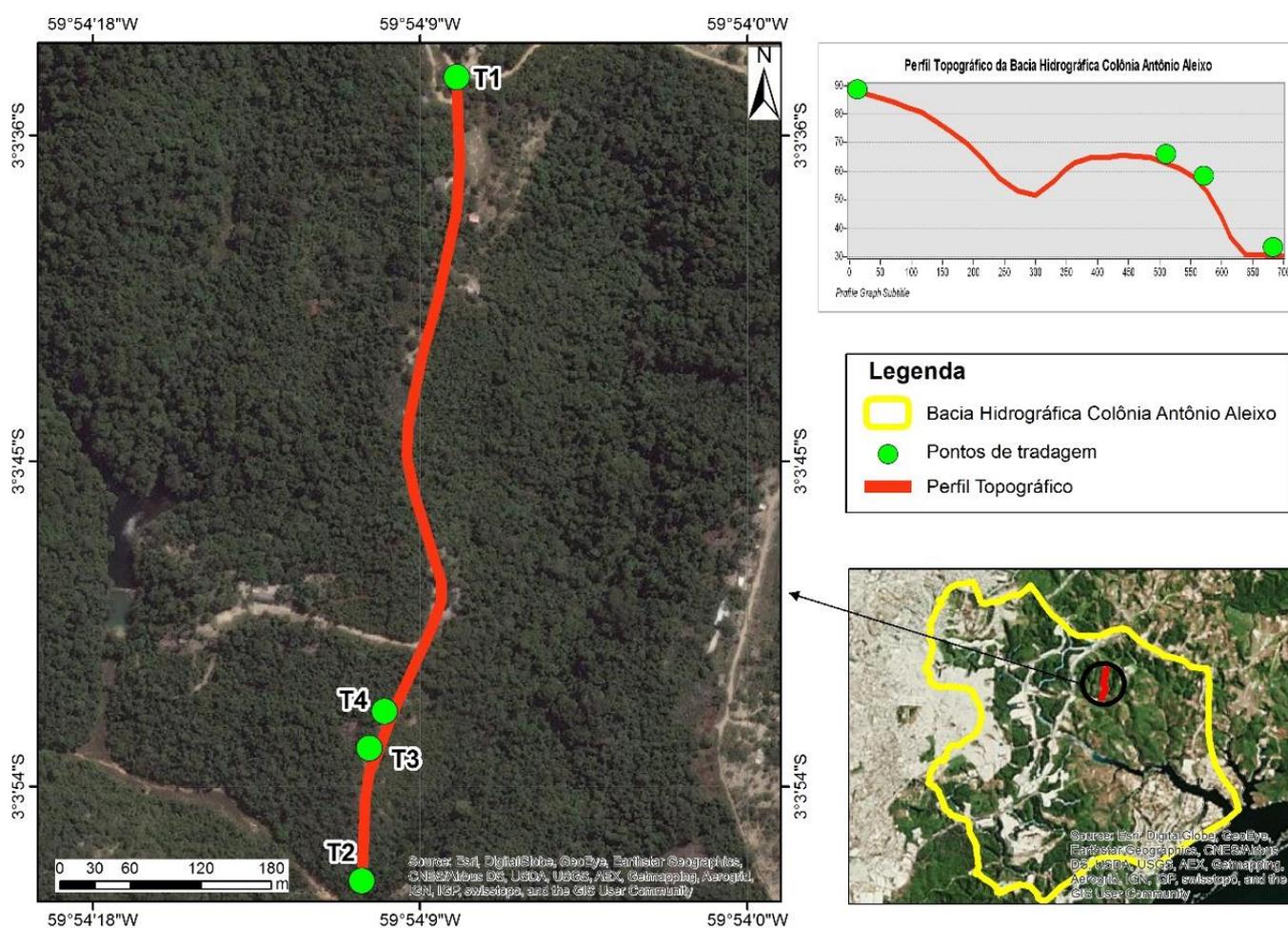
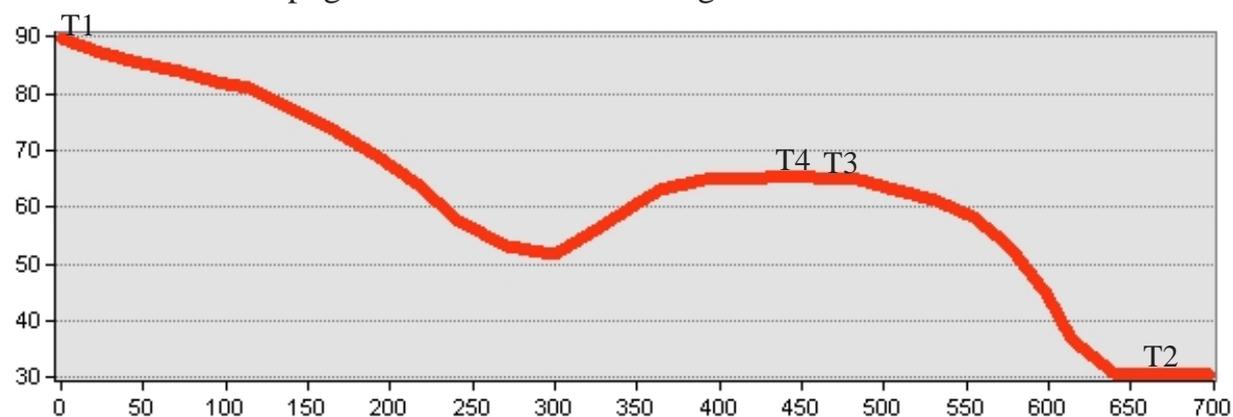


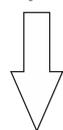
Figura 30: Mapa de Localização do Perfil Topográfico 01 da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, e pontos de coleta de solo, teste de Infiltração e Resistência a Penetração (P1, P4, P3 e P2).

Fonte: ArcGIS Online, Imagem Digital Globe 2012, Unidade Transversa de Mercator, Zona 21S, Datum WGS-84. Elaboração: Mônica Cortêz Pinto. Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2015

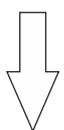
### Perfil Topográfico 01 da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo



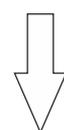
Profile Graph Subtitle



Tradagem 01  
Platô



Tradagem 04 e 03  
Encosta



Tradagem 02  
Baixio



Figura 31: Perfil Topográfico 01 da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo com as localizações dos pontos coleta de solo, teste de Infiltração e Resistência a Penetração.

Fonte: ArcGIS Online, Imagem Digital Globe 2012, Unidade Transversa de Mercator, Zona 21S, Datum WGS-84. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2015.

Quadro 14: Informações gerais dos pontos da topossequência.

Ponto da Topossequência	Posição na encosta	Forma da superfície	Drenagem	Vegetação Local	Pedregosidade / Rochosidade	Erosão
P 01	Topo	Plano	Solo bem drenado	Vegetação secundária	Não rochoso	Não aparente
P 04	Seção Média	Plano	Solo bem drenado	Vegetação secundária	Não rochoso	Não aparente
P 03		Plano			Não rochoso	Não aparente
P 02	Base	Declivoso	Solo mal drenado	Vegetação do tipo campinara	Não rochoso	Não aparente

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2015.

Foram realizadas coletas de solos, juntamente com testes de infiltração e de penetração do solo. Os resultados das análises de solo foram inseridos na pirâmide textural (U.S.D.A.,1951). Além disso, foram analisadas as características físicas do solo como Densidade Real, Aparente e Porosidade Total, e características químicas, como pH e nutrientes do solo.

- Ponto 01 – Topo da encosta

No topo da encosta, início da vertente (P1), observou-se que a fração argila predomina em todas as camadas analisadas, e a textura do perfil estudado variou entre “Argiloso” a “Muito Argiloso” (FIGURA 32) (APÊNDICE 1 - QUADRO 01). No que se refere à Densidade Real, os resultados mostraram uma variação de 2,46 a 2,63 g/cm<sup>3</sup>, muito próximo de que Kiehl (1979), considera para esse tipo de solo, com valores que variam de 2,3 a 2,9 g/cm<sup>3</sup>. A Densidade Aparente variou de 1,03 a 1,11 g/cm<sup>3</sup>, que de acordo com Kiehl (1979) pode apresentar variação entre 1,00 a 1,25 g/cm<sup>3</sup>, o que pode ser caracterizado como um solo mais resistente ao processo erosivo.

Segundo Kiehl (1979), a Porosidade Total de solos argilosos pode variar entre 56,56 a 60,47%. As análises de todas essas características possibilitaram classificar o solo até o segundo nível de análise, no caso identificando-o como Latossolo Amarelo.

Teste de penetração do solo no ponto 01 revela que ele apresenta baixa compactação e conseqüentemente pouca resistência à penetração (FIGURA 20). Essa análise pode ser corroborada considerando as características fisiográficas da área como a presença de vegetação e a não pedregosidade e rochosidade no local.

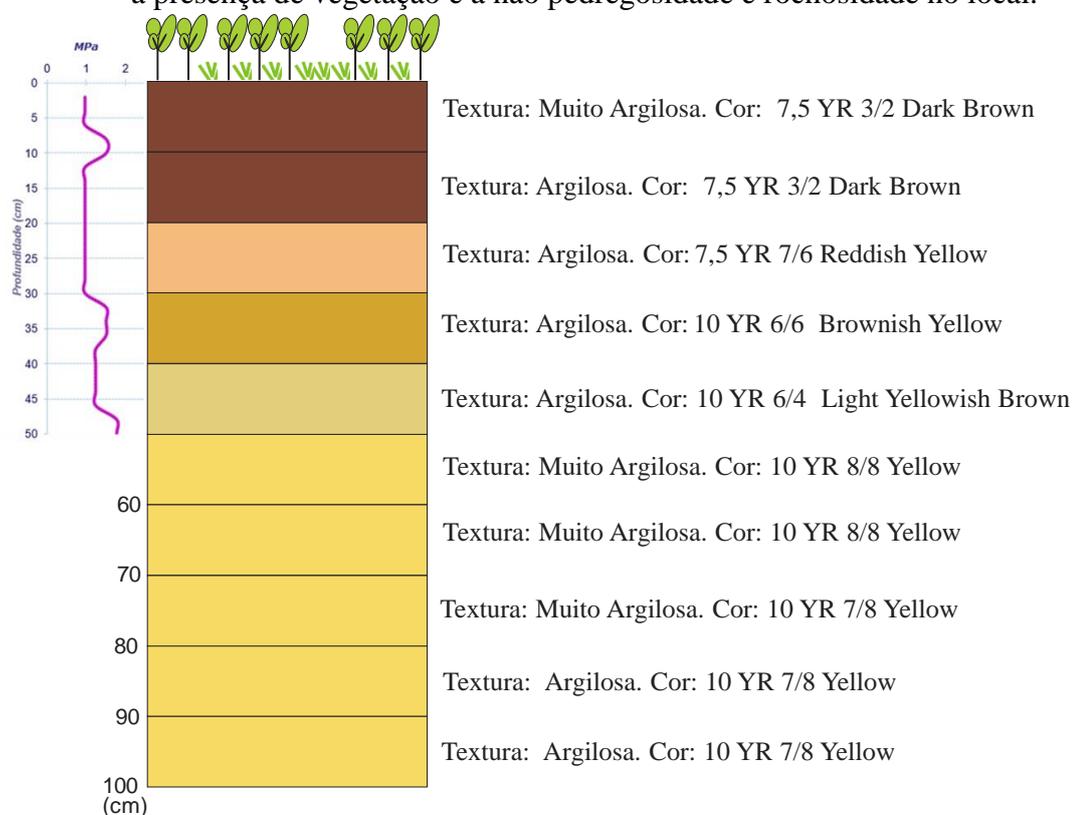


Figura 32: A – Teste de resistência a penetração; B – Perfil de solo do Ponto 01, no topo da encosta, BH Colônia Antônio Aleixo. Org. Armando B. da Frota Filho, 2015

De acordo com a Figura 32, os pontos que apresentaram maior resistência à penetração correspondem à faixa compreendida entre 5-10 cm de profundidade, com taxa de 1,51 Mpa, em que a porcentagem de silte aumenta, fazendo com que a porosidade diminua e a resistência aumente. Acrescenta-se, também, como faixas mais resistentes nesse perfil, os intervalos de 30-35 e 45-50 com 1,51 e 1,78 Mpa, respectivamente, que coincidem com um aumento de argila, como pode ser observado no Quadro 10 (ANEXO).

Segundo Canarache (1990) apud Camargo e Alleoni (2006), os valores entre 1,1 a 2,5 Mpa apresentam pouca limitação para o desenvolvimento de plantas, caracterizando um grau de compactação baixo. O gráfico 01 não apresenta taxas que cheguem a 2 Mpa, apresenta como taxa máxima 1,78 Mpa e como taxa média do perfil 1,21 Mpa, enquadrando-o na classificação do autor supracitado.

Apesar do baixo nível de compactação, a taxa de infiltração é baixa, se comparada com os demais testes de infiltração realizados na topossequência. Porém essa taxa de compactação colaborou para que o teste apresentasse valores constantes (GRÁFICO 09). Nos cinco minutos iniciais, a taxa de infiltração foi acelerada e apresentou um pico no minuto inicial, taxa de infiltração de 2,5 mm/min. A partir do sexto minuto, verificou-se uma diminuição da taxa com sua consequente estabilização, no 26º minuto com taxa de infiltração de 1,2 mm/min.

O teste durou 29 minutos e apresentou uma média 1,5 mm/min., considerando que no perfil de solo não há uma grande disparidade textural, pois o mesmo varia entre “Argiloso” a “Muito Argiloso”, o que corrobora para tais resultados.

Outro fator relevante para a taxa do teste de infiltração é a Umidade Gravimétrica do Solo (UmG). No momento do teste era de aproximadamente 27,32 %, influenciado na redução da taxa de infiltração, sendo a mais alta encontrada na topossequência.

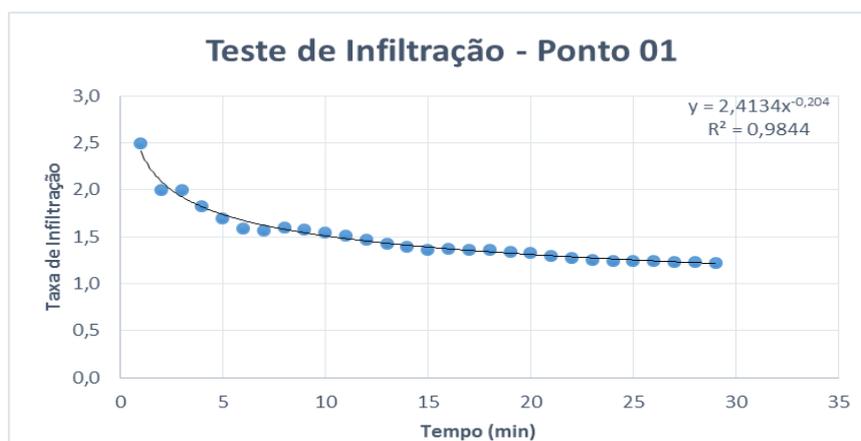


Gráfico 9: Teste de Infiltração realizado no topo da vertente, Ponto 01.  
Org. Armando Brito da Frota Filho, 2015

- Ponto 02 – Base da vertente

No ponto 02, localizado na base da encosta, observou-se que a fração de areia predomina em todas as camadas analisadas, com textura variando entre “Franco Arenoso” a “Areia Franca” (APÊNDICE 1 - QUADRO 02). A Densidade Real variou de 2,50 a 2,70 g/cm<sup>3</sup>. Já a Densidade Aparente variou de 1,36 a 1,46 g/cm<sup>3</sup>, que de acordo com Kiehl (1979), refere-se a solo arenoso por estar na amplitude de variação entre 1,25 a 1,40 g/cm<sup>3</sup>, logo este solo pode ser caracterizado como um solo menos resistente. Kiehl (1979), ressalta ainda que este solo é caracterizado como arenoso em face da Porosidade Total ficar entre 41,54 a 48,19%, pois a amplitude de solos arenosos varia entre 35 a 50%.

Com base nas características morfológicas do solo, associado à fisiografia do local e à presença de água a partir de 110 centímetros de profundidade no perfil, foi possível classificar o solo até o terceiro nível de análise, como sendo o Neossolo Quartzarênico Hidromórfico.

O teste de penetração apresentou níveis de resistência baixos (FIGURA 33), condizente com o tipo de solo rico em areia, considerando que não houve taxas de resistência que alcançassem 2 Mpa.

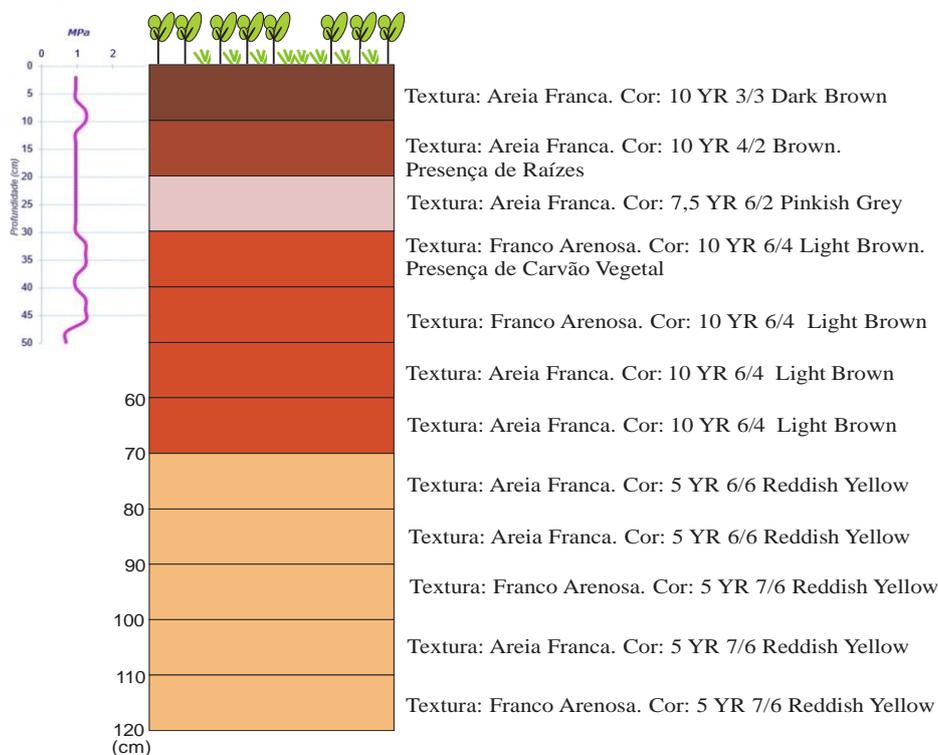


Figura 33: A – Teste de resistência a penetração; B – Perfil de solo do Ponto 02, na base da encosta, BH Colônia Antônio Aleixo. Org. Armando B. da Frota Filho, 2015

Para Canarache (1990) apud Camargo e Alleoni (2006), os valores entre 1,1 a 2,5 Mpa apresentam pouca limitação para o desenvolvimento de plantas, devido ao baixo grau de compactação do solo. Os momentos em que houve maior resistência à penetração ocorreram nos intervalos de 5-10, 30-35 e 40-45, apresentando taxa de 1,24 Mpa, que se correlacionam com o fato das amostras destas profundidades apresentarem maior quantidade de silte, que, por sua vez, colabora para que o solo seja menos poroso e, portanto, mais resistente à penetração.

O teste de infiltração, realizado na base da encosta, apresentou uma velocidade inicial maior se comparado com os demais testes, levando mais tempo para alcançar um nível constante de infiltração (GRÁFICO 10), além de apresentar a maior taxa de infiltração. Isso se deve à maior quantidade da fração de areia no perfil que variou de 63,9 a 85,1%.

Os primeiros três minutos apresentam a maior taxa de infiltração, tendo seu pico no primeiro minuto com uma taxa de 22 mm/min., além da porcentagem da fração de areia no perfil. Outra razão para a infiltração inicial ser elevada deve-se a UmG do solo, que no momento do teste estava em 11,17 %.

O processo de infiltração inicia sua estabilização por volta do 37º minuto com uma taxa de 5,40 mm/min. O teste teve duração de 39 minutos, com taxa média de infiltração de 7,43 mm/min.

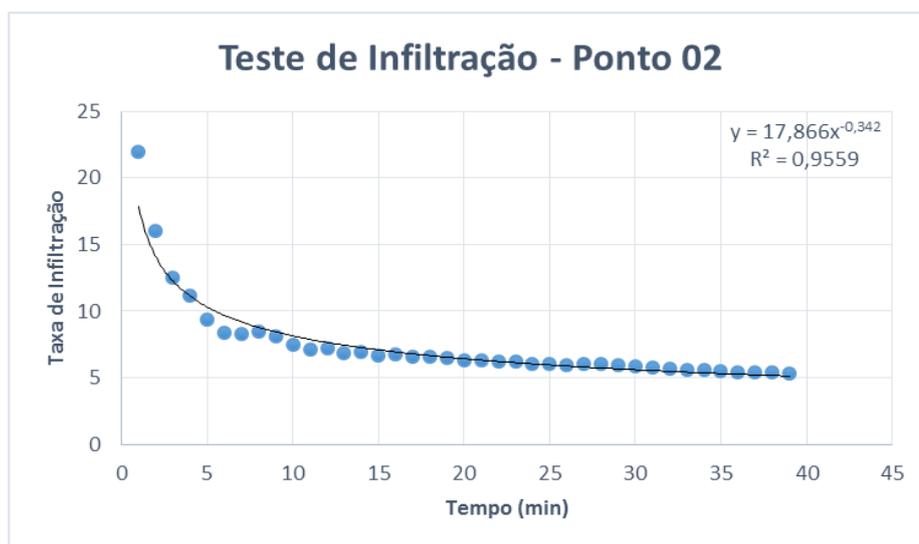


Gráfico 10: Teste de Infiltração realizado na base da vertente. Ponto 02

Org: Armando Brito da Frota Filho, 2015

- Ponto 03 – Seção média da vertente

Observou-se que a fração areia predomina nas camadas superiores. Contudo, à medida em que se aprofunda no perfil do solo, a quantidade de argila aumenta em especial nas camadas inferiores e faz com que a textura do perfil estudado varie entre “Franco Argilo Arenoso” a “Argiloso” (APÊNDICE 1 - QUADRO 03).

A Densidade Aparente é de 1,18 a 1,24 g/cm<sup>3</sup> classificando segundo Kiehl (1979), como um solo argiloso que tende a ser mais compactado. No que concerne à Porosidade Total varia de 51,49 a 55,55 %, o qual está inserido no espectro tanto arenoso (de 35 a 50 %) quanto argiloso (de 40 a 60%).

Quanto ao teste de Penetração (FIGURA 34) os valores observados apresentaram intervalos de maior resistência em 15-20 e 30-35 com uma taxa de 1,51 Mpa e no intervalo de 40-50 uma taxa de 1,78 Mpa.

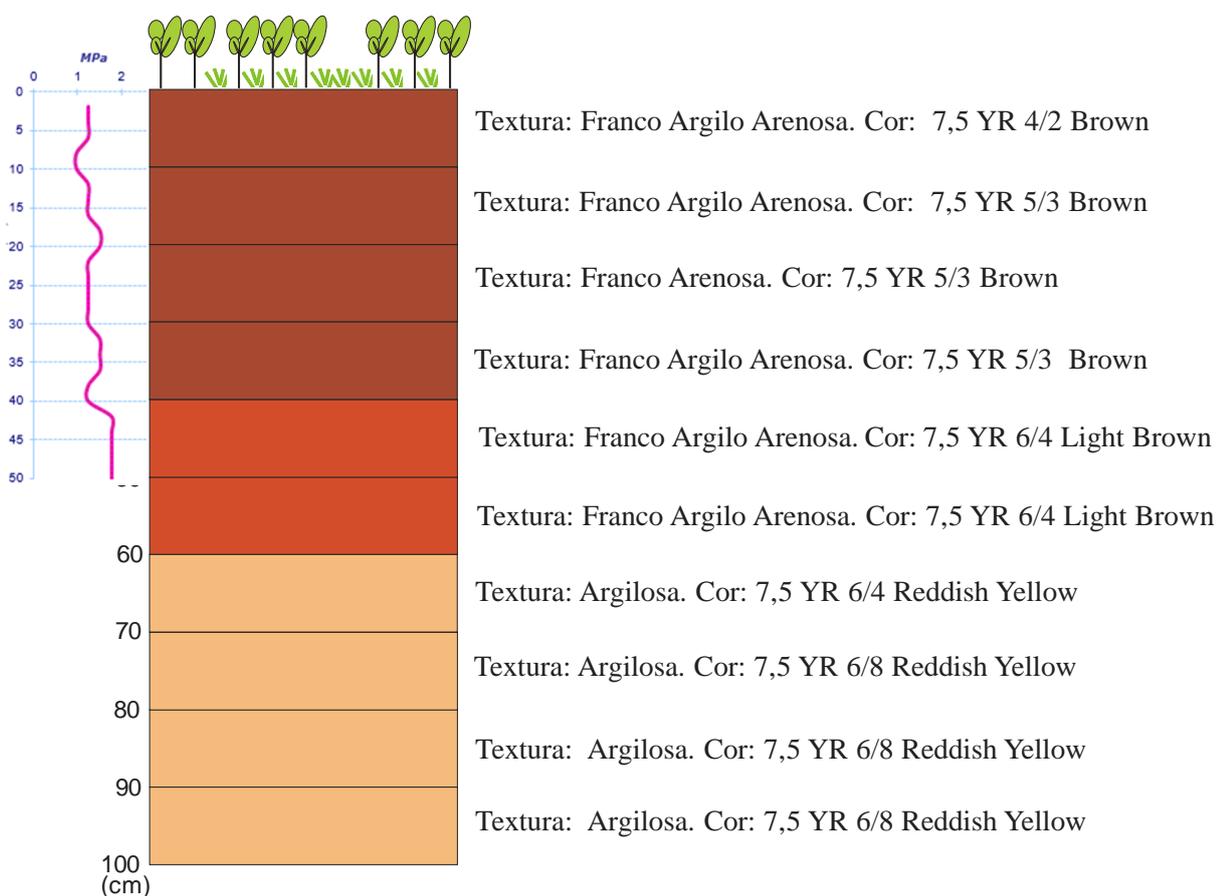


Figura 34: A – Teste de resistência a penetração; B – Perfil de solo do Ponto 03, na seção média da encosta, BH Colônia Antônio Aleixo.

