

UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO E DOUTORADO EM GEOGRAFIA

DINÂMICA HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS DE
DIFERENTES UNIDADES MORFOPEDOLÓGICAS NA AMAZÔNIA SUL OCIDENTAL

TAMIRES CUNHA DE AGUIAR

PORTO VELHO-RO
2024

TAMIRES CUNHA DE AGUIAR

DINÂMICA HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS DE
DIFERENTES UNIDADES MORFOPEDOLÓGICAS NA AMAZÔNIA SUL OCIDENTAL

Tese apresentada como requisito à obtenção do título de Doutora em Geografia no Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Rondônia.

Linha de Pesquisa: Paisagem, Processos do Meio Físico e Gestão Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Dorisvalder Dias Nunes
Coorientador: Prof. Dr. Edivaldo Lopes Thomaz
Coorientador: Prof. Dr. Michel Watanabe

PORTO VELHO-RO
2024

Catálogo da Publicação na Fonte
Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR

A283d Aguiar, Tamires Cunha de.
Dinâmica hidrossedimentológica em estradas não pavimentadas de diferentes unidades morfoedológicas na Amazônia Sul Ocidental / Tamires Cunha de Aguiar. - Porto Velho, 2024.

142f.: il.

Orientação: Dorisvalder Dias Nunes.

Coorientação: Michel Watanabe.

Coorientação: Edivaldo Lopes Thomaz.

Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Geografia. Núcleo de Ciências Exatas e da Terra. Fundação Universidade Federal de Rondônia.

I. Erodibilidade. 2. Estradas rurais. 3. Erosão dos Solos. I. Nunes, Dorisvalder Dias. II. Watanabe, Michel. III. Thomaz, Edivaldo Lopes. IV. Título.

Biblioteca Central

CDU 908



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

ATA DE TESE

O Colegiado do Programa de Pós-Graduação Mestrado e Doutorado em Geografia – PPGG/UNIR autoriza a Defesa Final em Nível de Doutorado da pós-graduanda **TAMIRES CUNHA DE AGUIAR**, matrícula: 20191002820, e aprova a Comissão Avaliadora constituída pelos(as) examinadores(as): **Prof. Dr. Dorisvalder Dias Nunes** - Orientador/PPGG/UNIR, **Prof. Dr. Michel Watanabe**

- Coordenador/PPGG/UNIR, **Prof. Dr. Edivaldo Lopes Thomaz** - Coordenador/UNICENTRO - Campus GUARAPUAVA, **Prof. Dr. Ricardo Gilson da Costa Silva** - Avaliador Interno/PPGG/UNIR, **Prof. Dr. João Paulo Assis Gobo** - Avaliador Interno/PPGG/UNIR, **Prof. Dr. Anderson Augusto Volpato Scotti** - Avaliador Externo/Universidade Federal de Santa Maria - PPGG/UFSM, **Prof. Dr. Valdemir Antoneli** - UNICENTRO - Campus IRATI, **Prof. Dr. Adnilson de Almeida Silva** - Suplente/PPGG/UNIR, **Profa. Dra. Siane Cristhina Pedroso Guimarães** - Suplente/PPGG/UNIR, que reuniram-se em formato híbrido, no dia **18 de dezembro de 2023**, iniciando os trabalhos às 08h:30 (horário de Brasília), para avaliar o trabalho de TESE: “ **DINÂMICA HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS DE DIFERENTES UNIDADES MORFOPEDELÓGICAS NA AMAZÔNIA SUL-OCIDENTAL**”.

Após a explanação da pós-graduanda e arguição pela Banca Examinadora, a referida **TESE** foi avaliada e de acordo com as normas estabelecidas pelo Regimento do Programa de Pós-Graduação em Geografia foi considerada **APROVADA**. A Candidata terá o prazo de até 90 dias para fazer as correções sugeridas pela banca e entregar as cópias definitivas de sua Tese, sob pena de invalidação, pelo Colegiado, do processo de Defesa, conforme preceitua o § 3º do artigo 83 do Regimento Interno do PPGG, uma vez que o curso só finaliza com a entrega da Tese revisada e a comprovação do cumprimento dos demais créditos, conforme Regimento Interno.

Prof. Dr. Dorisvalder Dias Nunes - Orientador/Presidente
Prof. Dr. Michel Watanabe - Co-orientador/PPGG
Prof. Dr. Edivaldo Lopes Thomaz - Co-orientador/UNICENTRO
Prof. Dr. João Paulo Assis Gobo - Avaliador interno/PPGG/UNIR

Prof. Dr. Ricardo Gilson da Costa Silva - Avaliador interno/PPGG/UNIR
Prof. Dr. Anderson Augusto Volpato Scotti - Avaliador Externo/UFSM
Prof. Dr. Valdemir Antoneli - Avaliador Externo/UNICENTRO
Prof. Dr. Adnilson de Almeida Silva - Suplente/PPGG/UNIR
Profa. Dra. Siane Cristhina Pedroso Guimarães - Suplente/PPGG/UNIR



Documento assinado eletronicamente por **DORISVALDER DIAS NUNES, Docente**, em 18/12/2023, às 12:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **MICHEL WATANABE, Docente**, em 18/12/2023, às 12:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Anderson Augusto Volpato Scoti, Usuário Externo**, em 20/12/2023, às 06:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Valdemir antoneli, Usuário Externo**, em 21/12/2023, às 09:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **RICARDO GILSON DA COSTA SILVA, Docente**, em 22/02/2024, às 17:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOAO PAULO ASSIS GOBO, Docente**, em 23/02/2024, às 18:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.unir.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1593544** eo código CRC **4C59C505**.

Referência:
77

Processo

nº

23118.009399/2023-

SEI nº 1593544

Dedico ao meu filho, fonte constante de inspiração e estímulo. Ele é a tradução viva do amor e tornou possível este trajeto desafiador, porém satisfatório. Este é o meu pedido sincero de perdão pelas ausências.

AGRADECIMENTOS

A Deus, soberanamente justo e bom, reconheço e aceito que meu caminho é a expressão da sua vontade.

À minha família, minha irmã Tainá e minha mãe Vicença, meu alicerce, a verdadeira essência do amor e da união. Obrigada pelo apoio e cuidado quando os momentos desafiadores foram realmente difíceis de viver sozinhos. Minha irmã, gratidão pelo suporte na análise dos dados, tua inteligência sempre foi minha inspiração.

Ao meu filho, cuja presença é uma dádiva e minha fonte de força nesta trajetória. Perdão pela ausência nos momentos cruciais da tua jornada de crescimento. Peço que compreendas que eu também estava crescendo e aprendendo contigo ao longo do caminho. Obrigada pelos abraços e carinhos quando eu me encontrava, *apenas*, exausta. Hoje percebo que juntos superamos desafios e alcançamos objetivos. Você é meu companheiro e prometo, enquanto fôlego de vida eu tiver, te proteger, apoiar, encorajar e celebrar suas vitórias. Te amo!

Aos meus queridos amigos e orientadores, Dorisvalder e Michel. Não consigo imaginar como teria sido minha trajetória acadêmica sem a presença de vocês. Agradeço imensamente a confiança, persistência, paciência e acima de tudo a oportunidade. Vocês, juntamente com a Geografia, moldaram e guiaram o curso da minha vida, transformando minhas expectativas. Sinto que foi uma bênção divina ter sido conduzida a encontrá-los desde os meus 17 anos. Vocês não me ensinaram apenas Geografia, mas também a essência de uma vida coerente baseada em dedicação e perseverança. Sorte seria um dia conseguir influenciar e transformar a vida das pessoas da mesma maneira que vocês fizeram na minha.

Ao meu co-orientador Edivaldo Thomaz, embora distante de nosso cotidiano, sempre foi acessível, paciente e uma grande referência científica para mim. Sua expertise no tema da tese foi fundamental para a finalização do trabalho com a segurança e qualidade exigidas no PPGG.

À minha amada afilhada, Raysa, que a jornada acadêmica me proporcionou. Ao longo de quase quinze anos de estudos no laboratório, sou imensamente grata ao universo por ter cruzado nossos caminhos. Agradeço o apoio e companheirismo e espero estar presente para celebrar todas as suas conquistas na vida também.

Ao querido Luiz Cleyton, todo conhecimento compartilhado e disposição para atividades de campo, obrigado pelo apoio e amparo nas angústias, sempre me senti acolhida ao teu lado.

À querida Adriana, obrigada por me ouvir nos momentos de angústia e tentar, docemente, acalmar meu coração. Obrigada pela leitura do trabalho, pelo auxílio com a pesquisa, a senhora é um grande exemplo de força e determinação e tem minha admiração.

Aos amigos do laboratório Selma, Allan e Caio, o apoio nas atividades de campo e risadas que tornaram a trajetória mais leve. Obrigada também aos colaboradores de campo e de pesquisa, Jansen e Darlan, Daiana sabemos o quanto foram difíceis os dias ensolarados no meio das estradas amazônicas.

Às amigas de profissão, Berenice e Iasmin, imprescindíveis em minha trajetória, sempre compreenderam minhas ausências na escola e torceram pelo sucesso da tese.

Aos professores Anderson Scotti e João Gobo que sempre foram solícitos em tempo recorde para ajuda solicitada. Gratidão pelo retorno e pelo cuidado no trato da avaliação do trabalho.

Às amigas da vida Tatiane, Dalvanira e Débora, que mesmo distantes estão sempre próximas, com uma mensagem de apoio, vivenciando comigo as angústias e tornando a caminhada possível. Deus foi bondoso e justo ao me presentear com vocês.

À **CAPES**, a bolsa de estudos. Ao **PPGG** – UNIR, a oportunidade. À **FAPERO** – Fundação de Amparo à Pesquisa no estado de Rondônia, ao apoio financeiro através de financiamento de projetos.

A **todos** que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para esta jornada desafiadora, mas repleta do sabor da vitória, expresso meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este estudo objetiva analisar o efeito das diferentes unidades homogêneas de interação solo-relevo-geologia de Unidades Morfopedológicas (UMF), associadas às condições de uso e cobertura da terra em unidades de paisagem setorizadas, na produção de escoamento e de sedimento em estradas não pavimentadas da bacia hidrográfica do alto Rio das Garças (BHARG), a partir do modelo de simulação de chuvas portátil por aspersão (SCPA). Foram simuladas chuvas que ocorrem em eventos intensos na área, como forma de controlar uma das variáveis que atua no processo erosivo das estradas, em parcelas hidroerosivas abertas, para estabelecer padrões de produção de escoamento superficial e quantificação de sedimentos. A BHARG destaca-se pelo progressivo uso e ocupação, no qual observou-se o potencial para abertura de novas estradas em áreas exploradas atualmente. É uma área que pressiona os limites da Floresta Nacional do Bom Futuro e a Terra Indígena Karipunas. Neste contexto, esta região se transforma em um cenário de intensa exploração de seus recursos naturais, indicando a necessidade de focar em seu estágio atual de exploração. As unidades morfopedológicas (UMF) foram delineadas de acordo com Castro e Salomão (2000). Os compartimentos delimitados estabeleceram fisionomias de relevo reconhecíveis e delineáveis, onde se reconhecem estruturas pedológicas e litológicas específicas, conforme os dados do Planaflo (Rondônia, 2001). Assim, foi realizada a setorização da BHARG considerando como critérios básicos: 1. Tipo de uso e cobertura da terra; 2. Unidades morfopedológicas mapeadas; 3. Função e hierarquização das estradas, que resultou em seis setores. A caracterização física da bacia demonstrou predominância em mais de 80% da área constituída por solos do tipo Cambissolo distrófico e Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. O mapeamento e hierarquização das estradas realizadas com base em DNER (1999) e Goodrich-Stuart (2012) indicaram, segundo a matriz de classificação aplicada, a predominância em mais de 60% de estradas de 4ª ordem, caracterizadas sumariamente com hierarquia funcional local de acesso em que pelo menos uma das extremidades do trecho não está conectada com vias de distribuição e 5ª ordem para atender à demanda de chegada às propriedades ou à saída delas. O tipo de uso e cobertura predominante está associado à pastagem e culturas temporárias como plantio de arroz, plantio de soja e milho. As respostas obtidas por meio do experimento SCPA estabeleceram um padrão de dinâmica de fluxos hidrológicos relacionados ao escoamento e à produção de escoamento dos trechos de estradas analisadas no ambiente Amazônico. A hipótese de que os trechos apresentariam diferentes padrões de respostas hidrossedimentológicas associadas à produção de sedimentos não foi confirmada entre os setores com distintas UMF. O efeito das distintas UMFs, que estão em contextos de setores com características de uso e cobertura também diferentes, não foi percebido através da produção de sedimentos durante o evento SCPA. É possível afirmar que as respostas de escoamento e produção de sedimento na superfície destas estradas – de acordo com o experimento, neste nível de escala de abordagem – estiveram mais relacionadas às variáveis controladoras que dizem respeito à Umidade, Declividade e Densidade Aparente do leito. Notamos que a Densidade Aparente, enquanto variável controladora nos processos hidrodinâmicos, indicou uma tendência para gerar maior desprendimento de sedimentos. O estudo pôde contribuir com a discussão de ampliação da rede de estradas na Amazônia associando fluxos sociais aos fluxos hidroerosivos em bacias hidrográficas. Esta discussão amplia o conhecimento de que as estradas continuam a atuar constantemente neste cenário por meio dos fluxos sociais e, por consequência, ampliando também o potencial de degradação das bacias hidrográficas pelos fluxos hidroerosivos.

Palavras-chave: Erodibilidade. Estradas rurais. Erosão de solos.

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of different homogeneous soil-relief-geology interaction units of Morphopedological Units (UMF) associated with land use and cover conditions in sectorized landscape units, on the production of runoff and sediment on unpaved roads in the upper Rio das Garças basin, based on the portable sprinkler rainfall simulation model (SCPA). Simulated rains that occur in intense events in the area, as a way of controlling one of the variables that acts on the erosive process of roads, in open hydro-erosive plots, to establish patterns of surface runoff production and sediment quantification. The present study focuses on the southern part of the Rio das Garças basin, which stands out due to the current occupation process, in which a potential for opening new roads in currently explored areas was observed. It is an area that presses the limits of the Bom Futuro National Forest, established by Decree No. 96,188 of 06/21/1988, and the Karipunas Indigenous Land. In this sense, this region becomes a scenario of intense exploitation of its natural resources, indicating the need to focus on its current stage of exploration through scientific investigation. The morphopedological units (FMU) were delineated according to the methodology suggested by Castro and Salomão (2000). The delimited compartments established recognizable and delineable relief physiognomies, where specific pedological and lithological structures are recognized, according to Planaflo data (Rondônia, 2001). The physical characterization of the basin demonstrated a predominance of more than 80% of the area consisting of dystrophic Cambisol and dystrophic Red Yellow Latosol soils. The mapping and hierarchy of roads indicated a predominance of more than 60% of 4th order roads, briefly characterized with a local functional hierarchy of access to meet the demand for arriving at or leaving properties and 5th order in which at least one of the ends of the section is not connected to distribution routes. The predominant type of use and coverage is associated with pasture and temporary crops such as rice planting, soybean planting and corn. BHARG was sectorized considering the following basic criteria: 1. Type of land use and coverage; 2. Mapped morphopedological units; 3. Function and hierarchy of roads, which resulted in six sectors. The responses obtained through the SCPA experiment established a pattern of hydrological flow dynamics related to runoff and runoff production of the road sections analyzed in the Amazon environment. The hypothesis that the stretches would present different patterns of hydrosedimentological responses associated with sediment production was not confirmed between the sectors with different FMU. The effect of the different FMUs, which are in contexts of sectors with different use and coverage characteristics, was not perceived through the production of sediments during the SCPA event. It is possible to state that the responses of runoff and sediment production on the surface of these roads, according to the experiment, at this scale level of approach, were more related to the controlling variables that concern the Humidity, Slope and Apparent Density of the bed. We noticed that Apparent Density, as a controlling variable in hydrodynamic processes, indicated a tendency to generate greater sediment detachment. The study was able to contribute to the discussion of expanding the road network in the Amazon, associating social flows with hydro-erosive flows in river basins. This discussion expands the knowledge that roads continue to act constantly in this scenario through social flows, and through consequence, also increasing the potential for degradation of river basins by hydro-erosive flows.

Keywords: Erodibility, Rural roads, Soil erosion

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esboço teórico ilustrando o caminho percorrido na literatura para entendimento dos processos físicos que ocorrem em superfície	21
Figura 2 – Fluxos promovidos através da abertura das estradas não pavimentadas nas diferentes dimensões analisadas.....	39
Figura 3 – Mapa de localização da área de estudo	45
Figura 4 – Estrutura metodológica para obtenção de dados sobre a erosão das estradas em unidades morfopedológicas da Bacia do Alto Rio das Garças.....	48
Figura 5 – Desenho amostral do perfil de estrutura básica das estradas	50
Figura 6 – Simulador de chuvas portátil com bico aspersor montado sobre uma parcela hidroerosiva aberta, com fluxos hidrodinâmicos em funcionamento durante os experimentos SCPA.....	57
Figura 7 – a) Disposição de pluviômetros manuais para mensuração da intensidade de precipitação durante o experimento SCPA; b) as setas brancas apontam para os parafusos de ferro utilizados para delimitar as parcelas hidroerosivas.....	59
Figura 8 – Procedimentos laboratoriais da segunda etapa metodológica: a) potes com água e sedimentos coletados durante o experimento SCPA; b) tigelas apenas com sedimento para quantificação após realizado o método de evaporação; c) procedimento de peneiramento dos sedimentos desprendidos durante o experimento SCPA; d) pesagem das amostras coletadas em 0-5 e 5-10 cm de profundidade com umidade, pré-secagem.....	62
Figura 9 – Mapa de hierarquização fluvial e localização da área no contexto da Terra Indígena Karipunas e da Floresta Nacional do Bom Futuro	65
Figura 10 – Fotos registradas dos tipos de uso e cobertura identificados na área da BHARG: a) plantio de Arroz; b) solo preparado para o plantio, que reflete a dinâmica de uso do solo para culturas temporárias; c) área de pastagem; d) plantio de mandioca, muito observado em áreas com predominância de agricultura de subsistência.	68
Figura 11 – Mapa da espacialização das Unidades Morfopedológicas definidas no âmbito da Bacia Hidrográfica do Alto Rio das Garças	69
Figura 12 – a) Estrada na UMF 01 no setor noroeste da BHARG; b) retrata uma estrada na UMF 02 próximo a pequenas propriedades redistribuídas pelo INCRA através de loteamentos; c) estrada aberta na fazenda Serra Verde, próxima a grandes áreas agrícolas; d) estrada na UMF 03 que possibilita o acesso a estradas de escoamento de grãos.....	71
Figura 13 – Registro de queimada realizada para limpeza de área recém desmatada em uma estrada de 4ª ordem (04/10/2022).....	72
Figura 14 – Fluxo de relações entre as tipologias de estradas.....	74
Figura 15 – Desenho esquemático para caracterização da área da BHARG em setores.....	81
Figura 16 – Estradas com feições erosivas aparentes: a) Estrada do trecho 2 com aparente erosão em ravinamento e em entre-ravinas; b) estrada do trecho 1 que dá o acesso ao setor 1 da BHARG com concentração de fluxos de superfície gerando atoleiros	86
Figura 17 – Média de pluviosidade mensal no período de 2008-2018.....	92
Figura 18 – Localização dos Trechos para execução dos experimentos SCPA	98
Figura 19 – Gráficos de Perda de solo e de taxas de escoamento final. a) ANOVA – diferença entre as médias dos trechos e b) taxas de escoamento (Coeficiente) entre os trechos	106
Figura 20 – Valores totais relacionados à perda de sedimentos e coeficiente de escoamento.....	107
Figura 21 – Gráfico de Perda de solo por trechos de experimento SCPA.....	108

Figura 22 – a) Gráfico que expressa o coeficiente de escoamento no decorrer do tempo do experimento; b) Gráfico da taxa de desprendimento de sedimentos nos intervalos de tempo de execução do experimento SCPA	110
Figura 23 – Gráficos da variação temporal de produção de sedimentos e de coeficientes de escoamento para cada trecho analisado	112
Figura 24 – Gráficos de correlação entre as variáveis hidrológicas: a) Correlação entre Perda de solo e Densidade Aparente; b) Correlação dada entre Coeficiente de escoamento final e Densidade Aparente.....	118

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Roteiro metodológico para estabelecimento cartográfico das Unidades Morfopedológicas em níveis sucessivos de abordagem	55
Quadro 2 – Matriz de hierarquização e classificação das estradas na Bacia do Alto Rio das Garças	77
Quadro 3 – Características para hierarquização das estradas presentes na BHARG	78
Quadro 4 – Descrição da setorização da BHARG.....	83
Quadro 5 – Descrição dos pontos onde as estradas foram mapeadas nos trechos do setor 1 e 2 da BHARG	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipologias de uso e cobertura encontradas na área e suas respectivas classes relacionadas	46
Tabela 2 – Parâmetros gerais do Simulador de Chuvas Portátil com bico aspersor	58
Tabela 3 – Tipos de Solos e Unidade geológica de formação na BHARG	67
Tabela 4 – Características gerais morfométricas da Bacia Hidrográfica do Alto Rio das Garças sob condições naturais e acrescidas da componente antrópica estradas.....	90
Tabela 5 – Controle de execução dos experimentos.....	97
Tabela 6 – Estudos relacionados aos Coeficientes de escoamento e taxas de erosão em estradas não pavimentadas com uso de simuladores de chuva.....	104
Tabela 7 – Correlações entre variáveis associadas à umidade obtida para a camada de 0 a 10cm de profundidade da superfície das estradas	114
Tabela 8 – Resumo dos parâmetros mensurados durante as SCPA das estradas do Setor 1 (trecho 1 e 2) e Setor 2 (trecho 3 e 4)	116
Tabela 9 – Correlação (r) entre os parâmetros de dinâmica hidroerosiva	118

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 ELEMENTOS CONCEITUAIS EM HIDROGEOMORFOLOGIA	19
2.1 PAISAGEM, SOLO E HIDROGEOMORFOLOGIA.....	19
2.2 PROCESSOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS	25
2.2.1 Interação antrópica por meio da Abertura de Estradas em sistemas naturais e processos superficiais ou erosão do solo	27
2.3 USO DE SIMULADORES DE CHUVA NO ESTUDO DE PROCESSO EROSIVO	30
2.4 O PAPEL ESTRATÉGICO DAS ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS NA AMAZÔNIA SUL OCIDENTAL: PROBLEMAS E DESAFIOS.....	35
2.4.1 Estradas como fenômeno geográfico na Amazônia	38
3 MÉTODOS E TÉCNICAS DA PESQUISA	44
3.1 DELIMITAÇÃO DA BHARG E PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA REDE DE DRENAGEM E DA REDE VIÁRIA	51
3.2 COMPARTIMENTAÇÃO DAS UNIDADES MORFOPEDOLÓGICAS E SETORIZAÇÃO	54
3.3 PARÂMETROS FÍSICOS DOS SOLOS NAS UNIDADES MORFOPEDOLÓGICAS	56
3.4 SIMULAÇÃO DE CHUVAS.....	57
3.4.1 Etapa das atividades de campo do experimento SCPA	59
3.4.2 Etapa de tabulação dos dados do experimento SCPA em laboratório	61
4 RESULTADOS DA PESQUISA – NÍVEL DESCRITIVO	64
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO ALTO RIO DAS GARÇAS	64
4.2 UNIDADES MORFOPEDOLÓGICAS DA BHARG	68
4.3 MAPEAMENTO E HIERARQUIZAÇÃO DAS ESTRADAS DA BHARG	72
4.4 SETORIZAÇÃO EM TIPOLOGIAS DE PAISAGENS – USO DA TERRA	79
4.5 INTERFERÊNCIA DA ABERTURA DAS ESTRADAS NAS CONDIÇÕES MORFOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA	87
4.6 DADOS CLIMATOLÓGICOS – PORTO VELHO (RO)	91
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES – NÍVEL PROCESSUAL	96
5.1 TRECHOS ESTABELECIDOS E LOCAIS DE EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO SCPA.....	96
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	99
5.3 RESPOSTAS HIDROSEDIMENTOLÓGICAS DO EXPERIMENTO SCPA: PROCESSOS HIDROLÓGICOS NAS PARCELAS HIDROEROSIVAS.....	102
5.3.1 Formação de fluxos hídricos e transporte de sedimentos	104
5.3.2 Coeficiente de escoamento e taxa de produção de sedimento entre os trechos	106
5.3.3 Análise da dinâmica têmporo-espacial durante eventos simulados	109
5.3.4 Umidade relacionada às Taxas de Escoamento e ao Tempo de Retorno	113
5.3.5 Fatores controladores da dinâmica hidrogeomorfológica estabelecida entre os trechos	115
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	120
REFERÊNCIAS	123
APÊNDICES	137

1 INTRODUÇÃO

Os processos hidroerosivos estabelecidos na paisagem, que reconfiguram os sistemas de bacias hidrográficas, tornam-se ainda mais complexos ao considerar a variável antrópica¹ — estradas —, muitas vezes desprezada neste contexto de ocorrência de processos superficiais no solo. Estudos já reconhecem o potencial que esta variável apresenta em modificar a paisagem nestes ambientes hidrodinâmicos, agora faz-se necessário compreender seu comportamento no ambiente amazônico, ainda pouco investigado.

Para sistematizar a compreensão da interação entre erosão e estradas, a análise é fundamentada em uma abordagem integrativa da paisagem. Esta abordagem permitiu a compreensão dos processos erosivos como resultados diretos da interação humana em unidades naturais, tais como bacias hidrográficas, unidades morfopedológicas e parcelas hidroerosivas abertas, que representam expressões destes sistemas naturais em um ambiente experimental.

Duas condições principais são importantes para se considerar: a primeira diz respeito ao fato de que a abertura das estradas na Região Amazônica é uma componente fundamental do modelo geral de ocupação da região, pois, desde o início da colonização amazônica elas estão associadas ao desenvolvimento estratégico de integração regional, como formas de ampliação de acesso para exploração de recursos naturais e ocupação fundiária; a segunda consiste no entendimento de que as estradas não pavimentadas, além de ampliarem o desmatamento a partir das frentes de ocupação para a região, estabelecem para os sistemas de bacias hidrográficas um redirecionamento de fluxos de matéria e energia que se traduzem em uma nova dinâmica hidrossedimentológica, cujos resultantes nos sistemas são sentidos de forma direta na qualidade e quantidade de recursos hídricos disponíveis. Portanto, é importante ampliar estudos que se preocupem com os processos físico-químicos que decorrem desta forma de ocupação, especialmente quando delas derivam problemas associados à diminuição do potencial hídrico e biológico dos sistemas naturais.