Org. Armando B. da Frota Filho, 2015

A partir dos valores máximos encontrados e a média, que foram respectivamente, de 1,78 e de 1,37 Mpa, encontram-se no intervalo de 1,1 a 2,5 Mpa, que conforme Canarache (1990) apud Camargo e Alleoni (2006), apresentam pouca limitação para o desenvolvimento de plantas. Além disso, as referidas taxas se encontraram na parte inferior do perfil e pode ser um reflexo do aumento da quantidade silte no perfil de solo.

Quanto ao teste de Infiltração (GRÁFICO 11), apresentou uma taxa inicial elevada nos três primeiros minutos, com um pico no primeiro minuto com valor de 8,7 mm/min. Em seguida inicia uma constância, pois encontra estabilidade a partir do 27º minuto com taxa de 1,36 mm/min. O teste teve duração de 29 minutos e a taxa de média de infiltração foi de 2,46 mm/min., o que caracterizou o solo com boa drenagem. Esse resultado é condizente para Argissolo, e com as características granulométricas do perfil que varia de “Franco Argilo Arenoso” a “Argiloso”.

Entretanto, esse perfil apresenta as camadas iniciais com características mais arenosas, com textura variando de “Franco Argilo Arenosa” a “Franco Arenosa”, corroborando para que o solo retenha pouca umidade. A UmG da superfície do solo no momento do teste era de 21,87 % e aliada à textura franco-argilo-arenosa colaboram para que os minutos iniciais apresentem taxas de infiltração mais elevadas.

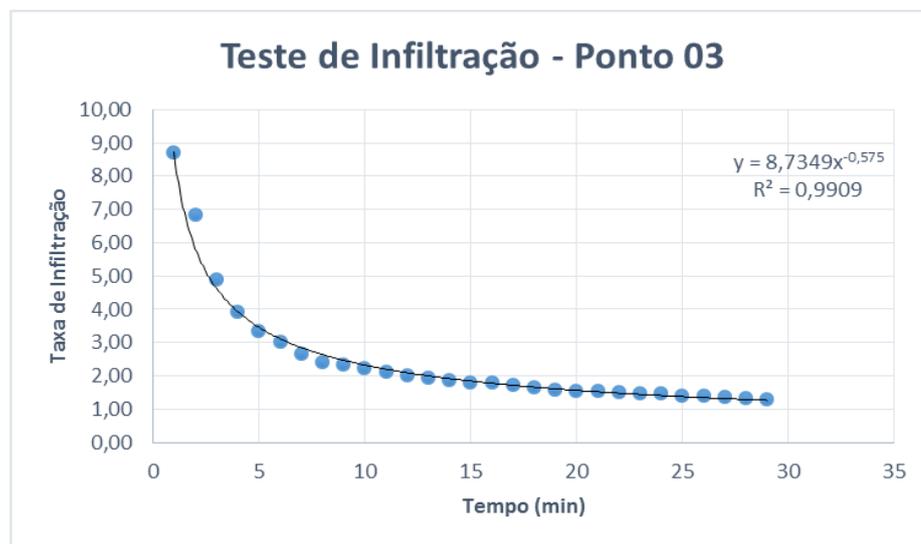


Gráfico 11: Teste de Infiltração realizado no terço inferior da vertente, ponto 03  
Org: Armando Brito da Frota Filho.2015

- Ponto 04 – Terço médio da vertente

Observou-se que a fração areia predomina nos trinta primeiros centímetros e nas camadas inferiores, a argila sobressai, fazendo com que a textura do perfil estudado varie entre “Franco-Argilo-Arenoso” a “Argiloso” (APÊNDICE 1 - QUADRO 04). No que se refere à Densidade Real, variou de 2,59 a 2,73 g/cm<sup>3</sup>.

A Densidade Aparente é de 1,18 a 1,23 g/cm<sup>3</sup> o que, segundo Kiehl (1979), classifica como um solo argiloso, que tende a ser mais compactado. Quanto à Porosidade Total, Kiehl (1979) afirma que a porosidade de solos arenosos varia de 35 a 50% enquanto a de solos argilosos varia de 40 a 60%, e salienta que os valores encontrados neste ponto de 51,06 a 57,23% podem ser considerados como um solo com características mais argilas.

Quanto ao teste de Penetração (FIGURA 35), as maiores taxas de resistência ocorreram no intervalo de 10-20 com 2,06 Mpa, que também apresentam uma grande concentração de silte (46,18%), que corrobora para baixa porosidade devido ao preenchimento dos espaços vazios por estes.

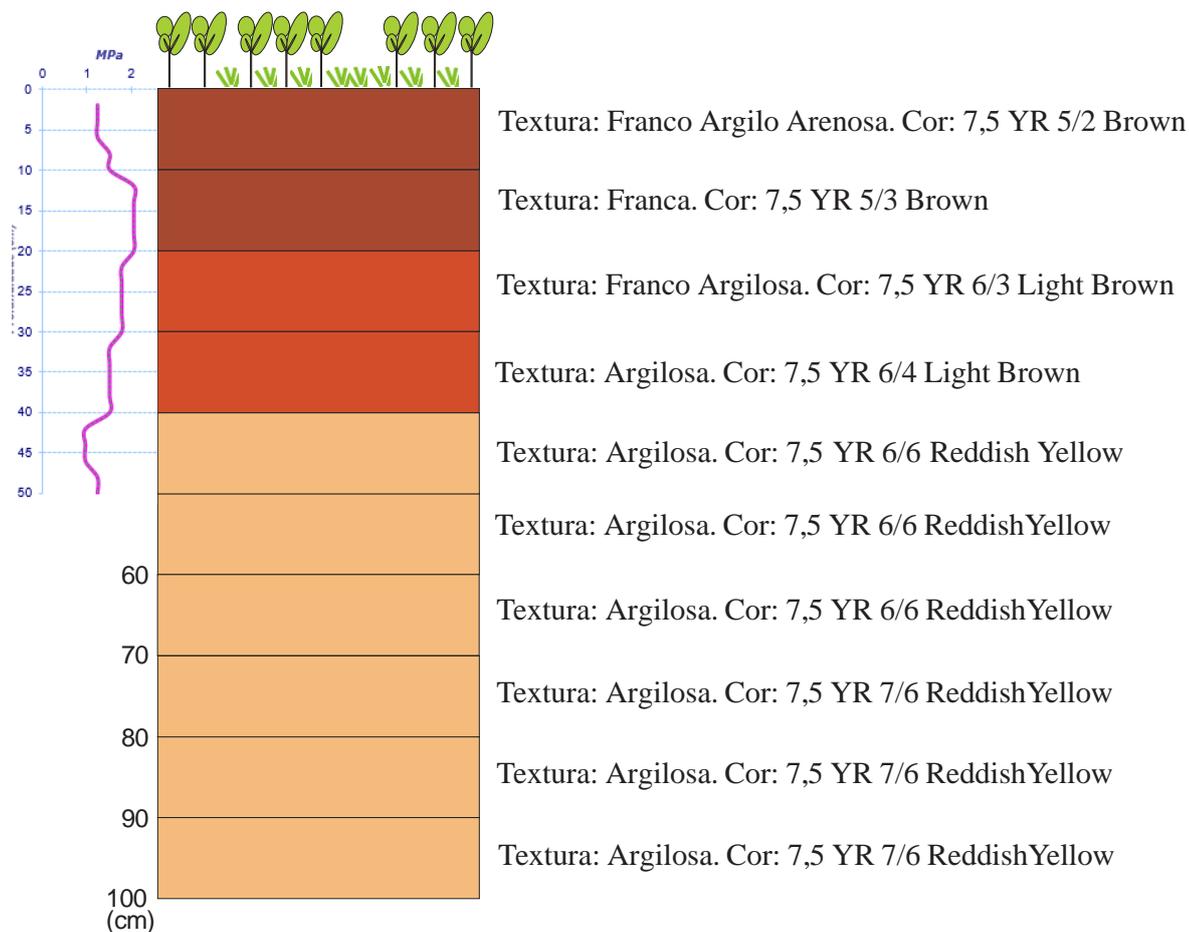


Figura 35: A – Teste de resistência a penetração; B – Perfil de solo do Ponto 04, na seção média da encosta, BH Colônia Antônio Aleixo. Org. Armando B. da Frota Filho, 2015

Apesar das maiores taxas de resistências à penetração estarem nos centímetros iniciais do perfil, o solo é considerado com pouca limitação para o desenvolvimento de plantas, por se enquadrar no intervalo 1,1 a 2,5 Mpa proposto por CANARACHE (1990) apud CAMARGO e ALLEONI (2006).

O teste de Infiltração (GRÁFICO 12) apresentou uma taxa de infiltração inicial elevada nos dois primeiros minutos, havendo pico no primeiro minuto com taxa de infiltração de 6,00 mm/min. A partir deste ponto, houve um decréscimo na infiltração em que ocorreu a estabilização no 23º minuto com taxa de infiltração igual a 2,00 mm/min.

O teste teve duração de 25 minutos e apresentou infiltração média de 2,72 mm/min. Isso se deve às características texturais do perfil, que variam de “Franco-Argilo-Arenosa” a “Argilosa”, caracterizando-o como um solo de boa drenagem. Apesar disso, a taxa de infiltração inicial não foi tão elevada como os testes realizados no ponto 02 e 03, isso pode ser explicado pela UmG da superfície do solo no momento do teste, que era de 25,72 %. Essa umidade associada ao solo com grandes quantidades de argila e silte, corrobora para a baixa capacidade de infiltração.

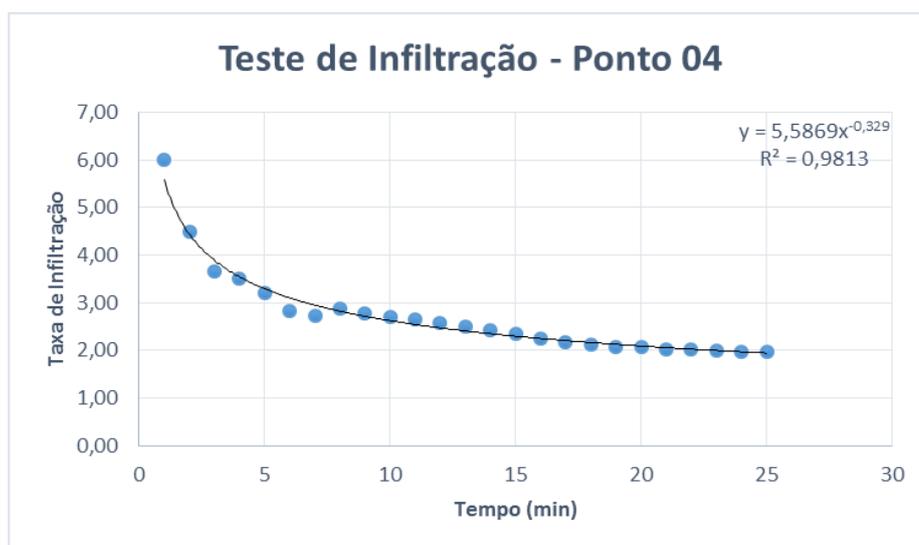


Gráfico 12: Teste de Infiltração realizado no terço inferior da vertente, ponto 04  
Org: Armando Brito da Frota Filho, 2015

- Análises Químicas

Foram avaliados os 30cm superficiais do solo, para análise das características químicas, como o pH e os nutrientes do solo dos pontos da topossequência. Com base nesses resultados, foi verificado que o solo apresenta acidez elevada, considerando tanto a análise do pH em KCl e H<sub>2</sub>O, com valores de 3,66 a 4,52 e 4,04 a 5,25 (TABELA 10), respectivamente (solos com pH abaixo de 5,0 são interpretados com acidez elevada - KIEHL,1979).

Tabela 10: Análise do pH dos perfis de solo da Topossequência da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo.

	Profund. (cm)	pH		
		H <sub>2</sub> O	KCl	ΔpH
T1	0-10	4,24	3,89	- 0,35
	10-20	4,46	3,95	- 0,51
	20-30	4,40	4,03	- 0,37
T4	0-10	4,19	4,02	- 0,17
	10-20	4,32	4,12	- 0,20
	20-30	4,44	4,06	- 0,38
T3	0-10	4,04	3,66	-0,38
	10-20	4,31	4,03	- 0,28
	20-30	4,53	4,03	- 0,50
T2	0-10	5,25	4,52	- 0,73
	10-20	4,45	4,40	- 0,05
	20-30	4,79	4,51	- 0,28

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Kiehl (1979) ainda ressalta que solos minerais com pH abaixo de 5,5 contêm alumínio trocável (Al<sup>3+</sup>), pois a correlação entre o H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> trocáveis é negativa, e o Al<sup>3+</sup> dissolvido na solução do solo reage com moléculas de H<sub>2</sub>O. Nessas condições, os íons de alumínio se hidrolisam facilmente, liberando H<sup>+</sup> para a solução, os quais são responsáveis, mesmo que indiretamente, pela acidez do solo (KIEHL, 1979; LEPSCH, 2011).

Outra relação referente ao pH salientada por Kiehl (1979) é que ΔpH (pH<sub>KCl</sub> – pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub>) apresenta valores negativos, que indicam a existência e predominância de argilas silicatadas que de forma geral, são resistentes ao processo de destacamento, porém em ambiente degradado, enrijecem e facilitam o processo de escoamento superficial, e conseqüentemente desenvolvem feições erosivas.

O  $\Delta$ pH apresentou valores negativos baixos, o que significa que a quantidade de  $Al^{3+}$  trocável é baixa e há pouca mobilidade, que permanece no solo e que gera toxicidade às plantas. Assim, caso haja um processo de desmatamento, a vegetação terá poucas chances de se revitalizar, pois o  $Al^{3+}$  dificulta ou mesmo impede o desenvolvimento de espécies vegetais.

Em estudo de Aniceto e Horbe (2012) foi realizada a análise do pH de solos, e como parâmetro de referência foi amostrado 1,5m de material no bairro do Novo Israel, para representar a região. Conforme esses dados para os 30 cm iniciais do perfil foram encontrados valores de 4,61 e 4,69 para pH KCl e pH  $H_2O$ , respectivamente, valores mais elevados que os encontrados na BH CAA, mas ainda com características de solos de acidez elevada.

O pH abaixo de 5 também influencia na deficiência de elementos como Ca, Mg, Mo, B ou toxicidade de Al, Mn, Zn e outros metais pesados, devido a suas maiores solubilidades (KIEHL, 1979). Esse processo pode ser observado na topossequência na BH CAA, em que a taxa dos nutrientes decai no decorrer da vertente (TABELA 11), sendo esse o resultado do processo de lixiviação descrito por Lucas (1988).

Tabela 11: Análise dos nutrientes dos perfis de solo da Topossêquencia da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

	Profund. (cm)	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>P</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>	<b>Mn</b>
		<b>cmoc/kg</b>					<b>mg/kg</b>		
T1	0-10	0,10	0,02	0,02	2,11	10,07	217,2	1,20	1,00
	10-20	0,25	0,06	0,03	1,76	8,70	181,2	1,20	1,30
	20-30	0,04	0,01	0,01	1,56	1,94	130,7	0,80	1,00
T4	0-10	0,06	0,01	0,02	1,65	4,82	188,7	1,20	0,90
	10-20	0,04	0,00	0,01	1,28	3,50	184,7	0,90	0,70
	20-30	0,04	0,01	0,00	1,25	1,45	166,2	1,00	0,70
T3	0-10	0,07	0,01	0,01	1,56	4,58	183,7	1,00	0,90
	10-20	0,04	0,00	0,01	1,08	3,20	185,2	1,10	0,80
	20-30	0,03	0,00	0,00	0,90	1,59	177,7	0,90	0,70
T2	0-10	0,05	0,01	0,01	0,55	6,87	88,7	1,00	0,80
	10-20	0,04	0,00	0,01	0,67	4,50	93,2	1,00	0,60
	20-30	0,06	0,00	0,01	0,56	2,84	117,2	0,80	0,70

Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

- Análise sobre a Topossequência

A topossequência apresentou três tipos de solos no decorrer da sua extensão. No topo da vertente encontra-se o Latossolo Amarelo que, a partir dos dados coletados e das características fisiográficas pode ser interpretado como:

Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200cm da superfície do solo ou dentro de 300cm, se o horizonte A apresenta mais que 150cm de espessura. Solos com matiz 7,5YR ou mais amarelo na maior parte dos primeiros 100cm do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA, 2006, p. 152).

Na seção média da vertente, com base nos dois pontos de tradagem (Ponto 3 e 4) e análises físicas do solo juntamente dos aspectos fisiográficos, foi interpretado que se tratava de Argissolo Amarelo, que pode ser definido pela Embrapa (2006) como:

Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação por bases baixa e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B, e satisfazendo, ainda, os seguintes requisitos:

- a) Horizonte plíntico, se presente, não satisfaz os critérios para Plintossolo;
- b) Horizonte glei, se presente, não satisfaz os critérios para Gleissolo. Solos com matiz 7,5YR ou mais amarelos na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA) (EMBRAPA, 2006, p. 94).

Na base da vertente, na qual foi realizada um ponto de tradagem (Ponto 02), foram analisadas as amostras de solo, em que houve preponderância da presença da areia no perfil. Além disso, foram observadas outras características como a presença do lençol freático encontrado a partir dos 110 cm de profundidade e os aspectos fisiográficos do local. Dessa forma, o solo neste local foi caracterizado como Neossolo Quartzarênico Hidromórfico, que de acordo com a Embrapa (2006) apresenta as seguintes características:

Solos pouco evoluídos constituídos por material mineral, ou por material orgânico com menos de 20cm de espessura, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico. Horizontes glei, plíntico, vértico e A chernozêmico, quando presentes, não ocorrem em condição diagnóstica para as classes Gleissolos, Plintossolos, Vertissolos e Chernossolos, respectivamente. Outros solos sem contato lítico dentro de 50cm de profundidade, com sequência de horizontes A-C, porém apresentando textura areia ou areia franca em todos os horizontes até, no mínimo, a profundidade de 150cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico; são essencialmente quartzosos, tendo nas frações areia grossa e areia fina 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala e, praticamente, ausência de minerais primários alteráveis (menos resistentes ao intemperismo). Solos com presença de lençol freático elevado durante grande parte do ano, na maioria dos anos, imperfeitamente ou mal drenados e apresentando um ou mais dos seguintes requisitos:

c) presença de lençol freático dentro de 150cm da superfície do solo, durante a época seca; (EMBRAPA, 2006, p. 171).

Lucas et al. (1984) e Lucas (1988) atestam que o Latossolo, o Argissolo e o Espodosolo fazem parte da evolução pedogenética que ocorre nas vertentes, nos quais há o processo de lixiviação. Conforme afirma Lucas (1988) há o empobrecimento do solo onde são lavadas as argilas e óxidos de ferros presentes no perfil por um processo denominado de Espodolização (podzolização), o qual ocorre de forma remontante, ou seja, da base em direção ao topo. Na base da vertente estão os Espodosolos ricos em areias, na seção média da encosta estão os solos transição como Argissolos e, no topo, estão os Latossolos, ricos em argilas e óxidos de ferro (FIGURA 36).

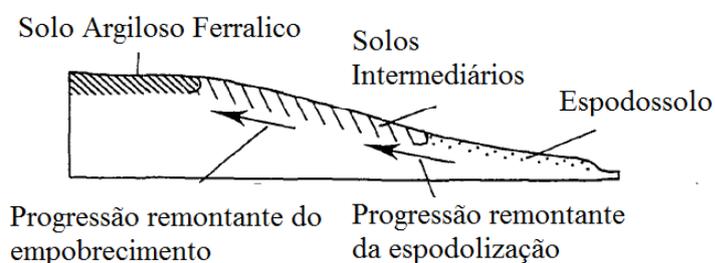


Figura 36: Diagrama esquemático de transformação de Latossolos em Espodosolos.  
Fonte: Adaptado de Lucas (1988).

Pode-se observar que a vertente estudada apresenta indícios de um processo de evolução pedogenética, pois apresenta Latossolo no topo, e o Argissolo como um solo de transição na seção média da encosta. Também observa-se a perda de nutrientes como K, Ca, Mg, Al, P, Fe, Zn e Mn vertente abaixo, o que caracteriza o empobrecimento do solo quando comparado à base da vertente com o topo da mesma.

A presença do Neossolo Quartzarênico na base da vertente não impossibilita tal análise, pois o Espodosolo pode estar abaixo desta camada de deposição.

Observa-se que esse processo de espodolização, descrito na figura 36, ocorre na vertente, do topo em direção à base da encosta, onde se verifica um aumento gradual de areia, como pode ser observado no Gráfico 12 e na Figura 37. Isso ocorre devido ao processo de lixiviação que carrega as frações mais finas como argila e silte e, também, os óxidos de ferro para as partes mais baixas do perfil e, simultaneamente, para a parte mais baixa da encosta, por meio de processos remontantes de empobrecimento do solo (espodolização).

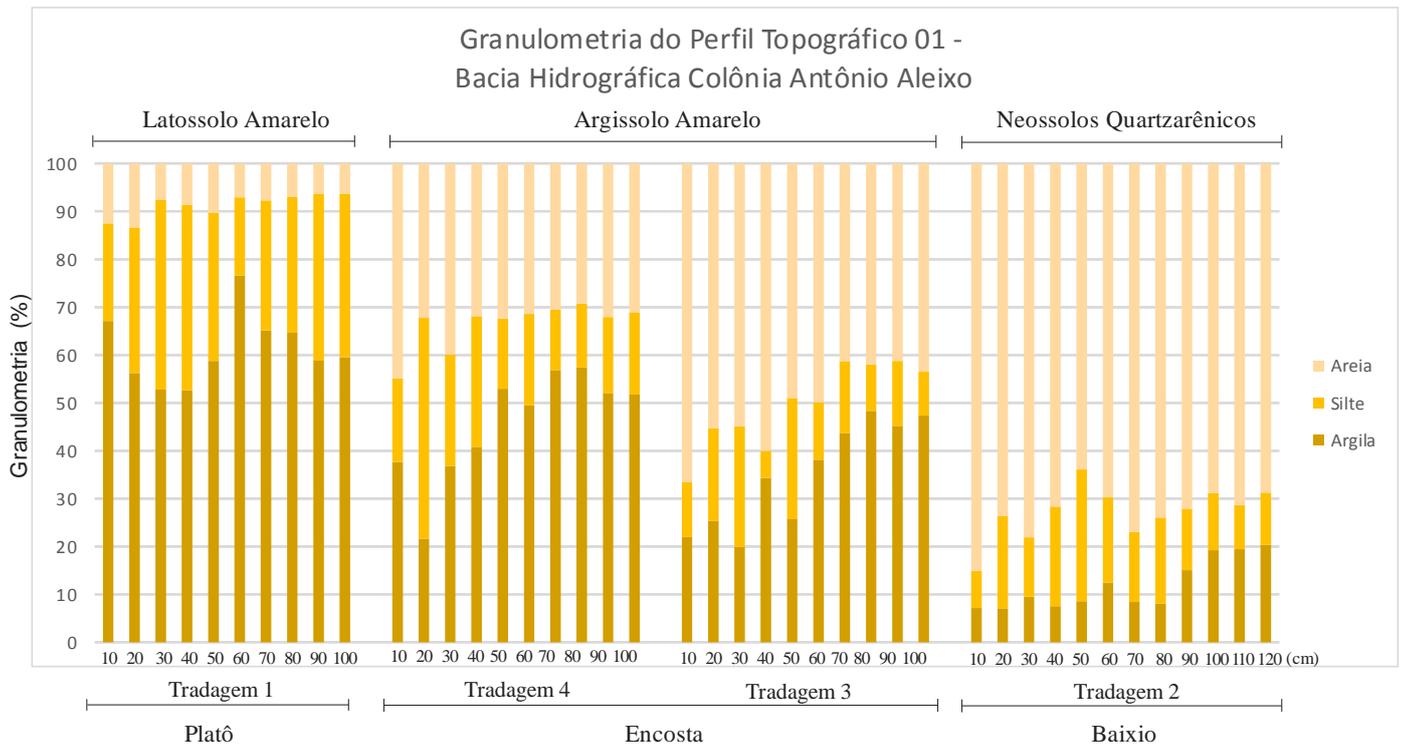
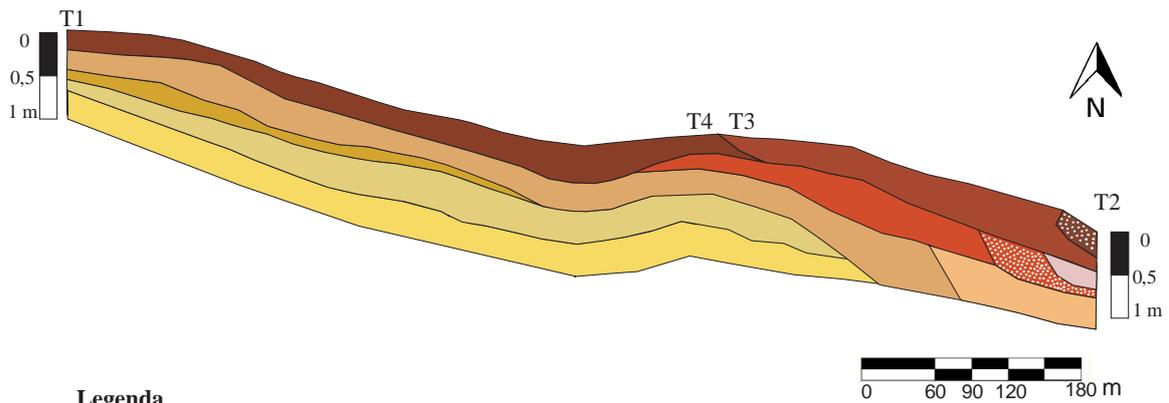


Gráfico 12: Granulometria do Perfil Topográfico 01 – Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2015



**Legenda**

- |  |   |
|--|---|
|  Textura: Argilosa a Muito Argilosa.<br>Cor: 7,5 YR 3/2 (Dark Brown)  |  Textura: Argilosa<br>Cor: 7,5 YR 6/6; 6/8; 7/6 (Reddish Yellow)                       |
|  Textura: Areia Franca.<br>Cor: 10 YR 3/3 (Dark Brown)  |  Textura: Franco Arenosa a Areia Franca<br>Cor: 5 YR 7/6 e 7,5 YR 6/6 (Reddish Yellow) |
|  Textura: Areia Franca, Franco Arenosa a Franco Argilo Arenosa<br>Cor: 7,5 YR 4/2; 5/2 e 5/3; 10 YR 4/3 (Brown) |  Textura: Argilosa<br>Cor: 10 YR 6/6 (Brownish Yellow)                                 |
|  Textura: Argilosa a Franco Argilosa e Franco Argilo Arenosa<br>Cor: 7,5 YR 6/4; 6/3 (Light Brown)              |  Textura: Argilosa<br>Cor: 10 YR 6/4 (Light Yellowish Brown)                           |
|  Textura: Areia Franca a Franco Arenosa<br>Cor: 7,5 YR 6/4; 6/3 (Light Brown)                                   |  Textura: Argilosa a Muito Argilosa<br>Cor: 10 YR 7/8 e 8/8 (Yellow)                   |
|  |  Textura: Areia Franca<br>Cor: 7,5 YR 6/2 (Pinkish Gray)                               |

Figura 37: Toposequência 01 realizada na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, e pontos de tradagem (T1, T4, T3 e T2).

Org. Armando Brito da Frota Filho e Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira, 2015

Essa análise é apoiada com base na observação da mudança da fisiografia da paisagem, em que à medida que se percorre a encosta há a mudança da coloração do solo (FIGURA 37) e do próprio tipo de vegetação, que varia de secundária no topo para campinarana na base da encosta.

Seguindo a mesma dinâmica, percebeu-se que a umidade gravimétrica (UmG) na superfície do solo (TABELA 12) e a taxa de resistência à penetração do solo também diminuem do topo da encosta para a base. Essa mudança pode ser observada na Tabela 13 e no Gráfico 13, devido à redução das frações finas e aumento das frações mais grosseiras como as areias. Outra característica observada refere-se à diminuição da taxa de compactação que diminui na base o que contribui para o aumento da capacidade de infiltração da água no solo.

Tabela 12: Umidade Gravimétrica superficial dos pontos de coleta de solo.

Ponto	Posição na encosta	Umidade Gravimétrica (%)
T1	Topo	37,59
T4	Seção	25,72
T3		21,87
T2	Base	11,17

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2015

Tabela 13: Taxa de resistências a penetração do solo (MPa) dos pontos de análise na topossequência.

Ponto	Posição na encosta		Profundidade (cm)									Média	
			0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45		45-50
T1	Topo	Mpa	0,97	1,51	0,97	0,97	0,97	0,97	1,51	1,24	1,24	1,78	1,21
T4	Seção		1,24	1,51	2,06	2,06	1,78	1,78	1,51	1,51	0,97	1,24	1,56
T3	Média		1,24	0,97	1,24	1,51	1,24	1,24	1,51	1,24	1,78	1,78	1,37
T2	Base		0,97	1,24	0,97	0,97	0,97	0,97	1,24	0,97	1,24	0,69	1,02

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

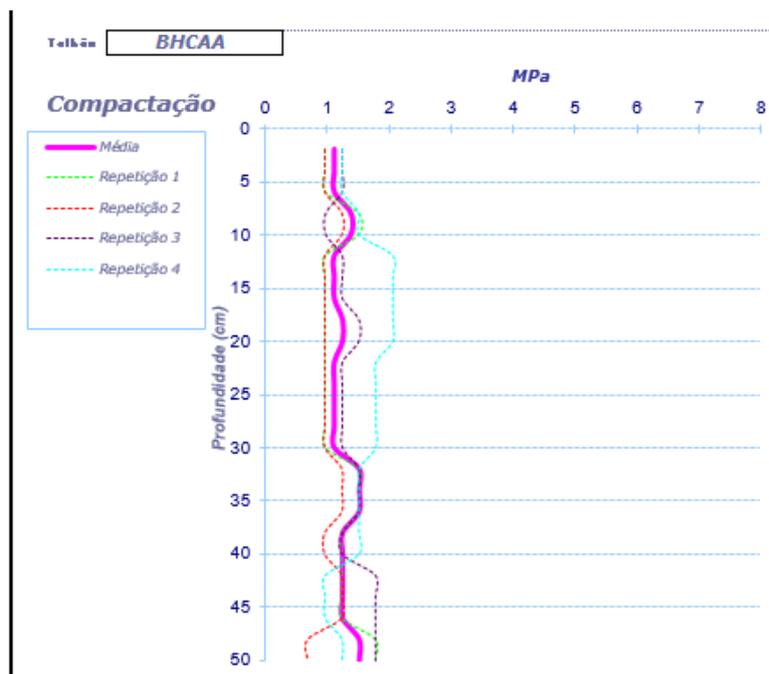


Gráfico 13: Taxa de resistência à penetração do solo, Média da topossequência da BH CAA.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2015

Ao associar as feições geomorfológicas e topográficas da bacia com os aspectos pedológicos pode-se afirmar que estas tendem a colaborar para o desenvolvimento de processos erosivos, havendo também uma preponderância da morfogênese sobre a pedogênese.

Na BH Colônia Antônio Aleixo observa-se o balanço morfogenético, ou seja, a relação da vertente em propiciar o desenvolvimento dos solos (componente vertical ou perpendicular - pedogênese) ou desenvolvimento dos processos erosivos (componente paralelo - morfogênese) (SILVA NETO, 2013) tende aos processos monogenéticos. Isso ocorre, pois as características da bacia, em especial as altas declividades que favorecem o escoamento em detrimento à infiltração, potencializam a morfogênese via o desenvolvimento dos processos erosivos.

O fator antrópico também é essencial no desenvolvimento dos processos erosivos, uma vez que à medida que a cobertura vegetal é substituída por solo exposto ou por áreas urbanizadas, maior será a propensão para o desencadeamento de processos erosivos de grandes proporções e a natureza não encontrará o equilíbrio positivo.

### 4.3 Caracterização dos aspectos urbanos dos locais de ocorrência com voçorocas

Conforme dados da pesquisa, a Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo (BHCAA) é composta por 7 bairros, sendo eles: Colônia Antônio Aleixo, Puraquequara, Tancredo Neves, Mauzinho, Distrito Industrial II, Gilberto Mestrinho e Jorge Teixeira. Apenas os três últimos apresentam incisões do tipo voçoroca, em parte, deve-se ao fato dos três ocuparem a maior porção da bacia. Contudo, a forma de ocupação destes bairros colabora para número diferenciado de incisões. Os bairros Gilberto Mestrinho e Jorge Teixeira apresentam 4 incisões cada, enquanto que o Distrito Industrial II apresenta 14.

Essa diferença decorre devido à forma e à fase de ocupação destes bairros, pois as intervenções antrópicas derivadas do processo de urbanização são modificadores do equilíbrio dinâmico natural de vários sistemas (do sistema vertente ao sistema Bacia Hidrográfica). Quaisquer mudanças na cobertura pedológica implicam em ruptura dos processos originais (RODRIGUES e GOUVEIA, 2013), gerando diversas consequências como o desenvolvimento de feições erosivas, e mesmo, mudanças no regime fluvial.

Autores como Chow (1964 apud VIEIRA e CUNHA, 2009) e Tucci e Collischonn (2000 apud RODRIGUES e GOUVEIA, 2013) afirmam que o processo de urbanização apresenta estágios, e cada um deles é responsável por mudanças nas dinâmicas naturais. Para esses autores, o processo de ocupação pode ser dividido em três fases:

- a) A primeira fase corresponde à transformação do perímetro pré-urbano para o urbano inicial, na qual ocorre o processo de desmate e retirada da cobertura vegetal, associado à movimentação de grandes volumes de terra e desestruturação das camadas do solo, seguido pela construção de casas, de tanques sépticos e da rede de drenagem de águas servidas e pluviais (VIEIRA e CUNHA, 2009; RODRIGUES e GOUVEIA, 2013).

Porém, neste intervalo de tempo, entre o início da urbanização e o loteamento, o solo fica exposto ao desencadeamento de processos erosivos (RODRIGUES e GOUVEIA, 2013). Também é nessa fase do processo de urbanização que o escoamento superficial é facilitado, o que ocasiona um aumento da produção de sedimentos e da vazão dos cursos d'água;

- b) A segunda fase do processo de urbanização é caracterizada pela urbanização não consolidada e loteamentos em fase ocupação, em que há a produção de

formas mais planas por meio da instalação e calçamento de ruas e outras edificações, com a execução de cortes e aterros, onde os materiais de menor coesão são erradicados e originam-se descontinuidades morfológicas. Essa fase é caracterizada pela elevação da taxa de escoamento e diminuição da infiltração devido ao aumento considerável de áreas impermeabilizadas, que elevam significativamente a taxa de deposição, como afirmam Rodrigues e Gouveia (2013).

Ainda sobre a segunda fase, Rodrigues e Gouveia (2013) explicitam que é característica a inexistência ou a inadequação da infraestrutura urbana como “pavimentação de ruas, sistemas de microdrenagem, sistema de captação de esgotos ou coleta regular de lixo”;

- c) A terceira fase trata da consolidação do processo de urbanização, onde ocorrem muitas edificações residenciais e públicas, além da construção de indústrias (VIEIRA e CUNHA, 2009), em que apresenta como consequência o aumento do escoamento, de vazão e das ocorrências de picos de cheia. Conforme Rodrigues e Gouveia (2013), este aumento do escoamento superficial ocorre pelo aumento das superfícies impermeabilizadas associadas à entrada de água no sistema, oriundas de outras bacias para o abastecimento público.

Como pode se observar no mapa do uso e ocupação do solo da Bacia Colônia Antônio Aleixo (FIGURA 38), a maior parte da bacia é composta por área vegetada. Em seguida, nota-se presença da malha urbana, em especial a montante, onde estão localizados os bairros Gilberto Mestrinho e Jorge Teixeira.

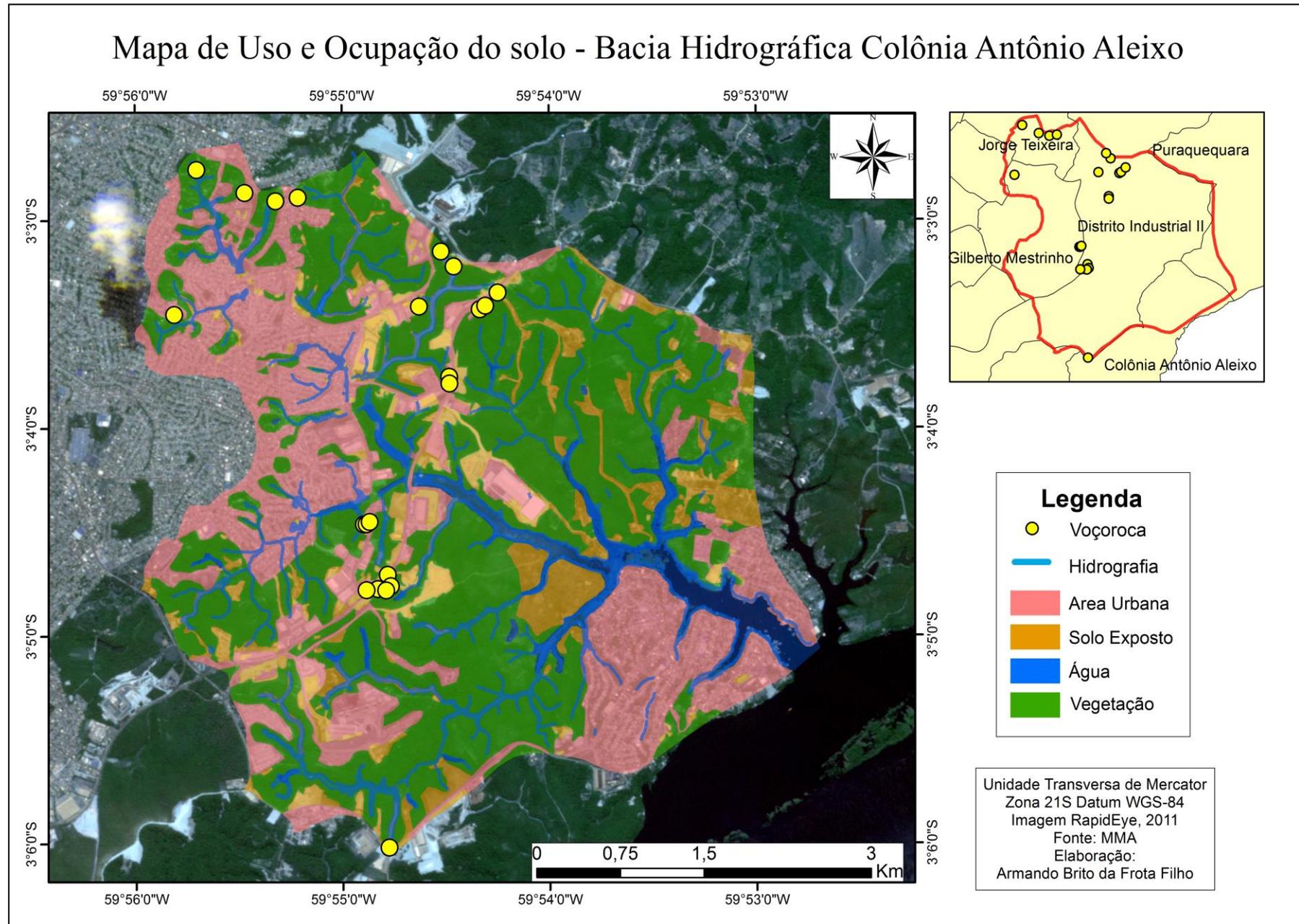


Figura 38: Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo com filtro de transparência de 50%.  
Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Os bairros Gilberto Mestrinho e Jorge Teixeira exibem uma ocupação consolidada que pode ser considerada como uma transição entre a segunda e a terceira fase de urbanização, enquanto que o bairro Distrito Industrial II, está na segunda fase da urbanização.

Nestes bairros, os aspectos ligados ao saneamento básico e drenagem de águas pluviais e servidas é precário e colaboram no desencadeamento, desenvolvimento e aceleração dos processos erosivos. Fatos estes que explicam o porquê das incisões, em sua totalidade, estarem localizadas próximas às vias urbanas e às residências.

Isso ocorre, como indicam Costa e Oliveira (2007) e Pennington (2009), devido ao fato de a cidade de Manaus ter crescido sem se desenvolver, ou seja, a expansão da malha urbana ocorreu sem o devido planejamento, desconsiderando aspectos naturais e socioeconômicos por tratar-se de ocupação espontânea<sup>10</sup>.

No que tange aos aspectos urbanos e sua relação com o desenvolvimento de processos erosivos, a dinâmica dos bairros Gilberto Mestrinho e Jorge Teixeira é semelhante, pois a parte majoritária destes bairros teve “ocupação espontânea”, e houve pouca interferência do Poder Público em sua fase inicial. Contudo, devido à sua ocupação ser predominantemente residencial e como havia um número expressivo de feições do tipo voçoroca, o Estado interveio por meio da contenção de voçorocas que colocavam em risco residências e aparelhos públicos, como mostra na figura 39 onde se observa uma voçoroca em processo de contenção.



Figura 39: Voçoroca em processo de contenção pelo poder público no bairro Jorge Teixeira. A linha preta indica a borda da incisão. As setas vermelhas indicam os patamares.

Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

<sup>10</sup> Denominado regionalmente de “invasões”

A Figura 40 é um exemplo de intervenção do poder público, onde a voçoroca foi contida. A contenção teve como característica a construção de patamares gramados que reduz o impacto da chuva no solo e a construção de canaletas com dissipadores de energia para evitar que a mesma fosse “reativada”. Contudo, a população iniciou um processo de ocupação nas bordas da voçoroca e nos patamares, além da plantação de bananeiras, fatores que contribuirão para a reativação desta voçoroca, ou mesmo o desenvolvimento de outras incisões.



Figura 40: Voçoroca contida pelo poder público no bairro Jorge Teixeira. As setas vermelhas indicam os patamares. As setas pretas indicam as ocupações em local inapropriado.

Fonte: Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira, 2012.

Ainda sobre a forma de ocupação dos bairros Gilberto Mestrinho e Jorge Teixeira, pode se destacar os fatores que contribuem para o desencadeamento de processos erosivos como: o **traçado das ruas**, a drenagem urbana (descarte de águas servidas e pluviais) e questão da deposição Tecnogênica (Gárbica).

#### 4.3.1 Traçado das ruas

As ruas dos bairros Gilberto Mestrinho e Jorge Teixeira, devido à própria forma do relevo da região, apresentam tendências a serem mais declivosas que facilitam o escoamento das águas pelas suas laterais, o que ocasiona em aumento de sua energia

cinética em face da grande declividade e que podem causar um impacto maior quando atingem a porção inferior da encosta.

Esses bairros também apresentam ruas que terminam nas bordas de voçorocas, como pode ser observado na Figura 41. Nesta, a rua é interditada, mas o fluxo de águas servidas vai em direção à incisão, fazendo com que a mesma continue em processo de expansão. Verificou-se que a incisão, também é usada como local de despejo de resíduos sólidos pela população local.



Figura 41: Rua interditada que encontra-se na borda de uma voçoroca. Bairro Jorge Teixeira. Tracejado vermelho indica a borda da incisão. A seta azul indica o sentido do escoamento das águas servidas, setas pretas indicam os resíduos sólidos na borda incisão. Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

#### 4.3.2 Drenagem (urbana)

Vieira (2008) enfatiza que a rede de drenagem urbana, quando bem estruturada, tem como intuito a retirada da água do local para outro com rapidez, porém em Manaus, como esta pratica é mal aplicada, traz consequências como o aumento do potencial de erosiva.

Ao seguirem o traçado da rua, as águas pluviais e/ou servidas têm como destino os fundos de vale (FIGURA 42), ou ainda devido à forma do relevo local combinado com os sistemas de drenagem mal construídos, e que chegam à meia encosta, tendem à descontinuidade entre a estrutura de concreto da canaleta e o solo, desencadear processos erosivos.



Figura 42: Voçoroca no Bairro Jorge Teixeira.  
Linha tracejada em vermelho indica a borda da voçoroca. A seta preta indica a saída de águas servidas de uma residência. Seta magenta indica a direção do fluxo para o interior da incisão.  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

Após intervenções do poder público, as canaletas foram reestruturadas e instaladas com a presença de dissipadores de energia e caixas coletoras, conforme se observa nas Figuras 43 e 44. Esse fato ocorreu nestes dois bairros especificamente, e no que se refere à figura 43, a construção desta canaleta ocorreu associada ao processo de contenção da voçoroca.



Figura 43: Canaleta com caixa coleta para dissipação de energia. Bairro Jorge Teixeira. Seta preta indica a caixa coletora.  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015



Figura 44: Canaleta com caixa coleta para dissipação de energia. Bairro Gilberto Mestrinho.  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2012.

#### 4.3.3 Deposição de resíduos sólidos em voçorocas

Quanto à presença de resíduos sólidos depositados em voçorocas, Vieira (2008) já apontava que, em alguns casos, a população circundante usa tais incisões como “bota-fora” de resíduos, que variam desde resíduos domésticos a rejeitos de construção civil. O referido autor ainda afirma que esse fato, além de poluir a área e cursos hídricos a jusante, atrai ratos e torna-se criadouro de diversos insetos como o mosquito da dengue.

Nesse universo de resíduos jogados no interior das voçorocas, pode-se dividir em: gárbicos, úrbicos e espólicicos. Os Depósitos Tecnogênicos Gárbicos são caracterizados por depósitos de materiais como resíduos orgânicos que podem conter outros materiais, só que em menor escala. Rodrigues e Gouveia (2013) indicam que, por essa deposição ser constituída de matérias diversas, apresentam descontinuidade internas, em especial se não forem devidamente compactados. Quando associados às vertentes declivosas apresentam tendências à convergência de fluxos (superficiais e subsuperficiais) que podem desencadear movimentos de massa, e assim colaborarem para o crescimento da incisão.

O conteúdo desse material também pode agravar o desenvolvimento do processo erosivo, pois restos orgânicos e matérias como plásticos contribuem ainda mais para a

baixa compactação, pois à medida que são desagregados, vão criando vazios e fazem com que a descontinuidade entre a morfologia original e a antropogênica fique mais latente (RODRIGUES e GOUVEIA, 2013).

Ainda como resultado desse processo, pode-se considerar a voçoroca como uma incisão erosiva que cresce via desmoronamento de suas paredes verticais, ou seja, por meio de movimentos de massa em seu interior, já que a presença de resíduos sólidos faz com que esse processo seja intensificado. No mais, a ausência de coesão entre o fundo e a parede da voçoroca, faz com que a água (servida ou pluvial), ao escorrer pelas paredes, desenvolva uma feição de retrabalhamento que desestabiliza o pacote superior por causa da perda de sustentação.

No bairro Jorge Teixeira, há duas incisões que apresentam tais características. Na Figura 45 pode ser observada a presença de resíduos sólidos, tanto no interior como na borda da incisão. Há outro fator agravante como a presença de espécimes vegetais como bananeira, que devido a sua fisiologia, com um tronco convergente que proporciona o fluxo de tronco, propicia que outras feições secundárias se desenvolvam no interior.



Figura 45: Voçoroca com deposição Tecnogênia Gárbica no bairro Jorge Teixeira. Linha tracejada em vermelho indica a borda e limites da voçoroca. As setas pretas indicam os resíduos sólidos. Setas Vermelhas indicam a presença de bananeiras no interior da incisão.

Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

#### 4.3.4 Processos erosivos acelerados no Bairro Distrito Industrial II

A dinâmica dos bairros Jorge Teixeira e Gilberto Mestrinho é diferente do bairro Distrito Industrial II. Em primeiro lugar devido à forma de ocupação deste último, que em sua maioria, se deu via loteamento do bairro para empreendimentos privados como fábricas, e em uma menor parte, teve “ocupação espontânea”.

É possível considerar que o bairro está ainda na segunda fase do processo de urbanização, pois assim como os locais dos referidos empreendimentos ainda estão em fase de implementação, o bairro também apresenta várias áreas ainda em processo de terraplanagem e aterramento. Ainda ocorre o problema da má estruturação da rede de drenagem urbana, fatores que propiciam o desencadeamento de processos erosivos.

Certas dinâmicas como a deposição de resíduos em incisões ganham outra dimensão quando confrontadas com a do bairro Distrito Industrial II, como pode ser observado nas Figuras 46 e 47. Nestas figuras é possível perceber a presença da incisão com a intervenção humana, não no sentido de contê-la, mas de usá-la como local de deposição de rejeitos (FIGURA 48), onde há a deposição de material Tecnogênico, variando entre Gárbico, Úrbico e, principalmente, Espólicos.



Figura 46: Cabeceira de uma voçoroca no Bairro Distrito Industrial II.

Setas pretas indicam os restos de uma árvore.

Fonte: Antonio Fábio Sabbá Guimarães Vieira, 2011.



Figura 47: Cabeceira de uma voçoroca no Bairro Distrito Industrial II, com intervenção humana e deposição tecnogênica.

Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015



Figura 48: Interior de uma voçoroca no Bairro Distrito Industrial II, com intervenção humana e deposição tecnogênica. Seta Vermelha indica a localização da Deposição Tecnogênica; Seta amarela indica o canal assoreado.  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

Esse processo fez com que a voçoroca tivesse um crescimento acelerado e chegasse mais próxima à via pública. No entanto, apesar da voçoroca apresentar-se mais ampla, sua profundidade reduziu devido à deposição de resíduos sólidos.

Neste bairro, devido à baixa ocupação por residências, a intervenção do Poder Público é mínima, o que levou a um alto número de incisões do tipo voçoroca, ocasionando o surgimento de voçorocas que apresentam as maiores dimensões, e conseqüentemente, provocam diversos impactos à bacia hidrográfica devido à grande quantidade de sedimentos carreados da incisão. Sendo que, a intervenção somente ocorre se as vias ou aparelhos urbanos estiverem em risco, como pode ser observado nas figuras 49 e 50.



Figura 49: Voçoroca que alcançou a via pública no bairro Distrito Industrial II.  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2011.



Figura 50: Voçoroca em processo de contenção no bairro Distrito Industrial II.  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

No que se refere à rede de drenagem pluvial, na parte residencial a drenagem de águas servidas apresenta a mesma dinâmica dos bairros Jorge Teixeira e Gilberto Mestrinho. Porém, quando a voçoroca chega a pontos críticos, em que há intervenção, são instaladas canaletas com caixas coletoras e dissipadores de energia.

Portanto, as características geomorfológicas e pedológicas da Bacia Colônia Antônio Aleixo propiciam o desenvolvimento natural de feições erosivas, contudo, é necessário pontuar que todas as incisões mapeadas se encontram próximas às vias urbanas, residências ou empreendimentos comerciais. Logo, apesar das características naturais da bacia, a forma de ocupação tem um fator importante no desenvolvimento das incisões, com relação à quantidade e suas dimensões.

#### 4.4 Monitoramento da morfometria e expansão das voçorocas

Dados de Vieira (2008) apontam que na cidade de Manaus havia 91 voçorocas, desse total 50 estavam localizadas na BH Colônia Antônio Aleixo. Na atualização deste cadastro, existiam 38 dessas incisões (FROTA FILHO, 2012). Essa redução do número de incisões ocorreu devido à ação do Poder Público através de obras de contenção, em especial, àquelas localizadas em áreas com maior densidade populacional como os bairros Jorge Teixeira e Gilberto Mestrinho. Nesses locais, havia risco às construções e aos aparelhos urbanos, daí a rapidez das contenções. No caso do bairro Distrito Industrial 2, as contenções ocorreram através de ações da Iniciativa Privada, uma vez que a expansão estava ocorrendo em propriedades particulares pondo em risco suas instalações.

É válido ressaltar que algumas das incisões se desenvolveram ao ponto de se unir e tornarem-se uma única voçoroca com dimensão maior e de grande impacto ao meio.

O cadastro mais recente e atualizado mostra que a dinâmica se repetiu, ou seja, o número de voçorocas foi reduzido de forma rápida. Foram localizadas 22 incisões desse tipo (TABELA 14), sendo que duas delas estão em processo de contenção pelo Poder Público.

Tabela 14: Quantidade de voçorocas encontradas na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

Feições Erosivas (Voçoroca)	Nº de voçorocas Vieira (2008)	50
	Nº de voçorocas Frota Filho (2012)	38
	Nº de voçorocas (2016)*	22

\* Este Trabalho

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

A figura 51 mostra a espacialização das incisões erosivas na bacia em que as mesmas tendem a se desenvolver próximas umas às outras, resultando na união de algumas destas.