O estudo foi aplicado na Bacia Hidrográfica do Alto Rio das Garças (BHARG), localizada no município de Porto Velho, que é uma área representativa do modelo geral de ocupação histórica da Amazônia. Atualmente, nesta área há ampliação da rede de estradas que avançam sobre áreas legalmente protegidas na região, ocasionando pressão sobre a Terra Indígena dos Karitianas e sobre a área da FLONA Bom Futuro, esta última desafetada em 2010

¹ Variável antrópica: será entendida como uma ação realizada por sujeitos ou atores sociais atuantes nas modificações do sistema ambiental da bacia, neste caso através da abertura de estradas.

com perda de cerca de 65% de sua área para as pressões de grileiros e madeireiros que transformaram a floresta em pasto. De maneira geral, a expansão das estradas somada ao crescimento populacional de municípios próximos e o aumento do rebanho bovino são fatores associados às causas do aumento de desmatamento da área (Barancelli *et al.*, 2017; Neto, 2009; Santos *et al.*, 2018). No contexto dos limites da BHARG, estas áreas protegidas têm sido fator fundamental para manutenção e permanência de cerca de 80% da floresta ombrófila nativa da bacia, cuja biodiversidade mantém-se praticamente intacta. Elas foram transformadas em áreas protegidas através de um instrumento de planejamento da ocupação e controle de utilização dos recursos naturais do Estado de Rondônia, o zoneamento socioeconômico e ecológico, preocupado com a expansão de ocupação territorial que coloca em ameaça os recursos naturais biológicos e hidrológicos disponíveis.

Neste sentido, as estradas não pavimentadas são entendidas como uma das formas de interação antrópica neste ambiente. Entende-se que a partir delas, outros tipos de interferências com os sistemas naturais para exploração dos recursos naturais são estabelecidos, como desmatamentos e utilização do solo para pastagem e atividades agrícolas ou formação de povoados. Além disto, reitera-se o potencial das estradas enquanto variável modificadora do funcionamento da paisagem, a partir dos processos superficiais das vertentes em bacias hidrográficas.

A abordagem a partir das Unidades Morfopedológicas (UMFs) expressa a integração entre elementos fundamentais para o entendimento de alguns componentes da paisagem (litologia-solo-relevo) e estabelece de forma prática uma unidade ideal à busca de padrões de respostas hidrossedimentológicas, pois, estas unidades de análise associadas ao modelo de simulação de chuvas SCPA permitem uma visão integrativa da paisagem, partindo da observação e quantificação dos processos em ocorrência. Esta abordagem ampara a hipótese da tese de que estradas abertas em diferentes UMF, onde também se estabelecem distintos usos e coberturas da terra, podem resultar em diferentes padrões de respostas hidrossedimentológicas na superfície das estradas. Há o entendimento de que em determinadas UMF, a abertura das estradas deve ter ações mitigadoras cuidadosamente previstas, porque podem ser mais susceptíveis à ocorrência de processos erosivos que intensificam o direcionamento de sedimento para o canal de drenagem mais próximo.

Há uma lacuna de estudos na Amazônia direcionados para os efeitos das unidades naturais que consideram a interação solo-relevo-geologia na produção de água e sedimento de superfície de estradas não pavimentadas. É possível que a interação dada entre estes ambientes naturais possa ser traduzida em diferentes capacidades de escoamento, produção de sedimentos

e conectividade da estrada com o canal hídrico. O desafio está justamente em compreender como se dá a dinâmica de fluxos hidrogeomorfológicos estabelecidos nas superfícies das estradas não pavimentadas para a região, dada a lacuna de levantamento de dados que observam o processo em ocorrência, como preconiza a análise fisiológica de processos de superfície da paisagem na Amazônia. A investigação de Thomaz, Nunes e Watanabe (2020) destacou a lacuna ainda existente em estudos direcionados aos impactos das estradas neste ambiente.

A partir do modelo de simulação de chuvas portátil por aspersão (SCPA), busca-se analisar a influência dos diferentes tipos de uso e cobertura da terra que, associada às diferentes UMFs mapeadas na BHARG, pode mostrar padrões de respostas de escoamento superficial e produção de sedimentos das estradas, visto que são as atividades antrópicas que impulsionaram e que regulam a abertura e manutenção das estradas das quais derivam estes padrões. Portanto, o objetivo principal é identificar o efeito das distintas Unidades Morfopedológicas (UMF) com diferentes tipos de uso da terra estabelecidos na dinâmica hidrossedimentológica da superfície de estradas não pavimentadas de livre acesso.

Para isto, os objetivos específicos foram: 1- hierarquizar as tipologias de estradas presentes nas diferentes unidades morfopedológicas da BHARG e comparar as respostas de produção de sedimentos e escoamento superficial estabelecidas; 2 - analisar o efeito das características físicas das parcelas hidroerosivas ao coeficiente de escoamento superficial e às taxas de produção de sedimento apresentadas; 3 - correlacionar os processos de degradação das estradas às respostas apresentadas na aplicação do método SCPA; 4 - estabelecer a efetividade de aplicação do método SCPA para análise do padrão de produção de sedimentos das estradas da bacia em ambiente amazônico.

Esta tese está organizada em cinco capítulos, além desta introdução. O segundo capítulo descreve os elementos conceituais que amparam a discussão sobre a erosão em estradas não pavimentadas, sob a perspectiva da ecologia da paisagem. O terceiro capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados, por exemplo para execução dos experimentos SCPA, hierarquização das estradas e levantamento de características físicas e hidrológicas da bacia hidrográfica. O quarto capítulo, com resultados descritivos, mostra o mapeamento das UMF e a setorização da BHARG, baseados especialmente nos padrões de uso e cobertura estabelecidos; a hierarquização das estradas com base na matriz construída a partir do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem ([DNER] 1999) e Goodritch-Stuart (2012); o direcionamento dos locais onde efetivamente foram realizados os experimentos. O quinto capítulo mostra os resultados a nível processual dos experimentos realizados em quatro trechos estabelecidos nos setores focais da pesquisa. A partir dos dados obtidos, buscou-se apresentar

o comportamento de processos hidroerosivos do início ao fim do experimento, considerando dinâmicas hidrológicas que ocorreram nas parcelas abertas, a partir da quantificação da produção de escoamento e de sedimento em 25 minutos de experimento. Por último, no sexto capítulo descreve-se as conclusões da pesquisa, as tendências observadas com a aplicação do método SCPA nas estradas das diferentes UMF estabelecidas para a BHARG, bem como as lacunas que podem ser supridas por meio de próximas pesquisas.

2 ELEMENTOS CONCEITUAIS EM HIDROGEOMORFOLOGIA

2.1 PAISAGEM, SOLO E HIDROGEOMORFOLOGIA

É amplamente reconhecida a importância do conceito de paisagem na própria construção da Geografia, enquanto ciência. Entretanto, são necessários esclarecimentos e definições do caminho teórico que se quer percorrer ao se buscar compreender na Geografia, sob a ótica integrativa da paisagem, os processos dinâmicos morfológicos superficiais atuais, fundamentados pela hidrogeomorfologia em ambiente pedológico.

Por algum tempo o conceito de paisagem foi associado apenas a elementos visíveis de uma concepção que surgiu com Alexander Von Humboldt no século XVIII, quando a Geografia ainda se firmava como ciência (Moraes, 1998; Moura-Fé, 2019). Porém, já se reconhece a evolução do conceito de paisagem como categoria de análise de processos geográficos (Corrêa; Rosendahl; Marafon, 1999; Maximiano, 2004; Moura; Simões, 2010). O destaque é dado para o entendimento da paisagem em estudos ligados à análise fisiológica que se preocupa em analisar seu funcionamento para além das formas apresentadas (Ab'Saber, 1969; Corrêa; Rosendahl; Marafon, 1998; Rodríguez, 1984) e estudar o processo em ocorrência, a partir da análise de fatores condicionais, para explicar os fenômenos ali estabelecidos (Zonneveld, 1989).

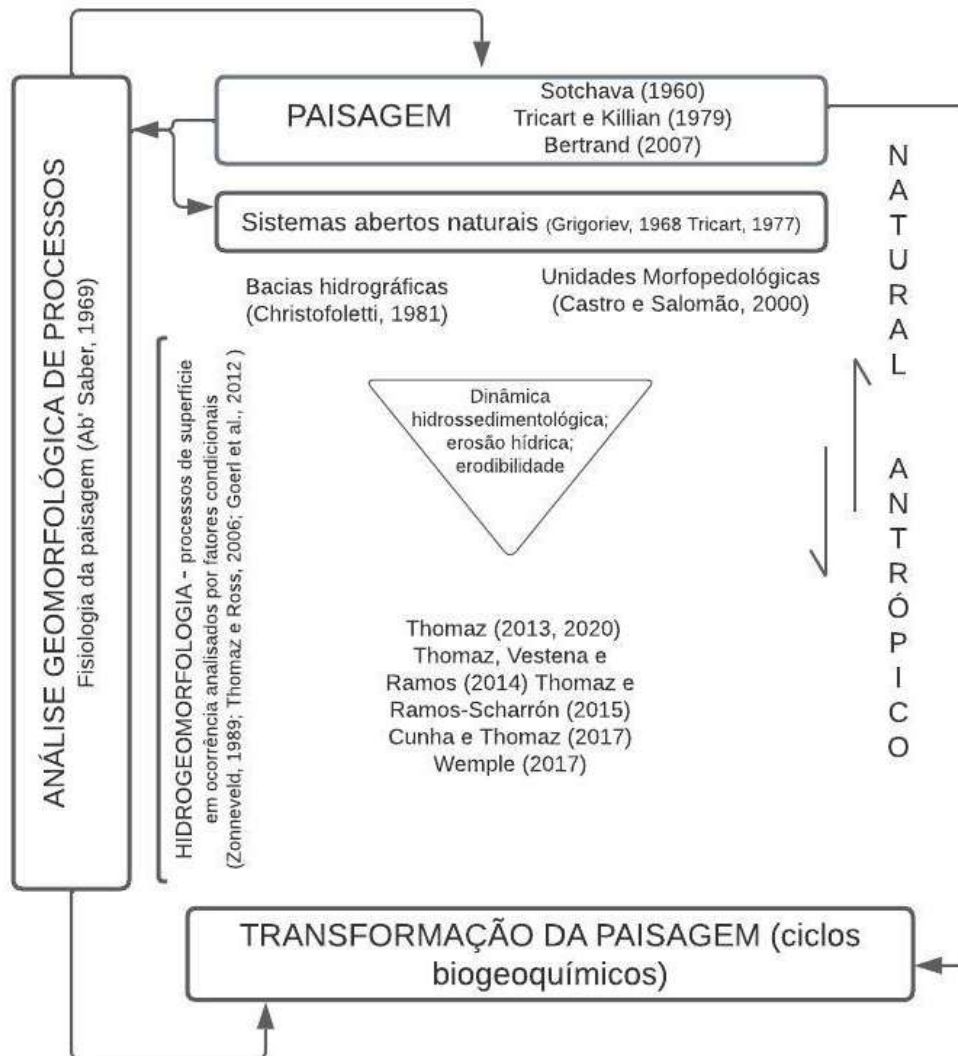
Assim, destaca-se a evolução do termo ligado aos elementos naturais pelos russos, usando o termo alemão *Landschaft*, quando surgiu o desenvolvimento da ciência da paisagem já entre o final do século XIX e início do século XX na Rússia. Momento em que a paisagem passou a ser atrelada a fenômenos/processos “inacessíveis à visão do homem” e que precisavam ser investigados. A paisagem passou a ter um novo olhar, não é composta de elementos estáticos, fixos visualmente, mas formados por componentes interdependentes que são vinculados por processos da natureza (Frolova, 2007). Tornou-se então um objeto visto por uma ótica sistêmica que reflete a interação de fluxos laterais de matéria e energia, e o homem neste contexto é parte integrante que também está inserido na paisagem (Ab'Saber, 1969; Christofolletti, 1999).

A geomorfologia tripartite de Ab'Saber (1969), dentro da perspectiva de análise das bases geomorfológicas, é uma perspectiva interessante para tratar de processos morfodinâmicos, responsáveis pela modelagem das formas superficiais, associados às transformações temporais do relevo na paisagem, enfatizado em seu terceiro nível, que especifica a Fisiologia da paisagem. Esta perspectiva trata dos processos morfodinâmicos e

pedogênicos atuais, dando conta de processos erosivos como resultados da funcionalidade atual da paisagem, atrelada à sua estrutura em sistemas de relações internas verticais e horizontais (Rodríguez, 1984).

A análise é pautada no entendimento de que o funcionamento da paisagem está sujeito às leis físicas, químicas e biológicas gerais. Mas, a sua função é mais do que a associação de processos físico-mecânicos. O movimento mecânico estabelecido durante um escoamento superficial, por exemplo, não é apenas o entendimento do escoamento como movimento da água sob a influência da lei da gravidade. O sentido geográfico do escoamento liga simultaneamente leis da mecânica, processos hidrológicos, geomorfológicos, geoquímicos, além de geográficos espaciais. O olhar geomorfológico neste contexto da paisagem traz a relação específica de processos hidroerosivos tratados na tese, a partir de bases hidrogeomorfológicas que explicam os processos superficiais que ocorrem no solo a partir da ação mecânica da água (Figura 1) (Rodríguez, 1984).

Figura 1 – Esboço teórico ilustrando o caminho percorrido na literatura para entendimento dos processos físicos que ocorrem em superfície



Fonte: Organizado pela autora.

Arelados à evolução do conceito de Paisagem, especialmente sob a perspectiva desta pesquisa, estão os fundamentos da pedologia (Grigoriev, 1968). Dokutchaev, importante contribuinte para a formulação do conceito e líder das expedições científicas na época, considerava o solo como resultado da ciência da Paisagem, ele é considerado como o fundador da Nova Escola Geográfica Soviética (Moura; Simões, 2010). Anterior ao surgimento da pedologia, dificilmente era dado ao solo a responsabilidade pelas dinâmicas de fluxos hídricos que geravam denudações. Dokutchaev, por exemplo, subordina a origem do solo à ação do relevo, mas ainda não era associada a evolução do relevo à natureza dos solos. O solo era visto apenas como manto de alteração de uma crosta em evolução (Espindola, 2010). Porém, numa perspectiva dinâmica, os elementos morfopedológicos são destacados como componentes

indissociáveis na gênese das paisagens (Queiroz Neto, 2001, 2012). No processo de evolução da paisagem, que ocorre a partir das formações superficiais, os elementos solo (pedogênese) e relevo (morfogênese) envolvidos são seus objetos de estudo. A pedogênese dá a possibilidade de geração de formas ao modelado e se ampara no conceito de solos enquanto “sistemas de transformação” de Millot (1977). Espindola (2010, p. 68) argumenta que “solos e relevo agem solidariamente, o tempo todo, na modificação das paisagens terrestres, cujo passado no mundo intertropical é difícil de ser resgatado sem envolver uma grande dose de subjetividade”. Solo e relevo são indissociáveis e resultados do material de origem, do clima, de organismos e do tempo (Espindola, 2010; Jenny, 1994, 2012).

O relevo pode interferir na formação e origem dos solos, bem como os solos podem interferir na produção de formas de relevo. Há variação de solos em diferentes declives, isto pode ocorrer em razão da percolação da água da chuva, por ação gravitacional; relevos íngremes e planos são associados a determinados tipos de solos, justamente porque condicionam fluxos que atuam em processos geoquímicos, potencializando o intemperismo químico ou constante abrasão por meio de processos erosivos lineares, o que limita ações de processos geoquímicos (hidrólise e dissolução) (Queiroz Neto, 2001; Rubira *et al.*, 2019). Nos estudos de Vitte (1998) e Coltrinari (2011) verificou-se novos modelos evolutivos da paisagem por meio da observação de alguns testemunhos dos processos de alteração e pedogênese, tais como: rebaixamento progressivo de interflúvios, exportação geoquímica com perda de material, presença de feições pseudocárticas. Basicamente indicaram evolução geoquímica do modelado e condições tropicais úmidas ao menos desde o Terciário Superior (Vilella; Ross; Manfredini, 2015). O solo é tido como o provedor de sedimentos, capaz de resistir de forma diferente às forças desagregadoras impostas sobre ele devido suas propriedades intrínsecas (Thomaz, 2020; Thomaz; Pereira, 2015).

O estudo da paisagem no contexto da pesquisa aqui desenvolvida é voltado para uma análise geomorfológica e hidrológica com fundamentos da pedologia, que juntos estabelecem uma tríade para o entendimento de processos superficiais em ocorrência que modelam e reconfiguram a estrutura da paisagem. De um lado, a paisagem fornecendo uma visão holística dos elementos naturais que compõem o mundo físico; e de outro lado, a hidrogeomorfologia focando na dinâmica de fluxos, das formas de relevo como componente fundamental, indissociável do pacote pedológico para explicar os processos em ocorrência (August; Iverson; Nugranad, 2002; Zonneveld, 1989). A hidrogeomorfologia vem para explicar como os processos hidrológicos podem contribuir para a formação e evolução da paisagem e como as

formas de relevo condicionam ou controlam os processos hidrológicos em diferentes escalas temporais e espaciais (Goerl; Kobiyama; Santos, 2012).

Neste entendimento da paisagem associada e vinculada a processos da natureza, o estudo da sua estrutura e sua função através de fundamentos hidrogeomorfológicos é uma via interessante para o entendimento dos fenômenos erosivos atuais de superfície. Estrutura que se refere ao conjunto de relações entre os componentes da paisagem, que estabelece os padrões; e sua função que se refere aos processos estabelecidos entre a troca e intercâmbio de matéria e energia no sistema. E desta forma estabelece a relação entre padrão e processos que regulamentam a reconfiguração das paisagens. Uma vez alterado algum componente da sua estrutura, a função tende a também se modificar, resultando em sua reconfiguração (Ab'Saber, 1969; Christofolletti, 1999; Rodríguez, 1984) (Figura 1).

A expressão prática dos padrões estabelecidos, por meio da relação e combinação dos elementos físicos, biológicos e antrópicos de forma integrada e indissociável, se dá na forma de processos hidrogeomorfológicos que estabelecem fluxos físico-químicos, presentes no seu funcionamento, que remodelam a paisagem em contínua e perpétua evolução (Armand, 1949; Bertrand, 2007; Trueba, 2012; Vitte; Niemann, 2009). Para a análise destes fluxos estabelecidos são definidas unidades de análise no contexto dos sistemas abertos, onde há troca e intercâmbio de matéria e energia em graus de escalas diferentes (Figura 1).

Em um nível mais abrangente, tomamos como unidade sistêmica de análise a bacia hidrográfica. Neste sistema há interação de fluxos a partir da entrada de energia por meio das águas das chuvas, que interage com variáveis do processo erosivo, e todo escoamento formado tende a fluir para um único ponto que é o exutório da bacia, estabelecendo a saída de energia. Porém, dentro desta perspectiva, outros subsistemas se formam e permitem a análise de processos erosivos em diferentes escalas de abordagem. Ao tomar as bacias hidrográficas como base para o estudo destes processos, entendemos este sistema como resultado destas dinâmicas que se refletem na disponibilidade de qualidade e quantidade de recursos hídricos disponíveis nas bacias (Christofolletti, 1988, 1999) (Figura 1).

No âmbito das bacias hidrográficas considera-se ainda uma outra unidade de paisagem de maior detalhamento que são as unidades morfopedológicas. A interação dinâmica integrativa entre estes elementos do meio físico se dá de tal forma que delimitam naturalmente unidades de estrutura semelhante, frutos da evolução fisiológica da paisagem, que diz respeito ao seu funcionamento e não apenas sob a forma da paisagem (Tricart, 1977; Tricart; Killian, 1979; Vitte, 2007). É uma abordagem integrada que normalmente permite maior conhecimento da evolução da paisagem, especialmente no meio tropical úmido, em que as superfícies são

expostas continuamente às alterações mecânicas e/ou geoquímicas em superfície ao longo do tempo geológico (Castro; Salomão, 2000; Vilella; Ross; Manfredini, 2015). São unidades que se estabelecem a partir da interação dinâmica de elementos, como solo, relevo e geologia; unidades ideais para a observação do processo erosivo ocorrente, uma vez que a interação destes elementos constitui unidades homogêneas que podem facilitar o controle de variáveis definidoras do fenômeno analisado. Os compartimentos morfopedológicos são entendidos como unidades têmporo-espaciais homogêneas e intrínsecas do meio físico (Lohmann; Santos, 2005).

Nas unidades morfopedológicas os processos hidrogeomorfológicos de produção de escoamento superficial e sedimento em superfície podem ser analisados ainda sob a perspectiva de outra unidade de análise de maior detalhamento que são as parcelas hidroerosivas abertas. Elas formam microssistemas pedogeomorfológicos pontuais que podem expressar a troca de energia e matéria que se processa em condições de eventos de chuva simulados (Ramos-Scharrón; Thomaz, 2020; Thomaz; Ramos-Scharrón, 2015).

A reconfiguração da paisagem se dá a partir do momento em que sua estrutura é alterada. Neste sentido, qualquer alteração antrópica que se dê sob o meio natural resulta em alteração da sua estrutura e, por conseguinte, do seu funcionamento. Na Figura 1 destacamos o esboço teórico demonstrando os caminhos que devem ser percorridos para se analisar os processos atuais que ocorrem em superfície sob a ótica da paisagem na geografia física, considerando como fator fundamental de alteração antrópica a abertura de estradas não pavimentadas que apresentam este potencial para reconfigurar o funcionamento da paisagem após sua implementação.

A análise desta reconfiguração pode ser realizada a partir da observação do fenômeno erosivo em ocorrência sob as parcelas hidroerosivas abertas, amparadas em análises de fatores condicionais descritos por Zonneveld (1989) que argumenta sobre a visão holística no conceito associado à ecologia da paisagem e descreve sobre os chamados “fatores operacionais” como o entendimento puro dos processos, como eles realmente acontecem. Todavia, em virtude da inviabilidade do uso em pesquisas de campo, os pesquisadores incluem nas suas análises a observação do funcionamento da paisagem a partir de fatores condicionais. Em um exemplo, o autor descreve que a energia exercida pela água em certas partículas do solo pode ser condicionada pelo fator: quantidade total de água e sua velocidade, que são controladas pela precipitação real, inclinação do terreno e certos fatores de estabilidade no solo. Partindo deste exemplo, ele demonstra que o verdadeiro fator operacional que explica puramente o processo da energia da água sobre a partícula do solo é difícil de medir diretamente. Os fatores

condicionais, tais como textura do solo, complexo de absorção, declive e muitas vezes a cobertura, podem ser medidos mais facilmente, por isto são usados para explicar processos de forma indireta. De fato, a maioria dos estudos do ambiente é feito medindo fatores condicionais em vez de fatores operacionais e neste estudo seguiremos este princípio para o estudo da fisiologia da paisagem baseada nos fatores condicionais e posicionais, para explicar os fenômenos e processos ligados à dinâmica da hidroerosividade em parcelas.

Desta forma, considerando a relação solo-relevo na formação e funcionamento da paisagem e a busca por entender processos dinâmicos atuais sob a ótica da fisiologia da paisagem, fundamenta-se a pesquisa em graus escalares de análise: Unidades de Bacias hidrográficas, Unidades morfopedológicas (UMF), que se diferenciam principalmente em termos de níveis de análise, sendo as UMF analisadas a partir das parcelas hidroerosivas abertas, com maior grau de detalhamento, que estão inseridas no contexto da bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica, como um sistema aberto, estabelece trocas a partir da confluência de elementos hidrodinâmicos e as unidades morfopedológicas, como resultado das interações dadas entre os elementos da paisagem em grau de maior detalhamento e que também é o resultado prático do intercâmbio de matéria e energia.

Ao procurar observar processos atuais, são as UMF representativas da análise sistemática da paisagem fundamentando a erosão de solos em efetivas partes homogêneas da paisagem, e nelas se estabelece a dinâmica de fluxos dentro e entre elas. Este sistema busca uma certa autorregulação, é um sistema numa espécie de equilíbrio (Zonneveld, 1989).

2.2 PROCESSOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS

Os processos que ocorrem na superfície dos solos representam a dinâmica do manto de alteração ao longo do tempo. Esta alteração ocorre nos horizontes da superfície dos solos que estão sendo constantemente lavados e erodidos pela ação mecânica que ocorre em superfície (Milott, 1977). Nesta perspectiva, a ação mecânica mais importante a ser analisada é a erosão de solo, ela tem sido considerada um processo que se estabelece por meio da aplicação de força instituída a partir da energia de um agente ativo, em que a água é o mais importante, sobre a resistência representada pelo agente passivo do processo, que é o solo e seus elementos constituintes que o tornam mais ou menos resistente à força aplicada (Crepani; Medeiros; Palmeira, 2004; Guerra; Silva; Botelho, 2009).

A interação entre estes agentes (ativos e passivos) possibilita o estabelecimento do processo erosivo em fases: desprendimento, arraste e deposição de sedimentos que variam em

intensidade e forma com que acontecem, a depender desta interação (Fendrich *et al.*, 1997; Silva; Schulz; Camargo, 2007).

Neste caso, o agente ativo diz respeito às águas das chuvas que estabelecem a erosão hídrica por meio da disponibilidade de energia mecânica (cinética e potencial). Não menos importante, destacam-se como agentes passivos ao processo o declive e rugosidade do terreno, seu grau de dissecação, o tipo de cobertura vegetal, o tipo de solo e material de origem assentado sobre o terreno. Todos estes elementos atuam em conjunto para o estabelecimento do processo hidroerosivo que pode se estabelecer em superfície e em subsuperfície.

Em superfície podem, por meio do escoamento superficial, apresentar feições laminares chamadas de erosão entre-ravinas, onde os principais fenômenos observados estão relacionados ao salpico e fluxo superficial difuso, ou feições lineares, que estabelecem processos de desprendimentos em maior intensidade, estabelecendo erosões em ravinas ou sulcos. Em subsuperfície, a partir de fenômenos associados ao fluxo insaturado, saturado de retorno ou subsuperficial profundo, observa-se feições erosivas relacionadas às voçorocas e túnel (Carvalho; Hernani, 2001; Guerra; Silva; Botelho, 2009; Thomaz, 2020).

A dinâmica do processo erosivo é complexa e segue padrões têmporo-espaciais. Alguns fenômenos são observados no início de um evento de chuva, enquanto outros só ocorrem quando o evento cessa. O salpico, por exemplo, vai ser mais intenso no início do evento quando o solo está seco e a desagregação ocorre principalmente pela ação da hidratação rápida dos agregados, ao formar o selamento superficial a taxa diminui gradativamente. Porém, processos como o salpico são muito efetivos em produzir e preparar sedimentos para serem transportados. Portanto, os processos envolvidos no fenômeno erosivo são diversos e um não mais importante que o outro, o que torna a erosão hídrica complexa e dinâmica, que envolve diversas variáveis controladoras (Ramos *et al.*, 2011; Thomaz, 2020; Viana; Fernandes Filho; Schaefer, 2004).

A erosão é o resultado da interação dinâmica de intercâmbio de fluxos de matéria e energia em sistemas abertos naturais; a depender dos elementos que formam a paisagem, dos tipos de variáveis que a compõem, os fluxos de matéria e energia podem ocorrer de forma diferente e produzir reflexos nos processos erosivos, também de forma diferenciada.

2.2.1 Interação antrópica por meio da Abertura de Estradas em sistemas naturais e processos superficiais ou erosão do solo

Além dos elementos naturais já compreendidos como fatores controladores do processo erosivo, a erosão pode ser intensificada com a interação do homem com os sistemas abertos estabelecidos nas bacias hidrográficas. Historicamente, a atuação antrópica nas paisagens naturais é resultado do uso dos recursos naturais, e particularmente na Amazônia percebe-se que o ambiente é vulnerável às modificações impostas na paisagem, pois, trata-se de uma região florestada que pauta seu desenvolvimento econômico na exploração de recursos naturais (August; Iverson; Nugranad, 2002; Fearnside, 2006). Nepstad, Stickler e Almeida (2006) afirmam que as principais causas de desmatamento na Amazônia estão associadas às demandas de carne bovina e produção de soja, e as taxas de desmatamento estão cada vez mais sensíveis à expansão econômica do planeta Terra. Fato que pode inclusive ser moderado por meio da intensificação das áreas agrícolas em vez da abertura de novas áreas (Garret *et al.*, 2018). Neste particular, Merten e Minella (2013) projetaram cenários que apontaram um aumento em até 20% de erosão do solo no Brasil como consequência da expansão agrícola, especialmente no bioma Amazônico.

A cobertura vegetal presente na área, composta predominantemente de Florestas Ombrófilas abertas e densas, constitui defesa natural do solo contra processos de erosão desencadeados por águas pluviais. Portanto, é lógico afirmar que o desmatamento pode acentuar o processo natural de erosão, visto que interfere não só na diminuição da evapotranspiração, mas também no aumento do escoamento superficial e atmosférico já que altera a precipitação regional (Cassol; Lima, 2003; Coe *et al.*, 2009).

O desenvolvimento econômico pautado no uso e exploração dos recursos naturais, observados para a região Amazônica, estimula a abertura das estradas que dão acesso às áreas ainda não ocupadas, além de se estabelecer como principal via de deslocamento, funcionando como ligação entre o produtor do campo e os centros consumidores (Faiz *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2009). As estradas se estabelecem como um pré-requisito fundamental para a conversão das paisagens naturais em efetivas atividades antrópicas, porque são elas que oferecem acesso aos recursos naturais oferecidos pela floresta e pelo sistema pedológico (August; Iverson; Nugranad, 2002).

Os fluxos de produção do agronegócio se refletem na Amazônia por meio da retirada da cobertura florestal e a abertura das estradas, por exemplo. De maneira geral, estas ações

antrópicas causam mudanças no uso da terra que, além de elevar emissões de carbono e causar perda de biodiversidade (Achard *et al.*, 2014; Baccini *et al.*, 2012; De Sy *et al.*, 2015), podem interromper fluxos dos ciclos hidrológicos em bacias hidrográficas, cujo resultado prático é a ocorrência de processos erosivos e subsequentemente alteração da qualidade e quantidade de água disponível nas bacias hidrográficas (Cunha; Thomaz, 2017; Thomaz; Peretto, 2016; Thomaz; Vestena; Ramos Scharrón, 2012, 2014; Wemple *et al.*, 2018).

No contexto das bacias hidrográficas, os fluxos hidrológicos que se estabelecem podem ser interrompidos devido a alguns fatores antrópicos de interferência, que estão associados na maioria dos casos à abertura de estradas (Cunha; Thomaz, 2017; Kerniski; Cunha, 2017; Wemple *et al.*, 2018). Elas acabam modificando a intensidade e a forma com que a água e o sedimento são direcionados para o canal de drenagem e atuam na dinâmica hidrossedimentológica, e por isso de reconfiguração das paisagens.

A abertura de estradas pode interferir na dinâmica natural da paisagem, principalmente em se tratando de bacias hidrográficas que estabelecem (de forma prática) a dinâmica hidrossedimentológica onde há a entrada de energia através das águas das chuvas, de modo a promover os escoamentos que convergem para um único ponto de saída que é o exutório. Assim, as estradas podem modificar os tipos de fluxos que ocorrem em bacias, muitas vezes transformando fluxos superficiais em subsuperficiais (Cunha; Oliveira; Thomaz, 2014; Cunha; Thomaz, 2017). Na interrupção do fluxo de escoamento hídrico formado na vertente, ela desvia-o de forma mais rápida para o canal de drenagem e acaba produzindo uma carga de sedimentos desproporcional à pequena área que as estradas normalmente ocupam nas bacias, quando comparada a outros tipos de uso da terra (Ziegler *et al.*, 2006; Wemple *et al.*, 2018). Há o entendimento de que o escoamento superficial e a erosão hídrica são processos potencializados a partir da abertura das estradas nas vertentes que traçam ligação direta com os cursos de drenagem.

O estudo do papel das estradas como o resultado da interação antropogênica nas paisagens das bacias hidrográficas tem importância em face do potencial que elas apresentam para reconfigurar este ambiente sistêmico, especialmente em locais do globo terrestre com maiores instabilidades geológicas e geomorfológicas na instalação das estradas, como em regiões costeiras com entrega de sedimentos ao mar, onde os estudos variam desde propostas de índices de suscetibilidade para avaliar as estradas ameaçadas pela erosão costeira (Brandes *et al.*, 2021), até mesmo análise de escoamento e de produção de sedimentos de estradas por meio de experimentos de simulação de chuva (Ramos-Scharrón, 2021). Se destacam também estudos de erosão das estradas em locais susceptíveis à erosão devido às suas características

pedogeomorfológicas (Cérda, 2007; Foltz *et al.*, 2009), e de maneira geral observa-se que os eventos pluviométricos e a energia disponibilizada pelo fluxo formado na estrada são as principais fontes de energia que causam a erosão superficial das estradas em grande parte das áreas (Fu *et al.*, 2010).

As áreas montanhosas na China (por exemplo) têm sido objeto dos mais diversos estudos envolvendo erosão das estradas, justificados não apenas pelas condições do relevo muito movimentado, que são por si ambientes propícios para o aumento da velocidade de fluxos de escoamento, mas também devido aos eventos pluviométricos que têm se acentuado na região. Nestes casos, estradas não pavimentadas criam caminhos de fluxos de água muito importantes durante os eventos intensos de chuva (Wang *et al.*, 2021).

Os estudos normalmente procuram investigar os fatores que influenciam a erosão das estradas e a intensidade com que eles atuam, tanto em estradas não pavimentadas (Li *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2019a) quanto em estradas com pavimento impermeabilizante que mudam as características hidrológicas da superfície, fornecendo maior fluxo de água para desprendimento de sedimento no solo das laterais das estradas (Yu *et al.*, 2021).

Normalmente, as estradas não pavimentadas ocupam percentual muito menor da área de bacias hidrográficas, se comparadas com outras interferências antrópicas atuantes neste sistema natural, como estabelecimento de pastagens e áreas agricultáveis. Porém, a contribuição de sedimento das estradas tem sido apontada como a principal fonte de sedimentos em vários trabalhos já realizados (Dunne; Dietrich, 1982), sendo que normalmente em estradas principais, onde o tráfego é maior, a erosão é mais severa do que em estradas secundárias e trilhas, visto que a erosão mostra-se intimamente relacionada à intensidade do tráfego (Li *et al.*, 2021; Ramos-Sharrón, 2021; Zhang *et al.*, 2019a). Alguns fatores aumentam o potencial de fornecimento de sedimentos pelas estradas, como a presença de altos teores de silte e de areia fina e o grau de inclinação das estradas mais íngremes tendem a aumentar as taxas de erosão (Ramos-Sharrón; MacDonald, 2005; 2007a).

Estudos como o de Cao *et al.* (2020) e Lu *et al.* (2017) usam a tecnologia de varredura a laser terrestre para facilitar o entendimento detalhado da perda de solo ao longo das estradas. A varredura a laser é capaz de detectar e quantificar a erosão e a redistribuição de sedimentos em bacias hidrográficas especialmente em estradas, além de identificar volumes de escoamentos formados e os fatores de influência. Por meio dela é possível descrever a morfologia de sulcos formados, além de possibilitar medições de erosão em sulcos (Lu *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019b). Nestes estudos, a erosão esteve intimamente relacionada ao comprimento, declive e fluxo interceptado, e as perdas de solo aumentaram com a distância do

fluxo, sendo que alcançaram o pico na parte inferior do segmento da estrada com um perfil côncavo (Lu *et al.*, 2017).

A erosão na superfície das estradas pode ainda ser controlada pela área da encosta superior, porque havendo a interceptação do fluxo de escoamento o seu potencial de desprendimento aumenta (MacDonald; Coe, 2007). Alguns estudos mostram que pode haver a interferência da geologia e solos, além de características geomorfológicas nas taxas de erosão do talude das estradas (Collison; Anderson, 1996; Megahan *et al.*, 2001).

Embora muitos estudos tenham abordado as questões erosivas nas estradas – inclusive enfatizando a sua conectividade com os cursos hídricos em bacias (Cunha; Thomaz, 2017; Kerniski; Cunha, 2017) e destacando a função das estradas não pavimentadas na alteração das taxas de escoamento e erosão em cenários tropicais (Ramos-Scharrón; MacDonald, 2007b) — algumas questões ainda são mantidas sem respostas no que se refere às diferenças fundamentais sobre o comportamento da abertura de estradas não pavimentadas em diferentes unidades de paisagem, como as UMF, e/ou considerando a dinâmica de uso e cobertura da terra estabelecidos na área analisada.

Há uma lacuna de estudos na Amazônia direcionados para os efeitos das unidades naturais que consideram a interação solo-relevo-geologia na produção de água e sedimento de superfície de estradas não pavimentadas. É possível que a interação dada entre estes ambientes naturais possa ser traduzida em diferentes capacidades de escoamento, produção de sedimentos e conectividade da estrada com o canal hídrico. O desafio está justamente em compreender como se dá a dinâmica de fluxos hidrogeomorfológicos estabelecidos nas superfícies das estradas não pavimentadas para a região, dada a lacuna de levantamento de dados que observam o processo em ocorrência, como preconiza a análise fisiológica de processos de superfície da paisagem na Amazônia. A investigação de Thomaz, Nunes e Watanabe (2020) mostrou os efeitos da conversão de florestas tropicais no solo da Amazônia brasileira. Eles notaram que a degradação da estrutura do solo e o aumento do fluxo superficial são os efeitos prejudiciais mais comumente documentados na literatura em decorrência da conversão de florestas em pastagens. Além disto, destacaram a lacuna ainda existente em estudos direcionados aos impactos das estradas neste ambiente.

2.3 USO DE SIMULADORES DE CHUVA NO ESTUDO DE PROCESSO EROSIVO

Estudos da fisiologia da paisagem são modalidades de pesquisas voltadas para análise de processos dinâmicos em ocorrência que modificam a paisagem. Neste sentido, pressupõe recursos técnicos, equipamentos delicados, análises demoradas e observações de processos em plena atividade (Ab'Saber, 1969). O uso dos simuladores surge como uma alternativa para o uso de técnicas e metodologias que possibilitam compreender as conexões entre os fenômenos, explicando-os de maneira integrada, em unidades de parcelas-hidroerosivas.

Nas pesquisas atuais voltadas para o estudo de erosão têm sido observadas várias formas de modelos experimentais para um planejamento estratégico de obtenção de dados direcionados ao estudo de erosão hídrica. Em geral buscam refletir sobre o fenômeno por meio da simulação do processo para observá-lo em ocorrência ou por meio do monitoramento ao longo do tempo. Thomaz (2020) divide as formas de estudo do processo erosivo em momentos distintos: 1. por meio da mensuração, 2. do monitoramento, 3. da experimentação, e da 4. modelagem. Nesta perspectiva, os experimentos ditos verdadeiros, que aumentam o detalhamento do estudo de erosão e o grau de falseamento da hipótese, em erosão de solo, são conduzidos com o uso de simuladores de chuva (Bezerra; Cantalice, 2006; Freitas *et al.*, 2008; Thomaz, 2020).

Além de controlar algumas variáveis como tempo, intensidade e volume, a chuva simulada torna possível observar a sensibilidade de outras variáveis relacionadas à erodibilidade dos solos, visto que mantém constante a variável chuva, interveniente do processo hidroerosivo. Os simuladores de chuva têm sido considerados uma ferramenta útil para analisar os processos de erosão do solo, especialmente direcionados à erosão em estradas ou intensificada por elas em todo o mundo (Cérda, 2007; Comino *et al.*, 2016; Foltz *et al.*, 2009; Ramos-Sharrón, 2021; Zhang *et al.*, 2019b).

Tais experimentos surgiram na década de 1930 com o intuito de reproduzir o contato da água com a superfície do solo, mas muitos deles na época sequer se aproximavam de eventos de chuva propriamente ditos. Conforme avanço do conhecimento das características das chuvas, os simuladores foram se adequando para reproduzir o evento de chuva o mais próximo possível da realidade, seja com braços rotativos, do tipo pendulares ou com bicos aspersores (Cérda *et al.*, 1997; Thomaz, 2017). Conforme os simuladores se ajustavam, também havia a necessidade de torná-los menores e mais práticos para atender demandas dos estudos em áreas mais distantes ou facilitar as atividades de estudos voltados a uma ampla variedade de ambientes geomórficos (Confessor; Rodrigues, 2018). O simulador ideal deve ser barato para ser construído e operado, de fácil instalação e transporte (Meyer, 1994).

O uso de simuladores se destaca para o estudo de erosão pelo potencial de representar o evento pluviométrico natural em cerca de 85% (Thomaz, 2020), além de tornar mais prática a

observação do processo de desprendimento e arraste de sedimento do solo no momento de ocorrência do processo. Em geral, os simuladores utilizados são do tipo fixo e portátil. O fixo simula chuvas em ambiente de laboratório com uso de amostras indeformadas ou deformadas coletadas, de acordo com o objetivo da pesquisa (Ekwue; Harrilal, 2010; Thomaz; Pereira, 2017). O portátil simula a chuva *in loco* sobre o solo em ambientes que se deseja observar o processo de desprendimento ocasionado pela chuva, normalmente em ambientes alterados por intervenção antrópica. Os simuladores também são usados para observação de infiltrabilidade de água no solo — característica muito importante para o contexto de escoamento superficial, a este tipo de simuladores dá-se o nome de Infiltrômetro de aspersão (Panachuki *et al.*, 2016) — e para cálculo de perda de solo e escoamento superficial obtidos com padrões de precipitação customizados simulados pelo InfiAsper como em Carvalho *et al.* (2022).

O uso de simuladores tem sido aplicado a diversos contextos nas pesquisas atuais em todo o mundo, desde estudos para observar os impactos das trilhas de veículos no escoamento, erosão e entrega de sedimentos para regiões costeiras (Ramos-Scharrón, 2021), como em regiões tropicais para observação das interações e efeitos das cinzas pós-fogo nos processos hidroerosivos (Thomaz, 2017) o aumento no uso dos simuladores se deram significativamente a partir dos anos 2000 (Luz *et al.*, 2023).

Ao propor a utilização de um simulador de chuvas para estudo de erosão de solos, alguns pontos cruciais devem ser considerados. Muitos simuladores usados no Brasil apresentam problemas de cunho metodológico para aproximação das chuvas simuladas às chuvas naturais. Por exemplo, um simulador projetado para análise de infiltração e escoamento superficial que projeta uma chuva de intensidade muito alta em relação às precipitações observadas naturalmente no Brasil, mais de 247 mm h^{-1} , e que não apresenta mensuração da distribuição uniforme de chuvas na área de molhamento, ou controle do tamanho das gotas (Goetten; Goetten, 2019).

Atualmente pesquisas se propõem a encontrar a melhor forma de representar o evento natural em forma de experimento, como as recomendações da pesquisa de Dunkerley (2021) de se cogitar reproduzir nas simulações as variações de intensidade de chuva que ocorrem durante o evento natural, já que no evento simulado as intensidades pluviométricas são constantes, mas naturalmente variam no próprio evento. A chuva de intensidade constante usada nos experimentos de simulação de chuva não possui os tipos de variações de intensidade rápidas vistas na chuva natural, disto podem derivar taxas de escoamento mais baixas e maiores proporções de infiltração do que quando as variações de intensidade estão presentes.

Um simulador com braços rotativos do tipo Swanson foi muito utilizado no Brasil (Bertol *et al.*, 2011; Gebler *et al.*, 2011; Levien; Van Lier; Alves, 2000; Silva *et al.*, 2005), porém, este simulador apresentava alguns problemas estruturais como o excesso de peso e a necessidade de um motor a gasolina usado para o movimento dos braços. Neste sentido, Bertol, Bertol e Barbosa (2012) pensaram em um novo tipo de simulador denominado “Tipo empuxo” que guardava características semelhantes ao Swanson, mas prometia minimizar estes principais problemas estruturais que este apresentava. Os autores caracterizaram o simulador do tipo empuxo como mais leve, econômico, silencioso e de fácil manejo em relação ao anterior, de forma que a intensidade da chuva, inclusive, correlacionou-se linear e positivamente com a pressão de água do manômetro. Mesmo superando algumas condições da estrutura original, outros elementos precisavam ser contemplados, como o fato de que ainda assim a estrutura é pouco viável para manuseio do simulador em áreas rurais distantes e que necessitam de estratégias para execução do experimento em campo e que guarde condições mais fidedignas do diâmetro de gotas e distribuição, velocidade terminal das chuvas ocorridas no Brasil (Bertol; Bertol; Barbosa, 2012).

O simulador precisa seguir algumas recomendações para que seja considerado satisfatório no que diz respeito à simulação das chuvas próximas às naturais. Segundo Sobrinho, Ferreira e Pruski (2002), é necessário que ele: 1. apresente relação entre a energia cinética da precipitação simulada e aquela da chuva natural acima de 75% (Meyer; Mccune, 1979); 2. aplique água de modo contínuo na parcela experimental, ou no mínimo execute duas aplicações por segundo compondo uma aplicação não intermitente (Morin *et al.*, 1967); 3. permita o uso de parcela experimental com área superior a 0,50 m², caracterizada como parcela alvo de precipitação, pois, experimentos cuja área útil é inferior a 0,50 m² estão sujeitos a resultados tendenciosos (Smith, 1976), ou seja, que sua área de molhamento seja grande o suficiente para verificar os processos hidrológicos e que apresente Coeficiente de uniformidade de Christiansen superior a 80% (Montebeller, 2001).

O tamanho das parcelas que recebem o chuveiramento de simulação das chuvas tem sido utilizado das formas mais variadas possíveis; a depender do tamanho e da largura destas parcelas, os tipos de erosão a serem observadas e medidas se diferenciam, por isto a escolha do tamanho e tipo de parcela se dá em função do processo que se deseja observar durante a simulação (Comino *et al.*, 2016; Guo *et al.*, 2015). As parcelas podem ser do tipo aberta ou fechada, que se diferenciam principalmente em função do reconhecimento da área de contribuição do escoamento superficial e do fluxo preferencial da água no local. As parcelas fechadas têm a área de contribuição delimitada previamente e normalmente com uso de placas

retangulares de aço ou alumínio que definem a área de observação do tamanho pré-regulado. Já as parcelas abertas são medidas após a ocorrência dos processos, observando-se o fluxo preferencial que a água do escoamento formou (Thomaz, 2020).

Os simuladores se adequam de acordo com a área geográfica através do uso de bico aspersor e pressão de água que possibilite geração de chuva semelhante às chuvas naturais ocorridas na região, observando sempre em que condições a chuva se dá de forma mais homogênea na área que o simulador consegue abranger (Cérda *et al.*, 1997).

Referente ao tamanho da gota, o parâmetro D que calcula o diâmetro da gota produzida é outro elemento da simulação de chuvas mensurado. Cérda *et al.* (1997) observaram que conforme se reduz a pressão de água e se aumenta a intensidade da chuva, o tamanho da gota de chuva também aumenta. Em geral, o bico trabalhado por eles mostrou diâmetros de gotas menores que 1mm. O parâmetro D proposto por Brandt (1989) mostra o diâmetro da gota em que metade da amostra de volume é composta de gotas maiores e metade de gotas menores. Os diâmetros médios das gotas de chuvas simuladas normalmente variam com a pressão do bico (Confessor; Silva; Rodrigues, 2021; Montebeller *et al.*, 2001; Santos *et al.*, 2020).

O cálculo da energia cinética da chuva média produzida é primordial para o entendimento de ocorrência do processo de escoamento que se formará com a chuva simulada nas parcelas hidroerosivas. Em Cérda *et al.* (1997), a energia cinética foi calculada a partir do tamanho da gota equivalente e da magnitude de frequência de intervalo de velocidade de queda da gota. Porém, muitos trabalhos desenvolvidos com simulação de chuvas não apresentam necessariamente o cálculo da energia cinética que é uma característica fundamental para demonstrar variáveis controladas (Alves Sobrinho *et al.*, 2003; Panachuki, 2007; Yu *et al.*, 2021).

A energia cinética das chuvas simuladas é em geral inferior à das naturais, justamente porque há uma baixa velocidade de queda por conta da baixa altura do bico, o que pode significar que as quedas não atingem a velocidade terminal (Cérda *et al.*, 1997; Epema; Riezebos, 1983), principalmente os simuladores projetados para estudar a capacidade de infiltração da água.

Em Cérda (2007) verifica-se mudanças no padrão de escoamento de acordo com a sazonalidade da execução do experimento. Durante o período mais seco, o escoamento atrasou de 5 para 25 minutos para iniciar, de modo que durante o inverno o escoamento iniciou mais rapidamente entre 1 e 10 minutos após o início da chuva, fato que se soma às maiores taxas de infiltração durante o verão. Medições sazonais mostram que as perdas de solo são maiores no inverno, quando o solo está úmido (Cérda, 2007).

Em Montebeller *et al.* (2001), para menores pressões de bico houve maiores diâmetros médios de gota, em que para os bicos utilizados a energia cinética da chuva produzida correspondeu a valores acima de 75% para intensidade de precipitação de até 30mm/h. As condições consideradas ideais para simulação de chuva com este equipamento devem ser submetidas à pressão de serviço superior a 27,2 kPa e intensidade de precipitação inferior a 160 mm h⁻¹ (Montebeller *et al.*, 2001). Oliveira *et al.* (2010) utilizaram um simulador acoplado de bicos VeeJet 80-150, que atuando sob a pressão de 34,0 kPa foi capaz de simular chuvas com características próximas às das chuvas naturais. O coeficiente de uniformidade da área molhada é um dos parâmetros a ser considerado na seleção de bicos aspersores para simular chuvas, de modo que já é reconhecido que geralmente quanto maior a pressão da água e a altura do aspersor, maior é a tendência de se obter melhores índices de uniformidade da área molhada (Santos *et al.*, 2020).

Para o controle do Coeficiente de uniformidade emprega-se o coeficiente de Christiansen. Este coeficiente é calculado através de uma equação, cujos dados que a alimentam relacionam a lâmina formada em pluviômetros coletores, distribuídos na área de molhamento do simulador, com o tempo de simulação da chuva. Montebeller *et al.* (2001) obtiveram o volume de água aplicado pelo simulador com 25 copos coletores distribuídos numa área de 1 m². A intensidade média de precipitação de água foi obtida por meio da relação entre a lâmina média de água nos pluviômetros manuais e o tempo de aplicação. Em Thomaz e Ramos-Scharrón (2015) foram distribuídos nove pluviômetros manuais em microparcels a partir de 5m². Para esta pesquisa foram distribuídos em média 12 pluviômetros manuais com 8,6cm de diâmetro para captação da chuva simulada em parcelas hidroerosivas que se formaram com média de 4m² de extensão.

2.4 O PAPEL ESTRATÉGICO DAS ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS NA AMAZÔNIA SUL OCIDENTAL: PROBLEMAS E DESAFIOS

Em estudo sobre uma estratégia mundial para a construção de estradas, Laurance *et al.* (2014) alertaram para o cenário de aumento global de novas estradas neste século, até 2050, onde previu que cerca de 25 milhões de quilômetros serão incorporados a atual malha viária global. O destaque deste alerta consiste no fato de que deste total, 9/10 (nove décimos) devem ser implementados em países em desenvolvimento, mormente aqueles que detêm grande diversidade ecossistêmica. A experiência na Amazônia brasileira tem demonstrado que as estradas constituem fator impactante na perda de biomassa florestal original, cuja expansão

ocorre de forma desordenada. Funcionam como um mecanismo de retroalimentação negativa, expresso desde os anos de 1980 no gráfico de alças causais denunciado por Fearnside (1991).

Estudos e discussões em torno da conservação e preservação dos recursos naturais e dos potenciais ambientais da Amazônia brasileira e internacional têm se intensificado nas últimas décadas devido ao fato de a região estar vivenciando mudanças rápidas e irreversíveis que ocasionam grandes impactos na hidrologia regional e no clima global, o que preocupa órgãos nacionais e internacionais (Perz *et al.*, 2007; Skidmore *et al.*, 2021; Thomaz; Nunes; Watanabe, 2020; Walker; Moran; Anselin, 2000).