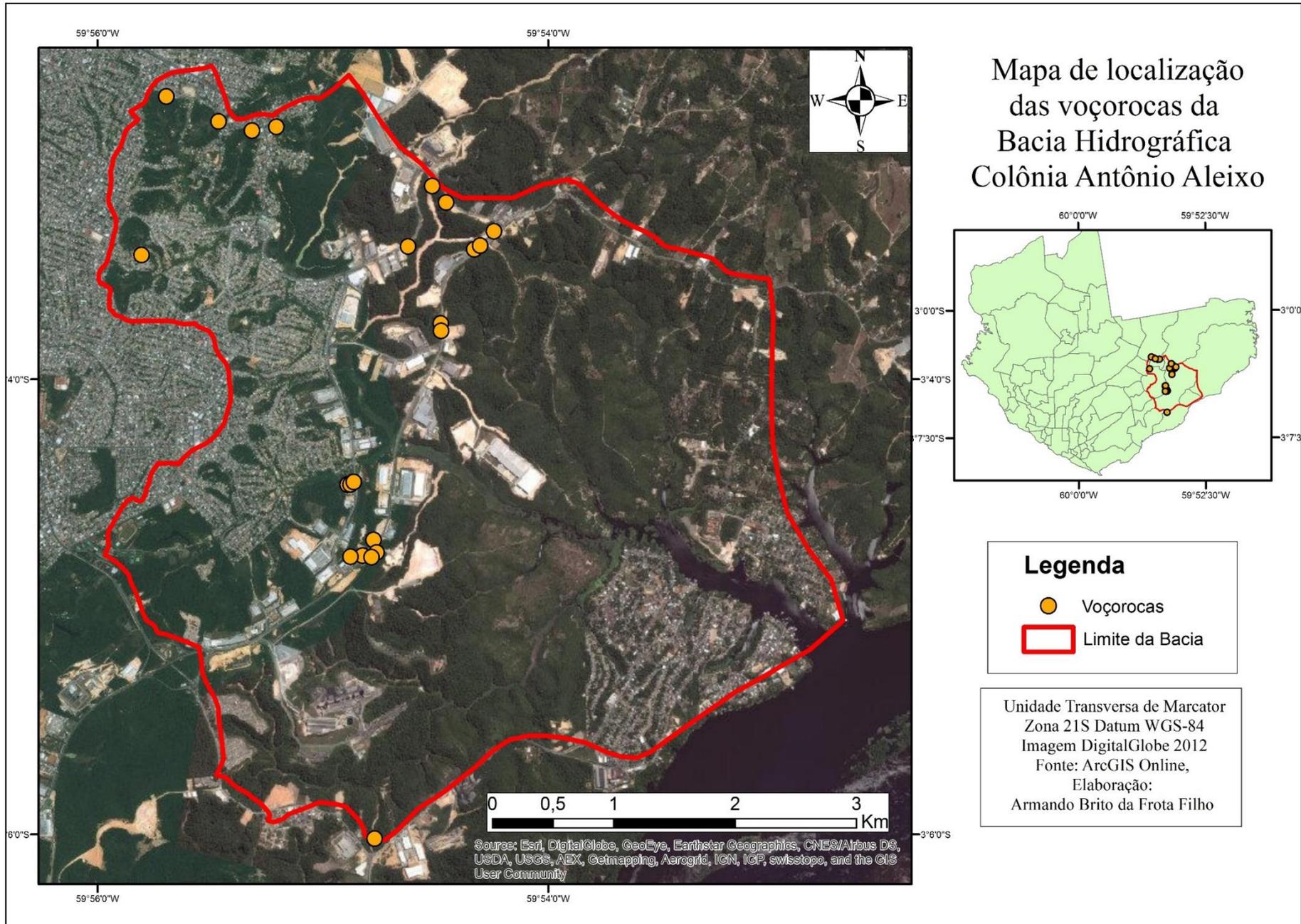


Figura 51: Mapa de localização das voçorocas encontradas na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo.  
Fonte: Imagem DigitalGlobe, 2012 – ArcGIS Online. Org: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

A partir das observações feitas nos trabalhos de campo, por meio das análises de imagens de satélite da área e de dados como da geomorfologia da bacia foi possível descrever as principais características quanto ao Tipo (OLIVEIRA, 1989) e à Forma (VIEIRA, 2008) das voçorocas (QUADRO 16) e inferir a respeito da forma e da orientação em que se desenvolvem.

Quadro 15: Síntese das principais características das voçorocas encontradas na Bacia Hidrográfica Colônia Aleixo.

Ponto (Voç.)	Coordenadas	Bairro	Tipo	Forma	Orientação da voçoroca	Forma da Encosta	Declividade da Encosta	
							Grau (°)	(%)
01	S 03° 6'4.24" W 59°54'46.85"	Distrito Industrial II	Desconectada	Retangular	NW-SE	Convexa Divergente	25,07°	41,55
02	S 03° 2'54.45" W 59°55'19.29"	Jorge Teixeira	Conectada	Retangular	SW-NE	Convexa Divergente	29,61°	50,18
03	S 03° 2'53.23" W 59°55'12.47"	Jorge Teixeira	Conectada	Irregular	SE-NW	Convexa Convergente	3,45°	5,42
04	S 3° 3'13.36" W 59°54'27.02"	Distrito Industrial II	Desconectada	Retangular	NW-SE	Convexa Divergente	33,35°	57,76
05	S 03° 2'44.05" W 59°55'28.03"	Jorge Teixeira	Conectada	Retangular	S-N	Convexa Convergente	20,75°	33,79
06	S 03° 3'26.29" W 59°55'48.05"	Gilberto Mestrinho	Desconectada	Retangular	NE-SW	Côncava Convergente	11,09°	17,59
07	S 03° 3'25.64" W 59°54'19.78"	Distrito Industrial II	Integrada	Retangular	N-S	Convexa Convergente	18,36°	26,66
08	S 03° 3'24.66" W 59°54'18.20"	Distrito Industrial II	Integrada	Bifurcada	NW-SE	Convexa Divergente	26,19°	43,62
09*	S 03° 3'20.62" W 59°54'14.08"	Distrito Industrial II	Integrada	Retangular	SW-NE	Convexa Divergente	23,58°	38,83
10	S 03° 3'24.35" W 59°54'36.69"	Distrito Industrial II	Desconectada	Retangular	SE-NW	Côncava Convergente	8,21°	12,96
11	S 03° 4'46.28" W 59°54'49.13"	Distrito Industrial II	Integrada	Bifurcada	NW-SE	Retilínea Divergente	24,11°	39,79
12	S 03° 4'41.85" W 59°54'46.45"	Distrito Industrial II	Conectada	Retangular	E-W	Convexa Divergente	19,67°	31,91
13	S 03° 4'45.32" W 59°54'45.37"	Distrito Industrial II	Integrada	Retangular	W-E	Convexa Convergente	19,20°	31,10
14	S 03° 4'46.99" W 59°54'47.04"	Distrito Industrial II	Desconectada	Retangular	W-E	Convexa Convergente	12,07°	19,19
15	S 03° 4'27.23" W 59°54'53.26"	Gilberto Mestrinho	Desconectada	Retangular	S-N	Côncava Convergente	11,34°	18,00
16	S 03° 4'27.35" W 59°54'52.78"	Gilberto Mestrinho	Integrada	Linear	S-N	Côncava Convergente	16,94°	27,25
17	S 03° 4'27.50" W 59°54'52.43"	Gilberto Mestrinho	Conectada	Retangular	S-N	Côncava Convergente	5,56°	8,75
18	S 03° 02' 51,8" W 59°54'29.13"	Distrito Industrial II	Conectada	Irregular	NW-SE	Convexa Convergente	19,13°	30,98
19	S 03° 3'46.86" W 59°54'28.62"	Distrito Industrial II	Conectada	Retangular	SW-NE	Convexa Divergente	18,20°	29,39
20	S 03° 3'7.29" W 59°54'31.31"	Distrito Industrial II	Integrada	Retangular	S-N	Convexa Divergente	25,37°	42,10
21	S 03° 4'46.58" W 59°54'52.89"	Distrito Industrial II	Conectada	Retangular	N-S	Côncava Planar	8,61°	13,60
22	S 03° 2'52.01" W 59°55'28.03"	Jorge Teixeira	Desconectada	Retangular	SW-NE	Convexa Divergente	17,50°	28,20

\* Iniciou seu desenvolvimento na seção da encosta Retilínea Divergente e prosseguiu até a seção Convexa Divergente. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2015.

No que se refere à classificação por Tipo de Oliveira (1989), das 22 incisões, 08 são do tipo **Conectada** (36%), 07 são do tipo **Desconectada** (32%) e 07 do tipo **Integrada** (32%) (GRÁFICO 14).

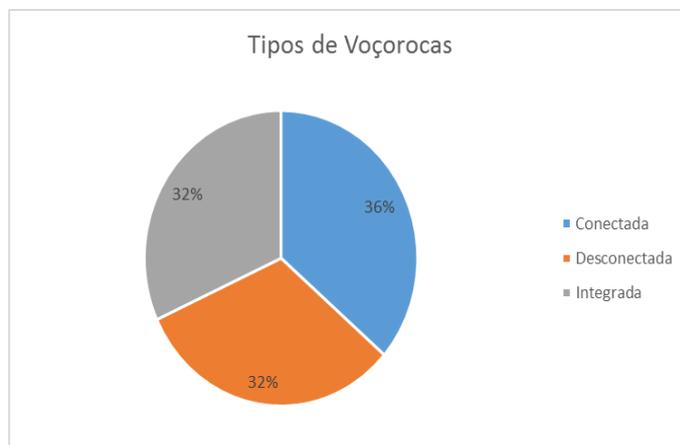


Gráfico 14: Tipo das voçorocas localizadas na Bacia Hidrográfica Colônia Aleixo  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

Oliveira (1989) aponta que as voçorocas do tipo Integrada são o estágio final no desenvolvimento. Sendo assim, ao encontrar certo nível de estabilidade quanto ao processo erosivo, tende à redução da velocidade devido à forma de crescimento remontante das voçorocas. Em contraponto, as incisões do tipo Conectada estão em processo de desenvolvimento, e só entrarão em “estabilização” ao atingirem o topo da vertente.

As voçorocas do tipo Desconectada, por se desenvolverem mais próximas ao topo da encosta, tendem a alcançar a estabilidade mais rapidamente. Devido à forma de crescimento remontante (em direção à montante) podem não se unir à rede de drenagem. Portanto, o material depositado permanecerá na base da vertente, na forma de depósito sedimentar.

Quanto aos impactos relacionados ao material erodido das voçorocas, o fato de haver um número elevado de voçorocas conectadas (incisões do tipo conectada e integrada) à rede drenagem (15 incisões, 68%), afeta drasticamente os cursos hídricos, pois a quantidade de material erodido depositado no canal pode levar à mudança no padrão de drenagem.

A BH Colônia Antônio Aleixo apresenta rios de águas negras, notórios pela baixa velocidade e conseqüente pouca carga sedimentar, ao receberem os sedimentos carregados pelas voçorocas podem ser assoreados e à medida que esse material chega a

curtos d'água de ordem superior, podem alterar o padrão tortuoso da bacia para um padrão mais anastomosado.

Das Formas descritas por Vieira (2008), verificou-se que das 22 incisões, 17 delas apresentam formato Retangular (77%), 02 são Bifurcadas, 02 com forma Irregular (09%) e 01 com a forma Linear (05%) (GRÁFICO 15).

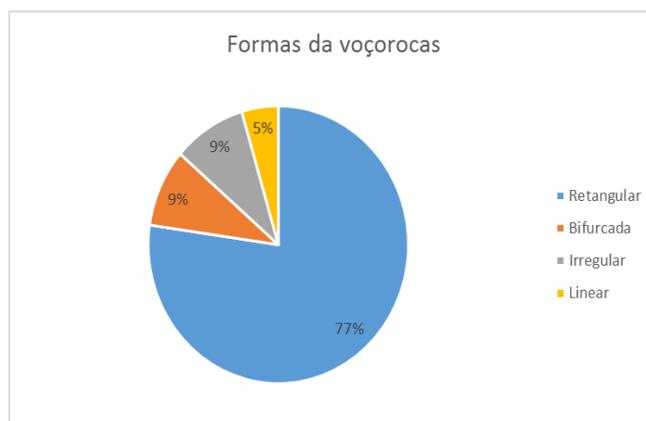


Gráfico 15: Forma das voçorocas localizadas na Bacia Hidrográfica Colônia Aleixo.

Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

Vieira (2008) assinala que as voçorocas retangulares representam o estágio final das incisões, ou seja, voçorocas mais próximas da estabilização. As voçorocas do tipo desconectada e integrada, devido a sua posição na vertente tendem à estabilização e a maioria das voçorocas retangulares têm os referidos tipos.

Ainda de acordo com Vieira (2008), as voçorocas com forma bifurcada apresentam duas cabeceiras, pois têm duas fontes de contribuição de fluxos superficiais concentrados e isso ocorre por diversas razões. Na bacia foram observadas duas situações:

- Voçorocas que apresentaram dois fluxos superficiais, formando duas cabeceiras;
- Resultantes da união de duas incisões desenvolvidas próximas, quando a parede que as separava foi erodida.

Foram cadastradas 02 voçorocas, que se desenvolvem devido à presença de múltiplos fluxos superficiais. No caso da incisão 03, isso ocorre em área densamente ocupada e os fluxos têm origem no escoamento de águas pluviais e servidas. Quanto à

voçoroca 18, o grande número de fluxos ocorre devido às crostas na área do entorno da incisão.

Apenas uma voçoroca apresentou forma Linear que está ligada a uma única zona de convergência de fluxos. Como a bacia apresenta áreas com declividades elevadas, não foram encontradas voçorocas com o formato Ramificado, pois esta forma é característica de “solos onde a declividade do terreno é relativamente baixa” (VIEIRA, 2008) ou em solos arenosos.

#### 4.4.1 Monitoramento da Morfometria

Foram monitoradas 04 voçorocas quanto as suas características morfométricas, escolhidas por apresentarem maior mudança e crescimento e, por meio de imagens de satélite, foram monitoradas em sua forma e evolução.

As incisões 07, 08, 09 e 12 foram monitoradas tanto quanto ao comprimento, largura, profundidade, área e volume erodido como também quanto à evolução de seu Tipo (OLIVEIRA, 1989) e de sua Forma (VEIRA, 2008) e à direção do crescimento.

Quanto ao comprimento das voçorocas monitoradas o Gráfico 16 exhibe o crescimento no comprimento de todas as voçorocas com exceção da incisão 09. Esta voçoroca não apresenta crescimento, pois sua cabeceira sofre deposição tecnogênica úrbica.

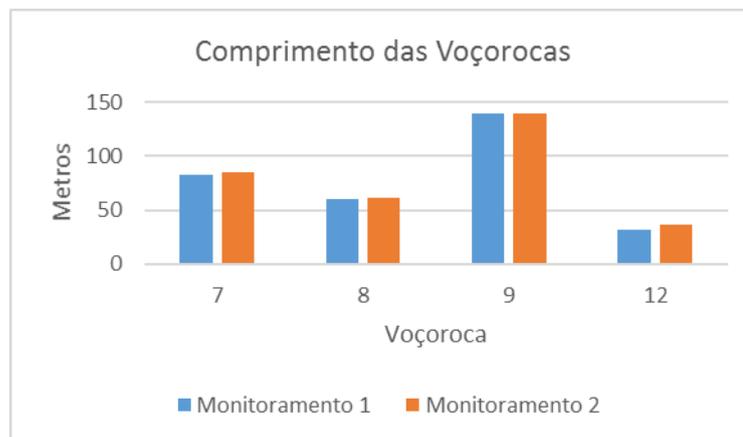


Gráfico 16: Crescimento do comprimento das voçorocas monitoradas.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

O gráfico 17 exhibe que todas as voçorocas sofrem o desenvolvimento da largura, isso ocorre, por apresentarem bordas sem vegetação que, por sua vez, ocasiona a geração de fluxos superficiais que escorrem pelas paredes da encosta desenvolvendo alcovas de regressão.

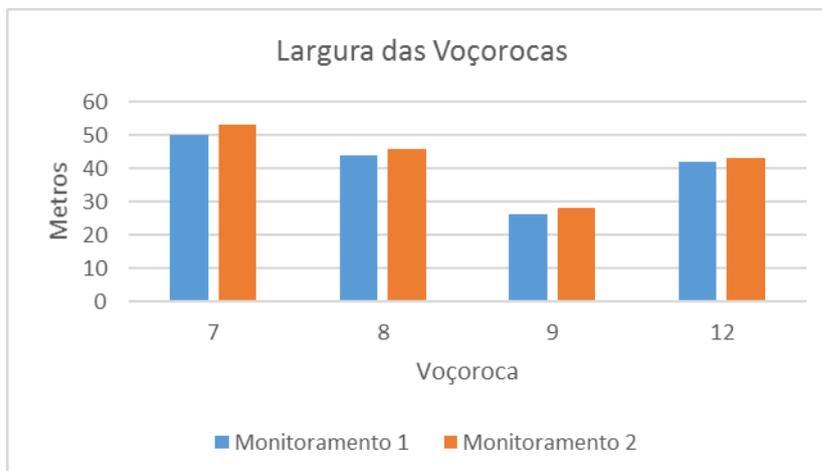


Gráfico 17: Crescimento da largura das voçorocas monitoradas.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

A profundidade apresentou pouca variação entre os dois monitoramentos, porém a voçoroca 09 apresentou redução na sua profundidade (GRÁFICO 18), uma vez que esta vem sofrendo alterações nos seus arredores e deposição no seu interior.

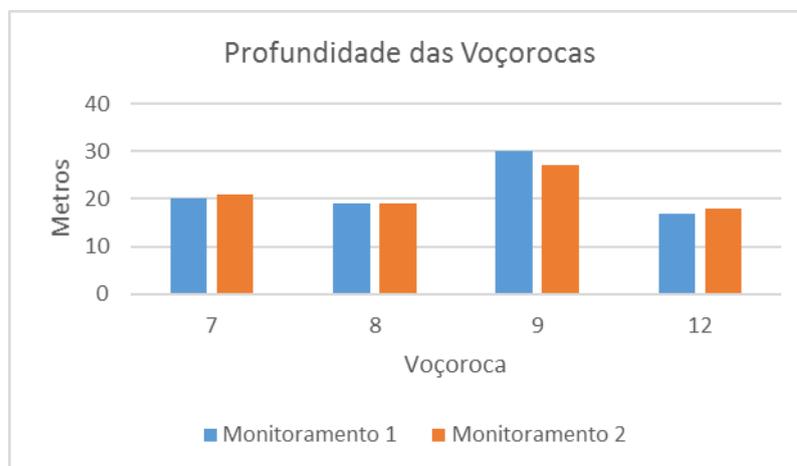


Gráfico 18: Crescimento da profundidade das voçorocas monitoradas.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

A área e o volume são dados baseados nos valores citados acima. Em relação à área (GRÁFICO 19), pode-se notar que a voçoroca 09 apresenta a maior área, visto que a mesma também apresenta os maiores valores de comprimento e largura, não apenas referentes às voçorocas monitoradas, mas a toda bacia.

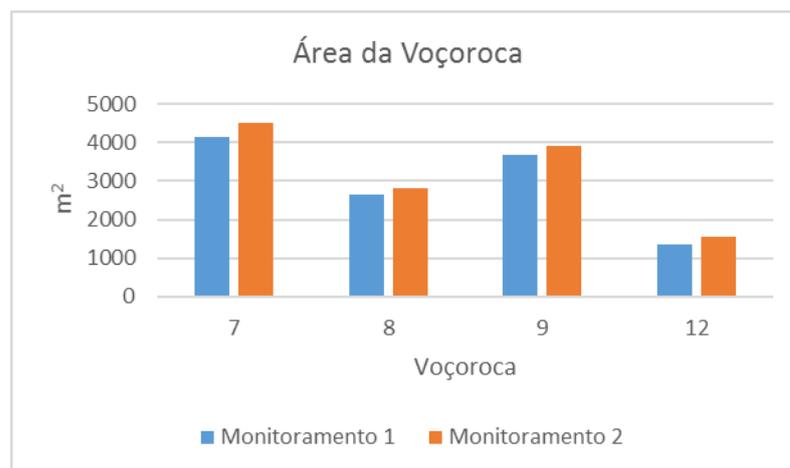


Gráfico 19: Crescimento da área das voçorocas monitoradas.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Quanto ao monitoramento do volume, é possível notar no gráfico 20 que todos os volumes superam o 20000 m<sup>3</sup> erodidos. Pela classificação, quanto ao volume erodido de Vieira e Albuquerque (2004), voçorocas com volume entre 20000 e 40000 m<sup>3</sup> são caracterizadas como “grandes”, como é o caso da incisão 12. As demais voçorocas apresentam volume superior a 40000m<sup>3</sup> caracterizadas como “muito grande”.

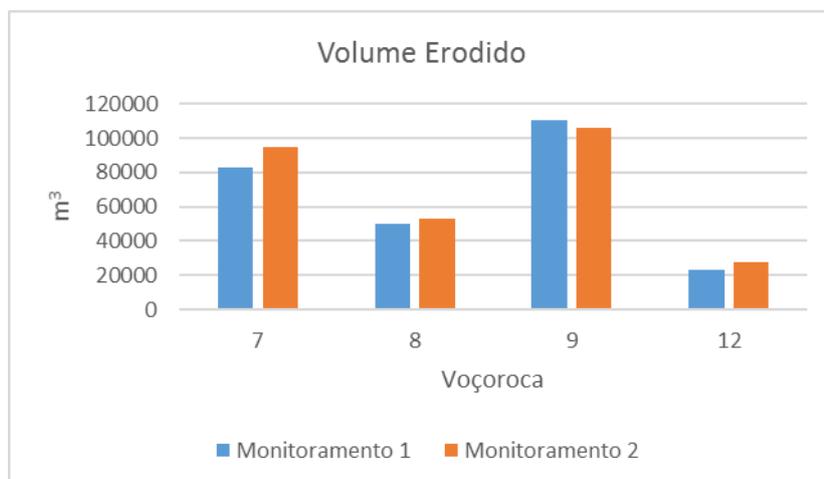


Gráfico 20: Crescimento do volume das voçorocas monitoradas.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Ao comparar a soma dos valores de material erodido no primeiro monitoramento 266 678 m<sup>3</sup> e do segundo monitoramento 281 623 m<sup>3</sup>, é possível observar a quantidade de material carregado pelas voçorocas à rede drenagem, o que ocasiona a alteração da composição da paisagem e o regime hidrológico da bacia, visto que apresenta vários canais assoreados.

A figura 51 exibe a evolução das incisões 07 e 08, onde as respectivas voçorocas apresentaram aumento na largura, na mesma proporção que a cabeceira se aproximou da pista.

No que cerne à forma, é possível notar que a mesma apresentava um formato mais linear à medida que atingiu um formato mais retangular, ou seja, ao chegar ao estágio evolutivo final. Como esta incisão está próxima ao topo da vertente, diminuiu-se a área de contribuição significativamente, o que colabora na redução do seu desenvolvimento.

A incisão cresce em direção à pista, apresentando-se como um risco, pois de acordo com o monitoramento realizado em Dezembro de 2015, a boca da voçoroca está a 6,7 metros de distância da pista.

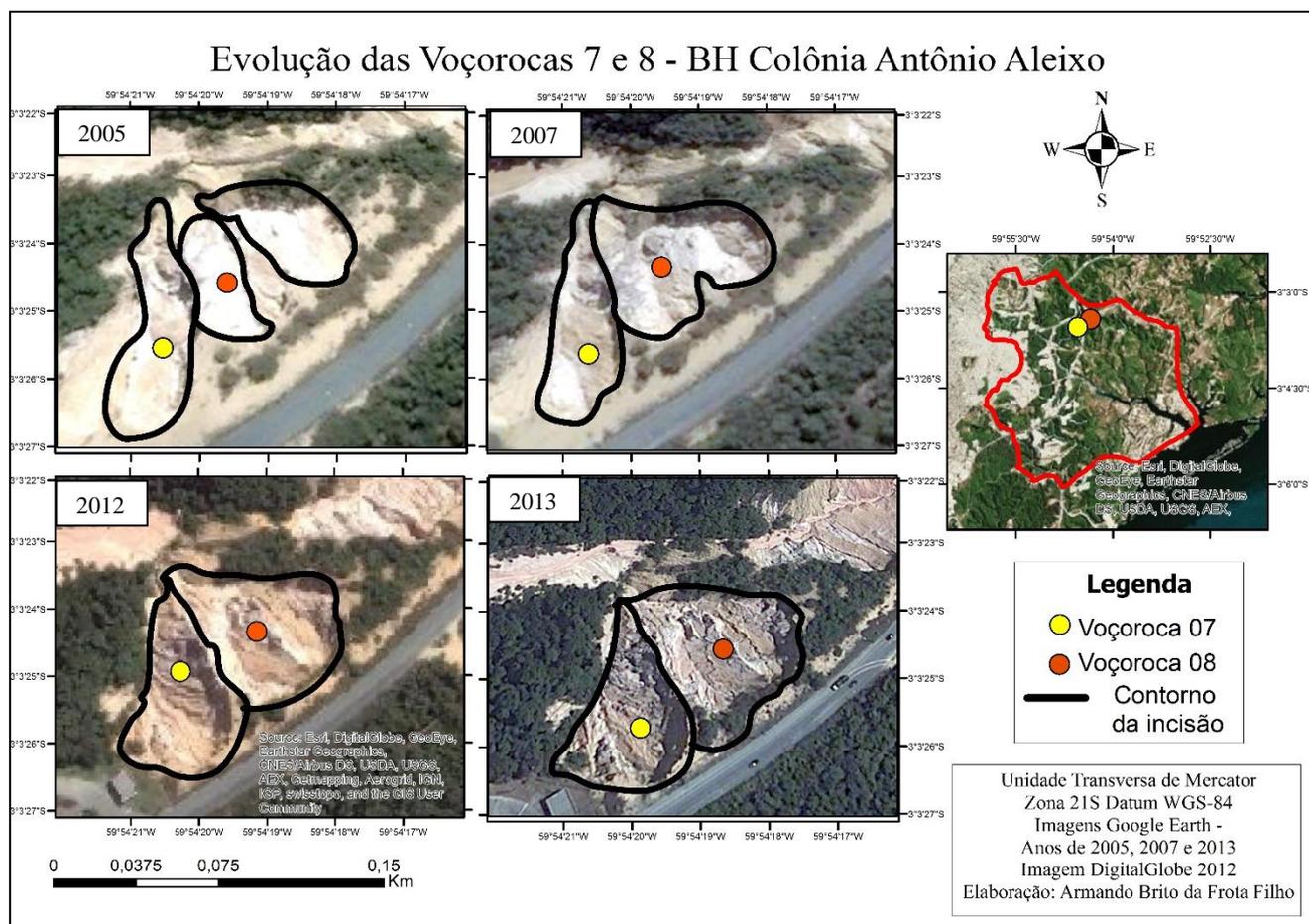


Figura 52: Mapa da evolução das voçorocas 07 e 08 com imagens dos anos de 2005, 2007, 2012 e 2013.  
Fonte: Google Earth e DigitalGlobe. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Quanto à incisão 08, é possível observar que no ano de 2005 consistia de duas incisões que cresciam próximas. Porém, à medida que se desenvolveram, a parede que

as dividia foi erodida, transformando as incisões retangulares em uma incisão bifurcada. O fato de terem se tornado uma única incisão com duas cabeceiras fez com que ela se desenvolvesse mais rapidamente, pois na primeira imagem as incisões eram do tipo conectadas e distantes da pista, em 2015 a incisão apresenta-se como integrada e estando a 7 metros da via principal.