Estima-se que a Floresta Amazônica possua mais de 15.000 espécies de árvores e todo este conjunto florístico tem a capacidade de reciclagem da água que mantém chuvas não só na Amazônia, mas em outras regiões adjacentes. Além disto, abriga cerca de 30% de todas as espécies existentes no planeta, o que demonstra a necessidade de manutenção da biodiversidade existente. Também pode auxiliar a mitigação do efeito estufa ao estocar mais de 150 bilhões de toneladas de carbono, o que é significativamente expressivo frente às emissões de gases responsáveis pelo incremento do efeito estufa (Fearnside, 2018; Forman *et al.*, 2003; Gibbs *et al.*, 2007; Laurance; Vasconcelos; Lovejoy, 2000; Steege *et al.*, 2020). Não menos importante, mais de 30 milhões de pessoas habitam o bioma amazônico, se considerarmos a superação dos limites territoriais brasileiros, inclusive 1,6 milhão de indígenas de 370 povos diferentes, distribuídos em 2,2 mil territórios (sem contar comunidades isoladas e urbanas) (Anderson *et al.*, 2018; Leal, 2019).

Toda esta biodiversidade, a quantidade de habitantes e a diversidade cultural humana deste bioma reforçam a necessidade de investigar, analisar e discutir fenômenos e processos que reconfiguram a paisagem amazônica e que são desencadeados inicialmente pelo fator principal que decorre da ocupação humana: o desmatamento, criando uma relação de causa e efeito com outros tipos de intervenções antrópicas (Laurance; Goosem; Laurance, 2009; Margulis, 2003; Nascimento *et al.*, 2021; Skidmore, 2021). Não é possível pensar sobre os problemas que envolvem o ambiente natural da Amazônia sem considerar a interação antrópica que objetiva, de forma geral, o uso dos recursos naturais. São as várias fácies dos sistemas atuando em conjunto, analisados a partir da perspectiva da reconfiguração da paisagem sob a ótica da geomorfologia, que se efetivam por meio de fluxos modificados pela ação antrópica sobre o meio natural.

Estudos desenvolvidos na Amazônia alertam para a degradação ambiental em sistemas de bacias hidrográficas, os quais estão associados ao avanço do desmatamento e devastação da floresta. O equilíbrio de processos naturais que sustenta a biodiversidade depende da floresta

para manter as relações mútuas de estabilidade dos recursos disponíveis pois, do contrário, a tendência será a diminuição substancial do seu potencial biodiverso (Thomaz; Nunes; Watanabe, 2020; Watanabe *et al.*, 2018).

Há décadas já se reconhece que o desmatamento da floresta está diretamente ligado a processos de uso e ocupação da terra refletidos na produção de grãos e estabelecimento de pastagens (Fearnside, 2001; Nunes *et al.*, 2015). Soares-filho *et al.* (2006) previram a perda de 40% de Floresta Amazônica caso os tipos de uso da terra para agricultura se mantivessem neste ritmo. Nepstad, Stickler e Almeida (2006) afirmaram que as principais causas de desmatamento na Amazônia estão associadas às indústrias de carne bovina e produção de soja, e as taxas de desmatamento estão cada vez mais sensíveis à expansão econômica que emanam em vários lugares do planeta Terra, fato que pode inclusive ser moderado por meio da intensificação das áreas agrícolas em vez da abertura de novas áreas (Garret *et al.*, 2018).

Neste particular, Mertem e Minella (2013) projetaram cenários que apontaram um aumento em até 20% de erosão do solo no Brasil por conta da expansão agrícola que está associada a outras intervenções antrópicas sobre o meio natural, como por exemplo a abertura de estradas para acesso às áreas, especialmente no bioma Amazônico. Já é reconhecido que a própria conversão de floresta em pastagem afeta as propriedades físico-químicas do solo e os recursos hídricos (Thomaz; Nunes; Watanabe, 2020). Azevedo-Ramos e Moutinho (2018) constataram que $\frac{1}{4}$ do desmatamento que ocorreu em florestas públicas ainda não designadas para conservação e/ou uso social resultaram em emissões de pelo menos 200 milhões de toneladas de CO₂. Dados do Programa de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia Brasileira (PRODES) estimaram o desmatamento de 11.088 km² com base em 45% da área monitorada. Isto representa um aumento de 47% e 9,5% em relação a 2018 e 2019, respectivamente, e é a maior taxa de desmatamento da década para a Amazônia brasileira (Silva Junior *et al.*, 2021).

Levantamentos mais recentes na bacia do rio Xingu-AM indicaram que a supressão da floresta, para além de todos os efeitos climáticos, ecossistêmicos e biogeoquímicos, demonstraram forte tendência nas perdas de solo, como resultado da erosão. Cenário potencializado pelos altos índices pluviométricos da região e que funcionam como efeito multiplicador (Lense *et al.*, 2020). Segundo os autores, entre os anos de 1988 e 2018, o desmatamento alcançou percentual de cerca de 12%, equivalente a 52.258 km² de áreas desflorestadas, redundando numa perda por erosão da ordem de 312%, o que significou afirmar uma perda anual de solo em 180 milhões de toneladas.

Fearnside (2005) reiterou a preocupação quanto ao avanço das plantações de soja na região, principalmente atrelado ao fato de que este tipo de uso e ocupação do solo estimula o investimento governamental em infraestrutura, como as rodovias (Fearnside, 2001, 2005). As estradas para retirada de madeira precedem e acompanham as rodovias, tornando as fronteiras acessíveis para o investimento dos lucros do comércio da madeira em plantações de soja e fazendas para a criação de gado. A extração da madeira, por exemplo, aumenta a inflamabilidade da floresta. E, na tentativa de desenvolver a região, pauta-se a necessidade de abertura de estradas como condição primeira para o acesso às novas áreas, que por sua vez serão desmatadas e exploradas em suas potencialidades diversas. Portanto, a abertura das estradas é o primeiro passo para o avanço da devastação projetado para a Amazônia e são aqui entendidas como Infraestruturas lineares, que se expandem nos trópicos rapidamente em função desta tendência de desenvolvimento econômico voltado para a exploração dos recursos naturais da floresta (Fearnside, 2005; Laurance; Goosen; Laurance, 2009; Mertem; Minella, 2013; Nascimento *et al.*, 2021).

2.4.1 Estradas como fenômeno geográfico na Amazônia

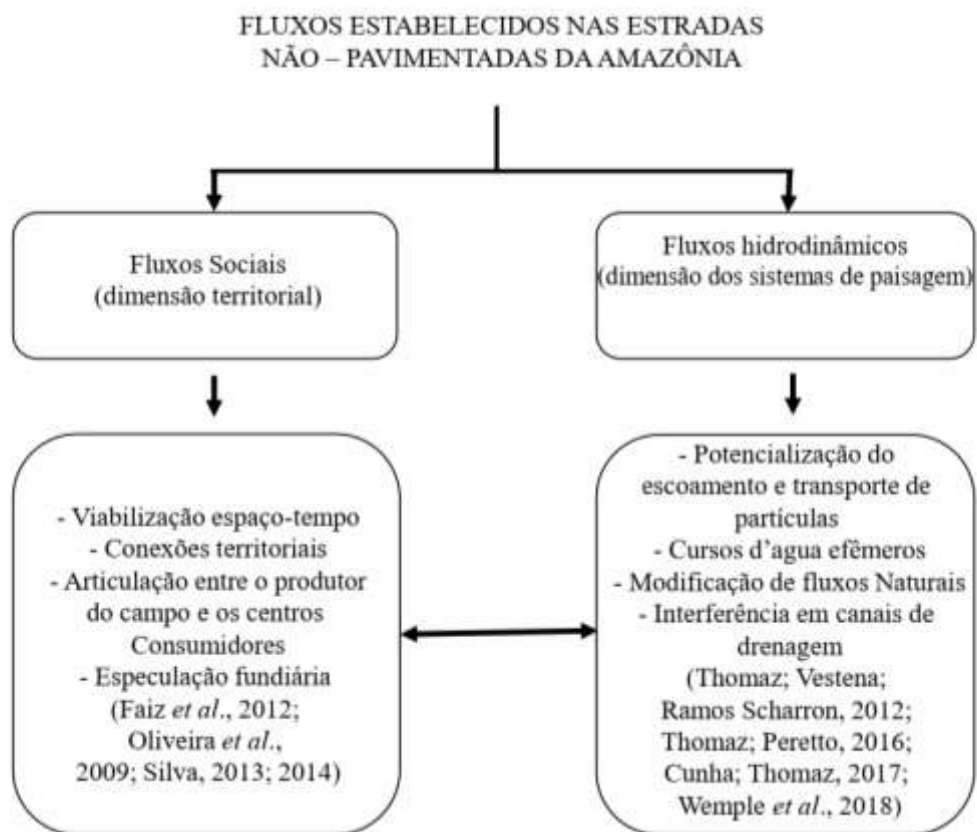
Por ser um fenômeno social (geográfico), as estradas têm definido as trajetórias de penetração da floresta nativa. Elas fazem parte de uma intrincada rede de conectividade, resultado dos interesses difusos pelos recursos naturais disponíveis no bioma amazônico; possuem hierarquização e uma lógica de funcionamento que se retroalimenta à medida que novas demandas por recursos naturais são exigidas. As estradas embrião, quando iniciam sua penetração na floresta, são conhecidas como “estradas de toureiro”, definição local para o caminhão que sem uma estrada inicial adentra a floresta e ele próprio faz o caminho (estrada) por onde as toras de madeira serão retiradas.

Neste caso, o grande desafio é como identificar em tempo real a criação de tais estradas. Em estudo recente, Botelho Jr. *et al.* (2020) mapearam a ocorrência de estradas na Amazônia brasileira por meio da Inteligência Artificial e do Sentinel-2. Os autores identificaram para a Amazônia Legal cerca de 3,46 milhões de quilômetros de estradas mapeadas em 2020. Os dados demonstraram que pelo menos 55% encontravam-se em áreas privadas e 25% em terras públicas. As mesmas que frequentemente são alvo de grilagens, invasões e retirada ilegal de seus recursos naturais. Os resultados também previram que 59% dos quase 3,1 milhões de km² de floresta original restante ainda não possuem estradas em seu interior, referendando a relevância do estudo no monitoramento de expansão de novas estradas. Embora nos possibilite

antever estas situações, obviamente este sistema ratifica a ideia de que as estradas fazem parte de um sistema complexo no uso e ocupação da Amazônia.

Portanto, as estradas são aqui entendidas como um fenômeno geográfico que representa a materialização da fluidez territorial para expansão da fronteira agrícola. É esta fluidez territorial que se estabelece através das estradas que permite a articulação do espaço da produção aos espaços do consumo (Silva, 2015). Este fenômeno evidencia a variação de dois fluxos que se estabelecem de maneira distinta (Figura 2).

Figura 2 – Fluxos promovidos através da abertura das estradas não pavimentadas nas diferentes dimensões analisadas



Fonte: Organizado pela autora.

É possível perceber causas e consequências promovidas a partir do estabelecimento das estradas não pavimentadas na Amazônia baseadas nos fluxos que são produzidos. Estes fluxos atuam de forma interdependente e mostram como o homem, através da inserção do capital na Amazônia, tem se apropriado dos recursos oferecidos pela natureza e o resultado das suas transformações nos sistemas abertos das bacias hidrográficas (Silva, 2013, 2014; Thomaz, Vestena; Ramos Scharron, 2012).

As causas para estabelecimento dos fluxos sociais estão associadas às motivações de ordem humana e econômica que estão ligadas especialmente às estratégias de desenvolvimento regional para Amazônia. Além disto, há conexões territoriais de cunho também geopolítico e de segurança nacional, já que historicamente reconhece-se que a abertura de estradas foi intensificada após o golpe de 1964. Esta data é marcada pelo avanço da ocupação da Amazônia como prioridade máxima, porque associava-se a ocupação desta área com a segurança nacional. A busca pelo acesso promovido pelas estradas apresentou várias consequências, tais como: 1. a articulação entre o produtor do campo e os centros consumidores inclusive em escala de acesso ao mercado global; 2. estabelecimento de conexões territoriais através do acesso às novas áreas; 3. entendida como o primeiro passo para o efetivo uso e ocupação das terras são elas que viabilizam o avanço do desmatamento ao transformar áreas anteriormente isoladas em pontos estratégicos de desenvolvimento; 4. especulação fundiária, porque a proximidade das propriedades com as estradas molda os preços das terras e interferem em desafios e oportunidades; 5. aniquilação do espaço pelo tempo, que diz respeito ao próprio deslocamento populacional e de mercadorias ao diminuir o tempo de deslocamento das distâncias que precisam ser percorridas (Becker; Miranda; Machado, 1990; Faiz *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2009; Silva, 2015) (Figura 2).

Neste sentido, por meio dos fluxos sociais, as estradas podem representar facilidade de transporte, acessibilidade e conectividade. Sob a perspectiva do agronegócio, reduz custos e amplia a velocidade de distribuição de *commodities* estabelecendo na paisagem o capitalismo mundializado e globalizado, conectado pelas estradas. As estradas proporcionam aos agricultores uma infraestrutura logística mais eficiente, reduzindo os custos e o tempo no transporte de produtos agrícolas até os centros de distribuição. Isto não só amplia a área de alcance dos produtores, mas também impulsiona a competitividade no mercado, permitindo que as mercadorias cheguem mais rapidamente aos consumidores finais (Bernardes; Aracri, 2010).

Já os fluxos hidrodinâmicos são causados pelo papel dinâmico que a água assume no contexto das bacias hidrográficas, considerando a análise integrativa da paisagem e associada aos sistemas que representam fluxos de entrada e saída de matéria e energia. Neste caso, as estradas tornam-se corredores hidrossedimentológicos que modificam a forma natural com que a água e o sedimento se deslocam naturalmente sobre as bacias hidrográficas. Nos eventos de chuva, estes corredores tornam-se cursos d'água efêmeros, capazes de concentrar mais de 50% de escoamento disponibilizado pelas chuvas e transportar sedimentos em quantidade superior até 90% que outros tipos de uso estabelecidos sobre a paisagem das bacias hidrográficas. As consequências básicas estão associadas à: 1. formação de cursos d'água efêmeros; 2.

escoamento concentrado na superfície com potencial maior de desprendimento e transporte de partículas; 3. modificação de fluxos naturais; e 4. interferência em canais de drenagem, especialmente de 1ª, 2ª e 3ª ordens (Cunha; Thomaz, 2017; Thomaz; Peretto, 2016; Thomaz; Vestena; Ramos Shcarrón, 2012, 2014; Wemple *et al.*, 2018).

A interdependência entre os fluxos sociais e hidrodinâmicos pode ser exemplificada pelo fato de que as estradas que dão acesso às grandes propriedades monocultoras têm normalmente maior fluxo de veículos, que podem mobilizar partículas da sua superfície causando maior transporte de sedimento para os canais de drenagem das bacias hidrográficas. Isto resulta em potencial de degradação do corpo hídrico por meio do assoreamento, alterando não apenas a quantidade de água disponível como também sua qualidade. O que sugere, em última instância, uma relação direta entre maior capital e maior capacidade de produção de sedimentos.

Na área de estudo, localizada ao norte do Estado de Rondônia, vemos o estabelecimento de estradas ligadas ao deslocamento da fronteira agrícola, representada pelo avanço/deslocamento do agronegócio da soja, milho e arroz do sul de Rondônia (Nunes *et al.*, 2015).

Neste sentido, Rondônia é destaque de uma inserção da agricultura capitalista e mercantilização da terra, materializada pelo agronegócio que se torna a “força política e o motor econômico que vai impor a transformação geoeconômica e uma agenda geopolítica no espaço rural brasileiro”, de modo que a fluidez territorial através das estradas se tornou um dos atributos relevantes para a expansão do comércio na região, pois, permite articular o espaço da produção aos espaços do consumo (Silva, 2014, 2015).

Alguns estudos constataam um rápido aumento na rede de estradas na Amazônia que vem alterando permanentemente e ameaçando o funcionamento do sistema natural da maior floresta tropical do mundo. Pelo menos mais de 10 mil km de estradas serão construídos ou melhorados na Amazônia com base nos documentos de projetos oficiais. Porém, é reconhecido o fato de que este número pode ser ainda maior visto que há uma vasta recorrência de abertura de estradas não oficiais que são abertas em áreas remotas da Bacia Amazônica, embora o tráfego esperado seja normalmente menor que os estabelecidos em estradas oficiais (Mendoza *et al.*, 2007; Nascimento *et al.*, 2021; Vilela *et al.*, 2020).

A abertura das estradas na Amazônia, através dos fluxos sociais, normalmente se inicia através dos atores sociais/indivíduos locais para atender necessidades próprias, sem planejamento, e que depois acabam sendo legalizadas pelo governo municipal e/ou estadual. Normalmente as estradas federais são estrategicamente planejadas e através delas é que surgem

afluências com acesso de novas estradas que tornarão possível a chegada aos locais ainda não explorados. Portanto, dois tipos de redes viárias são identificados na Amazônia: a) as estradas oficiais que são associadas àquelas construídas por atores estatais, teoricamente com planejamento; b) as estradas não oficiais, abertas em função das necessidades e oportunidades locais para fornecer acesso a recursos que sustentam os meios de subsistência local (Brandão; Souza, 2006; Goodrich Stuart, 2012; Nascimento *et al.*, 2021; Perz *et al.*, 2007).

Estudos direcionados para a abertura das estradas analisam o incremento no desmatamento e observam a dinâmica de uso e ocupação em torno das estradas, estabelecendo muitas vezes a sua função enquanto elemento construído por atores sociais (Nascimento *et al.*, 2021; Perz *et al.*, 2007; Skidmore, 2021). Outros estudos na Amazônia enfatizam o potencial de conversão de florestas em torno de estradas e previsões de abertura de novas estradas, alertando para o fato de que se todos os 75 projetos propostos para sua implementação forem efetivados para os próximos 20 anos, causarão o desmatamento de pelo menos 2,4 milhões de hectares (Laurance; Goosem; Laurance, 2009; Vilela *et al.*, 2020). Embora com enfoques diferentes, os estudos desenvolvidos têm em comum a preocupação em torno dos prováveis impactos que as estradas, enquanto intervenções antrópicas, causam no ambiente natural da Amazônia.

As discussões em torno da problemática que envolve as estradas são naturalmente direcionadas para uma análise associada a discussões sociais, porque permitem a acessibilidade, em muitos casos, para apoiar o desenvolvimento e subsistência da comunidade local, como também de cunho econômico, no que diz respeito aos custos de sua implementação e o retorno financeiro para sua utilização, especialmente no escoamento de grãos (Vilela *et al.*, 2020). Mas, para a presente pesquisa as estradas são investigadas como o possível fator responsável pela reconfiguração da paisagem, a partir das intervenções antrópicas que modificam fluxos de matéria e energia em sistemas abertos (Cunha; Thomaz, 2017; Thomaz; Vestena; Ramos Shcarrón, 2014; Wemple *et al.*, 2018), especialmente pela lacuna observada em discussões levantadas até então para ambientes amazônicos.

Reconhecemos as estradas não pavimentadas como infraestruturas lineares, que atualmente se expandem constantemente pelo contexto da exploração de uso e ocupação estabelecido. E estas infraestruturas são analisadas em uma unidade de bacia hidrográfica que representa este exemplo de expansão, com várias pressões na iminência da abertura de novas estradas e que, por efeito cíclico, pressionam áreas de conservação ao se expandirem territorialmente.

O cenário para o estado de Rondônia demonstra uma vulnerabilidade em resistir a estas pressões, principalmente porque atores sociais com poder de mando político ou econômico demonstram não reconhecer a importância em manter unidades territoriais de proteção ecológica ao propor e legalizar a diminuição destas áreas. Rondônia é, segundo levantamento realizado pelo Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, o segundo estado que mais passou por desmatamento em unidades de conservação e Terras Indígenas nos últimos anos, além disto, há muito se registra unidades de conservação sucessivamente diminuídas. Exemplo destas “flexibilidades institucionais” foi a redução dos limites territoriais da Resex Jacy Paraná, Rebio Jaru e Flona do Bom Futuro, esta última localizada na BHARG, que refletem a sucetível gestão do poder público na aplicabilidade da legislação (Nunes *et al.*, 2015; Magalhães *et al.*, 2015). Este fato se repete em alguns locais da Amazônia, como sobre as Terras indígenas de Kayapó, Trincheira e Apyterewa, bem como sobre a Flona do Tapajós e Reserva Extrativista do Arapiuns, no Pará (Junior *et al.*, 2005). Estudos como de Ferreira, Venticinque e Almeida (2005) ressaltam a importância da criação e manutenção de áreas protegidas como estratégia para impedir frentes de desmatamento da Amazônia ligadas às políticas de desenvolvimento econômico.

As estradas da BHARG refletem os usos voltados para áreas de consolidação da pecuária e cultivos temporários e podem contribuir para ampliar a possibilidade de ocorrência de desmatamento já que há ausência efetiva de ação por parte do poder público para proteção destas áreas (Veríssimo; Ribeiro, 2008).

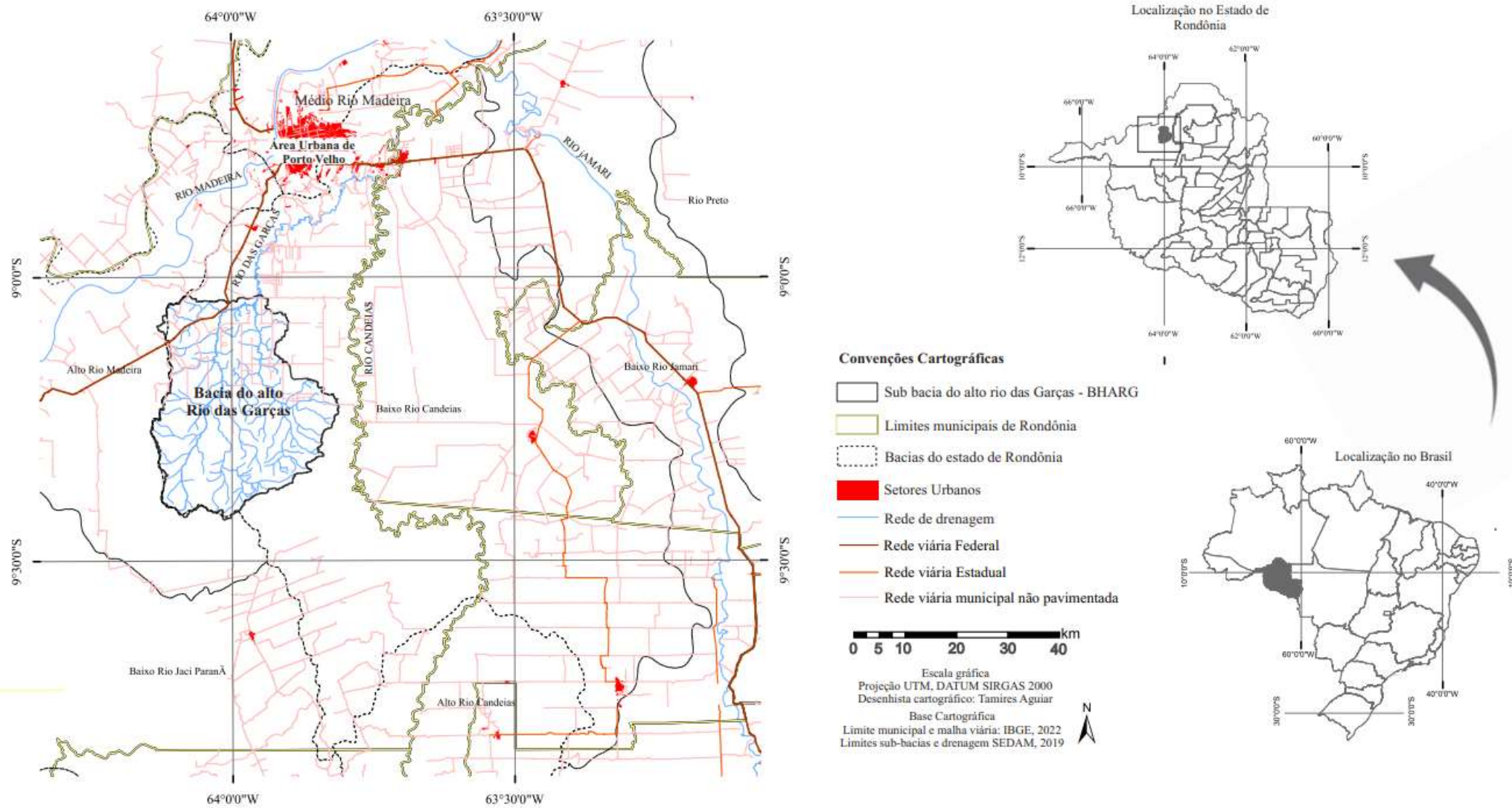
Nos próximos tópicos nossa discussão será centrada na interferência das estradas em sistemas ambientais na Amazônia, de modo a investigar como unidades de paisagem podem responder a este tipo de intervenção antrópica, expresso na expansão das estradas. A preocupação da presente investigação voltar-se-á para a produção de dados quantificados que possam dar conta de compreender questões de dinâmicas hidrogeomorfológicas superficiais, a partir do funcionamento do processo erosivo, associada à análise de fatores condicionais para explicar variáveis controladoras do fenômeno hidrogeomorfológico observado. Aplicamos uma metodologia de simulação de chuvas em superfície para conhecer variáveis controladoras do processo, entendendo o processo, relacionando fragmentação da paisagem, destacamento e transporte de sedimentos das estradas (Bertrand, 2007; Laurance; Goosem; Laurance, 2009; Thomaz, 2020; Zonneveld, 1989).

3 MÉTODOS E TÉCNICAS DA PESQUISA

Para alcançar respostas capazes de explicar a hipótese da tese dividiu-se a estrutura metodológica em três etapas para se entender a dinâmica hidroerosiva de estradas não pavimentadas das diferentes fácies de uso e cobertura da terra de distintas UMFs, conforme descrição dos subitens a seguir.

A Primeira etapa da pesquisa teve como objetivo central estabelecer os locais para realização do experimento SCPA. Para isto foi necessário delimitar a área da BHARG que faz parte do sul da Bacia hidrográfica do Rio das Garças. Esta bacia faz parte do sistema hidrológico do Rio Candeias e é composta por uma extensa rede hidrográfica que drena mais de 3mil km². Além das nascentes do próprio Rio das Garças somam-se outros dois importantes rios para alimentar esta extensa rede de drenagem que é o Igarapé João Ramos e Igarapé Jatuarana. Definimos uma sub-bacia desta rede hidrológica, a “Bacia do Alto Rio das Garças” (BHARG). Este setor se refere ao conjunto de drenagem que tem suas duas nascentes principais no Rio das Garças situadas dentro da terra indígena Karitiana, considerando seus limites topográficos de influência. No setor leste da Bacia do Rio das Garças encontram-se os outros dois igarapés que são desconsiderados para a delimitação topográfica desta sub-bacia escolhida (Figura 3).

Figura 3 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: IBGE (2002) e SEDAM (2019). Organizado pela autora.

Esta delimitação se justifica, primeiro pela proximidade da área urbana de Porto Velho que viabiliza os experimentos de campo, somada ao fato de que dão conta da problemática da tese no que se refere às estradas não pavimentadas abertas e em diferentes condições de unidades morfopedológicas, nas quais se efetivam distintos usos e cobertura da terra. Em segundo, representa o modelo geral de ocupação de Rondônia, demonstrando em uma escala de maior detalhamento o potencial de expansão do desmatamento, onde as interferências antrópicas, no que se refere à retirada da cobertura vegetal, são direcionadas para abertura de estradas e para implementação de pastagem e cultivo de grãos, predominantemente. A área foco das análises é especialmente a região sul, que constitui áreas de cabeceiras do rio principal, o Rio das Garças.

Com a delimitação da área da BHARG, nesta etapa também foi realizado o mapeamento das UMFs, seguindo o roteiro metodológico proposto por Castro e Salomão (2000), mediante banco de dados do Planaflo (Rondônia, 2001), além do levantamento morfométrico da bacia, associado à extensão da rede viária (Christofoletti, 1988; Cunha, 2010, 2011; Souza; Cunha, 2022; Vilela; Matos, 1975). O detalhamento dos procedimentos para a delimitação com a morfometria da BHARG e o levantamento das UMFs estão descritos nos subtópicos 2.1 e 2.2 deste trabalho, respectivamente.

O levantamento de uso e cobertura da terra obtido por meio da proposta metodológica de Brasil (2006) e Nunes (2012) possibilitou identificar a tipologia de uso no local. O levantamento foi baseado em atividades de campo, com levantamento de dados georreferenciados a cada 3km, tendo como base as 18 classes de uso e cobertura da terra comuns à região estudada, porém para a área foram identificadas apenas 4 classes (Tabela 1) (Furnas, 2005).

Tabela 1 – Tipologias de uso e cobertura encontradas na área e suas respectivas classes relacionadas

TIPOLOGIA DE USO E COBERTURA	CLASSES
Áreas antrópicas não agrícolas	Áreas redistribuídas pelo INCRA
Áreas antrópicas agrícolas	Pastagem e Áreas de lavoura temporária
Áreas de vegetação natural	Floresta do tipo ombrófila aberta e densa
Áreas cobertas por corpos hídricos	Água de rios e reservatórios

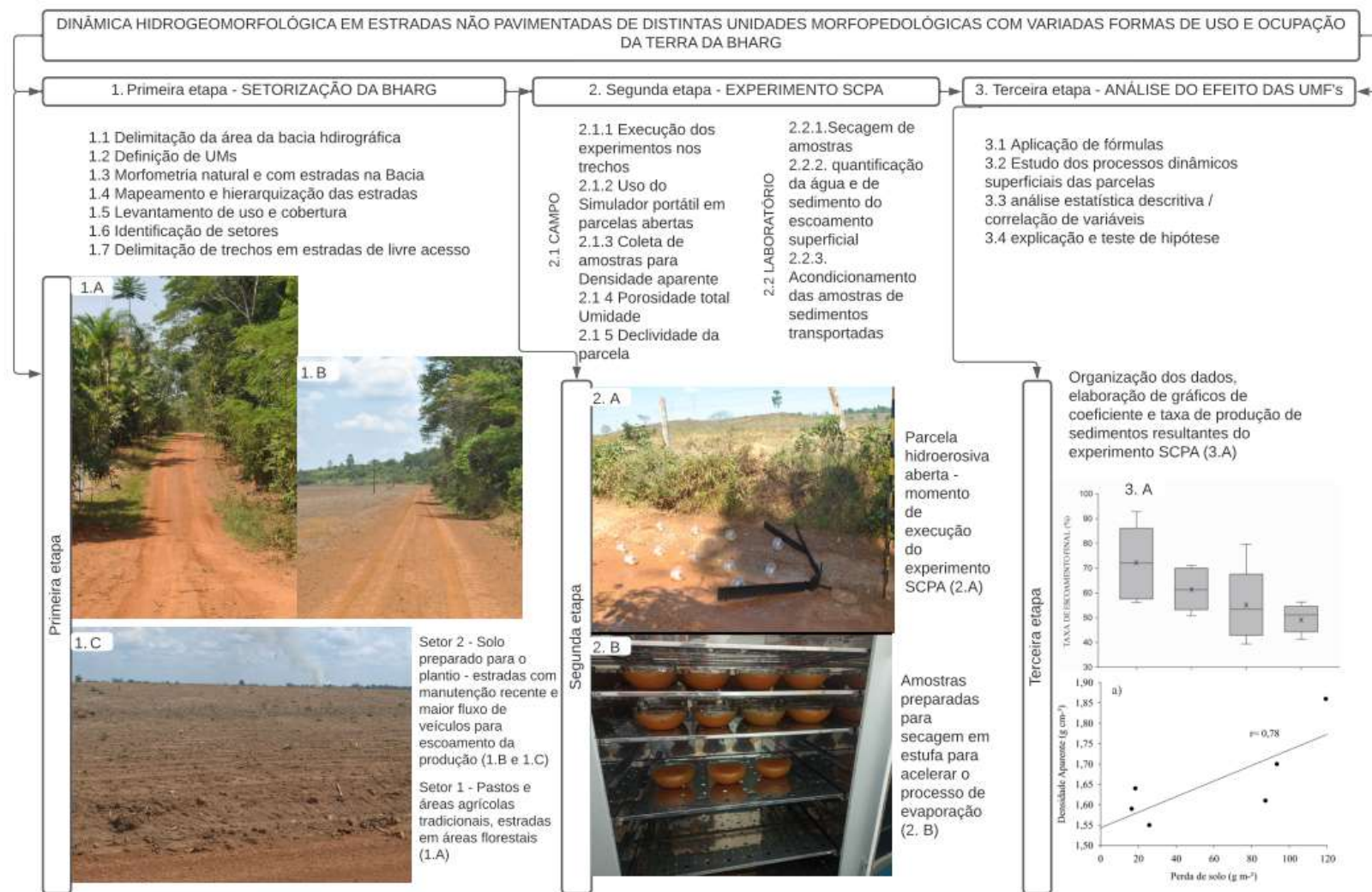
Fonte: Adaptado de Brasil (2006), Nunes (2012) e Trabalho de Campo (2022). Organizado pela autora.

Após levantamento das informações em campo foi confeccionado o mapa de uso e cobertura utilizando imagem Landsat-08 Bandas 6R, 5G, 4B, ano de 2022, órbita-ponto 232-

66, obtido por meio da classificação supervisionada no software ArcGis 8.3. Inicialmente, por meio da ferramenta Spatial Analyst Tools > Multivariate > Maximum Likelihood Classification, as classes gerais foram definidas. O pós-processamento foi realizado manualmente, uma vez que o perímetro da BHARG, apesar de compreender uma extensa área com mais de 1700km², apresenta floresta ainda presente em mais de 80% da área. Portanto, a região mapeada pelo uso e cobertura da terra possibilita aplicação de filtros manuais para correção e dispersão de pixels isolados, obtendo melhores resultados com a ferramenta *Start editing>Merge*.

A hierarquização das estradas (também realizada nesta etapa) foi obtida a partir da confecção de uma matriz que envolve critérios como a classificação funcional das estradas, suas características físicas, padrão técnico e sua jurisdição que trata da hierarquização (DNER, 1999; Goodrich-Stuart, 2012), e por último a setorização da área da BHARG, considerando todas as informações levantadas anteriormente, associadas ao critério de “livre acesso” aos trechos onde seriam realizados os experimentos SCPA. Com esta setorização foi possível definir, além dos setores focais a serem analisados, os trechos que receberam os experimentos e os pontos nos trechos que ainda serão realizados. O detalhamento de argumentos que nortearam a hierarquização e setorização das estradas está descrito no capítulo 4 (Figura 4).

Figura 4 – Estrutura metodológica para obtenção de dados sobre a erosão das estradas em unidades morfo-pedológicas da Bacia do Alto Rio das Garças



Fonte: Organizado pela autora.

A segunda etapa da pesquisa consistiu na execução do modelo SCPA para aquisição dos dados necessários para quantificar a contribuição das estradas não pavimentadas na produção de água e de sedimentos, nas diferentes unidades morfopedológicas que estão em quatro trechos de estradas, em dois setores focais de análise, definidos na primeira etapa. Para obtenção destes dados foi necessário organizar aquisição de dados em subetapas: a) de campo e b) de laboratório.

Em campo foram realizados os experimentos SCPA nos quatro trechos dos dois setores delimitados com estradas de livre acesso, ou seja, estradas que não estavam localizadas dentro de propriedades onde seria necessário solicitar permissão para acesso, para a realização do experimento. Nestes trechos foi realizado o experimento por meio de parcelas hidroerosivas para estabelecer padrões de produção de escoamento superficial e quantificação de sedimentos em parcelas (Thomaz, 2020). Chamaremos de “SCPA” os experimentos referentes às simulações de chuva com um simulador portátil acoplado de um bico aspersor, realizadas durante um evento com intensidade média de 35 mm h^{-1} durante o tempo de 25 minutos, sobre uma parcela hidroerosiva aberta que enseja a contribuição de uma área específica. O simulador portátil utilizado consegue simular, de acordo com Luk *et al.* (1986), pelo menos 85% da chuva natural com pressões de bico relativo a 32 KPa. Foram dois setores delimitados em diferentes UMFs, cada setor com dois trechos. Cada trecho apresentou um total de seis repetições, totalizando 36 repetições de experimento SCPA. O SCPA foi calibrado conforme recomendações de Luk *et al.* (1986) e Thomaz e Ramos-Scharrón (2015). Mais detalhes do experimento são descritos no subitem 3.4.

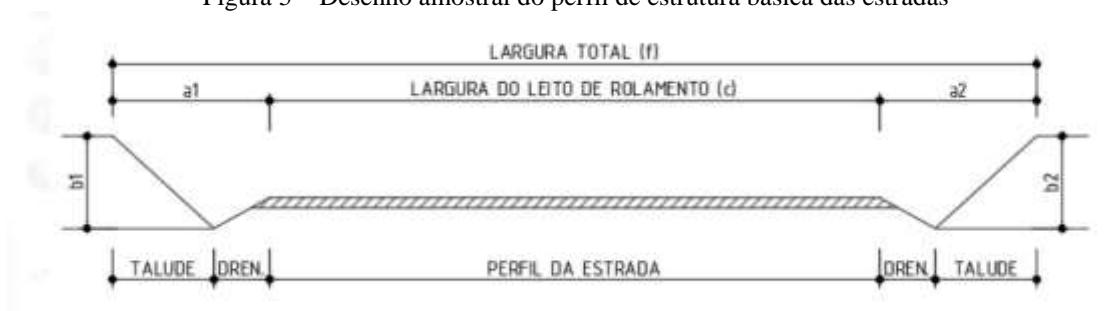
Em cada trecho dos setores da BHARG estabelecidos em diferentes UMFs foram realizadas coletas de seis amostras deformadas de aproximadamente 250g nas profundidades de 0 a 5 cm e 5 a 10 cm; e amostras indeformadas em anéis volumétricos em triplicada, com volume aproximado de 125 g cm^{-3} , para obtenção das características físicas onde as estradas estão assentadas, tais como Densidade Aparente, Porosidade total e Percentual de Umidade (Embrapa, 1997).

Características dos trechos também foram levantadas nesta etapa de campo para entendimento das formas das estradas. Considerando que as formas de estrutura básica das estradas podem responder de forma particular aos processos hidrogeomorfológicos atuantes em sua superfície (Thomaz; Antoneli; Dias, 2011), realizamos o levantamento da estrutura das estradas que cortam as unidades morfopedológicas mapeadas e que foram objeto de comparação dentro do desenho experimental que ampara a hipótese de tese ao procurarmos observar o efeito

dos diferentes tipos de uso e cobertura estabelecidos em distintas UMFs na produção de escoamento superficial e sedimentos na superfície das estradas.

As formas de estrutura básica avaliadas nos pontos dos trechos simulados foram: 1. largura do leito da estrada ou faixa de rolamento, 2. declividade, 3. tipo de material, e 4. tráfego das estradas, além de informações relativas à manutenção das estradas. Estes foram os fatores responsáveis pela disponibilização de sedimentos de formas variadas nas estradas (Figura 5) (Ramos-Scharron; MacDonald, 2007b; Thomaz; Antoneli; Dias, 2011).

Figura 5 – Desenho amostral do perfil de estrutura básica das estradas



Fonte: Organizado pela autora.

Estas informações objetivaram mapear e caracterizar as estradas, reconhecendo sua morfologia e estrutura básica para que os experimentos pudessem ser realizados em estradas não pavimentadas, com o máximo de propriedades semelhantes suficientes para representar diferenças em termos de sua instalação em diferentes unidades morfopedológicas e não por interferência de outros fatores controladores. Foi utilizado o formulário conforme Apêndice I.

Na segunda subetapa, os trabalhos foram realizados no Laboratório, cujas amostras foram pesadas úmidas, secas em estufa e analisadas para aplicação das fórmulas e obtenção dos parâmetros físicos descritos no tópico 3.3. Além disto, nesta etapa foram trabalhadas as amostras de água e sedimentos do escoamento superficial resultante dos experimentos SCPA, em que todo o detalhamento metodológico laboratorial está descrito no tópico 3.4.1.

A última etapa da pesquisa correspondeu à análise dos processos hidrodinâmicos que ocorreram nas parcelas hidroerosivas abertas. Para isto foram necessárias análises estatísticas descritivas por meio da média, desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximos e mínimos e a correlação de variáveis, além de comparação das médias. Foram aplicados o teste F por meio da ANOVA, e a análise de variância que pode determinar se as médias de três ou mais grupos são diferentes. Quanto maior a variabilidade entre as amostras, maior a evidência (probabilidade) de que as amostras são provenientes de populações com médias diferentes.

Objetivamos observar se os grupos de trechos realmente se diferenciaram dentro do conjunto de médias (Ferreira, 2009).

O delineamento experimental – definido para planejar o experimento e procurar isolar o máximo possível os efeitos de fatores que podem ser controlados no processo observado que foi o de produção de sedimentos e escoamento superficial – foi o inteiramente causalizado em blocos, de modo que permitiu a comparação de resposta das parcelas para cada uma das unidades morfopedológicas. Em cada parcela foram observadas pelo menos duas variáveis respostas: a) coeficiente de escoamento, e b) taxa de produção de sedimentos. O delineamento experimental de blocos casualizados é um procedimento adotado em pesquisas com este interesse (Panachuki *et al.*, 2003).

3.1 DELIMITAÇÃO DA BHARG E PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DA REDE DE DRENAGEM E DA REDE VIÁRIA

Para obtenção dos parâmetros morfométricos utilizados na análise hidrológica da BHARG foi preciso realizar uma etapa de obtenção de dados básicos, relacionados à rede de drenagem e à rede viária. A rede de drenagem e a rede viária utilizadas foram obtidas por meio do banco de dados geográficos disponibilizados pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Ambiental (SEDAM) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), respectivamente, em uma escala de 1:100.000. Algumas atualizações foram feitas considerando a análise e interpretação da imagem de satélite LANDSAT 8 e SRTM em ambiente SIG, cuja delimitação da BHARG foi realizada por meio do software ArcGis 8.3, que promove resultados práticos e relevantes para execução rápida de dados hidrológicos (Sobrinho *et al.*, 2010).

Para esta análise considerou-se que as estradas rurais não pavimentadas fazem parte dos sistemas dinâmicos das bacias hidrográficas, por isto não devem ser descartadas durante a análise hidrológica realizada. A abertura das estradas é um fator antrópico que estabelece novos rumos para a dinâmica hídrica, e a intensidade com que isto acontece pode ser medida através de alguns parâmetros simples.

Os parâmetros referentes à rede de drenagem seguiram a proposta de Christofolletti (1988) e Villela e Mattos (1975), sendo levantadas as seguintes informações:

1. Área da bacia (A) correspondente a toda área drenada pelo conjunto do sistema fluvial;
2. Perímetro da Bacia Hidrográfica (P) configurando-se como poligonal aberta que delimita a área da bacia, sendo determinado por meio da opção de operações métricas;

3. O comprimento da bacia (L) que é a maior distância medida em linha reta entre a foz de um determinado ponto situado ao longo do seu perímetro;

4. Comprimento total dos cursos fluviais (Lt) que se refere à soma de todos os comprimentos das redes de drenagem estabelecidas;

5. Coeficiente de compacidade (Kc) que relaciona a forma da bacia com um círculo e é determinado a partir da Equação 1:

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Equação 1}$$

Em que P é o perímetro da bacia (km) e A é a área (km²).

6. Densidade de Drenagem (Dd) que correlaciona o comprimento total dos canais de escoamento com a área da bacia hidrográfica, podendo ser calculada pela Equação 2:

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad \text{Equação 2}$$

Em que Lt é o comprimento total dos canais (km); A é a área da bacia hidrográfica (km²);

7. Número total de segmentos (Nr) são todos os cursos d'água que apresentam seu segmento até a confluência com o canal subsequente. Um segmento de rio sem tributários constitui-se um rio de primeira ordem; havendo a confluência de dois canais de primeira ordem dará origem a um novo segmento de segunda ordem e assim sucessivamente;

8. Comprimento do rio principal (Rp) que é a distância que se estende ao longo do curso de água desde a nascente até sua foz;

9. Extensão do percurso superficial (Eps) representando a distância média percorrida pelas enxurradas entre o interflúvio e o canal permanente, calculada através da Equação 3:

$$Eps = \frac{1}{2 \times Dd} \quad \text{Equação 3}$$

Em que Dd é a densidade de drenagem (km/km²);

10. Coeficiente de manutenção (C_m) que é o valor da densidade de drenagem expresso em metros, conforme a Equação 4:

$$C_m = 100 \times \frac{1}{D_d} \quad \text{Equação 4}$$

Em que D_d é a densidade de drenagem (km/km^2);

11. Densidade de rios (D_r) caracterizada pelo número de rios ou curso de água e a área da bacia, expressa pela fórmula da Equação 5. $D_r = N/A$:

$$D_r = \frac{N}{A} \quad \text{Equação 5}$$

Em que N é o número total de rios (unidades) e A é a área da bacia (km^2);

12. Relação de relevo (R_r) dada pela amplitude altimétrica e o comprimento total do canal principal descrita na Equação 6:

$$R_r = \frac{H}{L} \quad \text{Equação 6}$$

Em que H é a amplitude altimétrica da bacia e L é o comprimento do canal principal.

Com relação aos parâmetros morfométricos da rede viária, alguns parâmetros foram utilizados baseados em Cunha (2010; 2011), Souza e Cunha (2022), são eles:

1. Comprimento total das estradas (C_e), caracterizado pela mensuração do comprimento total das estradas rurais;

2. Densidade das estradas (D_e) em que se relaciona o número total de estradas à área da bacia por meio da fórmula expressa na Equação 7:

$$D_e = \frac{E}{A} \quad \text{Equação 7}$$

3. Extensão do percurso superficial interceptado pelas estradas (EpsE), caracterizado pela distância média percorrida pelas enxurradas entre o interflúvio e a estrada, representada pela fórmula da Equação 8:

$$EpsE = \frac{1}{2 \times De} \quad \text{Equação 8}$$

4. Número de cruzamento de canais fluviais com as estradas, contabilizado a partir da rede de drenagem mapeada e as estradas. Estes dados foram processados com o auxílio do software ArcGis 8.3 e Microsoft Excel, organizados e tabulados para discussão dos dados descritos no Capítulo 4.

3.2 COMPARTIMENTAÇÃO DAS UNIDADES MORFOPEDOLÓGICAS E SETORIZAÇÃO

Na abordagem da compartimentação morfopedológica, em primeiro momento, associa-se a erosão do solo como o fator-problema e os fenômenos associados à ocorrência de erosão. As unidades morfopedológicas são compreendidas como unidades homogêneas resultantes da interação entre solo-relevo-geologia. A interação dinâmica integrativa entre estes elementos do meio físico se dá de tal forma que delimita naturalmente unidades de estrutura semelhante, frutos da evolução fisiológica da paisagem que diz respeito ao seu funcionamento e não apenas sob a forma da paisagem (Tricart, 1977; Tricart; Killian, 1979; Vitte, 2007).

Os compartimentos formados das unidades morfopedológicas estabelecem fisionomias reconhecíveis e delimitáveis de relevo com estruturas pedológicas e litológicas específicas. São unidades têmporo-espaciais homogêneas resultantes de Internalidades e Externalidades sistêmicas (Castro; Salomão, 2000; Lohmann; Santos, 2005).

Para identificação destas unidades foi aplicado o roteiro metodológico de Castro e Salomão (2000) que descreve uma compartimentação morfopedológica sob diferentes escalas de análise. São níveis sucessivos de tratamento com diferentes dimensões de abordagem, dispostos desde níveis hierárquicos superiores até escalas detalhadas, cujos resultados práticos são produtos cartográficos de mapeamento destas unidades. No Quadro 1 observa-se o detalhamento das atividades e procedimentos principais dentro das escalas avaliadas nesta pesquisa, correspondente ao 3º nível de abordagem.

Quadro 1 – Roteiro metodológico para estabelecimento cartográfico das Unidades Morfopedológicas em níveis sucessivos de abordagem

NÍVEL DE ABORDAGEM	TIPO DE TRATAMENTO	ESCALA IDEAL	ATIVIDADES PRINCIPAIS	PROCEDIMENTOS
1º Nível	Compartimentação morfopedológica	1:100.000 ou maiores	Estudos analíticos temáticos e integrados do meio físico com escala regional, com controle de reconhecimento em campo para validação.	Superposição de Mapas temáticos. Delimitação de Unidades Morfopedológicas homogêneas.
2º Nível	Caracterização dos sistemas pedológicos em cada compartimento morfopedológico	1:2.000 ou maiores	Levantamento, descrição morfológica bidimensional para os solos em topossequências; coleta de amostras e análise em laboratório, se possível análise micromorfológica.	Elaboração de interpretação das relações espaciais.
3º Nível	Estudo do comportamento físico hídrico em cada sistema pedológico	Escala real de campo	Ensaio de caracterização do comportamento físico hídrico dos sistemas pedológicos em campo, com monitoramento do comportamento hídrico-climático; Ensaio físico hídrico em laboratório.	Registros das medições físico hídricas dos sistemas pedológicos e sua representação gráfica, principalmente dos fluxos hídricos, correlação com a topografia, morfologia dos sistemas pedológicos e seu uso e ocupação e o problema enfocado (ex. erosão).

Fonte: Castro e Salomão (2000). Organizado pela autora.

As unidades morfopedológicas foram definidas a partir da homogeneização de unidades com interação semelhante de solo-relevo-geologia, com a base cartográfica obtida dos bancos de dados digitais do Planaflores (Rondônia, 2001). As unidades foram definidas diretamente pela sobreposição cartográfica dos três mapas trabalhados em ambiente SIG pelo programa Arcgis 8.0, por meio do qual foi possível o reconhecimento e delimitação das unidades homogêneas. É importante ainda manter a uniformidade de escala entre os documentos, admitindo-se pequenas alterações para ampliação ou redução da base original, quando possível recorrer às informações detalhadas do mapeamento, que geralmente apresentam-se numa escala maior do que foi publicada, conforme Castro e Salomão (2000) indicam no roteiro metodológico.

Foi realizada a análise entre as unidades mapeadas e a estrutura básica das estradas, observando eventuais ocorrências de processos erosivos e a estrutura das estradas, para

obtenção de dados da análise da unidade na qual foram e serão realizados os experimentos nas parcelas hidroerosivas, descritos no Capítulo 4.

Após mapeamento das UMF foi realizada a setorização da BHARG considerando como critérios básicos: 1. tipo de uso e cobertura da terra; 2. unidades morfopedológicas mapeadas; 3. função e hierarquização das estradas. Os locais observados com os critérios básicos homogêneos foram delimitados como setores e o detalhamento e descrição dos 6 setores delimitados estão descritos no tópico 4.6 deste trabalho de tese.

3.3 PARÂMETROS FÍSICOS DOS SOLOS NAS UNIDADES MORFOPEDOLÓGICAS

Os parâmetros físicos analisados nos solos das UMF foram obtidos a partir da coleta de anéis volumétricos com amostras indeformadas para definição de: densidade aparente, porosidade total e umidade volumétrica. Foram realizadas três repetições de coletas de amostras em anéis volumétricos na camada superficial da estrada, em cada ponto em que foram realizados os experimentos SCPA. Os procedimentos em campo foram realizados conforme preconizado por Brasil (2015). Uma única variável simples não representa a complexa estrutura de um solo, que necessita de uma combinação de características e propriedades físicas que podem melhor explicar sobre seus aspectos estruturais, por isto propomos o levantamento de algumas características que incidem de forma direta no seu potencial de infiltrabilidade, retenção e armazenamento da água no solo e que auxiliaram o entendimento de processos hidrológicos que ocorreram em superfície (Kiehl, 1979; Sanchez, 1976; Thomaz, 2019).

A Umidade gravimétrica consistiu na determinação do teor de umidade presente na amostra de solo, transportada em embalagem impermeável e vedada, coletada no Anel volumétrico e entre as camadas de 0-5 e 5-10cm de profundidade. De acordo com Embrapa (1997), aplica-se a fórmula da Equação 9:

$$UG (\%) = [(Pu - Ps) \times Ps] \times 100 \quad \text{Equação 9}$$

Sendo: UG= Umidade gravimétrica; Pu= Peso da amostra úmida (g); Ps= Peso da amostra seca (g) por 24 e 48 horas à 110° C.