Na figura 53 apresenta a evolução da incisão 09. Esta é a voçoroca que mais se desenvolveu, apresentando, portanto, as maiores dimensões, principalmente em termos de comprimento e profundidade.

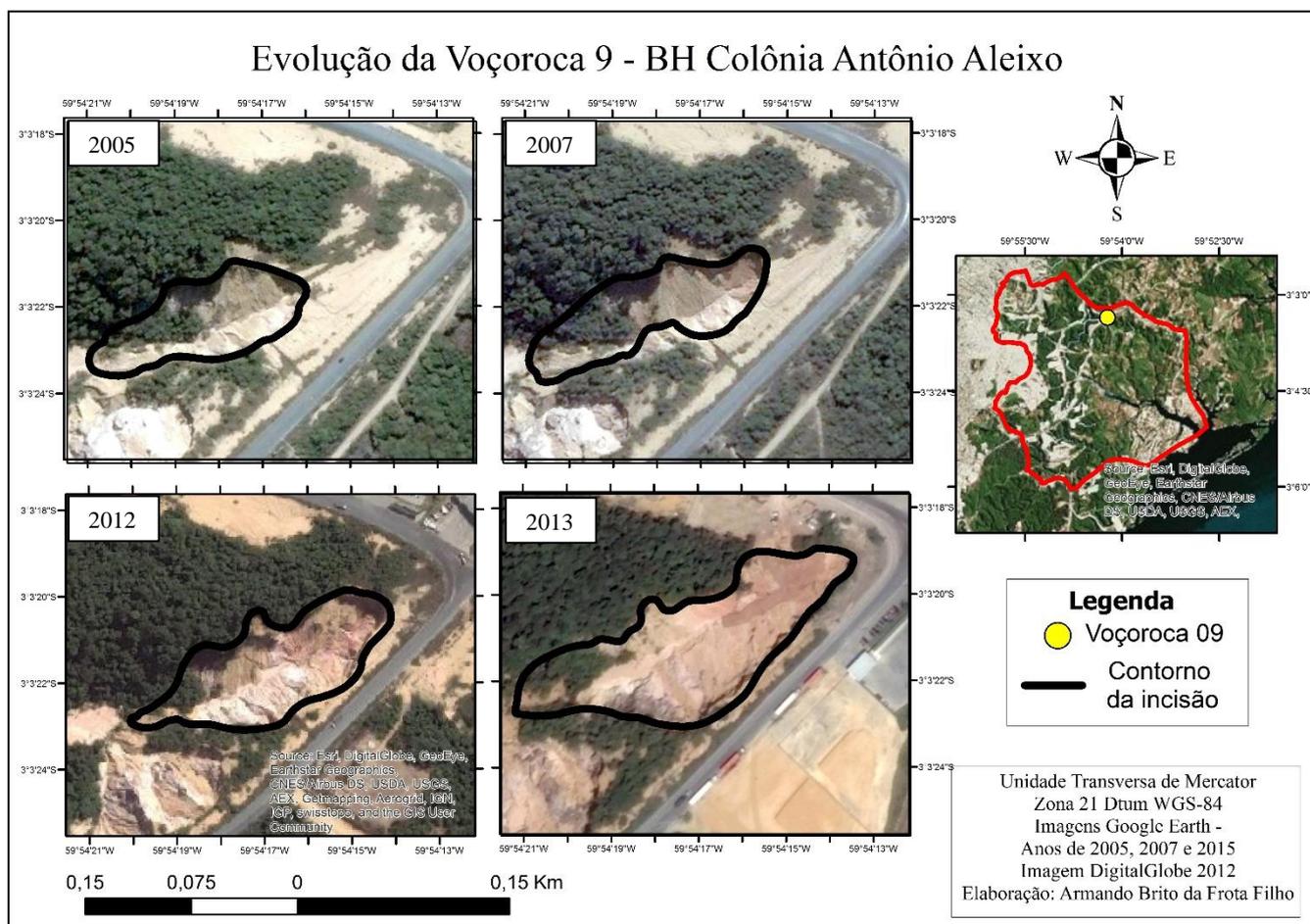


Figura 53: Mapa da evolução da voçoroca 09 com imagens dos anos de 2005, 2007, 2012 e 2013.

Fonte: Google Earth e DigitalGlobe. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

A partir da terceira imagem, referente ao ano de 2012, nota-se que a incisão começa um processo de alargamento de suas bordas e fica mais próxima à pista. O crescimento da incisão é expressivo, tendo em vista que a incisão inicialmente era do tipo conectada, atualmente é do tipo integrada, o que significa seu desenvolvimento por quase toda extensão da vertente.

No monitoramento realizado em dezembro de 2015 a borda lateral da voçoroca estava a 7 metros da pista. A incisão apresenta uma forma retangular e sua cabeceira está localizada paralelamente à via pública e não apresenta risco expressivo, além disso, a área de contribuição da incisão foi reduzida pelo seu crescimento.

A voçoroca também sofre intervenções humanas na sua cabeceira que foi ocupada pela iniciativa privada, que culminou na tentativa de contenção por meio da deposição tecnogênica *gárbica* e *espódica* (FIGURA 54). No primeiro monitoramento a profundidade encontrada foi de aproximadamente 30m, enquanto no segundo monitoramento foi obtida valor aproximado de 27m, devido a deposição que ocorre no interior da incisão.



Figura 54: Deposição tecnogênica Gárbica no interior da incisão 09.  
Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015.

As incisões 07, 08 e 09 são voçorocas de grande porte, tem seu impacto aumentado pela sua proximidade, pois todo o material carreado das incisões chega à rede de drenagem, ocorre assoreamento em canais mais próximos e há mudança no formato de outras.

A figura 55 mostra o processo evolutivo da incisão 12 em que é possível notar que da primeira imagem (2005) para a segunda (2007) a voçoroca apresenta crescimento do seu comprimento, enquanto que nas imagens seguintes o crescimento mais expressivo ocorre no aumento de suas bordas laterais.

A voçoroca 12 apresenta forma retangular e é do tipo conectada, contudo devido às características fisiográficas, a voçoroca apresenta possibilidades de crescimento que pode levá-la a alcançar o tipo integrada.

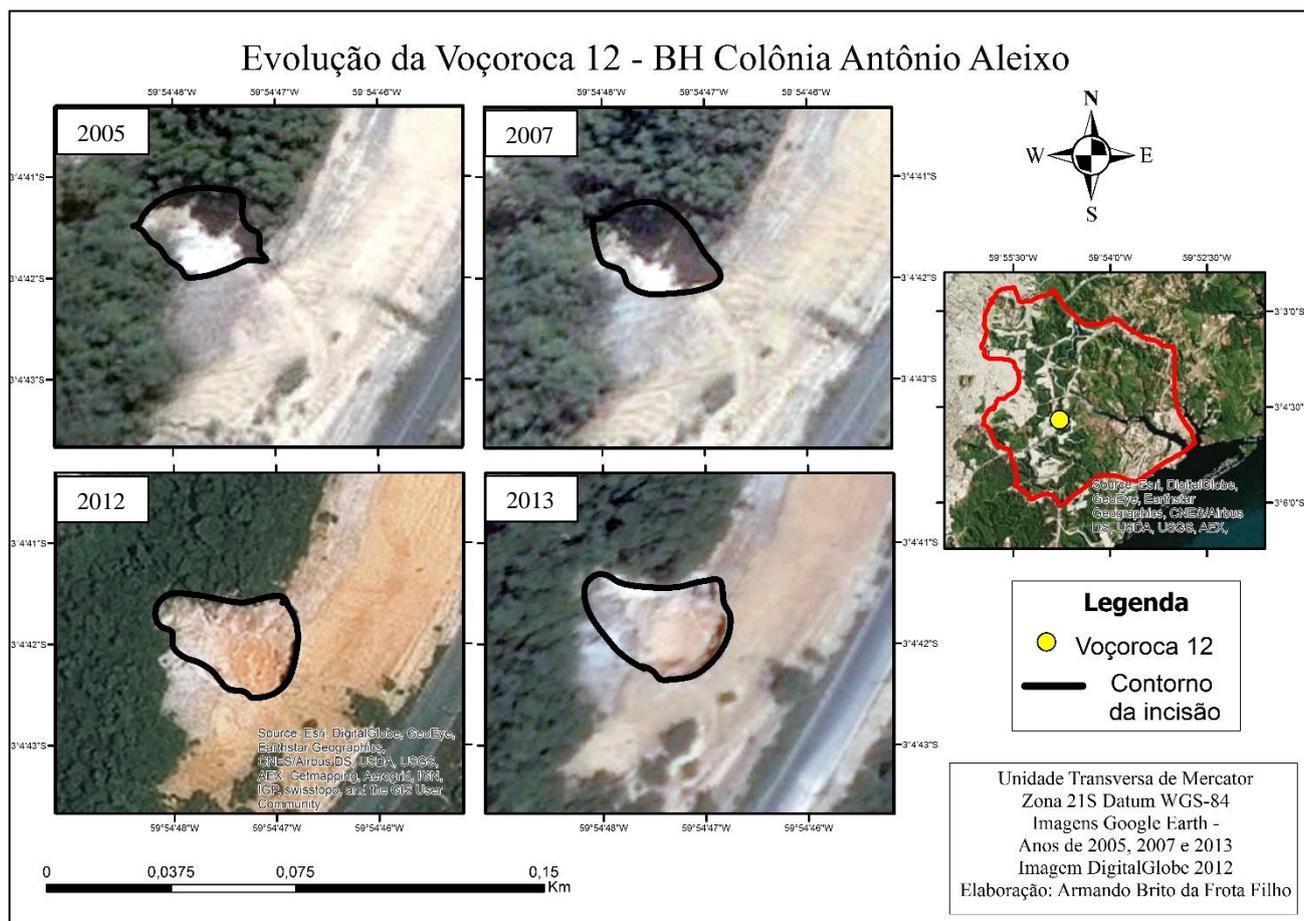


Figura 55: Mapa da evolução da voçoroca 12 com imagens dos anos de 2005, 2007, 2012 e 2013.

Fonte: Google Earth e DigitalGlobe. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Os aspectos da área do entorno da incisão, como a falta de cobertura vegetal e o solo encrostado (FIGURA 56) facilitam o desenvolvimento da feição erosiva. Além disso, a voçoroca apresenta grande área de contribuição favorecendo seu crescimento.

Percebeu-se no monitoramento realizado em dezembro de 2015, que a incisão se desenvolveu em direção à via pública, onde sua cabeceira aparece a 32,9m da pista.



Figura 56 Solo encrosta na borda da incisão 12.

Linha vermelha indica a borda da voçoroca. Seta indica a caneta como escala.

Fonte: Armando Brito da Frota Filho, 2015

## 4.5 Correlação dos aspectos geomorfológicos aos aspectos morfométricos das voçorocas

### 4.5.1 Correlação entre Variáveis Numéricas

A correlação entre as variáveis numéricas versou sobre as características de comprimento e declividade da encosta e as características morfométricas como comprimento, largura, profundidade, área e volume erodido das voçorocas.

- Correlação entre declividade da encosta e morfometria da voçoroca

Foram realizados 5 testes de correlação entre declividade e a morfometria. Os gráficos 21 e 22 mostram a correlação da declividade com comprimento e largura da voçoroca, respectivamente. Nota-se a baixa correlação entre estas características, pois ambos os testes apresentaram valor de  $r^2$  abaixo de 0,1.

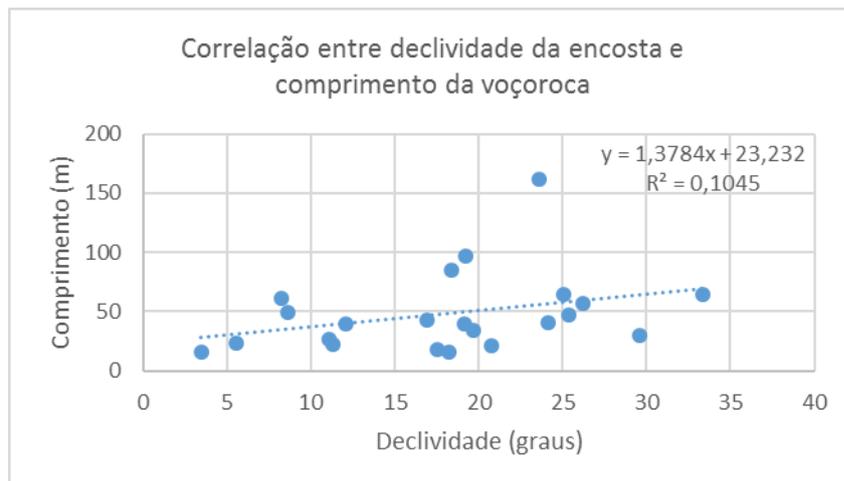


Gráfico 21: Correlação entre a declividade da encosta e o comprimento da voçoroca.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

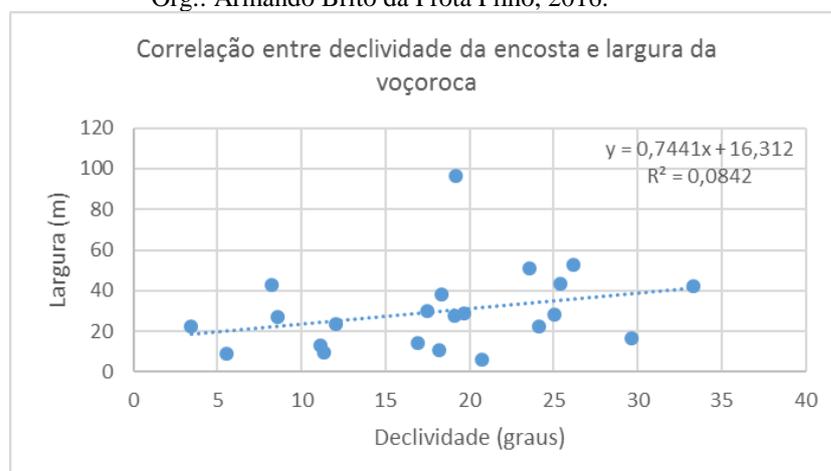


Gráfico 22: Correlação entre a declividade da encosta e largura da voçoroca.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Sabe-se que a largura e o comprimento subsidiam o cálculo da área e do volume. Portanto, é correto dizer que se houver baixa correlação dos dois primeiros valores, os valores derivados também apresentarão baixa correlação. Como pode ser observada no gráfico 23, a correlação entre a declividade e a área erodida é muito baixa, pois apresenta um  $r^2$  inferior a 0,1.

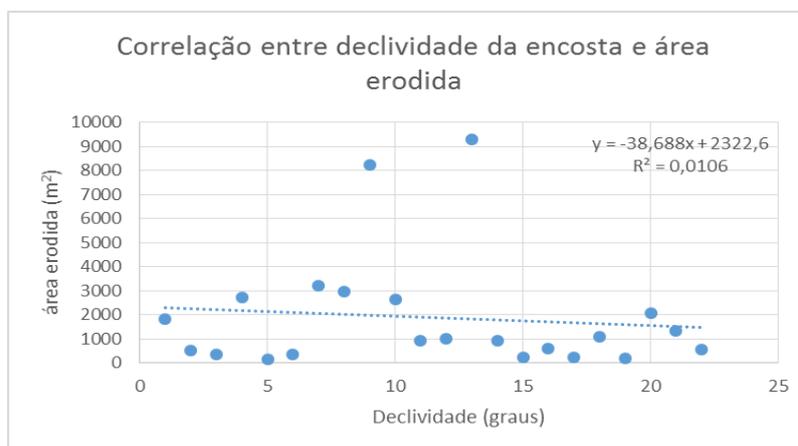


Gráfico 23: Correlação entre a declividade da encosta e área erodida.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

- Correlação entre comprimento da encosta e morfometria da voçoroca

Foram realizados cinco testes de correlação entre o comprimento da encosta e a morfometria. Os gráficos 24, 25 e 26 mostram a correlação do comprimento da encosta com comprimento e largura da voçoroca e a área erodida, respectivamente. Todos os testes apresentam baixa correlação entre estas características, apresentando valor de  $r^2$  levemente superior a 0,1, e inferior a 0,6.

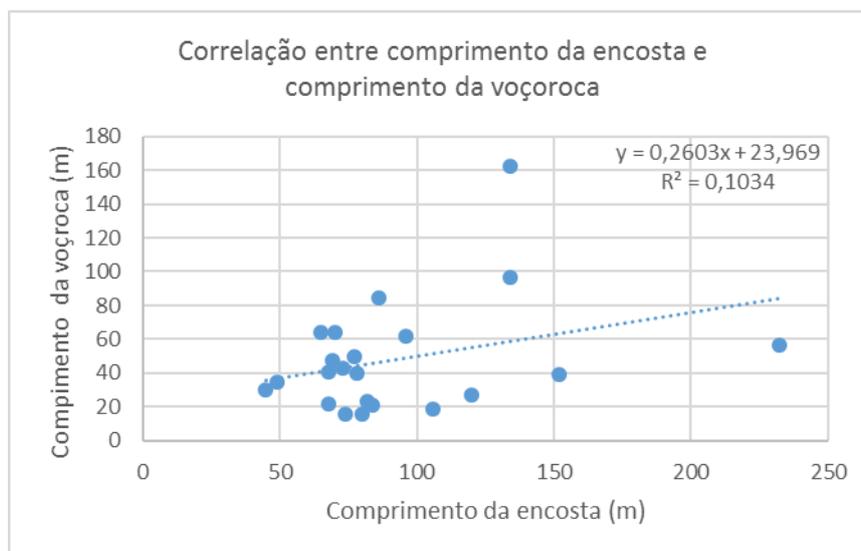


Gráfico 24: Correlação entre comprimento da encosta e comprimento da voçoroca.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016.

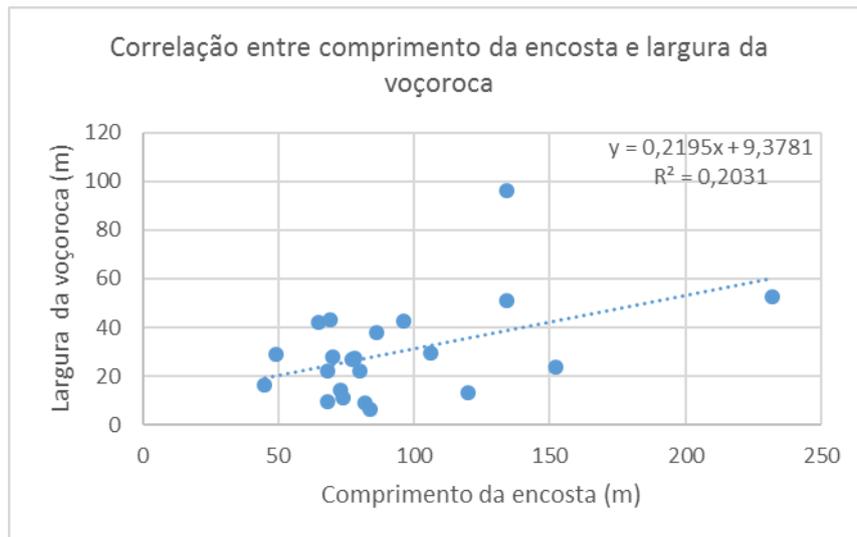


Gráfico 25: Correlação entre comprimento da encosta e largura da voçoroca.  
 Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016

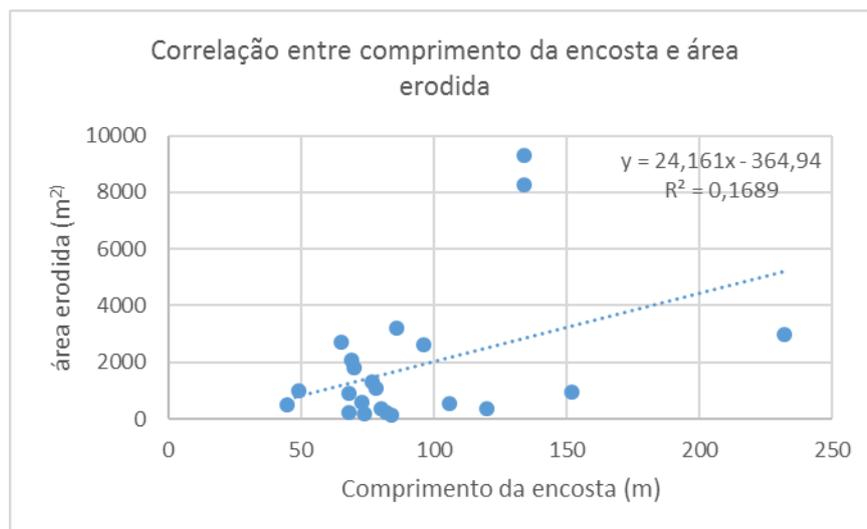


Gráfico 26: Correlação entre comprimento da encosta e área erodida.  
 Org.: Armando Brito da Frota Filho, 2016

Para que uma correlação apresente relevância seu valor de  $r^2$  deve ser igual ou superior a 0,6; se inferior, a correlação entre as duas características pode ser considerada como baixa ou até mesmo inexistente (VIEIRA, 2015).

De acordo com os dados das voçorocas e das encostas, é possível observar que para o caso da BH Colônia Antônio Aleixo as características métricas da encosta não apresentam correlação com as características métricas das incisões.

A partir da análise em relação às duas características da encosta, declividade e comprimento, verificou-se que a segunda apresentou maior correlação ainda que baixa,

pois os valores encontrados no segundo grupo de teste alcançaram valores de  $r^2$  iguais ou superiores a 0,1.

É válido ressaltar que apesar da bacia estudada ser a região da cidade com maior número de incisões, a quantidade amostral é muito pequena para poder fazer generalizações sobre o comportamento das incisões e de sua morfometria.

#### 4.5.2 Correlação entre Variáveis Nominais

A correlação entre as Variáveis Nominais ou linguísticas contemplou a forma da vertente, o tipo e o formato da voçoroca. A curvatura horizontal da encosta indica a forma do escoamento superficial, variando entre divergente, planar e convergente. Já a curvatura vertical das encostas consiste em uma forma geométrica com perfil da encosta que varia entre côncavo, retilíneo e convexo.

A Forma do Terreno é a combinação entre a curvatura vertical e curvatura horizontal de encosta, que variam em nove classes entre a forma côncava-convergente (máxima concentração e acúmulo do escoamento) a convexa-divergente (máxima dispersão do escoamento) (VALERIANO, 2008).

No que tange à voçoroca, foi analisado o tipo da incisão definido por Oliveira (1989) que consiste em três tipos conforme a posição na vertente e a rede de drenagem, classificada em conectada, desconectada ou integrada. A forma da voçoroca definida por Vieira (2008) é: linear, bifurcada, irregular, ramificada e retangular.

As características das voçorocas são baseadas nos dados coletados em campo, contudo, no caso da forma, não foi encontrada nenhuma com características ramificadas, assim como não foram encontradas voçorocas em todas as formas das encostas.

Foi realizada uma análise pareada entre os três aspectos da vertente (curvatura vertical e horizontal e forma do terreno) e os dois aspectos da voçoroca (Forma e Tipo). Criou-se então a Hipótese (Nula) em que a forma ou tipo independe da encosta. Tanto os valores encontrados em campo, quanto os valores esperados nos parênteses foram postos na tabela. Os valores esperados foram calculados através do processo do teste Qui-Quadrado.

- Correlação entre o Tipo da Voçoroca e Forma da Encosta

Foram realizados três testes de correlação entre o Tipo de voçoroca (OLIVEIRA, 1989) e a forma da encosta, Curvatura Vertical da Encosta, Curvatura Horizontal da Encosta e a Forma do Terreno.

- Correlação entre Tipo de voçoroca e Curvatura Vertical da Encosta

O primeiro teste é a correlação entre o tipo de voçoroca (OLIVEIRA,1989) e a curvatura vertical da encosta (côncava, convexa e retilínea), a partir do qual apresentaram-se as seguintes hipóteses:

H<sub>0</sub>: O Tipo (Conectada, Desconectada ou Integrada) de uma voçoroca é independente da forma da encosta (Côncava, Convexa e Retilínea);

H<sub>A</sub>: O Tipo (Conectada, Desconectada ou Integrada) de uma voçoroca depende da forma da encosta (Côncava, Convexa e Retilínea);

Com base nos dados de campo onde foram cadastradas as voçorocas e caracterizadas quanto ao Tipo, e via geoprocessamento foi possível indicar em qual tipo de encosta cada incisão se desenvolveram. O Quadro 16 mostra a disposição das voçorocas de acordo com o tipo e a encosta que se localizam.

Quadro 16: Correlação entre a Curvatura Vertical da Encosta e o Tipo de voçoroca

		Tipo de Voçoroca			Total
		Conectada	Desconectada	Integrada	
Curvatura Vertical	Côncava	2 (2,178)*	3 (1,908)*	1 (1,908)*	6
	Convexa	6 (5,445)*	4 (4,77)*	5 (4,77)*	15
	Retilínea	0 (0,363)*	0 (0,318)*	1 (0,318)*	1
Total		8	7	7	22

\* Os valores constantes no interior dos parênteses, corresponde aos “valores esperados” de acordo com Qui-Quadrado. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016

A partir dos dados do quadro foi encontrado o valor de pertinência *P* de 0,90626759, indicador da baixa correlação entre a forma da encosta e o desenvolvimento de um tipo específico de voçoroca descrito no modelo de Oliveira (1989).

- Correlação entre Tipo de voçoroca e Curvatura Horizontal da Encosta

O segundo teste é a correlação entre o Tipo de voçoroca (OLIVEIRA,1989) e a curvatura horizontal da encosta (convergente, planar e divergente), com as seguintes Hipóteses:

H<sub>0</sub>: O Tipo (Conectada, Desconectada ou Integrada) de uma voçoroca é independente da forma da encosta;

H<sub>A</sub>: O Tipo (Conectada, Desconectada ou Integrada) de uma voçoroca depende da forma da encosta;

O Quadro 17 mostra a disposição das voçorocas de acordo com o tipo e a encosta que se localizam

Quadro 17: Correlação entre a Curvatura Horizontal da Encosta e o Tipo de voçoroca

		Tipo de Voçoroca			Total
		Conectada	Desconectada	Integrada	
Curvatura Horizontal	Convergente	4 (3,993)*	4 (3,498)*	3 (3,498)*	11
	Planar	1 (0,363)*	0 (0,318)*	0 (0,318)*	1
	Divergente	3 (3,63)*	3 (3,18)*	4 (3,18)*	10
Total		8	7	7	22

\* Os valores constantes no interior dos parênteses, corresponde aos “valores esperados” de acordo com Qui-Quadrado. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016

Com base nos dados do quadro acima, o valor de  $P$  foi de 0,973221395, o que indica uma correlação muito baixa entre a forma de encosta quanto ao tipo de fluxo e o Tipo de voçoroca.

- Correlação entre o Tipo da voçoroca e Forma do Terreno

O terceiro teste é a correlação entre o Tipo de voçoroca (OLIVEIRA,1989) e a Forma do Terreno. Tendo as seguintes Hipóteses:

H<sub>0</sub>: O Tipo (Conectada, Desconectada ou Integrada) de uma voçoroca é independente da forma da encosta;

H<sub>A</sub>: O Tipo (Conectada, Desconectada ou Integrada) de uma voçoroca depende da forma da encosta;

O Quadro 18 mostra a disposição das voçorocas de acordo com o tipo e a encosta que se localizam, e não foram identificadas voçorocas em todas as formas de encostas.

Quadro 18: Correlação entre a Forma do Terreno e o Tipo de voçoroca

		Tipo de Voçoroca			Total
		Conectada	Desconectada	Integrada	
Forma da encosta	Côncava Convergente	1 (1,815)*	3 (1,59)*	1 (1,59)*	5
	Retilínea Convergente	-	-	-	0
	Convexa Convergente	3 (2,178)*	1 (1,908)*	2 (1,908)*	6
	Côncava Planar	1 (0,363)*	0 (0,318)*	0 (0,318)*	1
	Retilínea Planar	-	-	-	0
	Convexa Planar	-	-	-	0
	Côncava Divergente	-	-	-	0
	Retilínea Divergente	0 (0,363)*	0 (0,318)*	1 (0,318)*	1
	Convexa Divergente	3 (3,267)*	3 (2,862)*	3 (2,862)*	9
Total		8	7	7	22

\* Os valores constantes no interior dos parênteses, corresponde aos “valores esperados” de acordo com Qui-Quadrado. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016

A partir dos dados do quadro acima, analisou-se que o valor de pertinência do  $\chi^2$  foi de 0,951808349, o qual indica que a forma do terreno (forma da encosta) não apresenta correlação com desenvolvimento do com algum tipo de voçoroca. Ao considerar todos os testes de correlação entre as formas da encosta e o tipo de voçoroca, observa-se que não há correlação entre estas características, ou seja, a forma da encosta não é um fator determinante se a voçoroca será **conectada**, **desconectada** ou **integrada**.

- Correlação entre Forma da encosta e Forma da Voçoroca

Foram realizados três testes de correlação entre a Forma da voçoroca (VIEIRA, 2008) e a forma da encosta, curvatura vertical da encosta, curvatura horizontal da encosta e a forma do terreno, mas não foram localizadas voçorocas com a forma do tipo Ramificada.

- Correlação entre Forma da voçoroca e Curvatura Vertical da Encosta

O primeiro teste utilizando o método  $\chi^2$ , visou correlacionar a Forma da Voçoroca com a curvatura vertical da encosta (côncava, convexa e retilínea), assim foram desenvolvidas as seguintes hipóteses:

H<sub>0</sub>: A Forma da voçoroca (Retangular, irregular, bifurcada, linear e ramificada) é independente da forma da encosta;

H<sub>A</sub>: A Forma da voçoroca (Retangular, irregular, bifurcada, linear e ramificada) depende da forma da encosta;

O Quadro 19 dispõe os dados de acordo com as formas de voçoroca (VIEIRA, 2008) e as formas das encostas.

Quadro 19: Correlação entre a Curvatura Vertical da Encosta e a Forma da voçoroca

		Forma da Voçoroca					Total
		Retangular	Irregular	Bifurcada	Linear	Ramificada	
Curvatura Vertical	Côncava	5 (4,632)*	0 (0,54)*	0 (0,54)*	1 (0,27)*	-	6
	Convexa	12 (13,124)*	2 (1,53)*	1 (1,53)*	0 (0,765)*	-	15
	Retilínea	0 (0,772)*	0 (0,090)*	1 (0,090)*	0 (0,045)*	-	1
Total		17	2	2	1	0	22

\* Os valores constantes no interior dos parênteses, corresponde aos “valores esperados” de acordo com Qui-Quadrado. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016

Com base nos dados acima, o valor de pertinência calculado para o teste  $\chi^2$  foi de 0,212659988, apesar do valor não estar entre 0,025 e 0,05, que significaria a rejeição da hipótese nula, esse valor baixo indica que há um certo nível de correlação, ainda que baixo.

- Correlação entre Forma da voçoroca e Curvatura Horizontal da Encosta

No primeiro teste utilizando o método  $\chi^2$ , visou correlacionar a forma da voçoroca com a curvatura horizontal da encosta (convergente, planar e divergente), assim foram desenvolvidas as seguintes hipóteses:

H<sub>0</sub>: A Forma da voçoroca (Retangular, irregular, bifurcada, linear e ramificada) é independente da forma da encosta;

H<sub>A</sub>: A Forma da voçoroca (Retangular, irregular, bifurcada, linear e ramificada) depende da forma da encosta;

O Quadro 20 dispõe os dados de acordo com as formas de voçoroca (VIEIRA, 2008) e as formas das encostas.

Quadro 20: Correlação entre a Curvatura Horizontal da Encosta e o Forma da voçoroca

		Forma da Voçoroca					Total
		Retangular	Irregular	Bifurcada	Linear	Ramificada	
Curvatura Horizontal	Convergente	8 (8,492)*	2 (0,99)*	0 (0,99)*	1 (0,495)*	-	11
	Planar	1 (0,772)*	0 (0,090)*	0 (0,090)*	0 (0,045)*	-	1
	Divergente	8 (7,72)*	0 (0,90)*	2 (0,90)*	0 (0,45)*	-	10
Total		17	2	2	1	0	22

\* Os valores constantes no interior dos parênteses, corresponde aos “valores esperados” de acordo com Qui-Quadrado. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016

Com base nos dados, o valor de pertinência para o teste  $\chi^2$  foi de 0,900990646, que por sua vez comprova a veracidade da Hipótese Nula, o que comprova que não há correlação entre a forma da voçoroca e a curvatura horizontal da encosta.

- Correlação entre Forma da voçoroca e Forma do Terreno

O terceiro Teste utilizando o método  $\chi^2$ , visou correlacionar a Forma da voçoroca com a Forma do Terreno. Para tanto, foram definidas as seguintes hipóteses:

H<sub>0</sub>: A Forma da voçoroca (Retangular, irregular, bifurcada, linear e ramificada) é independente da forma da encosta;

H<sub>A</sub>: A Forma da voçoroca (Retangular, irregular, bifurcada, linear e ramificada depende da forma da encosta;

No Quadro 21, estão dispostos os dados entre as Formas das voçorocas de acordo com o modelo de Vieira (2008) e em qual tipo de encostas estão localizadas, contudo algumas formas de encostas não apresentaram desenvolvimento de voçoroca. Nesse caso, não pôde ser calculado o valor esperado para estas formas especificamente.

Quadro 21: Correlação entre a Forma do Terreno e o Tipo de voçoroca

		Forma da Voçoroca					Total
		Retangular	Irregular	Bifurcada	Linear	Ramificada	
Forma da encosta	Côncava Convergente	4 (3,86)*	0 (0,45)*	0 (0,45)*	1 (0,225)*	-	5
	Retilínea Convergente	-	-	-	-	-	0
	Convexa Convergente	4 (4,632)*	2 (0,54)*	0 (0,54)*	0 (0,27)*	-	6
	Côncava Planar	1 (0,772)*	0 (0,090)*	0 (0,090)*	0 (0,045)*	-	1
	Retilínea Planar	-	-	-	-	-	0
	Convexa Planar	-	-	-	-	-	0
	Côncava Divergente	-	-	-	-	-	0
	Retilínea Divergente	0 (0,772)*	0 (0,090)*	1 (0,090)*	0 (0,045)*	-	1
	Convexa Divergente	8 (6,948)*	0 (0,81)*	1 (0,81)*	0 (0,405)*	-	9
Total		17	2	2	1	0	22

\* Os valores constantes no interior dos parênteses, corresponde aos “valores esperados” de acordo com Qui-Quadrado. Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016

Com base nos dados acima, o valor de pertinência do teste  $\chi^2$  é de 0,380418405, o qual indica que o nível de correlação é baixo. Assim, a Forma do Terreno apresenta baixa correlação com a forma desenvolvida pela voçoroca, ou seja, a forma da encosta é um fator que contribui para a forma da voçoroca. No caso da bacia Colônia Antônio Aleixo as encostas convexas tenderam a apresentar incisões com forma **bifurcada**.

Apesar de a Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo apresentar um número elevado de incisões erosivas, para realização do teste ainda é um número baixo. No entanto, os resultados mostraram bastante relevância, e de maneira geral a forma da encosta não apresenta grande influência no tipo ou na forma que a voçoroca possui, pelo menos no caso da bacia estudada.

Devido ao baixo número amostral, no caso com apenas 22 voçorocas cadastradas na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, não foi possível desenvolver uma correlação significativa entre as características das voçorocas e da encosta.

## **4.6 Análise da vulnerabilidade erosiva da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio**

### **Aleixo**

A Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo é vulnerável à erosão, isso pode ser constatado através do Mapeamento da Vulnerabilidade Natural e Ambiental em que a soma das classes “alta” e “muito alta” ultrapassam 50% da área da bacia.

Entretanto ao comparar os dois mapeamentos pôde-se observar diferenças na quantidade e espacialização dos cinco níveis de vulnerabilidade. Estas se devem à conceituação de mapas em que cada um tem critérios como base analítica.

O Mapa de Vulnerabilidade Natural utiliza a geologia, solo, relevo, clima entre outros; enquanto o Mapa de Vulnerabilidade Ambiental usa dos mesmos critérios, porém, associa-os ao Uso e Ocupação do Solo e considera a influência da sociedade ao meio.

Sendo assim, as declividades acentuadas presentes na área de estudo apresentam-se como o fator de maior impacto para o desenvolvimento de erosões, pois as declividades que variam de 8 a 20% correspondem a 39,67% da área; o intervalo de 20 a 45 % correspondem a 35,22 % da área; e acima de 45% ocorrem em apenas 2,03% da área da bacia. Estas declividades somam 76,92% da bacia, o que revela um alto nível de fragilidade ao desencadeamento dos processos erosivos.

A forma da encosta, segundo estudos de Vieira (2008) na cidade de Manaus, apontou o desenvolvimento de voçorocas mais frequentes em encostas Convexas, diferente da literatura. Isso ocorre em face do tipo de encosta apresentar os valores de declividade mais elevados.

### **4.6.1 Análise da Vulnerabilidade Natural à erosão da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo**

No que se refere à Vulnerabilidade Natural levou-se em consideração somente os aspectos naturais, nesse caso a declividade e a forma do terreno (forma da encosta). O objetivo, neste momento, foi considerar o nível de vulnerabilidade da bacia, assim como a sua espacialização.

A Vulnerabilidade Natural apresentada frente aos processos erosivos é observada no Gráfico 27 e Tabela 15, onde há vulnerabilidade devido a maior parte se encontrar no intervalo entre “alta” a “muito alta” (62,77%). É possível notar que a bacia

apresenta pouca representatividade das áreas com “baixa” e “muito baixa”, o que resulta em apenas 15% da sua totalidade.

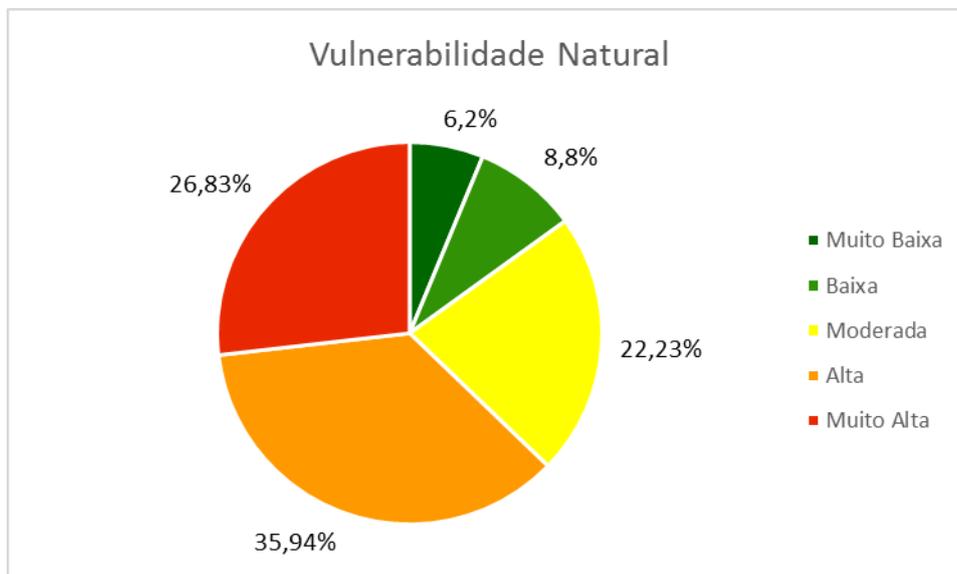


Gráfico 27: Classes de Vulnerabilidade Natural.  
Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Tabela 15: Classes de Vulnerabilidade Natural

Classe de Vulnerabilidade	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
Muito Baixa	1,54	6,2
Baixa	2,2	8,8
Moderada	5,54	22,23
Alta	8,96	35,94
Muito Alta	6,69	26,83
Total	24,93	100

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Na figura 57 pode se observar a distribuição das 22 incisões cadastradas, em que 19 delas estão no intervalo de vulnerabilidade “alta” a “muito alta”, somente 3 delas localizadas em áreas definidas como de vulnerabilidade “moderada”, reflexo da geomorfologia da bacia que propicia o desenvolvimento morfogenético em detrimento dos pedogenéticos.

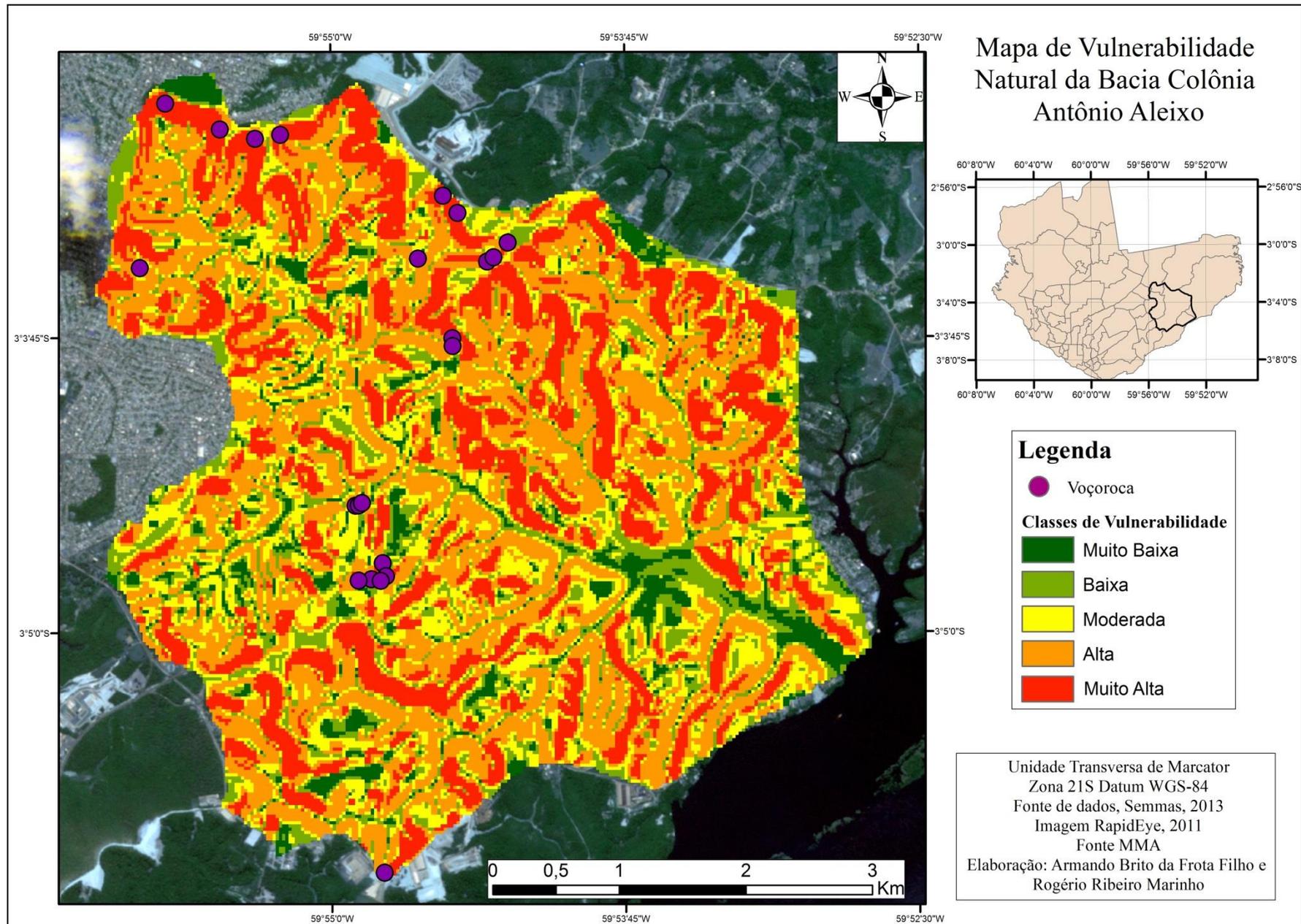


Figura 57: Mapa de Vulnerabilidade Natural aos processos erosivos da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM.

Org.: Armando Brito da Frota Filho e Rogério Ribeiro Marinho, 2015.

#### 4.6.2 Análise da Vulnerabilidade Ambiental à erosão da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo

Grigio (2003) e Fushimi, (2013) abordam a questão da vulnerabilidade ambiental como a combinação das variáveis naturais associadas à ação da sociedade, que assim como Suertegaray (1999) defende a abordagem na qual o ambiente é a combinação intrínseca da natureza com a sociedade. Portanto, o mapa de vulnerabilidade ambiental é baseado nos mapas de declividade, forma do terreno e do uso e ocupação do solo.

No que se refere a este mapa, é notório o predomínio das classes mais elevadas (“alta” a “muito alta”) representando 55,78% de toda a área da bacia (GRÁFICO 28 e TABELA 16), enquanto a área de vulnerabilidade de “baixa” a “muito baixa” corresponde a 25,03% da bacia.

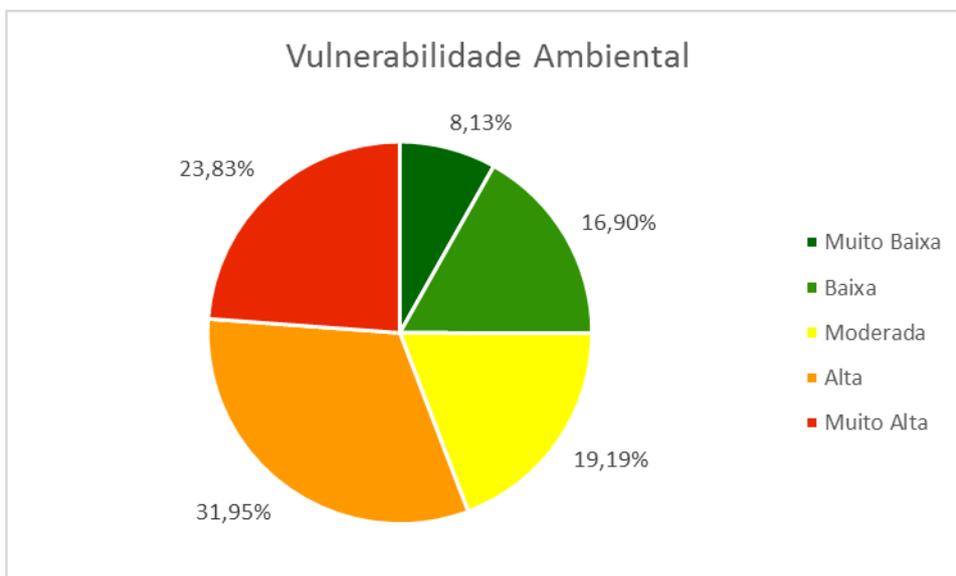


Gráfico 28: Classes de Vulnerabilidade Ambiental  
Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Tabela 16: Classes de Vulnerabilidade Ambiental

Classe de Vulnerabilidade	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
Muito Baixa	2,02	8,13
Baixa	4,21	16,9
Moderada	4,78	19,19
Alta	7,97	31,95
Muito Alta	5,94	23,83
Total	24,93	100

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Quanto à distribuição das áreas mais vulneráveis, estão localizadas junto às declividades mais elevadas e em locais com solo exposto. Já as áreas de descontinuidade entre “área urbana”, “solo exposto” e “vegetação” também são pontos sensíveis. Esse fato é legitimado pela distribuição de incisões erosivas na bacia, pois apenas duas voçorocas cadastradas se encontram em áreas classificadas como vulnerabilidade “moderada”, enquanto o restante (20 incisões) está localizado nas áreas de vulnerabilidade “alta” a “muito alta” (FIGURA 58).

A partir da espacialização da vulnerabilidade no mapa, pode-se propor a não ocupação. No entanto, quando estas já estiverem ocupadas, é preciso a tomadas de ações mitigadoras para redução do impacto ao meio e possível desenvolvimento de processos erosivos.

As características do solo apontam que a ausência de cobertura vegetal é um fator para o mesmo ser facilmente erodido, fato agravado ao ser associado às características de declividade.

O desenvolvimento de voçorocas na BH Colônia Antônio Aleixo ocorre, preferencialmente, em vertentes de forma convexa, dados que corroboram com a análise de Vieira (2008) para a cidade de Manaus. Logo, estas áreas foram interpretadas como as mais vulneráveis. Quanto à declividade, se esta for mais elevada, maior será a propensão da vertente desenvolver processos erosivos.

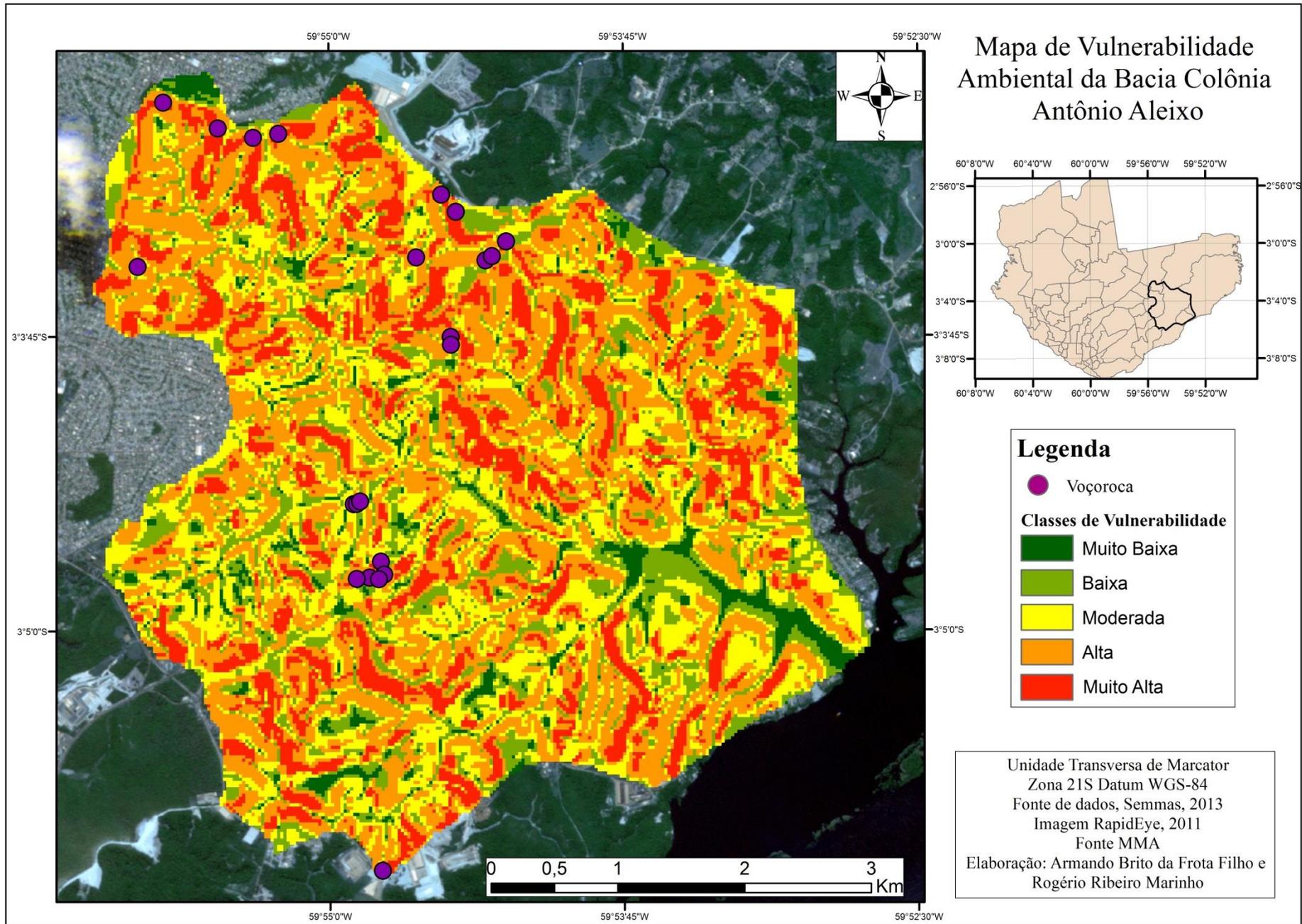


Figura 58: Mapa de Vulnerabilidade Ambiental aos processos erosivos da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, Manaus-AM.  
Org.: Armando Brito da Frota Filho e Rogério Ribeiro Marinho, 2015.