A densidade aparente leva em consideração o espaço total do solo (volume ocupado pelos sólidos e espaços porosos juntos) e a massa (peso) de unidade por volume do solo seco. Este volume incluirá tanto os sólidos quanto os poros (Brady, 1969). Para definição da

densidade aparente do solo foi considerado o volume ocupado pelo solo no anel volumétrico (50cm³) e massa de solo apresentado quando retirada a amostra do solo, com umidade natural e massa de solo após secagem em estufa por 24 e 48hs a 110°C, conforme Equação 10 (Embrapa, 1997):

$$Dap = \frac{Ps - Pa}{Va} \quad \text{Equação 10}$$

Sendo: Dap= Densidade aparente (g/cm³); Ps= Peso da amostra seca (g) por 48 horas a 110° C; Pa= Peso do anel (g); Va= Volume do anel (cm³).

E, por fim, a porcentagem de espaços porosos foi dada também a partir das amostras dos anéis volumétricos em triplicada em cada ponto em que foi realizado o experimento SCPA, pela relação entre a densidade aparente e a densidade da partícula dos agregados do solo. A média da densidade da partícula dos solos minerais tropicais pode ser considerada como da ordem de 2,65 g/cm³ (Brady, 1989). Os dados obtidos de densidade aparente, por constituir uma relação entre massa e volume, possibilitaram fazer a relação dos espaços porosos presentes na amostra coletada, conforme Equação 11:

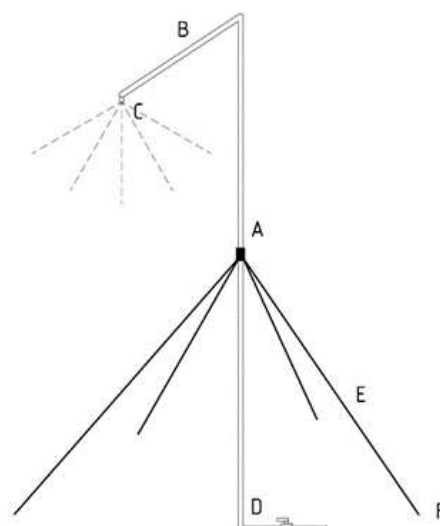
$$\% \text{ espaço poroso} = \left(\frac{Da}{Dp} \right) \times 100 \quad \text{Equação 11}$$

Sendo: Da= densidade aparente da amostra de solo (g/cm³); Dp= densidade da partícula (cm³).

3.4 SIMULAÇÃO DE CHUVAS

Foi utilizado um simulador de chuva portátil com bico aspersor para execução do experimento na superfície das estradas de livre acesso, em parcelas do tipo abertas, em que a área de contribuição é definida conforme os caminhos preferenciais da água do escoamento durante o evento de chuva simulada. O SCPA foi calibrado conforme recomendações de Luk *et al.* (1986) e Thomaz e Ramos-Scharrón (2015) (Figura 6 e Tabela 2). Este simulador de chuvas foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), Guarapuava-PR (Thomaz, 2020).

Figura 6 – Simulador de chuvas portátil com bico aspersor montado sobre uma parcela hidroerosiva aberta, com fluxos hidrodinâmicos em funcionamento durante os experimentos SCPA



Nota: Do lado direito o desenho da estrutura básica do simulador portátil de chuvas utilizado para os experimentos.
Fonte: Organizado pela autora (2021).

O evento de chuva ocorreu em média por 25min conforme o comportamento de escoamento relacionado às características da superfície da estrada. As chuvas foram simuladas nos períodos de transição sazonal, após os meses de estiagem de junho, julho e agosto. O simulador utilizado é formado por tubos de aço galvanizado de $\frac{3}{4}$ polegadas, com 4,8m de altura na haste vertical principal (A). No topo da haste há um encaixe para conectar um cano de 2m com o bico aspersor na ponta (B), toda esta estrutura é fixada ao solo por ganchos e cabos de aço (E, F). O sistema é interligado a uma bomba, com funcionamento a gasolina, que alimenta com água para o simulador e é regulada através da pressão medida por um manômetro (D). Este bico operou entre 48 e 69 KPa e produziu chuvas entre 27 a 45 mm h⁻¹ (C). A chuva produzida por este bico, nesta estrutura, possui uma energia cinética 90% equivalente à energia de uma chuva natural com a mesma intensidade e a mediana das gotas produzidas é de 2,4mm (Figura 6).

Tabela 2 – Parâmetros gerais do Simulador de Chuvas Portátil com bico aspersor
PARÂMETROS GERAIS DO SCPA

Bico aspersor	S.S.CO.FULLJET ½ HH 30WS.O
Altura da simulação (m)	4,8
Capacidade do reservatório (L)	250
Área de molhamento (m ²)	10
Intensidade da chuva (mm/h)	27 a 45

Fonte: Organizado pela autora.

A área de molhamento do simulador pode cobrir até 10m² de extensão com boa distribuição de chuva (Luk *et al.*, 1986; Thomaz; Ramos-Scharrón, 2015) (Figura 6). Em pré-

testes foi observado que um reservatório de 250ℓ que alimenta a tubulação por meio de uma bomba a vácuo, do tipo autoescorvante com sucção de 6m e vazão máxima de 18m³/h (motor 3.0), consegue manter um evento de chuva por 30 min, com taxa de precipitação média de 0,58mm/min, equivalente à média de 34,8 mm/hora. Porém, um outro reservatório com a mesma capacidade de armazenamento ficou sempre disponível, caso houvesse alguma eventualidade, devido a oscilações que ocorrem durante o SCPA, e que exigisse uma maior quantidade de água.

3.4.1 Etapa das atividades de campo do experimento SCPA

A intensidade pluviométrica foi medida por meio da média aritmética obtida de 12 pluviômetros manuais, com área de captação de 58,73cm², distribuídos na área da parcela hidroerosiva (Figura 7^a).

Figura 7 – a) Disposição de pluviômetros manuais para mensuração da intensidade de precipitação durante o experimento SCPA; b) as setas brancas apontam para os parafusos de ferro utilizados para delimitar as parcelas hidroerosivas



Fonte: Organizado pela autora.

A água captada nos pluviômetros foi medida em provetas e foi realizado o cálculo simples de intensidade pluviométrica, considerando a lâmina d'água formada em cada pluviômetro e o tempo de simulação da chuva. Por meio deste dado obtido foi possível calcular também o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) por meio da Equação 12:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n\bar{X}} \right)$$

Equação 12

Em que CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen; X_i - lâmina precipitada em cada coletor; \bar{X} - lâmina média precipitada; e n - número de copos coletores.

Nesta parcela hidroerosiva aberta, os sedimentos e escoamento se formam a partir dos caminhos preferenciais percorridos pela água que vão naturalmente delimitando a área de contribuição da parcela hidroerosiva. As parcelas abertas são normalmente utilizadas para superfícies muito compactadas, como de estradas não pavimentadas (Ramos-Scharrón; Thomaz, 2016; Thomaz; Ramos-Scharrón, 2015).

O SCPA montado sobre a superfície da estrada disponibiliza água para os processos hidrossedimentológicos e a parcela se forma compreendendo a área de molhamento da simulação. Para concentrar o escoamento e possibilitar a coleta, chapas de aço galvanizado foram instaladas na parte inferior da parcela, com altura entre 15 e 20cm e larguras variáveis entre 30 e 60cm, para fechar o local de concentração e facilitar a coleta do escoamento superficial formado com água e sedimento (Thomaz, 2019). Em trechos onde havia presença de microravinas, elas foram utilizadas como condição para o estabelecimento das parcelas e delimitação da área de contribuição de escoamento e de produção de sedimento.

O volume de água precipitado gerou escoamentos com água e sedimentos que foram coletados em recipientes de 500ml em intervalos de três minutos. Durante as coletas foi controlado o tempo para preenchimento total deste recipiente, rendendo um total de sete a oito coletas por experimento realizado. A primeira coleta foi sempre realizada exatamente quando iniciou o escoamento superficial na saída das calhas, e a partir da primeira coleta foi definido o intervalo de três minutos para continuar coletando o escoamento formado.

Foi elaborado um formulário de campo para execução do teste SCPA com algumas variáveis necessárias para o controle e entendimento dos processos que ocorreram durante o teste, tais como: o tempo para início do escoamento, o tempo para início da chegada do escoamento na parte inferior da calha, e o tempo que o escoamento foi mantido após a finalização da simulação do evento de chuva (tempo de recessão). Ademais, foram controlados os números dos potes de coletas e números dos pluviômetros manuais distribuídos nas parcelas (cf. formulário apêndice II). Houve coletas de amostras para controle de umidade entre 0-5 e 5-

10 cm de profundidade da superfície da estrada onde foi montada a parcela de monitoramento hidroerosivo.

Para obtenção da média de declividade local da parcela hidroerosiva foram realizadas 10 repetições de mensuração utilizando um inclinômetro digital e uma régua de metal para facilitar a realização das medições na superfície do terreno. Durante a simulação foram fixados marcadores no solo (parafusos de ferro, cf. Figura 7b), nas bordas da área de molhamento, que se formaram com os aparentes caminhos preferenciais da água disponibilizada durante o teste SCPA; os marcadores foram envolvidos por uma corda de aproximadamente 5mm para mensurar o perímetro da parcela e calcular a área de contribuição para o escoamento e produção de sedimentos obtidos. Para mensuração da quantidade de veículos que trafegam em cada trecho, optamos por realizar a contagem de veículos que passaram durante a execução do experimento em cada ponto onde foi realizado o SCPA.

3.4.2 Etapa de tabulação dos dados do experimento SCPA em laboratório

Em laboratório foi montado protocolo para trabalhar as amostras de água, sedimento e de solo obtidas nas atividades de campo. O protocolo segue três subetapas básicas. A primeira (1) etapa diz respeito à pesagem e secagem das amostras obtidas dos anéis volumétricos para mensuração de umidade, porosidade total e densidade aparente. Os anéis volumétricos obtidos em campo foram pesados em laboratório, secos em estufa por 48hs a 110°C (Embrapa, 1997). Após 24hs foi realizada a primeira pesagem e as amostras devolvidas para estufa, para serem pesadas novamente após 24hs. A segunda (2) etapa descreve a secagem das amostras destinadas apenas ao cálculo de umidade nas camadas de 0-5 e 5-10cm de profundidade. As secagens também foram realizadas a 110°C por um total de 48hs. As amostras secas foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados para armazenamento, caso posteriormente fosse necessária alguma análise granulométrica dos sedimentos da amostra (Figura 7d). A terceira (3) e última etapa organizou a secagem das amostras de água e sedimento do escoamento superficial coletado. Previamente às expedições de atividade de campo, foi realizada a pesagem dos potes que foram utilizados para coleta da água do escoamento superficial formado a partir do SCPA. No retorno da atividade de campo o pote foi pesado novamente, agora completo por água proveniente do escoamento superficial e com sedimentos desprendidos durante o evento (mensuração do volume de água escoado em cada intervalo de tempo coletado). Após a pesagem dos potes todo o líquido foi transferido para tigelas de vidro para realização do método de evaporação (ASTM, 2000), com auxílio de uma estufa para

acelerar o processo que possibilitou sua secagem total e evaporação da água para contabilização dos sedimentos presentes na amostra. Foi necessário um total de 48 horas, a uma temperatura de 100°C, para completa secagem da água presente nos recipientes. Os dados das pesagens alimentam um extenso formulário que estabelece a organização dos dados (Figura 8a e 8b).

Figura 8 – Procedimentos laboratoriais da segunda etapa metodológica: a) potes com água e sedimentos coletados durante o experimento SCPA; b) tigelas apenas com sedimento para quantificação após realizado o método de evaporação; c) procedimento de peneiramento dos sedimentos desprendidos durante o experimento SCPA; d) pesagem das amostras coletadas em 0-5 e 5-10 cm de profundidade com umidade, pré-secagem



Fonte: Organizado pela autora.

Algumas variáveis principais são consideradas para o entendimento da dinâmica hidroerosiva nas parcelas durante o experimento SCPA: 1. o coeficiente de escoamento, calculado considerando a razão entre o escoamento total e a precipitação média (%); 2. o rendimento de sedimentos que foi calculado como o produto da concentração de sedimentos em g L^{-1} e multiplicado pelas taxas de escoamento durante todo o período de escoamento ($\text{g L}^{-1} \text{min}^{-1}$); 3. a taxa de produção de sedimentos, calculada como produto da produção de sedimentos em relação à área da parcela (g m^{-2}) (Ramos-Scharrón; Thomaz, 2017).

Considerando as mensurações do volume precipitado durante o evento simulado e o volume de água escoado, foi possível obter dados referentes à capacidade de infiltração de água no solo, que é uma das variáveis respostas também observadas nas parcelas hidroerosivas.

A partir dos dados foi realizada uma análise estatística descritiva, utilizando as medidas de tendência central e de dispersão. Aplicou-se também a estatística inferencial para comparar médias e fazer previsões da amostra de dados.

A análise de variância (ANOVA) foi aplicada e é importante para que se considere que a média é um valor representativo dos dados, se as médias de três ou mais grupos são diferentes. Estando dentro da normalidade pode-se testar as médias através de testes paramétricos que indicam onde as médias se diferenciam e onde se encontram os valores mais altos e baixos.

Quanto maior a variabilidade entre as amostras, maior a evidência (probabilidade) de que as amostras são provenientes de populações com médias diferentes. A estatística F é a razão entre a variação entre grupos e a variação dentro dos grupos. Quanto maior o valor de F, maior é a chance de as médias serem diferentes. Pela análise de variância foi possível avaliar a relação entre dois tipos de variações entre grupos e dentro dos grupos das taxas de produção de escoamento.

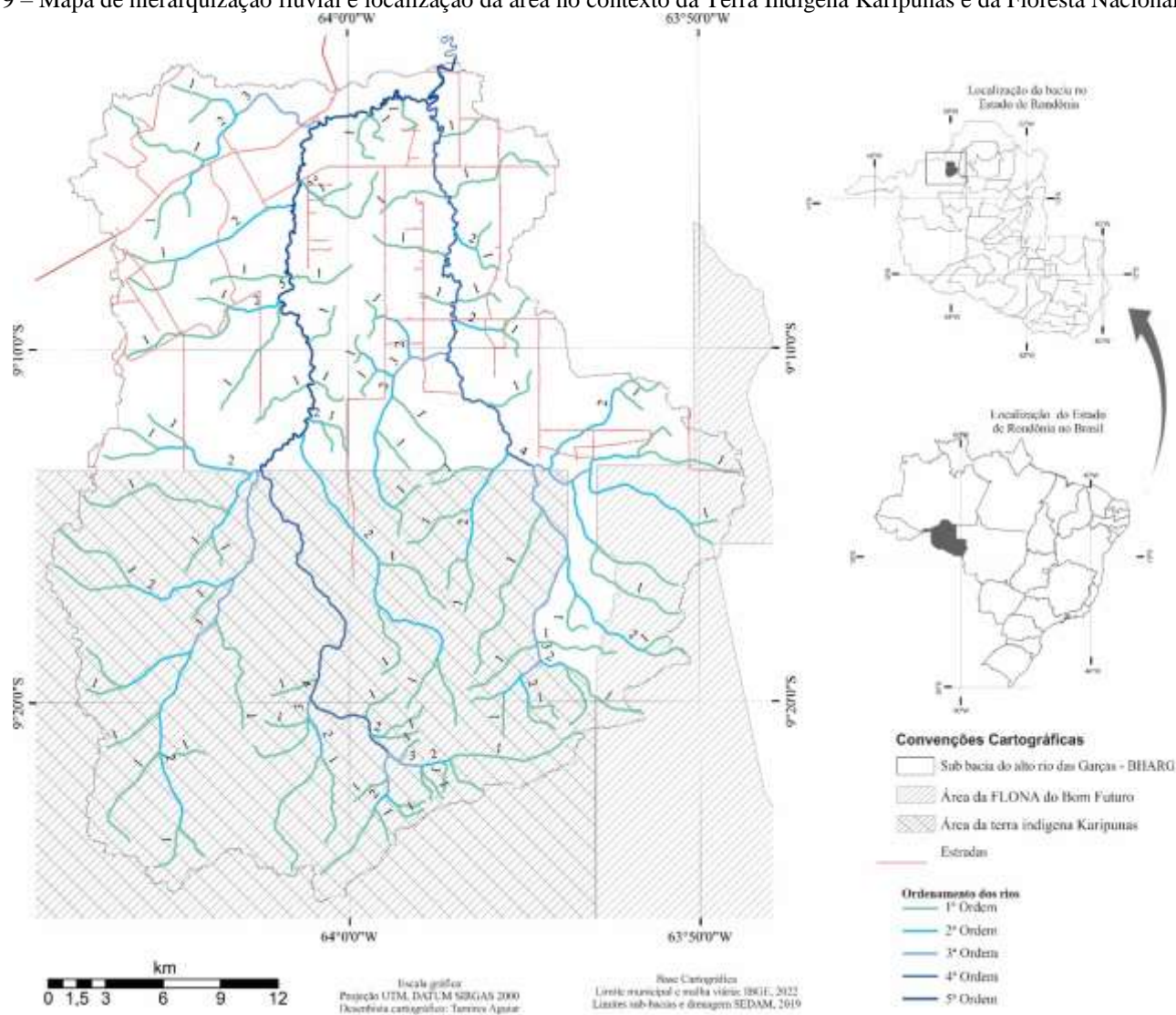
4 RESULTADOS DA PESQUISA – NÍVEL DESCRITIVO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA DO ALTO RIO DAS GARÇAS

A Bacia Hidrográfica do alto Rio das Garças (BHARG) perfaz uma área de 1077,25 km², configurando uma bacia de 5^a ordem (Strahler, 1952), e faz parte da rede hidrológica do Rio Candeias e do Jamari, um importante afluente do Rio Madeira. As principais nascentes do Rio das Garças estão localizadas neste setor correspondente à área da Terra Indígena Karitiana.

Há um total de 151 cursos d'água mapeados, com predominância de rios de 1^a ordem em 70% do total, estes — ao percorrer por aproximadamente 345 km de extensão e apresentar 29 pontos de cruzamentos com estradas, sendo 10 destes em rios próximos às nascentes — indicam o potencial de degradação hídrica na BHARG (Figura 9), já que reconhecemos que a interferência das estradas não pavimentadas pode induzir efeitos adversos a jusante dos canais de drenagem e tendem a evidenciar maior concentração de sedimentos suspensos em rios de ordem menores, sendo indetectáveis em rios de 5^a ordem, por exemplo (Thomaz; Peretto, 2016; Thomaz; Vestena; Ramos Shcarrón, 2014).

Figura 9 – Mapa de hierarquização fluvial e localização da área no contexto da Terra Indígena Karipunas e da Floresta Nacional do Bom Futuro



Fonte: Organizado pela autora.

Esta área é predominantemente inserida na unidade geomorfológica Depressão do Madeira; apresenta um conjunto de formas de relevo de topos tabulares, conformando feições de rampas suavemente inclinadas e lombas esculpidas em coberturas sedimentares inconsolidadas que denotam eventual controle estrutural. As áreas de cabeceiras da bacia que formam o Rio das Garças estão no domínio de Faixas de Dobramentos e Coberturas Metassedimentares. Em pequenos pontos que constituem cerca de 10% da área há uma região abaciada definida como planos convergentes, arenosa e/ou argilosa, sujeita a inundações, podendo apresentar arreísmo ou impedimento de drenagem, com lagoas fechadas ou precariamente incorporadas à rede de drenagem (Rondônia, 2012).

Os solos são formados predominantemente a partir da unidade geológica Suíte Intrusiva do Teotônio (69%) e das Coberturas Neogênicas indiferenciadas (15%), originando solos do tipo Latossolos (Vermelho-Amarelo e Amarelo) e Cambissolos, ambos distróficos e este último, certas vezes, associado a solos aluvionares. As coberturas neogênicas do Quaternário-terciário formam uma zona de transição entre solos do tipo Cambissolos, Latossolos e Neossolos. Neste caso, os Neossolos são caracterizados como essencialmente quartzosos, desprovidos de materiais primários alteráveis, sem contato lítico dentro de 50cm de profundidade, com sequência de horizontes A–C, porém, apresentando textura arenosa. Os cambissolos caracterizam-se principalmente por seu horizonte B incipente, cujo material originário sofreu alteração física e química em grau não muito avançado, mas suficiente para o desenvolvimento de cor ou de estrutura no horizonte (Tabela 3) (Brasil, 2019; Jacomine, 2009).

Os Latossolos perfazem mais de 60% da área e caracterizam-se pelo alto grau de intemperização e de evolução estrutural entre os seus horizontes, o que se justifica pelas transformações do material constitutivo, cujos materiais primários menos resistentes ao intemperismo apresentam completa alteração. Apresentam, portanto, concentração de óxidos de ferro e de alumínio, minerais de argila 1:1, quartzo e outros minerais mais resistentes ao intemperismo (Brasil, 2019; Jacomine, 2009). As estradas não pavimentadas recebem material destes solos que se constituem como a principal matéria-prima para sua construção.

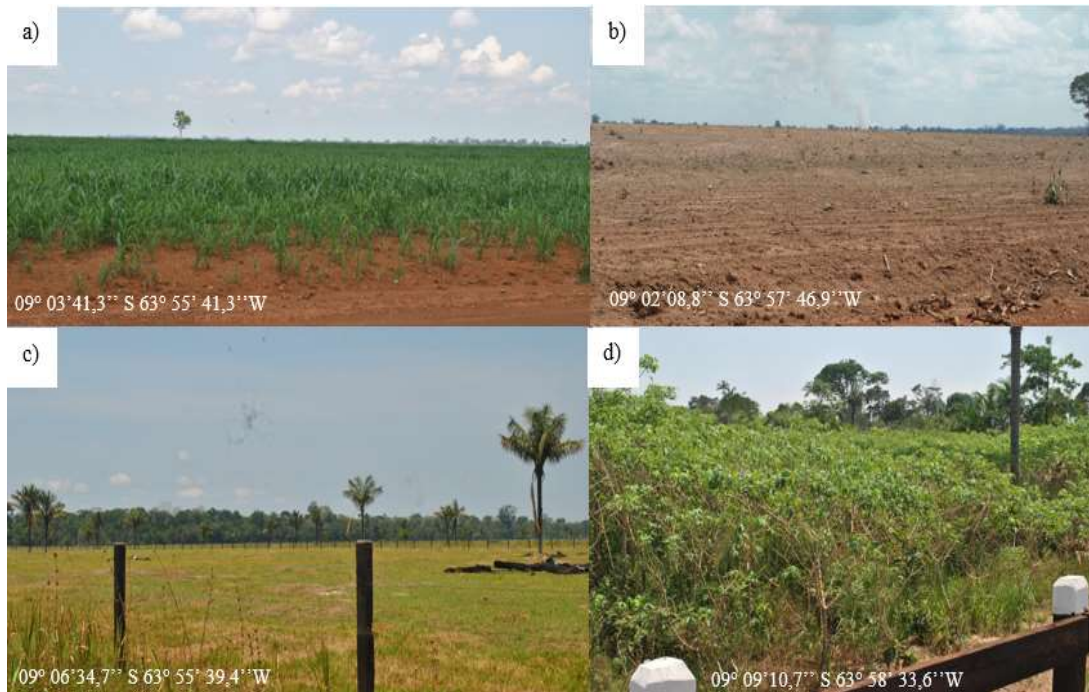
Tabela 3 – Tipos de Solos e Unidade geológica de formação na BHARG

SOLOS	km ²	%	UNIDADE GEOLÓGICA DO MATERIAL ORIGINÁRIO
Neossolo Quartzarênico	24,15	2,24	Coberturas Neogênicas
Cambissolo distrófica textura arenosa + Neossolo Distrófico textura arenosa	66,41	6,16	Grupo Palmeiral São Lourenço
Cambissolo distrófica textura argilosa + Neossolo Distrófico textura argilosa	284,34	26,39	Suíte Intrusiva Teotônio e Coberturas Neogênicas
Latossolo Amarelo Distrófico textura argilosa relevo suave ondulado	438,69	40,72	Granitos Rapakivi de Rondônia, Suíte Intrusiva Teotônio e Coberturas neogênicas
Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico textura média	235,95	21,90	Suíte Intrusiva Teotônio
Solo Concrecionário Distrófico textura argilosa	27,67	2,56	Lateritas imaturas
TOTAL	1077,2	100	-----

Fonte: Rondônia (2001) e Jacomine (2009).

O Rio das Garças tem sua nascente na Terra indígena dos Karipunas e percorre mais de 3 mil km até desaguar no Rio Candeias e alimenta a rede hidrográfica do estado de Rondônia, como por exemplo o Rio Jamari, um dos principais afluentes do Rio Madeira. A Bacia do Alto Rio das Garças encontra-se alvo de pressões pelo uso e ocupação de suas terras para uso agropastoril e extensas áreas destinadas ao plantio de grãos de milho, soja e arroz (Figura 10a, 10b e 10c), mas também foram identificados plantios para abastecimento local, como é o caso de plantio da mandioca pelas características das propriedades e de plantio observado (Figura 10d).

Figura 10 – Fotos registradas dos tipos de uso e cobertura identificados na área da BHARG: a) plantio de Arroz; b) solo preparado para o plantio, que reflete a dinâmica de uso do solo para culturas temporárias; c) área de pastagem; d) plantio de mandioca, muito observado em áreas com predominância de agricultura de subsistência.