#### 4.6.3 Análise integrada e comparativa dos mapas de Vulnerabilidade Natural e Ambiental

De forma geral, ambos os mapeamentos mostram que a BH Colônia Antônio Aleixo apresenta um alto nível de vulnerabilidade aos processos erosivos, entretanto, é notável como o fator Uso e Ocupação do Solo influencia na vulnerabilidade. A bacia apresenta muitas áreas verdes, o que diminui sua fragilidade, reduz a área com características de “alta” a “muito alta”, e aumenta as áreas de “baixa” a “muito baixa”, a ser visto nos mapas de Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental expostos na Tabela 17.

Tabela 17: Comparação entre a distribuição da Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental

Classe de Vulnerabilidade	Vulnerabilidade Natural		Vulnerabilidade Ambiental	
	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
Muito Baixa	1,54	6,2	2,02	8,13
Baixa	2,2	8,8	4,21	16,9
Moderada	5,54	22,23	4,78	19,19
Alta	8,96	35,94	7,97	31,95
Muito Alta	6,69	26,83	5,94	23,83
<b>Total</b>	<b>24,93</b>	<b>100</b>	<b>24,93</b>	<b>100</b>

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Ao analisar o comportamento das classes observa-se um padrão relacionado, em parte, à declividade, parâmetro principal para identificação de área com vulnerabilidade. Isto posto, as maiores declividades da BH Colônia Antônio Aleixo localizam-se na margem esquerda e na região do curso médio colaborando para que tais regiões apresentem, nos dois mapeamentos, áreas com vulnerabilidade elevada e também concentração das incisões.

O quadro 22 mostra a síntese das características das classes de Vulnerabilidade Natural e Vulnerabilidade Ambiental da BH Colônia Antônio Aleixo, dividida com base nos critérios usados para desenvolver o mapa, e nos dados cartográficos e observações de campo, além da quantidade voçorocas cadastradas em cada classe de vulnerabilidade.

Quadro 22: Síntese das características das classes de Vulnerabilidade Natural e de Vulnerabilidade Ambiental da BH Colônia Antônio Aleixo

<b>Classe de Vulnerabilidade Natural</b>	<b>Declividade</b>	<b>Forma do terreno</b>	<b>Classe de Vulnerabilidade Ambiental</b>	<b>Uso e Ocupação do Solo</b>	<b>Quantidade voçorocas por classe no MVN <sup>1</sup></b>	<b>Quantidade voçorocas por classe no MVA <sup>2</sup></b>
Muito Baixa (Área de 6,2 %) 	0 a 8%	Planar-retilínea Convergente-retilínea Divergente-retilínea	Muito Baixa (Área de 8,14 %) 	Cobertura Vegetal	0	0
Baixa (Área 8,8%) 	9 a 13%	Divergente-retilínea Planar-Côncava Convergente-côncava	Baixa (Área 16,90%) 	Cobertura Vegetal	0	0
Moderada (Área de 22,23%) 	14 a 20%	Convergente-côncava Divergente-côncava Planar-convexa	Moderada (Área de 19,19%) 	Solo exposto e área urbana	3	2
Alta (Área de 35,94%) 	21 a 45%	Divergente-côncava Planar-convexa	Alta (Área de 31,96%) 	Solo exposto e área urbana	5	11
Muito Alta (Área de 26,83%) 	Acima de 45%	Convergente-Convexa Divergente-Convexa	Muito Alta (Área de 23,83%) 	Solo exposto	14	9

<sup>1</sup> Mapa de Vulnerabilidade Natural <sup>2</sup> Mapas de Vulnerabilidade Ambiental.

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.

Observa-se que as voçorocas cadastradas estão localizadas majoritariamente nas áreas classificadas com vulnerabilidade “alta” a “muito alta”, o que vem comprovar a veracidade e a legitimidade do mapa de vulnerabilidade ambiental. Contudo, há variação de classe de vulnerabilidade de algumas incisões ao se comparar os dois mapas. Essa variação ocorre devido ao fato do Mapa de Vulnerabilidade Ambiental incorporar o Mapa de Uso e Ocupação do Solo, pois grande parte da bacia se encontra vegetada. O outro segmento expressivo é a urbanização, e por fim em menor escala, as áreas com solo exposto que apresentam a maior vulnerabilidade.

Contudo, é possível observar que a maior parte das voçorocas está na mesma classe em ambos os mapas. Dentre as diferenças verificadas, o maior número de incisões está nas classes com nível de vulnerabilidade elevado no mapa de Vulnerabilidade Natural e estão em um nível mais baixo no Mapa de Vulnerabilidade Ambiental (QUADRO 5 – APÊNDICE 2). Isso ocorre porque estas voçorocas se localizam em zonas de descontinuidade, como por exemplo zonas de contato entre a área urbana e a área com vegetação.

Quanto às voçorocas que estavam em classes mais baixas no mapa de vulnerabilidade natural e aparecem em classes mais elevadas no mapa de vulnerabilidade ambiental, ocorre por estarem localizadas em solo exposto.

O Mapa de Vulnerabilidade Natural não apresentará grandes mudanças com o passar do tempo por se basear em características geomorfológicas que levam um período maior para serem alteradas servindo, contudo, para nortear áreas que não deveriam ser desmatadas ou mesmo ocupadas.

O Mapa de Vulnerabilidade Ambiental carece intrinsecamente do Mapa de Uso e Ocupação do Solo, por isso necessita ser atualizado com frequência, pois a expansão da malha urbana, em especial neste setor da cidade de Manaus, ocorre de forma rápida e sem a preocupação em considerar as áreas vulneráveis ou de fragilidade ambiental apresentadas pela vulnerabilidade natural.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar a vulnerabilidade aos processos erosivos que ocorrem na Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo foram considerados as principais características fisiográficas que colaboram para o desenvolvimento das incisões, as propriedades pedo-geomoforológicas da bacia e as particularidades da ocupação humana na área.

As características pedológicas da área demonstram um grande potencial ao desenvolvimento do processo erosivo, pois as propriedades químicas do solo com o elevado pH atrelado a uma alta concentração de alumínio, associado ao modelado do relevo e sua a declividade intensificam o surgimento de processos erosivos do tipo de voçorocas.

O solo da bacia também tende a apresentar formação de crostas facilitando o escoamento superficial (difuso e/ou concentrado), desencadeador do processo erosivo com mais facilidade. Apesar da bacia ter solos com maior concentração de argila, notável pela sua resistência ao processo erosivo, outras características do solo como suas características químicas, uso e manejo desempenham grande influência no surgimento das feições erosivas.

Estes fatores são determinantes para a vulnerabilidade à erosão na bacia estudada, mas quando considerada a geomorfologia local, observa-se que esta tem capacidade de influir no desencadeamento e aceleração do processo erosivo devido às colinas com altimetria superior a 50 metros.

Considerando unicamente os aspectos morfométricos da bacia, como sua área, a mesma pode ser considerada pequena, apresentando área de 24,93km<sup>2</sup> e seu formato é circular, tendendo a processos de enchentes, contudo o evento que sobressai é a erosão. A bacia apresenta elevado número de incisões do tipo voçoroca (n=22), sendo em sua maioria incisões de grande porte que devido a deposição de sedimentos nos canais causam impactos.

Ao entender a voçoroca como um canal de ordem 0, e que a Densidade de Drenagem da bacia apresenta possibilidades para o aparecimento de canais é possível inferir o desenvolvimento de voçorocas conectadas. Os dados de declividade e de rugosidade do relevo da bacia propõem uma maior dissecação em algumas partes da bacia. Essa dissecação atualmente ocorre, em especial, devido à presença dessas incisões.

As características geomorfológicas da bacia apresentam grande importância no desencadeamento do processo erosivo, visto que por mais propícias que sejam as características do solo para o desencadeamento da erosão, se não houver encosta com declividade e formato favorável o processo erosivo não será deflagrado. A BH Colônia Antônio Aleixo apresenta declividades elevadas, sendo que 74,89% da área da bacia tem declividades entre 8 a 45% (4,57o a 29,91o), tornando esta área bastante vulnerável ao desenvolvimento de processos erosivos.

Contudo, esses são apenas aspectos pedo-geomorfológicos, logo, se a cobertura vegetal não fosse alterada, o número de incisões e suas dimensões seriam menores. Mas ao analisar os aspectos fisiográficos e o local onde as incisões se desenvolveram é notável que todas ocorreram nas proximidades das vias públicas.

As incisões podem ser associadas ao desenvolvimento urbano neste setor da cidade, como exemplos disso há as áreas que sofrem processo de retiradas da cobertura vegetal e camada superficial do solo (desmatamento e terraplanagem), canaletas mal dimensionadas e sem dissipadores de energia, entre outros.

Isso se reflete no elevado número de incisões no bairro Distrito Industrial 2 (pertencente a essa bacia) que apresenta 14 voçorocas. Todas apresentam grandes dimensões e elevado volume erodido, com áreas variando entre 1.000 a mais 4.500 m<sup>2</sup> e volume erodido de 20.000 a mais de 110.000 m<sup>3</sup>. Destaca-se que o seu desenvolvimento acelerado é acentuado pela drenagem urbana que direciona as águas pluviais e servidas para a incisão. Um aspecto também relacionados às voçorocas nessa área, está o uso destas como “bota-fora” (local de deposição de toda sorte de resíduos sólidos).

Estes fatores colaboram para o desenvolvimento das voçorocas e aparecimento de feições de retrabalhamento que pela baixa de coesão do solo, facilita o processo de destaque e transporte.

Deve-se levar em consideração os impactos secundários que as voçorocas podem trazer a bacia. Isso foi observado através de 04 incisões monitoradas, cujo volume aferido em 2015 foi de aproximadamente de 281.623 m<sup>3</sup>. Esta quantidade de sedimentos carregado do interior da voçoroca para a rede de drenagem é capaz de assorear os canais que ficam a jusante da incisão.

Aumentando a carga de sedimentos em suspensão dos canais, e ao considerar a tipologia e velocidade dos canais, a rede de drenagem pode ser afetada de forma geral,

tendo seu padrão de drenagem modificado, sem considerar os impactos secundários na foz da bacia.

Outro ponto a ser considerado é o risco que as voçorocas podem apresentar tanto a aparelhos urbanos quanto à propriedade privada, envolvendo desde a residência a infraestrutura de indústrias circundantes.

A fim de espacializar a vulnerabilidade da bacia frente aos processos erosivos, foram elaborados mapas, com base nos critérios que mais influenciam o desencadeamento da erosão. Realizando-se a análise integrada dos mapas de Vulnerabilidade Natural e de Vulnerabilidade Ambiental visou-se compará-los e observar o impacto da ocupação humana em áreas cujas características pedo-geomofológicas apresentam alto nível de vulnerabilidade aos processos erosivos.

Isto posto, observou-se que as áreas que apresentavam maiores classes de vulnerabilidade natural apresentam ocupação humana. As características geomorfológicas possibilitam o desenvolvimento do processo erosivo, a presença de cobertura vegetal tende a reduzir e/ou conter tal processo, mas conforme a malha urbana se expande o desenvolvimento de feições erosivas é desencadeado.

Como o processo de ocupação ocorre em etapas, na qual a primeira é o desmatamento, deixando o solo desnudo e exposto as intemperes, aumenta drasticamente a vulnerabilidade aos processos erosivos, pois é durante essa fase que ocorre o desenvolvimento da maior parte das voçorocas. Tal fato ocorre especialmente no bairro Distrito Industrial 2, apresentando elevado número de incisões (n=14), além de possuírem as maiores dimensões.

Portanto, o mapa de vulnerabilidade natural apresenta uma grande possibilidade de uso, dentre eles para o zoneamento para melhor ocupação das áreas, visto que não necessita ser atualizado com frequência. Enquanto, o mapa de vulnerabilidade ambiental pode ser usado na realização de medidas mitigadoras para redução ou contenção do processo erosivo.

Baseado no estudo pedo-geomorfológico da Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo, a vulnerabilidade varia de alta a muito alta, destacando as porções a montante e a margem esquerda da bacia como as mais vulneráveis ao voçorocamento. Os impactos mais comuns nesta foram o elevado número de incisões de grande porte.

Ressalva-se que para melhor acurácia do mapa de vulnerabilidade natural é necessária uma base de dados (cartográficos) mais completa, considerando temas como

pedologia, geologia, litologia, pluviometria e bases mais detalhadas da geomorfologia local. Dessa forma, o nível de precisão aumentará exponencialmente. E no caso do mapa de vulnerabilidade ambiental, quanto melhor for a resolução espacial e temporal melhor será o resultado obtido.

Verificou-se, que a Bacia Colônia Antônio Aleixo apresenta uma paisagem susceptível aos processos erosivos. Tanto as características naturais do ambiente quanto os processos sociais que ocorrem sobre seu solo, contribuíram para o surgimento e conseqüentemente, aceleração de fatores incisivos. Considerando tais fatos, em geral, a Bacia Hidrográfica Colônia Antônio Aleixo apresenta:

1) As características geomorfológicas da bacia, como as elevadas declividades, em especial o intervalo de 9 a 45% (5 a 24°), além de vales encaixados contribuem para o desenvolvimento do processo erosivo, em especial na parte superior da bacia e na margem esquerda, por concentrarem declividades mais acentuadas. Além disso é na região da meia encosta que as declividades de 21 a 45% se concentram.

Outro ponto a ser salientado é a presença de neotectônica na bacia, que apesar de não exercer controle estrutural nas incisões, apresenta influência no seu desenvolvimento, pois quando dois horizontes do solo estão dispostos lateralmente apresentam níveis de coesão diferenciados, em especial o horizonte C, característicos por sua porosidade elevada e baixa coesão podendo ser erodido com mais facilidade.

2) As propriedades químicas do solo dificultam a revitalização da vegetação, seja pelo pH ácido da área ou pela alta concentração de Al<sup>+</sup>. Foi observado o processo de evolução pedogenética na bacia, no qual há o empobrecimento remontante juntamente com o processo de espodolização (do solo) da vertente. Isso possibilita inferir que nas regiões da meia encosta tendem a desenvolver as erosões devido à baixa coesão, gerada pela pouca quantidade de argila e silte.

3) A forma de ocupação e a fase de urbanização da bacia é um fator preponderante para o desencadeamento de feições erosivas, como foi observado no bairro Distrito Industrial II com maior número de incisões (n=14), que está na segunda fase de urbanização, caracterizada pelo desmatamento e retirada das camadas superficiais do solo, falta de drenagem de águas (pluviais e servidas).

4) O desenvolvimento das incisões ocorre de forma geral como consequência da urbanização, tendo em vista que não houve cadastro de voçorocas em regiões vegetadas,

somente em regiões próximas, na qual as voçorocas se explicam pela presença de canaletas sem dissipadores de energia e devido a terraplanagem.

5) As voçorocas localizadas na área tendem a apresentar grandes proporções, 15 delas (08 do tipo Conectada e 07 do tipo Integrada) apresentam ligação a rede de drenagem, logo o sedimento carregado do interior das incisões impacta diretamente a rede drenagem, quando mais próximo mais a voçoroca ocasiona o assoreamento do canal, e em termos possibilita a mudança do padrão de drenagem predominantemente retilíneo para sinuoso ou anastomosado.

6) Não observou-se correlação direta das vertentes e as características métricas das voçorocas (comprimento, largura, profundidade, área e volume), entretanto, quanto a forma da encosta e a forma da voçoroca encorrou-se uma correlação, na qual além das encostas convexas apresentarem a maior quantidade de incisões, as voçorocas tendem a ser da forma Retangular.

7) A Bacia Colônia Antônio Aleixo apresenta altos níveis de vulnerabilidade natural, visto que a declividade é o fator preponderante para o aumento da vulnerabilidade, a mesma segue a tendência de distribuição da declividade na bacia. Quanto a vulnerabilidade ambiental, por considerar o uso e ocupação do solo, apresentou uma tendência mais fraca, apesar de bastante elevada, pois a área com vegetação se sobrepõem as áreas de elevadas declividades. Contudo estas áreas sofrem a pressão da expansão urbana e podem vir a ser locais com o desenvolvimento de feições erosivas de grande porte.

Considerando a forma de ocupação (urbana ou rural) na atualidade e a ineficácia do poder público, para impedir que áreas vulneráveis aos processos erosivos sejam ocupadas, seja na cidade de Manaus, como no resto do território brasileiro, faz-se necessário novas pesquisas voltadas ao estudo pedo-geomorfológico e ao desenvolvimento de mapas de vulnerabilidade, afim de subsidiar o planejamento de novos bairros, e a elaboração de medidas mitigadoras e compensatórias para problemas já existentes.

## 6 REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A.N. **A cidade de Manaus (primeiros estudos)**. Boletim Paulista de Geografia, São Paulo, v. 15: p.18-45. 1953.
- AB'SABER. A.N. **As boçorocas de Franca**. Revista de FFF, São Paulo, n.2: 5-27. 1968
- ABREU, N.R.P. ; VIEIRA, A. F. G. ; FROTA FILHO, A. B. . **A Relação do Controle Estrutural com Processos de Voçorocamentos em Manaus (AM): Uma Análise Preliminar**. In: 9º SINAGEO - Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2012, Rio de Janeiro - RJ. Geomorfologia e Eventos catastróficos: passado, presente e futuro. 2012.
- ADGER, W. N. **Vulnerability**. Global Environmental Change . V. 16 p. 268–281. 2006
- AGUIAR, F. E. O. **As alterações climáticas em Manaus no século XX**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ: Instituto de Geociências: Departamento de Geografia. Rio de Janeiro. 182 p. 1995.
- ALMEIDA, L. Q. de. **Vulnerabilidades socioambientais de rios urbanos. Bacia hidrográfica do rio Maranguapinho. Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará**. Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Geociências e Ciências Exatas/Unesp, Rio Claro. Tese de Doutorado, 2010.
- ALMEIDA, L. Q. de . **Por uma ciência dos riscos e vulnerabilidades na geografia**. Mercator (Fortaleza. Online), v. 10, p. 83-99, 2011.
- ALVES, J. A. ; OLIVEIRA, J. A. . **A política de isolamento para a Hanseníase e a Saúde Pública: a Geografia do isolamento em Manaus - AM..** In: XIII Ecuentero de Geógrafos de America Latina - EGAL, 2011, San Jose. Estableciendo puentes em la geografia de latinoamerica. San Jose: Universidad Nacional Costa Rica, 2011.
- ALVES, J.M.P.; CASTRO, P. T. A. **Influência das feições geológicas na morfologia da bacia do rio do Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 33, n.2, p. 117-124, 2003.
- ANICETO, K. C. P.; HORBE, A.M.C.. **Solos urbanos formados pelo acúmulo de resíduos em Manaus, Amazonas, Brasil** Acta Amazonica (Impresso), v. 42, p. 135-148, 2012.
- AUGUSTIN, C. H. R. R. ; ARANHA, P. R. A. . **Voçorocas em Gouveia, MG: Características e Processos Associados**. Geonomos, v. 14, p. 75-86, 2006.
- BARBOSA, A.J..; **Voçorocas e a produção de sedimentos na bacia da Colônia Antonio Aleixo em Manaus (AM)**. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Amazonas – UFAM; Instituto de Ciências Humanas e Letras -ICHL: Departamento de Geografia. Manaus. 89 p. 2013.

BARBOSA, M. E. F.; FURRIER, M. . **Caracterização geomorfológica com apoio de índices morfométricos: o estudo de caso da bacia do RIO GURUJI**. Cadernos do LOGEPA. Série Texto Didático (UFPB. Impresso), v. 6, p. 1-24, 2011.

BASSANEZI, R. C. **Temas & Modelos**. Ed. UFABC. Santo André- SP. 2012, 212 p.  
Link: <http://gradmat.ufabc.edu.br/livros/Temas%20&%20Modelos-%20o%20livro.pdf>

BERTALANFFY, Ludwing von. **Teoria geral dos sistemas**. Tradução de Francisco M. Guimaraes. 2 ed. Petrópolis, Vozes; Brasília , INL, 1975. 351 p.

BERTONI, J. LOMBARDI NETO, F.. **Conservação do solo** – São Paulo: Editora Ícone, – 7 edição 355 p. 2010

BIGARELLA, J.J. e MAZUCHOWSKI, J.Z. (1985). Visão integrada da problemática da erosão. **In: 3o Simpósio Nacional de Controle de Erosão**. (Livro Guia). Maringá:ABGE/ADEA. 331 p.

BOHRER, C.B.de A. e GONÇALVES, L.M.C. **Vegetação**. *In:* Geografia do Brasil. Região Norte. Volume 3. Rio de Janeiro: IBGE. 1991. p.137-168

BORSATO, F.H. **Caracterização física das bacias de drenagem do município de maringá e os postos de combustíveis como potenciais poluidores**. Dissertação (Mestre em Geografia). Universidade Estadual de Maringá. Maringá-PR, 2005

BOTELHO, R. G. M.; DA SILVA, A. S. **Bacia hidrográfica e qualidade ambiental**. *In:* VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. Reflexões sobre a geografia física no Brasil .Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004

BRANDAO, V. S. ; PRUSKI, F.F. ; SILVA, D.D. da . **Infiltração da água no solo**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2003. v. 1. 98p .

BRASIL. *Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)*. **Capacitação em Mapeamento e Gerenciamento de Risco**. Brasília, 122p. 2004

CAMARGO, L.H.R.; GUERRA, A.J.T.. **Geografia da complexidade: aplicação das Teorias da Auto-organização ao Espaço Geográfico**. *In:* Antônio Carlos Vitte. (Org.). Contribuições à História e À Epistemologia da Geografia. Rio de Janeiro: Bertrand, 2007, v. , p. 127-162.

CARBONO, A.J.J. **Simulação Computacional para a Evolução do Relevo de Bacias Hidrográficas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2010

CARDOSO, A.T. ; GIGLIO, J.N. ; KOBİYAMA, M ; GRISON, Fernando . **Morfometria de bacias embutidas na gestão de bacias hidrográficas - Rio Negrinho, SC..** *In:* VII Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, 2012, Criciúma. Anais. Criciúma: ASBEA, 2012. v. 1. p. 1-10.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 344 p. 2001.

CARVALHO, José Barbosa de. **Desmatamentos, grilagens e conflitos agrários no Amazonas**. Manaus: Valer, 2010.

CHEREM, L. F. S. **Morfo-pedogênese das bordas dos planaltos escalonados do sudeste mineiro**. 2012. 96 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise morfométrica de bacias hidrográficas**. Rev. Geomorfol, Campinas, v.18, n.9, p.35-64, 1969.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise de Sistemas em Geografia**. São Paulo: Hucitec, 1979.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980, 149p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Edgard Blücher, 1981. 313p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

COHEN, J.C.P. **Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia**. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos - SP. 154p. 1989

COSTA, S.L. **Caracterização de crostas em superfícies de solos em ambientes degradados em Manaus (AM): gênese e evolução**; Relatório Final de Pesquisa de Iniciação Científica). Manaus: DEGEO/UFAM. 63 p.2014

CREPANI, E. MEDEIROS, J. S.; FILHO, P. H.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São Jose dos Campos, 2011.

COSTA, Reinaldo Corrêa. **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.

CUNHA, S. B. da. Geomorfologia fluvial. In: CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. (Org.). **Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, Cap.5. p. 157-189. 1996.

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. **Degradação ambiental**. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, E. S. B.(Org.). Geomorfologia e meio ambiente. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000. p. 337-379.

CUTTER, S.L. (1996) “**Vulnerability to environmental hazards**”. *Progress in Human Geography*, vol. 20, nº 4. Thousand Oaks, CA. p.529-539.

DARDEL, E. **O homem e a Terra: natureza da realidade geográfica**. Tradução de Werther Holzer. São Paulo: Perspectiva, 2011

DEODORO, S. C. ; FONSECA, B. M. . **Análise da Bacia Hidrográfica do Rio Santa Bárbara (MG) Baseada em Análises Morfométricas e Multicriteriais**. *In: XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento XXV Expositiva*, 2014, Gramado. *Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia V Congresso Brasileiro de Geoprocessamento XXV Expositiva*. Rio de Janeiro: SBC, 2014. v. 1. p. 1-14.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPq). **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p. Il.

EVANS, R. **Mecanismos de la erosión hídrica y sus controles espaciales y temporales: un punto de vista empírico**. *In: Erosion de suelos*. Org. KIRBBY, M.J., MORGAN, R.P.C. ed. LUMASA. Mexico D.F. p.141- 164.1984

FILIZOLA, N; GUYOT, J.L . **The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination in the River Amazon / L’utilisation des techniques Doppler pour la détermination du transport solide de l’Amazon**. *Hydrological Sciences Journal*, v. 49, n.1, p. 143-153, 2004.

FARIA, A. L. L.; SILVA, J. X.; GOES, M. H. de B. **Análise ambiental por geoprocessamento em áreas com susceptibilidade à erosão do solo na bacia hidrográfica do ribeirão do Espírito Santo, Juiz de Fora (MG)**. *Caminhos de Geografia-Revista on line*. V4(9) 50-65, jun/ 2003.

FERNANDES, M. J. dos S. **ANALISAR A EROSIVIDADE DA CHUVA EM MANAUS NO PERÍODO DE 1922 A 2012**. (Relatório Final de Pesquisa de Iniciação Científica). Manaus: DEGEO/UFAM. 57 p.2014

FLORENZANO, T.G. **Sensoriamento Remoto para Geomorfologia**. *In: Florenzano, Teresa Gallotti. (Org.). Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais*. 1ªed.São Paulo: Oficina de Textos, 2008, v. 2, p. 31-71.

FREITAS, M.I.C, CUNHA,L. **Modelagem de dados Socioambientais visando estudos de vulnerabilidade: O Caso de 17 Concelhos do Centro de Portugal**. *Revista Geonorte*, v. 1, p. 816 – 829, 2012

FROTA FILHO, A.B. **Movimentos De Massa E Voçorocamentos Nas Microbacias Colônia Antônio Aleixo E Boa Vista (Manaus-AM)** Relatório Final de Pesquisa de Iniciação Científica). Manaus: DEGEO/UFAM. 62 p.2012

FUSHIMI, M. **Vulnerabilidade Ambiental aos processos erosivos lineares nas áreas rurais do município de Presidente Prudente -SP.** (Dissertação de Mestrado) Presidente Prudente. FCT –UNESP. 2012

FUSSEL, H.M. **Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research.** *Global Environmental Change* v.17.p.155–167. 2007

GARCIA, R.A.C. ZÊZERE, J.L. **AVALIAÇÃO DE RISCOS GEOMORFOLÓGICOS: CONCEITOS, TERMINOLOGIA E MÉTODOS DE ANÁLISE.** *in:* III SEMINÁRIO RECURSOS GEOLÓGICOS, AMBIENTE E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO. Lisboa- Portugal 1-20p, 2003

GREGORY, K. J. **A Natureza da Geografia Física.** Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 367p. 1985.