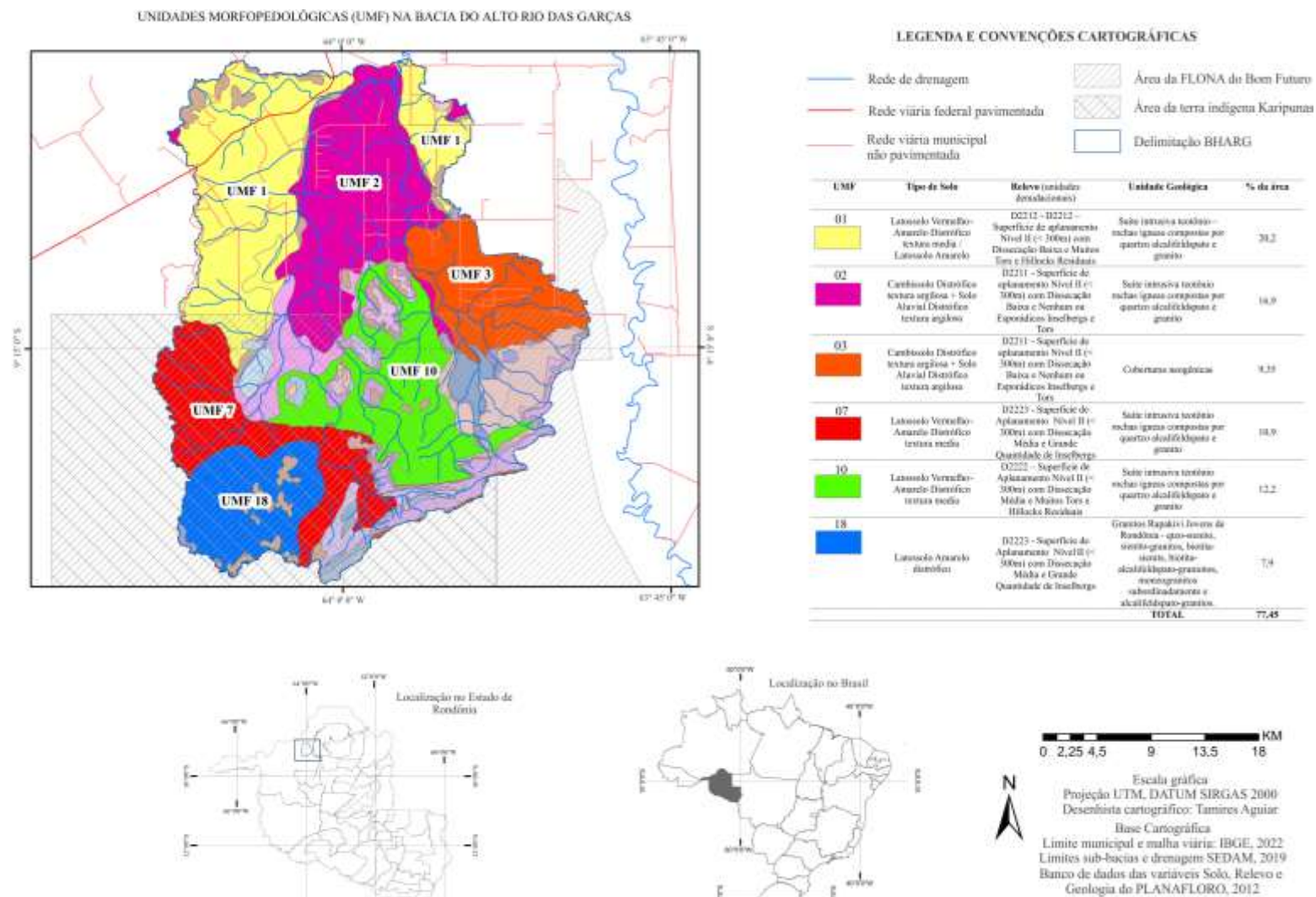
Fonte: Organizado pela autora.

4.2 UNIDADES MORFOPEDELÓGICAS DA BHARG

As unidades morfopedológicas (UMF) foram definidas seguindo o roteiro metodológico proposto por Castro e Salomão (2000). Os compartimentos delimitados no mapa da Figura 11 estabelecem fisionomias reconhecíveis e delimitáveis de relevo onde se estabelecem estruturas pedológicas e litológicas específicas, com base no banco de dados do Planaflo (Rondônia, 2001). A interação entre as unidades geomorfológicas, as tipologias de solo e a litologia das unidades geológicas formam as unidades têmico-espaciais homogêneas (Castro; Salomão, 2000; Lohmann; Santos, 2005).

O banco de dados do Planaflo foi trabalhado em SIG no programa computacional ArcGis 8.3, por meio da ferramenta de Analysis Tools na opção Intersect de Overlay. Esta ferramenta promoveu a intersecção de três layers e a saída é um layer que apresenta apenas o que se sobrepõe nos layers de entrada, inclusive combinando as tabelas de atributos. Como resultado foram observadas seis unidades morfopedológicas principais na área que representam mais que 77% da área total da BHARG. Apesar da intersecção dos layers com informações das três componentes (litologia – solo - relevo) gerarem um total de 43 unidades, as que se destacam são as UMF: 1, 2, 3, 7, 10 e 18 (Figura 11).

Figura 11 – Mapa da espacialização das Unidades Morfopedológicas definidas no âmbito da Bacia Hidrográfica do Alto Rio das Garças



Fonte: Organizado pela autora.

Atividades de campo mostraram a estrutura das estradas e retrataram o cenário da paisagem estabelecida nas unidades 01, 02 e 03, que ocorrem onde as estradas estão instaladas. Na Figura 12b, a estrada ilustrada representa a unidade morfopedológica 02 com predomínio de solos do tipo Cambissolos associados a solos litólicos, cujo material de origem é pertencente à Suíte Intrusiva do Teotônio (Rondônia, 2002). A UMF 03 é representada pela estrada no setor leste da área da BHARG também com solos do tipo Cambissolos associados a solos litólicos, porém o material de origem é pertencente às coberturas neogênicas (Figura 12d).

Destaca-se o exemplo exposto nas Figuras 12a e 12c que mostram duas estradas com estruturas visivelmente diferentes, mas instaladas nas mesmas UMF 01. Esta UMF tem os solos Latossolos como predominantes, associados à Suíte Intrusiva Teotônio com baixa dissecação de relevo (Rondônia, 2002). Assim, percebemos que a estrutura superficial das estradas está associada a outras condicionantes que não somente às características físicas de cada UMF, como por exemplo a frequência da manutenção, volume de tráfego, que por sua vez se relaciona aos tipos de uso da terra que a estrada interliga e dá acesso. Portanto, foi importante realizar uma setorização que pôde melhor representar as diferenças expostas nas superfícies das estradas, que são necessariamente o foco da pesquisa.

Figura 12 – a) Estrada na UMF 01 no setor noroeste da BHARG; b) retrata uma estrada na UMF 02 próximo a pequenas propriedades redistribuídas pelo INCRA através de loteamentos; c) estrada aberta na fazenda Serra Verde, próxima a grandes áreas agrícolas; d) estrada na UMF 03 que possibilita o acesso a estradas de escoamento de grãos



Fonte: Organizado pela autora a partir dos trabalhos de campo de 2022.

Cabe destacar que o comportamento hídrico que se estabelece na superfície das estradas a partir do experimento SCPA pode variar em razão destas diferenças nas características superficiais do leito das estradas, e/ou pelo tempo de uso e consolidação das estradas, por isto é necessário reconhecer todas as diferenças entre trechos onde os experimentos são realizados, para dentro do desenho amostral da tese isolar variáveis controladoras do processo. Esta variação é sentida através de processos superficiais, principalmente do escoamento superficial, estabelecido pelo deslocamento das águas na superfície até encontrar seus caminhos preferenciais (Chow; Maidment, 1988). Algumas variáveis podem representar o escoamento superficial, tais como: a vazão, a profundidade do escoamento formado e a velocidade com que ele se estabelece (Tucci, 2004). O escoamento que se forma agrega energia para o desprendimento de partículas no solo e é dependente de alguns fatores, dentre eles, no caso da superfície das estradas, depende da cobertura de material estabelecida. A partir da chuva simulada é possível calcular o volume de escoamento e a sua vazão máxima (Pruski *et al.*, 1997).

4.3 MAPEAMENTO E HIERARQUIZAÇÃO DAS ESTRADAS DA BHARG

Avaliando imagens de satélite Landsat-08 Bandas 6R, 5G, 4B, até o ano de 2022, órbita-ponto 232-66, identificamos que a abertura das primeiras estradas nos limites da BHARG data da década de 1990, quando teve início o processo de uso na área, pelo setor norte-nordeste da bacia, com a abertura inicial da linha 32 que hoje é o principal acesso da BHARG. No início de 2001, as propriedades e usos de recursos naturais do setor nordeste já estavam estabelecidos e com o decorrer dos anos vieram se expandindo no sentido noroeste. Em 2012 foi aberta uma outra estrada para promover o acesso de saída e entrada principal no oeste da área, que até então era realizado somente através da linha 32, no sentido de Jaci-Paraná. Desta estrada de acesso principal foram derivadas outras estradas. Portanto, no contexto geral da BHARG, as estradas das regiões noroeste e oeste da bacia são mais recentes, reiterando as diferenças na estrutura do leito entre as estradas estabelecidas no noroeste e nordeste da área. Em um rápido levantamento de dados do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES), reiteramos a franca expansão do setor noroeste da área, já que ali estabeleceu-se cerca de 90% dos desmatamentos que ocorreram nos últimos 3 anos (2019-2021). Em atividades de campo foram registrados desmatamentos e queimadas estabelecidos na área que está em franca expansão (Figura 13).

Figura 13 – Registro de queimada realizada para limpeza de área recém desmatada em uma estrada de 4ª ordem (04/10/2022)



Fonte: Organizado pela autora.

Atualmente, a área da BHARG possui um total de 217,95 km de extensão de estradas que recebem na maioria das vezes o chamado revestimento primário. Este revestimento primário é uma camada de solo, com características adequadas de material fino suficiente para oferecer certo grau de coesão entre as partículas e assegurar o tráfego de veículos. De acordo com órgãos brasileiros responsáveis pela manutenção das camadas de revestimento das estradas, como o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), a regular manutenção deve ser realizada com materiais isentos de matéria orgânica, com diâmetro máximo de agregado menor ou igual a 25 mm (Silva *et al.*, 2018). A única estrada que é revestida de camadas betuminosas ou de concreto dentro dos limites da bacia estudada é a BR-364, rodovia de acesso principal, por isto de primeira ordem, as demais recebem apenas este revestimento primário e não são pavimentadas.

Segundo Santos *et al.* (2020), o pavimento é considerado um sistema de múltiplas camadas finitas, sujeito às tensões, deformações e deslocamentos provenientes das solicitações cíclicas do tráfego. A fundação da estrutura deve apresentar capacidade de suporte compatível com a intensidade e frequência com a qual será solicitada.

Um caminho seguido para construção da hierarquização destas estradas parece ser a caracterização da função e objetivo de sua construção na paisagem da área, observando processos socioespaciais por trás da construção destas estradas e sua disposição geográfica-espacial na bacia. Na maioria dos casos, as hierarquias são classificadas como primárias, secundárias e terciárias (Forman *et al.*, 2003; Goodrich-Stuart, 2012; Perz *et al.*, 2007) ou principais e secundárias (Antoneli; Thomaz, 2016; Thomaz; Vestena; Ramos, 2014). No geral, estradas primárias são estradas oficiais, que representam a forma de primeiro acesso² e movimento principal, delas derivam as estradas secundárias e terciárias.

Ao se basear na lógica da primeira ordem, Goodrich-Stuart (2012) montou um fluxo de relações entre as estradas (Figura 14) e fez algumas conclusões importantes que apesar de (sozinhas) não serem conclusivas para a hierarquização aqui proposta, podem dar base para a proposta no que concerne a:

1. Estradas de acesso muitas vezes vêm das estradas primárias. Observe, no entanto, que uma estrada principal pode ser construída como uma estrada de acesso, mas qualquer estrada de acesso não pode ser considerada uma estrada primária;

² Primeiro acesso se refere ao movimento primeiro realizado para possibilitar alcançar novas áreas para serem exploradas. A partir deste primeiro acesso surgem aflúências através de novas estradas que tornarão possível, por meio de um segundo ou terceiro acesso, a chegada aos locais ainda não explorados.

2. As estradas de acesso são geralmente estradas secundárias (uma vez que se originam de estradas primárias como as estradas secundárias o fazem), mas as estradas de acesso (quando primárias) também podem 'aumentar' as estradas secundárias;

3. As estradas de acesso estão condicionadas tanto às estradas secundárias como às principais.

Figura 14 – Fluxo de relações entre as tipologias de estradas



Fonte: Adaptado de Goodrich-Stuart (2012), organizado pela autora.

No manual de projeto geométrico de rodovias rurais (DNER, 1999) há uma proposta de classificação das rodovias que de maneira geral segue quatro critérios principais que se referem à: a) sua jurisdição, b) sua função, c) suas características físicas, e d) condições técnicas.

a) Sua jurisdição indica órgãos responsáveis pela construção e manutenção, além de estar relacionada ao atendimento de necessidades de circulação territorial, neste sentido podem ser federais, estaduais, municipais ou particulares;

b) Sua classificação funcional possibilita identificar vias que sejam: arteriais, quando sua função se preocupa em fornecer mobilidade; coletoras, quando há um misto de funções relacionadas tanto à mobilidade quanto ao acesso; ou locais, onde a principal função é oferecer condições de acesso;

c) Quanto às suas características físicas podem ser pavimentadas, não pavimentadas, com pistas simples ou duplas;

d) E, por fim, seu padrão técnico baseia-se no volume médio de tráfego previsto, considerando também as características físicas da estrada (DNER, 1999).

O referido manual também agrega a base de raciocínio de relações de movimentos que as estradas possibilitam e podem ser classificadas, levando em conta seu grau de conexão com os centros urbanos (primeira ordem), até a chegada à exploração dos recursos naturais (terceira ordem). Toda classificação gerada leva em consideração o tipo de serviço que a estrada proporciona, limite de tráfego de veículos e tipo de padrão técnico que apresenta. Vão desde as rodovias de Classe 0 que apresentam elevado padrão técnico, com controle total de acesso e no mínimo pista dupla, até a Classe IV B que se refere a rodovias simples que suportam tráfego médio diário inferior a 50 veículos no ano de abertura, são as chamadas estradas agrícolas ou rodovias pioneiras. O manual DNER (1999) mostra a possibilidade de hierarquização das estradas conforme a movimentação de veículos, que saem de uma localidade para alcançar os polos urbanos, e nomeia as formas de deslocamento como: acesso, captação, distribuição, transição e movimento principal.

Como podemos observar, apenas a classificação do manual DNER (1999) não é conclusiva para o entendimento das particularidades das estradas não pavimentadas que estamos estudando na BHARG, que necessitam de um nível de detalhamento para caracterização e classificação em relação às funções que desempenham, tipos de padrão técnico e as características físicas que apresentam, dadas as particularidades de acesso aos assentamentos, pastagens e áreas agrícolas, cujas funções das estradas se diferenciam devido ao uso e cobertura da terra que se estabelecem ao longo dos trechos.

Deste modo, associamos as informações obtidas de estradas classificadas em estudos já realizados (Antoneli; Thomaz, 2016; Forman *et al.*, 2003; Perz *et al.*, 2007; Thomaz; Vestena; Ramos, 2014) com as indicações de fluxos viários estabelecidos por Goodrich-Stuart (2012) e as recomendações do manual DNER (1999). Da associação das informações contidas nestas classificações foi derivada a hierarquização proposta que classificou as estradas da BHARG, considerando o agrupamento de rodovias em função dos serviços que elas prestam, baseando-se nos movimentos hierárquicos de deslocamentos de veículos necessários para direcionar o acesso dos locais mais distantes, onde os recursos naturais estão sendo explorados, para os centros urbanos das demais localidades, especialmente no que se refere ao acesso à área urbana de Porto Velho.

Uma matriz foi confeccionada com as informações sistematizadas que auxiliaram no processo de hierarquização e classificação das estradas, considerando alguns parâmetros importantes para análise da estrutura superficial e tendências erosivas, obedecendo critérios que

já são utilizados por órgãos e trabalhos científicos com o objetivo de sintetizar e agrupar as características gerais das estradas, possibilitando desta forma sua hierarquização no contexto da realidade da BHARG. Por exemplo, foram adequados à matriz alguns dados específicos da ocorrência das estradas ali abertas, como por exemplo os valores máximos e mínimos de largura média do leito de rolamento e de largura total da estrada. O leito menor encontrado foi de 2,5m de largura dentro de propriedades, em estradas que dão acesso às instalações de fazendas; e o leito maior foi da estrada de movimento principal, a BR-364. Os critérios se baseiam em: 1. classificação funcional; 2. características físicas das estradas; 2. padrão técnico; e 4. jurisdição (Quadro 2).

O primeiro critério de classificação funcional segue a caracterização de hierarquia e relação funcional preconizadas pelo manual DNER (1999), que caracterizam a estrada conforme sua função principal e as formas de acesso estabelecidas e, neste caso, se relacionam inclusive ao tipo de uso e cobertura, porque dependendo do tipo de uso que se estabelece, a função da estrada se modifica de acordo com o objetivo do trânsito de veículos.

O segundo critério é o de características físicas que as classificam a partir do tipo de material utilizado e a largura do leito, informações que podem auxiliar a identificação de padrões de produção de sedimento e de produção de escoamento superficial, porque mostra a quantidade de superfície disponibilizada para ocorrência dos processos.

Quadro 2 – Matriz de hierarquização e classificação das estradas na Bacia do Alto Rio das Garças

Critério	Variável	Sub-variável	Estradas	Estradas	Estradas	Estradas	Estradas
			5ª ordem	4ª ordem	3ª ordem	2ª ordem	1ª ordem
classificação funcional	Hierarquia Funcional	1. Acesso					
		2. Captação					
		3. Distribuição					
		4. Transição					
		5. Movimento principal					
	Relação funcional	1. Arterial					
		2. Coletora					
		3. Local					
Características físicas	Tipo de revestimento/pavimento	1. Pavimento betuminoso ou de cimento					
		2. Revestimento primário					
		3. Sem revestimento, material originário					
	Largura do leito total	1. até 4m					
		2. até 6 m					
		3. > 6m					
Padrão técnico	Intensidade de Tráfego	1. Baixo					
		2. Moderado					
		3. Intenso					
Jurisdição	Órgão responsável	1. Federal					
		2. Estadual					
		3. Municipal					
		4. Privada					

Fonte: Organizado pela autora. Adaptado de Goodrich-Stuart (2012) e DNER (1999).

O padrão técnico, terceiro critério da matriz de hierarquização, visa estabelecer a intensidade do tráfego de veículos e se relaciona com o tipo de uso, já que em estradas cuja função é apenas o acesso às propriedades, a intensidade de fluxo de veículos é baixa porque a quantidade de veículos que têm acesso ao trecho será restrita.

Quanto à jurisdição, quarto critério, considera-se o órgão responsável pela manutenção das condições básicas de trafegabilidade da estrada e o objetivo de seu funcionamento, fato que pode indicar padrões e frequência de manutenção além do material a ser utilizado no leito das estradas.

De acordo com esta perspectiva, baseada em quatro critérios principais que são desmembrados em variáveis e sub-variáveis e a variabilidade de características das estradas da BHARG, elas foram hierarquizadas basicamente em: estradas de 1ª, 2ª, 3ª, 4ª e 5ª ordem (Quadro 3).

Quadro 3 – Características para hierarquização das estradas presentes na BHARG

TIPOLOGIA DE ESTRADA	EXTENSÃO (KM ²)	%	CLASSIFICAÇÃO GERAL
5ª Ordem	54,64	25,8	Hierarquia funcional local de acesso para atender à demanda de chegada às propriedades ou à saída delas. Baixo fluxo de veículos. Os que chegam a esta estrada são para atender demandas de propriedades de forma individual, pode apresentar ou não revestimento primário.
4ª Ordem	81,84	37,57	Estradas com hierarquia funcional local de acesso, em que pelo menos uma das extremidades do trecho não está conectada com vias de distribuição. Baixo fluxo de veículos, sob jurisdição privada e/ou municipal. Apresenta essencialmente revestimento primário com largura de leito de até 6 m.
3ª ordem	54,75	25,1	Apresenta relação funcional coletora de distribuição e transição, coleta tráfego de veículos provenientes das vias locais de acesso para a via de movimento principal. Sob jurisdição municipal apresenta tráfego leve a moderado.
2ª ordem	12,22	5,61	Apresenta hierarquia funcional de distribuição e transição, com relação funcional arterial e coletora, ou seja, preocupa-se com a mobilidade dos veículos, pois, promove a distribuição dos veículos das vias de 3ª ordem para as de movimento principal.
1ª ordem	14,37	6,59	Hierarquia funcional de movimento principal, via arterial que conecta os polos urbanos. Apresenta pavimento betuminoso com largura do leito superior a 7 metros e trânsito intenso de veículos, sob jurisdição essencialmente federal.
Total	217,95	100	----- -----

Fonte: Organizado pela autora. Adaptado de Goodrich-Stuart (2012) e DNER (1999).

As estradas de 5ª ordem são aquelas que apresentam hierarquia funcional local de acesso para atender à demanda de chegada às propriedades ou à saída delas. A largura do leito não passa de 4 m e a extensão do trecho é inferior a 1,5km. O trecho pode estar interligado de forma direta às vias de distribuição ou de movimento principal, porém, apenas para dar acesso de forma individual às demandas da propriedade privada, uma das extremidades necessariamente não estará integrada à outra via de 3ª ou 4ª ordem, por isto associa-se o baixo fluxo de veículos. Os que chegam a esta estrada são para atender demandas de propriedades de forma individual, pode apresentar ou não revestimento primário.

As estradas de 4ª ordem apresentam também hierarquia funcional de local de acesso, em que pelo menos uma das extremidades do trecho não está conectada com vias de distribuição e que necessariamente não estão conectadas diretamente com as estradas primárias de movimento principal, exceto se estiverem sob jurisdição privada que dão acesso às propriedades. Visam fornecer acesso a recursos que sustentam os meios de subsistência local ou dar acesso às lavouras, por isto associa-se ao baixo fluxo de veículos, sob jurisdição privada e/ou municipal. Apresenta essencialmente revestimento primário com largura de leito de até 6 metros.

As estradas de 3ª ordem apresentam relação funcional de coletora de distribuição e transição, coletam tráfego de veículos provenientes das vias locais de acesso para a via de movimento principal. Apresentam necessariamente revestimento primário e largura de leito de rolamento superior a 6 metros de largura, com intensidade de fluxo moderado, porque em pelo menos uma das extremidades da estrada dão acesso a outras vias coletoras de distribuição, sob jurisdição municipal.

As estradas de 2ª ordem apresentam hierarquia funcional de distribuição e transição, com relação funcional arterial e coletora, ou seja, preocupam-se com a mobilidade dos veículos, porque promovem a distribuição dos veículos das vias de 3ª ordem para as de movimento principal. O Revestimento primário apresenta contínua manutenção; a largura de leito é necessariamente superior a 6 metros, em razão da demanda de veículos; estão associadas à jurisdição estadual ou municipal; promovem mobilidade e acesso de veículos pesados, apresentando trânsito moderado, uma vez que ambas as extremidades das estradas se conectam para escoamento da produção agropecuária em franca expansão, cuja finalidade principal é atender o escoamento da produção.

E, por fim, as estradas de 1ª ordem, com hierarquia funcional de movimento principal, via arterial que conecta os polos urbanos. Apresentam pavimento betuminoso com largura do leito superior a 7 metros e trânsito intenso de veículos, sob jurisdição essencialmente federal.

4.4 SETORIZAÇÃO EM TIPOLOGIAS DE PAISAGENS – USO DA TERRA

Procurou-se estabelecer uma relação entre os processos hidrodinâmicos que estão sendo investigados na superfície destas estradas, por meio do experimento SCPA, como o resultado concreto da interação antrópica com os elementos do meio físico-natural da BHARG. Para esta integração propõe-se a realização dos experimentos em setores da bacia. Esta setorização foi realizada considerando como critérios básicos:

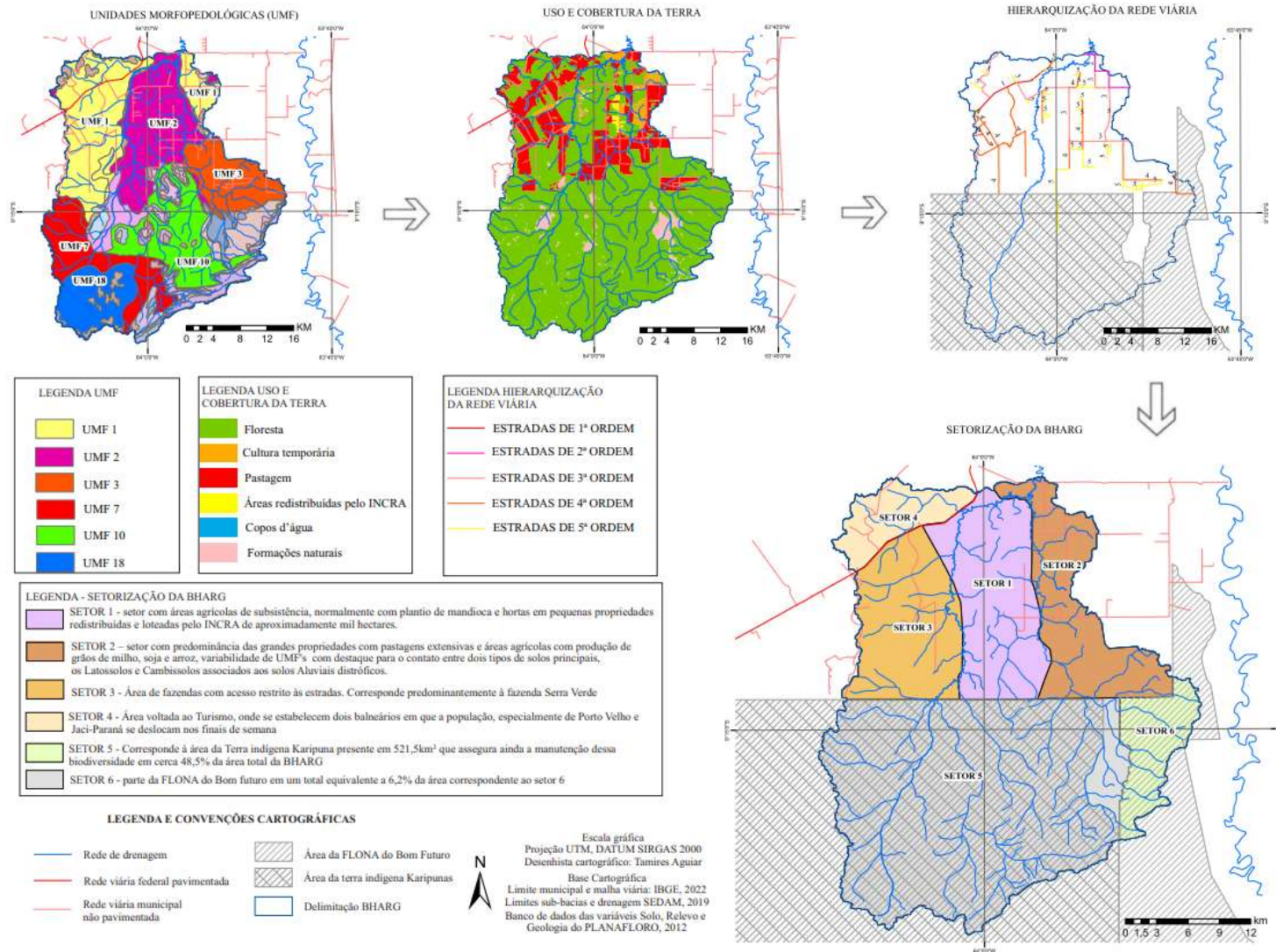
1. Tipo de uso e cobertura da terra;
2. Unidades morfopedológicas mapeadas;
3. Função e hierarquização das estradas.