GRIGIO, A. M. **Aplicação de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do município de Guamaré (RN): simulação de risco às atividades da indústria petrolífera.** 2003. 222 p. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

GUERRA, A. J. T. . **Processos Erosivos Nas Encostas.** *In:* Geomorfologia - Exercícios, Técnicas e Aplicações. Orgs. S.B.Cunha e A.J.T.Guerra. Ed. Bertrand Brasil, 139-155.. *In:* Sandra B. Cunha; Antonio J. T. Guerra. (Org.). Geomorfologia - exercícios, técnicas e aplicações.. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008, v. , p. -.

GUERRA, A.J.T. . **Degradação dos Solos - Conceitos e Temas.** *In:* Antonio Jose Teixeira Guerra; Maria do Carmo Oliveira Jorge. (Org.). Degradação dos Solos no Brasil. 1ed.Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014, v. 1, p. 15-50.

GUERRA , A,J,T. GUERRA, A,T. **Novo dicionário geológico- geomorfológico.** 8 ed. – Rio de Janeiro: Betrand Brasil, 2010. 652 p.

GUERRA, A. J. T. ; MARÇAL, M. S. . **Processo de Urbanização e Mudanças na Paisagem da Cidade de Açailândia (Maranhão).***In:* Antonio José Teixeira Guerra; Sandra Baptista da Cunha. (Org.). Impactos Ambientais Urbanos no Brasil. 1ed.Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009, v. 1, p. 275-303.

GUYOT, J.L, MOLINIER, M. GUIMARÃES, V. CUDO, K.J. OLIVEIRA, E. **Balanco hídrico da bacia do rio negro.** Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul. Gramado –RS, 1993

HORBE, A. M. C. ; HORBE, M.A. ; SUGUIO, K. . **Contribuição ao estudo dos depósitos de areias brancas no nordeste do Amazonas.** *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, n.1, p. 41-50, 2003

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basin: Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol. Soc America Bulletin**, v.3, n.56, 1945.

HORTON, R.E. **Drainage-basin characteristics**. Trans. Am. Geophys. Union, 13: 350-361. 1932.

IGREJA, H.L.S. **Aspectos do modelo neotectônico da Placa Sul-Americana na Província Estrutural Amazônica, Brasil**. Tese referente ao concurso de Professor Titular. Manaus: UFAM – Departamento de Geologia, 151 p. 2000.

JESUS, M. R. G. **Análise ambiental da bacia hidrográfica do rio Cambuí no perímetro urbano de Campo Largo – PR**. 2004. 116 páginas. Monografia (Graduação em Geografia) Universidade Tuiuti do Paraná. Curitiba, 2004

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia: relações solo-plantas**. Editora Agronômica Ceres: São Paulo, 1979.262p.

KER, J. C. . **Latossolos do Brasil: Uma Revisão**. Geonomos, Belo Horizonte - MG, v. 5, n.1, p. 17-40, 1997.

KIRKBY, M. J. **El problema**. In: Erosion de suelos. Org. KIRBBY, M.J., MORGAN, R.P.C. ed. LUMASA. Mexido D.F. p. 15- 34. 1984

LANDIM NETO, F. O. ; GORAYEB ; PEREIRA FILHO, N.S . **Análise das condições hidroclimáticas, hidrogeológicas e morfométricas da bacia hidrográfica do Rio Guaribas, Ceará, Brasil: subsídios para a gestão ambiental local**. Boletim Campineiro de Geografia , v. v. 4, p. 285-303, 2015.

LEAL, P. C. (1996). **Caracterização e interpretações genéticas de alguns solos da região de Manaus-AM**. Ciências do Solo. Recife-PE: Universidade Federal Rural de Pernambuco. 109 p.

LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G., **River channel patterns--Braided, meandering and straight**: U.S. Geological Survey Professional Paper 282-B, p. 39-84. 1957,

LOPES, P.S.P.R, Avaliação Regional da Susceptibilidade a Deslizamentos no Concelho de Santarém. 2008. 120p. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade de Lisboa – Portugal.

LUCAS, Y. **System pedologiques en amazonie bresilienne equilibres, desequilibres et transformation**. (Tese de Doutorado) Paris – França, L'Université de Poitiers - U.F.R. SCIENCES FONDAMENTALES ET APPLIQUEES, 184 p. 1988

LUCAS Y., CHAUVEL A., BOULET R., RANZANI G., SCATOLINI F. **Transição latossolos-podzóis sobre a Formação Barreiras na região de Manaus, Amazônia**. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, 325-335. 1984.

MACEDO, F. L. ; SILVA, H. R. ; RODRIGUES, R. A. F. . **Análise Fisiográfica da Microbacia Hidrográfica do Córrego da Véstia, Selvíria - MS, Brasil**. *Caminhos de Geografia (UFU)*, v. 14, p. 196-203, 2013.

MARCUZZO, F. F. N.; OLIVEIRA, N. DE L. ; CARDOSO, M.R.D. ; TSCHIEDEL, A. F.. **Detalhamento Hidromorfológico da Bacia do Rio Paraíba**. In: XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2012, João Pessoa. Anais do XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Porto Alegre: ABRH, 2012. v. 1. p. 1-20.

MASCARENHAS JUNIOR, T. A.; SARAIVA, J. M. B.; AGUIAR, F. E. O.. **Comparação entre a Normal Climatológica 1961-1990 e o período 1991-2007 para a Precipitação na Cidade de Manaus - AM**. Revista brasileira de climatologia, v. 5, p. 165-176, 2009.

MEADE, R.H, NORDIN, C.F. CURTIS, W.F.. RODRIGUES, F.M.C, VALE, CM. EDMND, J.M. **Transporte de sedimentos no rio Amazonas**. Acta Amazônica v.9 n.3, p543-547, 1979

MENDONÇA, F.A. **Geografia Física: Ciência Humana?**. 8. ed. São Paulo. Sp.: Contexto, 2011. v. 1. 89p.

MESQUITA, O. **La Belle Vitrine: Manaus entre dois tempos (1890-1900)**. Manaus: EDUA, 2009.

MIGUEL, A. E. S. ; MEDEIROS, R. B. ; HERMILIANO F. D. ; OLIVEIRA, W. . **Análise Morfométrica, Geológica e Hipsométrica Da Bacia Hidrográfica Do Rio Taquaruçu/Ms**. Revista Geoaraguaia, v. 4, p. 159-178, 2014.

MONTETRO, C.A.F., **Geossistemas: a história de uma procura**. São Paulo, Contexto, ed. 2. 125p. 2001

MOREIRA, F.R.; CÂMARA, G. FILHO ALMEIDA, R.; **Técnicas de Suporte a Decisão para Modelagem Geográfica por Álgebra de Mapas**. São José dos Campos: INPE,121 p. 2001

NEU, V. **Influência da cobertura vegetal na ciclagem de nutrientes via solução do solo na região de Manaus – AM**. (Dissertação de Mestrado).Piracicaba – SP.: ESALQ-USP. 110, 2005

NUNES, J.O. R.; SANT'ANNA NETO, J. L.; TOMMASELLI, J.T.G. ; AMORIM, M. C. C. T. ; PERUSI, M.C. **A Influência dos Métodos Científicos na Geografia Física**.. Terra Livre, v. 2, p. 119-130, 2006.

NUNES, J.O. R.; SILVA, É. C. N. **Estudo geográfico dos depósitos tecnogênicos nos conjuntos habitacionais Jardim Humberto Salvador e Augusto De Paula na cidade de Presidente Prudente, São Paulo, Brasil**. Revista Geográfica de América Central (online), v. 2, p. 1-13, 2011.

OLIVEIRA, M.A.T. de. **Erosion Disconformities and Gully Morphology: A Threedimensional Approach**. In: Catena: an interdisciplinary journal of Soil Science Hydrology – Geomorphology. Vol. 16. W. Germany: Catena Verlag. p. 413- 423. 1989.

OLIVEIRA, J. A. de. **Manaus de 1920 a 1967. A cidade doce dura em excesso.** – Manaus: Editora Valer – Governo do Estado do Amazonas. Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2003.

OLIVEIRA, J. A. . **Espaço-tempo de Manaus, a natureza das águas na produção do espaço urbano.** Espaço e Cultura (UERJ), v. 23, p. 33-41-33, 2008.

ONU. **Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives.** Interagency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR,) Genebra, Suíça, 2004 [www.unisdr.org](http://www.unisdr.org). 152pp

PASSOS, M. M. **O GTP: Geossistema - Território - Paisagem. Um novo paradigma?** In: 12 EGAL, 2009, Montevideu/Uruguai. Caminando en una América Latina en transformación. Montevideu/Uruguai: Easy Planters, 2009. v. 1. p. 246-272

PENNINGTON, D. R. L. . **Manaus e Liverpool : Uma ponte marítima centenária.** 1. ed. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2009. v. 2000. 318p .

PELERIN, J. ; VIEIRA, A. F.S.G. ; BORGES, M. ; LIMA, M. S. B. . **Análise Tridimensional da cobertura pedológica de uma pequena depressão fechada: município de Biguaçu/Santa Catarina/Brasil..** In: 6º Encuentro de geógrafos de América Latina, 1997, Buenos Aires. Resúmenes de trabajos presentados. Buenos Aires: Editora da Universidade de Buenos Aires, 1997.

PINHEIRO, E. da S.; MARQUES, J. P. C. e KUX, H. J. H. **Modelo linear de mistura espectral e métricas da paisagem aplicado ao estudo do desflorestamento em Manaus, Amazonas.** Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.

PORTO, R.L. ZAHED FILHO, K. TUCCI. CE.M. BIDONE. F. **Drenagem urbana.** In: TUCCI, C. E. M. ( Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 2. Ed Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, 1997. Cap.21, p. 805- 847. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; v.4)

REBELO, Fernando. **Geografia Física e Riscos Naturais.** Ed. Coimbra. 2010

RODRIGUES, C. . **A Teoria Geossistêmica e sua Contribuição aos Estudos Geográficos e Ambientais.** Revista do Departamento de Geografia (USP), São Paulo, v. 1, n.14, p. 112-122, 2001.

RODRIGUES, C.; GOUVEIA, I. C. M-C. **A Importância Do Fator Antrópico Na Redefinição De Processos Geomorfológicos E Riscos Associados Em Áreas Urbanizadas Do Meio Tropical Úmido. Exemplos Na Grande São Paulo..** In: Antonio José Teixeira Guerra; Maria do Carmo Oliveira Jorge. (Org.). Processos Erosivos e Recuperação de Áreas Degradadas. 1ªed.São Paulo: Oficina de Textos, 2013, v. , p. 01-192.

RODRIGUES, C.; ADAMI, S. . **Técnicas de Hidrografia.** In: Luis Antonio Bittar Venturi. (Org.). GEOGRAFIA Práticas de Campo , Laboratório e Sala de Aula. São Paulo: SARANDI, 2011, v. 1, p. 9-528.

RODRIGUEZ, J. M. M. ; SILVA, E. V. ; CAVALCANTI, A. P. B. . **Geocologia das Paisagens. Uma visão geossistêmica da análise ambiental.** 4a. ed. Fortaleza: Edições UFC, 2010. v. 1. 222p

ROQUE.W.V. **Mapeamento geoambiental da área urbana de Manaus -AM.** (Dissertação de Mestrado) Brasília - DF. UnB. 179p. 2006

ROSS, J. L. S. . **Ecogeografia do Brasil.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. v. 1. 208p .

ROSS, J. L. S. ; FIERZ, M. S. M. ; VIERA, B. C. . **Técnicas de Geomorfologia.** In: Luis Antonio Bittar Venturi. (Org.). Geografia-Praticas de Campo, Laboratório e Sala de Aula. 1ªed.São Paulo: Editora Sarandi, 2011, v. 1, p. 29-54.

SAATY, Thomas L. **Decision-marking with the AHP: why is the principal eigenvector necessary.** European Journal of Operational Reserch, North-Holland, v. 145, p. 85-91, 2003.

SÁNCHEZ, L. E. . **Avaliação de Impacto Ambiental: Conceitos e Métodos.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. v. 1. 496 p.

SARGES,R.R. ; SILVA, T. M. ; RICCOMINI,C. . **Caracterização do relevo da região de Manaus, Amazônia Central.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 12, p. 95-104, 2011.

SCHOR, T ; ALVES-GOMES, J . **Vulnerabilidade socioecológica em manaus.** Revista GeoNorte, v. 01, p. 57-78, 2011

SELBY, M. J. **Hillslope Materials & Processes.** New York: Oxford University Press, 1990.

SILVA, A. M. **Rainfall erosivity map for Brazil.** Catena, v.57. p, 251-259. 2004

SILVA, A. M. ; SCHULZ, H. E. ; CAMARGO, P. B. . **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas.** 1. ed. São Carlos - SP: RIMA, 2003. v. 1. 138p .

SILVA, A. M.; SILVA, M. L. N. ; CURI, N. ; AVANZI, J. C. ; FERREIRA, M. M. . **Erosividade da chuva e erodibilidade de Cambissolo e Latossolo na região de Lavras, Sul de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Ciência do Solo (Impresso), v. 33, p. 1811- 1820, 2009.

SILVA, C. A.; PEREZ FILHO, A. . **Geografia, Turismo e Análise Sistêmica.** In: Antônio Carlos Vitte. (Org.). Contribuições à História e À Epistemologia da Geografia. Rio de Janeiro: Bertrand, 2007, v. , p. 253-290.

SILVA, C. L.; **Análise da tectônica cenozoica da região de Manaus e adjacências.** (Tese de Doutorado). Rio Claro – SP.: UNESP, 309p. 2005.

SILVA, E. V.; RODRIGUEZ, J. M. M. . **A Classificação das Paisagens a partir de uma Visão Geossistêmica.** Mercator, Fortaleza, v. 1, n.1, p. 95-112, 2002.

SILVA, F. M. ; ALMEIDA, L. Q. de . **Uma abordagem sobre a vulnerabilidade socioambiental no ambiente estuarino: aspectos teóricos - conceituais.** Revista GeoNorte, v. 1, p. 102-112, 2012.

SILVA NETO, J. C. A. . **Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno.** Geografia (Londrina) , v. 22, p. 5-25, 2013.

SOARES, M.R.G.J; SOUZA,J.M.S . **Análise morfométrica da bacia do rio Pequeno em São José dos Pinhais - PR.** Geografia (Londrina), v. 21, p. 019-036, 2012.

SOTCHAVA, V. B. **Por Uma Teoria De Classificação Do Geossistemas De Vida Terrestre.** Biogeografia São Paulo: n.14, 1978, p. 01-24.

SOUSA, F.A; RODRIGUES, S. C., **Aspectos Morfométricos Como Subsídio Ao Estudo da Condutividade Hidráulica e Suscetibilidade Erosiva dos Solos.** Mercator - Revista de Geografia da UFC [online] 2012, 11 (Mayo-Agosto)

SCHUMM, S. A. **The evolution of drainage systems and slopes in badlands at PerthAmboi, New Jersey.** Bulletin of the Geological Society of America. v. 67, n. 5, p. 597- 646, 1956.

STABILE, R.A. ; VIEIRA, B. C. . **Análise do papel exercido pela topografia na distribuição das feições erosivas da bacia hidrográfica Água da Faca, Piratininga (SP), a partir de um modelo digital de elevação.** In: 12 Congresso de Geógrafos da América Latina, 2009, Montevideo. 12 Congresso de Geógrafos da América Latina, 2009.

STRAHLER, A. N. **Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography.** Bulletin **Geological Society of America.** 63: 1117-1142, 1952.

STRAHLER A.N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology.** Trans Am Geophys Union n.38, p.913–920, 1957

SUERTEGARAY, D.M.A. **Notas sobre epistemologia da Geografia.** In: Cadernos Geográficos / Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Filosofia e Ciências Humanas. Departamento de Geociências. N.1 (Maio 1999)-. – Florianópolis: Imprensa Universitária, 1999

SUGUIU, K. BIGARELLA, J.J. **Ambientes fluviais.** Florianópolis. Ed. da UFSC, 1990

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar** – São Paulo: 1<sup>o</sup>ed. São Paulo: Edtirora Blucher, 2003.400p.

TANAKA, L. M. D. S. ; SATYAMURTY, P. ; MACHADO, L. A. T. . **Diurnal variation of precipitation in central Amazon Basin**. International Journal of Climatology , v. 34, p. 3574-3584, 2014.

TEODORO, V. L.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D.J. L. e FULLER, B. B. . **O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local**. Revista UNIARA, v. 20, p. 137-156, 2007.

THORNES, J.B.. **Procesos erosivos de las corrientes de agua y sus controles espaciales y temporales: un punto de vista teórico**. In: Erosion de suelos. Org. KIRBBY, M.J., MORGAN, R.P.C. ed. LUMASA. Mexico D.F. 1984

TOMINAGA, L.K. **Avaliação de metodologias de análise risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP.** Tese (Doutorado em Geografia (Geografia Física)) - Universidade de São Paulo. 2007

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: Revisão**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.2, n.1, p.135 - 152, 1997

TUCCI, C. E. M. . **Águas urbanas**. Estudos Avançados (USP.Impresso), v. 22, p. 97-112, 2008.

VALE, C. C. . **Teoria Geral Do Sistema: Histórico e Correlações com a Geografia e com o Estudo da Paisagem**. Entre Lugar, v. 6, p. 85-108, 2012.

VALENTIN. C, POESEN. J., YONG LI.. **Gully erosion: Impacts, factors and control**. (Cremlingen), Amsterdam, v. 63, n.3, p. 132-153, 2005.

VALERIANO, M. M., 2008. Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 72 p. (INPE-15318-RPE/818).

VEYRET, Yvette. **Os riscos: O homem agressor e vítima do meio ambiente**. São Paulo. Contexto 2007

VIEIRA, A.F.G. (1998). **Erosão por voçorocas em áreas urbanas: o caso de Manaus (AM)**. (Dissertação de Mestrado). Florianópolis: DPGG/UFSC. 181 p.

VIEIRA, A.F.G.; ALBUQUERQUE, A.R.da C. (2004). Cadastramento de voçorocas e análise de risco erosivo em estradas: BR-174 (Trecho Manaus – Presidente Figueiredo). **In: V Simpósio Nacional de Geomorfologia e I Encontro Sul- Americano de Geomorfologia**. (Anais). Santa Maria: UGB/UFSC. p. 50-65

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

VIEIRA, A.F.G.S. Correlação de variáveis (informação oral). Manaus. UFAM, 2015

WEI, Y.M. YING, F. CONG, L. TSAI,H-T. **The assessment of vulnerability to natural disasters in China by using the DEA method.** Environmental Impact Assessment Review. v.24. p. 427–439. 2004.

# APÊNDICE 1

Características físicas dos solos dos perfis da  
topossequência

Quadro 01: Características do Perfil de solo 01 – Tradagem no topo da encosta

Prof. (cm)	Cor	Argila	Silte	Areia Total	Textura	Dr *	Da **	Pt (%)
		%						
0 - 10	7,5 YR 3/2 Brown	67,15	20,35	12,50	Muito Argilosa	2,50	1,04	58,25
10 - 20		56,27	30,33	13,40	Argilosa	2,56	1,09	57,35
20 - 30	7,5 YR 7/6 Reddish Yellow	52,80	39,65	7,55	Argilosa	2,46	1,06	57,03
30 - 40	10 YR 6/6 Brownish Yellow	52,60	38,75	8,65	Argilosa	2,59	1,11	57,03
40 - 50	10 YR 6/4 Light Yellowish Brown	58,80	30,95	10,25	Argilosa	2,50	1,04	58,24
50 - 60	10 YR 8/8 Yellow	76,65	16,30	7,05	Muito Argilosa	2,56	1,03	59,64
60 - 70		65,15	27,15	7,70	Muito Argilosa	2,50	1,08	56,70
70 - 80	10 YR 7/8 Yellow	64,65	28,35	7,00	Muito Argilosa	2,46	1,03	58,29
80 - 90		58,85	34,85	6,30	Argilosa	2,46	1,07	56,46
90 - 100		59,55	34,15	6,30	Argilosa	2,63	1,04	60,47

DR – Densidade Real ; DA – Densidade Aparente; Pt – Porosidade Total  
Org. Armando Brito da Frota Filho, 2015

Quadro 02: Características do Perfil de solo 02 – Tradagem no baixo

Prof. (cm)	Cor	Argila	Silte	Areia Total	Classe Textural	Dr *	Da **	Pt (%)
		%						
0 - 10	10 YR 3/3 Dark Brown	7,15	7,75	85,10	Areia Franca	2,56	1,36	46,84
10 - 20	10 YR 4/3 Brown	7,10	19,30	73,60	Areia Franca	2,56	1,41	44,80
20 - 30	7,5 YR 6/2 Pinkish Grey	9,53	12,38	78,10	Areia Franca	2,66	1,42	46,74
30 - 40	7,5 YR 6/4 Light Brown	7,55	20,80	71,65	Areia Franca	2,59	1,39	46,19
40 - 50		8,55	27,55	63,90	Franco Arenosa	2,70	1,40	48,19
50 - 60		12,50	17,80	69,70	Franco Arenosa	2,63	1,37	47,70
60 - 70		8,40	14,65	76,95	Areia Franca	2,50	1,41	43,23
70 - 80	7,5 YR 6/6 Reddish Yellow	8,05	18,00	73,95	Areia Franca	2,50	1,46	41,53
80 - 90		15,05	12,85	72,10	Areia Franca	2,59	1,38	46,74
90 - 100	5 YR 7/6 Reddish Yellow	19,25	11,95	68,80	Franco Arenosa	2,63	1,40	46,59
100 - 110		19,45	9,20	71,35	Areia Franca	2,56	1,36	46,66
110 - 120		20,32	10,93	68,75	Franco Arenosa	2,66	1,41	46,75

DR – Densidade Real ; DA – Densidade Aparente; Pt – Porosidade Total  
Org. Armando Brito da Frota Filho, 2015

Quadro 03: Características do Perfil de solo 03 – Tradagem na vertente

Prof. (cm)	Cor	Argila	Silte	Areia Total	Textura	Dr *	Da **	Pt (%)
		%						
0 - 10	7,5 YR 4/2 Brown	22,00	11,50	66,50	Franco Argilo Arenosa	2,46	1,19	51,75
10 - 20	7,5 YR 5/3 Brown	25,35	19,30	55,35	Franco Argilo Arenosa	2,59	1,20	53,65
20 - 30		19,90	25,20	54,90	Franco Arenosa	2,53	1,21	52,16
30 - 40		34,32	5,68	60,00	Franco Argilo Arenosa	2,50	1,21	51,48
40 - 50	7,5 YR 6/4 Light Brown	25,70	25,35	48,95	Franco Argilo Arenosa	2,66	1,2	54,19
50 - 60		38,10	12,05	49,85	Franco Argilo Arenosa	2,56	1,24	51,56
60 - 70	7,5 YR 6/6 Reddish Yellow	43,65	15,05	41,30	Argilosa	2,70	1,23	54,17
70 - 80	7,5 YR 6/8 Reddish Yellow	48,35	9,65	42,00	Argilosa	2,63	1,23	53,06
80 - 90		45,20	13,60	41,20	Argilosa	2,63	1,19	54,75
90 - 100		47,37	9,13	43,50	Argilosa	2,66	1,18	55,49

DR – Densidade Real ; DA – Densidade Aparente; Pt – Porosidade Total  
Org. Armando Brito da Frota Filho, 2015

Quadro 04: Características do Perfil de solo 04 – Tradagem na vertente

Prof. (cm)	Cor	Argila	Silte	Areia Total	Textura	Dr *	Da **	Pt (%)
		%						
0 - 10	7,5 YR 5/2 Brown	37,65	17,45	44,90	Franco Argilo Arenosa	2,66	1,18	55,66
10 - 20	7,5 YR 5/3 Brown	21,62	46,18	32,20	Franca	2,59	1,21	53,26
20 - 30	7,5 YR 6/3 Light Brown	36,82	23,33	39,85	Franco Argilosa	2,63	1,20	54,39
30 - 40	7,5 YR 6/4 Light Brown	40,80	27,30	31,90	Argilosa	2,7	1,18	56,63
40 - 50	7,5 YR 6/6 Reddish Yellow	52,97	14,63	32,40	Argilosa	2,66	1,23	53,78
50 - 60		49,55	19,05	31,40	Argilosa	2,63	1,12	57,23
60 - 70		56,82	12,73	30,45	Argilosa	2,63	1,15	55,98
70 - 80	7,5 YR 7/6 Reddish Yellow	57,37	13,38	29,25	Argilosa	2,66	1,17	55,83
80 - 90		52,07	15,88	32,05	Argilosa	2,66	1,16	56,36
90 - 100		51,72	17,23	31,05	Argilosa	2,50	1,17	53,06

DR – Densidade Real ; DA – Densidade Aparente; Pt – Porosidade Total  
Org. Armando Brito da Frota Filho, 2015

## **APÊNDICE 2**

**Disposição das voçorocas nos Mapas de  
Vulnerabilidade Natural e Ambiental**

Quadro 5 : Disposição das voçorocas nos Mapas de Vulnerabilidade Natural e Ambiental da BH Colônia Antônio Aleixo

Voçoroca	Mapa de vulnerabilidade Natural	Mapa de Vulnerabilidade Ambiental
01	Muito alto	Muito alto
02	Muito alto	Muito alto
03	Muito alto	Muito alto
04 *	Muito alto	Alto
05	Muito alto	Muito alto
06	Alto	Alto
07 *	Muito alto	Alto
08	Muito alto	Muito alto
09	Alto	Alto
10	Alto	Alto
11 *	Alto	Moderado
12	Muito alto	Muito alto
13 *	Muito alto	Alto
14 *	Muito alto	Alto
15 **	Moderado	Alto
16 **	Moderado	Alto
17	Moderado	Moderado
18 *	Muito alto	Alto
19	Muito alto	Muito alto
20	Muito alto	Muito alto
21	Alto	Alto
22	Muito alto	Muito alto

\* Redução do Grau de Vulnerabilidade Natural para Vulnerabilidade Ambiental.

\*\* Elevação do Grau de Vulnerabilidade Natural para Vulnerabilidade Ambiental.

Org. Armando Brito da Frota Filho, 2016.