Considerando a dinâmica de uso e ocupação nesta área delimitada para a BHARG, associada às UMFs e às estradas presentes, a bacia ficou dividida em seis setores (Figura 15).

No contexto geral da BHARG, a floresta ainda é presente em mais de 80% da área devido à TI e à Flona, que juntas perfazem cerca de 52% da área da bacia. Estas áreas foram caracterizadas como setor 5 e 6. O setor 5 corresponde à área da Terra indígena Karipuna, presente em 521,5 km², que assegura ainda a manutenção desta biodiversidade em cerca 48,5% da área total da BHARG e apresenta apenas um trecho de estrada de 9 km, aproximadamente, em meio a área florestada que dá acesso ao polo da aldeia indígena. Ademais, há ainda parte da Flona do Bom Futuro em um total equivalente a 6,2% da área correspondente ao setor 6, com apenas 2 km de estradas neste setor dentro dos limites estabelecidos para BHARG (Figura 15).

Fora dos limites territoriais correspondentes à Flona e à TI, sobram 457,8 km² correspondentes a 42% da área total da BHARG. Esta é a área da bacia em que há a possibilidade de uso e exploração dos recursos naturais de forma legal e é onde tem se efetivado a abertura de estradas, construídas por atores sociais/indivíduos com interesses próprios, que se estendem a partir das estradas primárias e fornecem acesso a recursos, apoiando os meios de subsistência local. Esta região que está fora dos limites estabelecidos para a Flona e TI, e corresponde aos setores 1, 2, 3 e 4, já teve 44,3% da área desmatada, equivalente a 202,7 km², o que demonstra a possibilidade de continuar a expansão do desmatamento e uso de recursos disponíveis na área.

Figura 15 – Desenho esquemático para caracterização da área da BHARG em setores



Fonte: Organizado pela autora.

Diante da setorização realizada, as estradas rurais não pavimentadas com livre acesso, presentes nos setores 1 e 2 — que correspondem a 59,5% do total de área possível de ser utilizada legalmente —, são focos para a efetiva execução dos testes SCPA. Não foram investigadas as estradas de propriedades privadas, como é o caso das estradas presentes nos setores 3 e 4 (Quadro 4).

Quadro 4 – Descrição da setorização da BHARG

		SETOR 1	SETOR 2	SETOR 3	SETOR 4
Tipos de solo	Latossolos Amarelo e Vermelho Amarelo (%)	16,4	29,5	85,7	98,6
	Cambissolo (%)	77,5	70,3	14,3	1,3
	Solo Concrecionário (%)	6,2	0,17	0,0	0,0
Formas de Relevo (declividade %)	Plano (0-3)	92,4%	87,8%	76,6%	67,0%
	Suave ondulado (3 - 8)	7,5%	12,2%	23,3%	32,8%
	Ondulado (8-20)	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%
	Amplitude altimétrica	110m	77m	100m	80 m
Uso e Cobertura da terra	Floresta (%)	63,45	55,72	55,13	57,52
	Pastagem (%)	33,8	31,5	40,2	41,7
	Cultura temporária (%)	0,8	11,7	2,4	0,00
	Corpos hídricos (%)	0,3	0,9	1,1	0,7
	Formas naturais (%)	0,05	0,2	1,2	0,07
	Propriedades loteadas	1,5	0,00	0,00	0,00
Extensão da rede viária	1ª ordem (km)	0	0	7,8	6,5
	2ª ordem (km)	0	11,0	0,0	0,0
	3ª ordem (km)	21,4	18,2	5,8	9,4
	4ª ordem (km)	19,8	13,5	44,5	0,0
	5ª ordem (km)	25,4	18,5	0,0	5,0
	Extensão total por setor (km ²)	66,6	61,1	58,2	21,0
Unidades Morfopedológicas	UMF - 01 (Latossolos - suíte intrusiva teotônio)	7,3%	23,0%	83,2%	80,5%
	UMF - 02 (Cambissolos+solos aluviais - suíte intrusiva teotônio)	76,4%	21,5%	14,5%	—
	UMF - 03 (Cambissolos+solos aluviais - coberturas neogênicas)	—	48,0%	—	—
	TOTAL da área delimitada	156,0 km ²	133,1 km ²	143,1 km ²	54,3 km ²

Fonte: Organizado pela autora com base em trabalho de campo e adaptado de Rondônia (2001).

Estes setores são correspondentes a:

- SETOR 1: setor com áreas agrícolas de subsistência, normalmente com plantio de mandioca e hortas em pequenas propriedades redistribuídas e loteadas pelo INCRA, de aproximadamente mil hectares. Neste setor também se localizam áreas de pastagens das fundiárias de grandes fazendas e há predominância da UMF 02 em mais de 76% da área do setor. Esta UMF é caracterizada por Cambissolos, provenientes da suíte intrusiva Teotônio em relevos de superfície de aplanamento, com baixa dissecação, nenhum ou esporádicos Inselbergs e Tors. As classes de declividade são predominantemente planas e destaca-se o fato de que, dentre os setores analisados, este apresenta o menor percentual de classes de relevo suave ondulado (3 – a 8% de declividade). A amplitude altimétrica no setor é de 110m, com mínima de 90 e máxima de 190m. Neste setor, as estradas são predominantemente de 5ª e 3ª ordem, onde sua função fundamental é dar acesso às propriedades e permitir a locomoção da população das propriedades loteadas, dando amparo à subsistência local. Segundo relatos dos moradores, não havia manutenção por pelo menos 3 a 4 anos nas estradas deste setor até 2022, momento em que se observou áreas de atolamento e buracos, o material da superfície do leito havia sido, aparentemente, removido por fluxos hídricos superficiais e o solo é aparente em vários pontos, inclusive em locais onde ocorreram os experimentos SCPA efetivamente. Em 2023 este setor apresentou manutenção de leito, associado especialmente à remoção da superfície inicial via nivelamento com raspagem do leito central;
- SETOR 2: setor onde há predominância das grandes propriedades com pastagens extensivas e áreas agrícolas com cultivos temporários, como a produção de grãos de milho, soja e arroz. Há uma variabilidade de UMFs neste setor, com destaque para o contato entre dois tipos de solos principais, os Latossolos e Cambissolos associados aos solos Aluviais distróficos. A UMF 03 corresponde a 48% da área deste setor, se diferencia da UMF 02 (21,5% do setor) pelas características de origem geológica associadas à Suíte Intrusiva do Teotônio e às Coberturas Neogênicas, respectivamente. A UMF 01 (23%) se caracteriza por solos Latossolos e os trechos simulados estarão presentes nestas UMF. Os parâmetros morfométricos do relevo para este setor caracterizam-se com uma amplitude altimétrica de 77m, de máxima 157m e mínima de 80m, em declividades predominantemente planas (87%) e suave onduladas (12%). As estradas neste setor têm finalidade principal de dar acesso e atender o escoamento da produção agropecuária;

- SETOR 3: Área de fazendas com acesso restrito às estradas. Corresponde predominantemente à fazenda Serra Verde, localizada no eixo sudoeste da bacia, e apresenta uma malha viária de aproximadamente 34 km no total que dá acesso à ampla rede de plantio de soja, milho e arroz, mesmo havendo predominância de pastagens na fazenda. Predomina neste setor a UMF 1 em mais de 80% da área;
- O SETOR 4: Área voltada ao Turismo, onde se estabelecem dois balneários em que a população, especialmente de Porto Velho e Jaci-Paraná, se desloca nos finais de semana. Também predomina neste setor a UMF 1 em mais de 80% da área.

Os setores focos da execução do método SCPA (setores 1 e 2) apresentam predominantemente pastagens, porém, contextualmente se diferenciam através da função prática das estradas e intensidade de fluxo de veículos, justificados especialmente pelo atendimento aos tipos de uso e ocupação estabelecidos, que interferem nas hierarquias das estradas.

No **setor 1**, o acesso primeiro é realizado por meio de uma estrada de 3ª ordem que dá acesso direto à BR-364, embora o acesso não seja direto e bem estruturado. Esta estrada representa o trecho 1 selecionado para execução do experimento SCPA e apresentou problemas estruturais, como atoleiros, com ocorrência de fluxo acumulado de água em superfície. Isto indicou susceptibilidade a problemas na infraestrutura, explicados em parte pelo relevo predominantemente plano e baixa manutenção das estradas (Figura 16b). Neste trecho o tipo de uso e cobertura estabelecido ao redor desta estrada é floresta e pasto de fundiárias das fazendas próximas.

Nas estradas do trecho 2, classificadas como de 4ª ordem, os processos erosivos que são evidentes no seu leito estão associados à concentração de fluxos superficiais em áreas com declive acentuado (Figura 16a). É válido lembrar que o clima equatorial, característico desta região, resulta em períodos de chuva intensos (Santos Neto *et al.*, 2014) e, portanto, agressivos às estradas, que se tornam canais efêmeros durante os eventos. A contínua degradação das estradas é uma somatória de elementos naturais impostos pelas condições climáticas, associadas ao tipo de solo instalado e o tipo de material utilizado para as manutenções, quando são realizadas. Esta estrada desempenha a função de dar acesso a estradas de 5ª ordem que possibilitam a entrada para as propriedades redistribuídas pelo INCRA, e estes fatores somados dificultam a manutenção das estradas em condições minimamente trafegáveis.

As estradas do setor 1 se destinam basicamente ao acesso das propriedades com plantio tradicional/familiar, evidenciado por exemplo pelo plantio da mandioca feito em pequena escala e pastos normalmente associados a áreas de assentamentos no setor centro-oeste da

BHARG e/ou fundiária das fazendas com área de pastagem. O padrão estrutural do leito das estradas neste setor 1 se diferencia pelas condições de trafegabilidade, processo de manutenção e recapeamento e a função básica de acesso a recursos. As condições destas estradas mostram uma relação direta dos tipos de uso estabelecidos entre este setor 1 e o setor 2, cujas estradas estão em condições de trafegabilidade melhores devido à necessidade de escoamento da produção de grãos nas grandes propriedades que mantêm a manutenção em dia. Estas manutenções poderiam ser reduzidas se as estradas fossem planejadas e bem executadas, minimizando custos e impactos negativos.

Figura 16 – Estradas com feições erosivas aparentes: a) Estrada do trecho 2 com aparente erosão em ravinamento e em entre-ravinas; b) estrada do trecho 1 que dá o acesso ao setor 1 da BHARG com concentração de fluxos de superfície gerando atoleiros



Fonte: Organizado pela autora.

No **setor 2**, as estradas abertas apresentam a função principal de acesso às grandes áreas de pastagens extensivas, além de possibilitarem a distribuição da produção estabelecida a partir do plantio de culturas temporárias, como a monocultura da soja, do milho e do arroz. As estradas podem inclusive facilitar a transformação estrutural na produtividade agrícola porque o seguimento do agronegócio depende de infraestrutura e de serviços logísticos (Asher; Novosad, 2019; Santos; Pereira, 2019). De formas alternadas, estes tipos de culturas são estabelecidos anualmente nos solos dentro da delimitação da bacia. Devido aos usos da terra, muitos cursos d'água acabam sendo afetados, especialmente porque muitos deles estão com suas áreas de nascentes comprometidas pelo desmatamento realizado. Neste setor, o fluxo de maquinário agrícola e veículos para transporte se dá de forma mais intensa, a forma de acesso principal é predominantemente a linha 32, uma estrada que constantemente recebe manutenção, apresenta leito largo, sempre boas condições de trafegabilidade e possibilita a franca expansão dos grãos.

As constantes manutenções que as estradas recebem disponibilizam sedimento fino no leito da estrada, este fato gera poeira quando trafegam veículos e disponibiliza sedimentos finos transportados nos eventos de chuva. Estas modificações da superfície da estrada que influenciam negativamente as suas condições de rolamento podem ser buracos, poeira, afundamento de trilhos de rodas e a própria erosão (Baesso; Gonçalves, 2003).

O modelo de expansão econômica pautado no uso e ocupação de terras para exploração de recursos naturais, comum a toda região amazônica, se concretiza nesta delimitação da BHARG, exigindo uma demanda imediata de abertura das estradas que dão acesso à ocupação de novas áreas e que possibilitam a exploração de seu potencial natural e a manutenção das estradas remanescentes. Pode-se dizer que este modelo potencializa, por efeito, a disponibilização de sedimentos transportados para o canal de drenagem através do fenômeno erosivo (Fearnside, 1989; Laurance *et al.*, 2011).

Há duas questões a se considerar: a primeira refere-se ao fato de que a degradação das estradas através dos processos erosivos não afeta apenas a sua trafegabilidade, mas também podem contribuir, por meio das incisões erosivas, com maiores produções de sedimentos que incidem sobre os corpos hídricos. Esta degradação está associada a elementos de solo, relevo, condições climáticas e tipo de material utilizado para sua implantação. A energia disponibilizada pelos eventos pluviométricos potencializa fluxos hídricos já que as estradas apresentam o contato direto com a energia de destacamento e transporte das partículas, porque não há nenhuma proteção vegetal sobre elas. A segunda questão está atrelada ao fato de que a constante manutenção realizada com este material fino deixa na superfície sedimentos preparados para serem transportados. Por meio dos experimentos SCPA realizados, associados a esta setorização da bacia, pode-se obter respostas que auxiliam o entendimento sobre estes tipos de dinâmicas hidroerosivas presentes nas superfícies das estradas da BHARG.

4.5 INTERFERÊNCIA DA ABERTURA DAS ESTRADAS NAS CONDIÇÕES MORFOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA

Já salientamos em capítulos anteriores a importância do estudo das estradas no recorte espacial das bacias hidrográficas, especialmente pelo papel fundamental que elas apresentam ao interceptar fluxos hídricos (superficiais e/ou subsuperficiais), modificando a forma com que a água escoar no sistema, influenciando as trocas de matéria e energia ali conferidas. De forma prática, o resultante do processo incide sobre os corpos hídricos. Reconhecemos que são as estradas o elemento principal fornecedor de sedimentos para os canais hídricos (Cunha;

Thomaz, 2017; Thomaz; Peretto, 2016; Thomaz; Vestena; Ramos Shcarrón, 2014; Wemple *et al.*, 2018). Além de assoreamento das redes de drenagem, alteram a qualidade da água disponível, porque os sedimentos carregam consigo elementos químicos provenientes do material utilizado para manutenção das estradas ou das próprias áreas de barrancos, constituídos fundamentalmente por ferro e alumínio, material mineral disponível comumente em solos tropicais (Collison; Anderson, 1996; Cunha; Thomaz, 2017; Kerniski; Cunha, 2017; MacDonald; Coe, 2007; Megahan *et al.*, 2001; Ramos-Scharrón; MacDonald, 2007b).

As conexões e conectividades que as estradas estabelecem tanto para mobilidade quanto para aumento de redes de drenagem causam modificações importantes na paisagem da BHARG, e a medida destas modificações pode ser analisada através dos parâmetros morfométricos naturais, acrescidos da componente estrada no ambiente hidrológico. Os parâmetros morfométricos realizam o levantamento de índices numéricos que podem classificar para além das redes de drenagem, também a rede viária que auxilia a caracterização hidrológica das bacias, e podem indicar mudanças na dinâmica de drenagem de uma bacia hidrográfica (Cunha, 2010, 2011; Souza; Cunha, 2022).

Como pode ser visualizado na Tabela 4, o estudo morfométrico foi realizado sob condições naturais, analisando formas de relevo e drenagem da BHARG, associadas à inserção das estradas para verificar as relações dadas entre rede de drenagem, parâmetros de relevo e rede viária, que indicam mudanças na dinâmica de drenagem desta bacia hidrográfica ocupada especialmente para uso agrícola e pecuário. Os índices morfométricos da área, como a declividade e a amplitude altimétrica, indicam terrenos da Superfície de Aplainamento com superfícies predominantemente planas e de baixa amplitude altimétrica, o que se constitui um fator facilitador do uso e ocupação desta área.

De modo geral, a bacia apresenta um total de 151 segmentos de drenagem, perfazendo um total de 602,7 km, que distribuídos em 1077,25 km² (extensão da bacia) indicam uma densidade de 0,55 km/km². Estes segmentos, quando acrescidos à extensão total de estradas, aumentam a densidade de drenagem para 0,76 km/km², o que indica em dados que a abertura das estradas aumenta em 47% o potencial hidrológico da bacia em eventos pluviais, ao transformar as estradas em redes de drenagem efêmeras. Outros estudos mostram a mesma tendência, com valores de aumento de densidade ainda maiores (Cunha, 2010; Souza; Cunha, 2022) (Tabela 4).

A extensão das estradas ainda não superou a quantidade de cursos de drenagem da bacia, como verificado em outros trabalhos (Cunha, 2010; Medeiros; Jesus; Alves, 2022; Souza; Cunha, 2022; Thomaz; Antoneli; Dias, 2011), em que a rede viária apresentou maior extensão

do que a rede de drenagem. Entretanto, quando somadas a rede de drenagem com as estradas, este aumento do potencial hidrológico pode, em períodos chuvosos, representar 901,62 km de canais de escoamento carreando sedimentos para os cursos hidrológicos. Thomaz, Antoneli e Dias (2011) chegaram aos valores de 28,8% de aumento ao unificar as redes viárias e da drenagem.

Tabela 4 – Características gerais morfométricas da Bacia Hidrográfica do Alto Rio das Garças sob condições naturais e acrescidas da componente antrópica estradas

CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO RIO DAS GARÇAS				
Parâmetros naturais da rede de drenagem*			Parâmetros morfométricos das estradas**	
Ordenamento/ Hierarquização	Rios		Estradas	
	Comprimento (km)	Quantidade	Comprimento (km)	%
1ª ordem	344,26	107	14,37	6,59
2ª ordem	124,92	32	12,22	5,61
3ª ordem	42,69	9	54,75	25,1
4ª ordem	50,23	3	81,84	37,7
5ª ordem	40,62	1	54,64	25,08
TOTAL	602,72	151	217,82	100 %
Área da bacia	1077,25 km ²		Percentual da área da bacia com relativo acesso por meio das estradas abertas	44,5%
Perímetro	220,02 km		Tipos de uso que as estradas dão acesso	Pasto, lavoura, fazenda, áreas turísticas
Densidade de drenagem	0,55 km/km ²		Densidade de estradas	0,2 km/km ²
Extensão do percurso superficial	0,89 km		Extensão do percurso superficial interceptado pelas estradas	0,65 km
Altitude da foz	80m		Densidade de Drenagem com acréscimo das estradas	0,76 km/km ²
Altitude da nascente	185m		Nº de cruzamentos canais X estradas	
Comprimento da bacia	44,7 km		Rios de 1ª ordem	29 – destes 10 em área de nascente
Comprimento do canal principal	61,72 km		Rios de 2ª ordem	16
Coefficiente de Compacidade	1,87		Rios de 3ª ordem	2
Índice de Circularidade	0,89 km		Rios de 4ª ordem	1
Coefficiente de Manutenção	1787,3 m ² /m		Rios de 5ª ordem	2
Densidade de rios	0,14		Total	50
Relação de relevo	1,7m/km			

Fonte: *Horton (1945), Strahler (1957), Christofletti (1988), Villela e Mattos (1975) e **Cunha (2010; 2011).
Organizada pela autora.

O índice de Compacidade de 0,17 mostra que a BHARG apresenta padrão alongado, assim há menor tempo de concentração, o que denota uma baixa susceptibilidade à ocorrência de inundações. Apesar de os índices que calculam as condições morfométricas naturais da bacia retratarem a sua baixa susceptibilidade a enchentes, precisamos considerar a importância de agregar a morfometria da rede viária nesta discussão, em razão da importante modificação hidrológica que as estradas podem trazer para a dinâmica da bacia hidrográfica. As estradas na BHARG também apresentam esta tendência de formar conectividades, seja para fluxos de veículos para mobilidade da produção agropecuária e de agricultura de subsistência para atender demandas locais, ou para fluxos hidrológicos. Para este último podem se conectar com sistemas

de drenagem em 50 pontos de intersecção estrada-rio, aumentando a densidade de drenagem e a distância média percorrida pelas enxurradas entre o interflúvio e a estrada, parâmetro representado pela extensão do percurso superficial interceptado pelas estradas (Tabela 4).

O fato de que 90% dos 50 pontos de intersecção se dão em segmentos de drenagem de 1ª e 2ª ordem, que por serem rios de menor porte podem ter o potencial de interferência do leito do rio aumentado, a possibilidade de degradação aumenta ainda mais se considerarmos que dos 29 pontos de intersecção entre estrada – rios de primeira ordem, 10 deles estão próximos até 30 metros de áreas de nascentes dos rios. Já podemos identificar pontos em que a intersecção da estrada-rio tem degradado mananciais na área e diminuído o potencial hídrico dos rios, especialmente em períodos de estiagem. Os pontos de encontro entre estrada-rio são os locais onde há a interferência direta de despejo de sedimentos. Se considerarmos a proximidade destes locais com áreas de nascente, a possibilidade de degradação aumenta.

Os traçados abertos de forma inadequada, definidos basicamente para dar acesso aos recursos naturais e em função das facilidades do terreno, contribuem para estabelecimento de fluxos direcionados e acumulados na estrada. Os fluxos estabelecidos ampliam de forma considerável a rede de canais no sistema da bacia hidrográfica, interceptam o escoamento das vertentes e acabam favorecendo o movimento do escoamento superficial com sedimentos de forma intensificada durante eventos pluviométricos para os cursos hídricos (Chappel, 2010; Cunha, 2010; Cunha; Thomaz, 2010; Forman, 1998). Esta dinâmica incide de forma direta nos processos erosivos tanto no leito de rolamento quanto nas áreas marginais, onde se constituem a drenagem concentrada. Isto aumenta a necessidade de manutenção constante destas estradas que normalmente, quando construídas desta forma, têm manutenção de alto custo e de difícil execução (Baesso; Gonçalves, 2003).

Defeitos comuns encontrados nas estradas rurais não pavimentadas podem ser facilitadores do processo de escoamento e perda de sedimentos das superfícies, tais como elementos destacados por Baesso e Gonçalves (2003), seção transversal imprópria, mau sistema de drenagem, buracos, atoleiros, trilha de rodas, corrugações (Parker, 2000).

4.6 DADOS CLIMATOLÓGICOS – PORTO VELHO (RO)

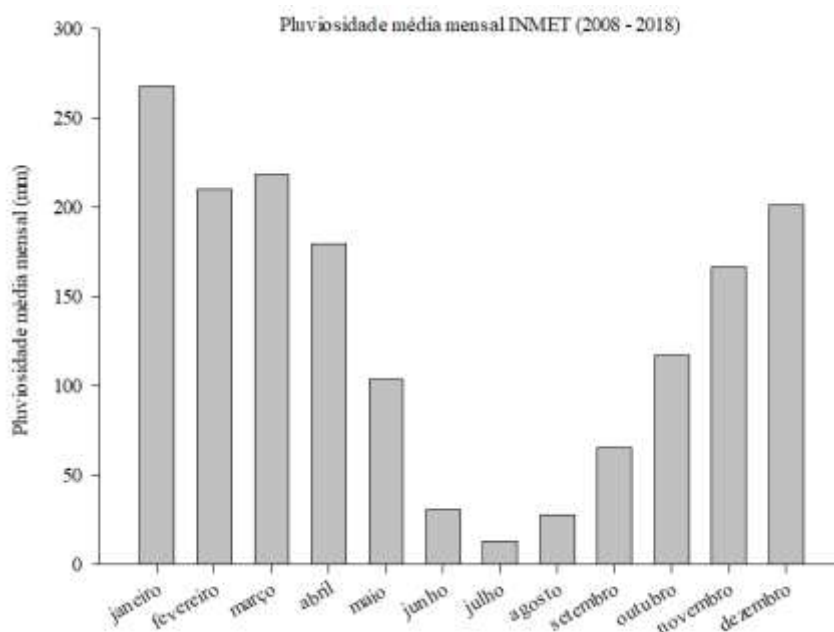
Foram selecionados dados da estação pluviométrica instalada em Porto Velho com dados mensurados por ocorrência de eventos diários (INMET, 2020). Os dados mostraram uma tendência de sazonalidade de chuvas já conhecida para o estado de Rondônia, especialmente na área do município de Porto Velho. Os meses de estiagem configuram-se como os meses de

junho, julho e agosto, e os mais chuvosos e períodos de transição estão entre dezembro e abril (Figura 17) (Bezerra; Dantas; Trindade, 2010).

Segundo o sistema de Koppen, o Estado de Rondônia é submetido ao regime climático tropical chuvoso dos tipos Aw e Am. No entanto, a região de Porto Velho, especificamente, é submetida ao tipo de clima tropical chuvoso do tipo Am, cuja principal característica é o total pluviométrico elevado com moderado período de estiagem. O padrão de chuva e estiagem estabelecido na cidade de Porto Velho pode ser organizado em trimestres, de modo que há um trimestre chuvoso, entre os meses de dezembro e fevereiro e um trimestre de estiagem que compreende os meses de junho a agosto. Da mesma forma há dois trimestres de transição, transição para estiagem entre os meses de março e maio e a transição para o período chuvoso entre setembro e novembro (Alvares *et al.*, 2013; Bastos; Diniz, 1982; Dubreuil *et al.*, 2019, 2023; Santos Neto *et al.*, 2014).

De maneira em geral, o regime pluviométrico de Porto Velho tem uma sazonalidade bem definida, correspondendo a um período chuvoso que se estende de novembro a abril (precipitações entre 228,9 mm a 329,6 mm/mês) e um período de estiagem de junho a setembro (precipitações entre 38,7 mm a 107,7 mm/mês), sendo os meses de maio e outubro considerados meses de transição de um regime para outro (Bezerra; Dantas; Trindade, 2010; Santos Neto *et al.*, 2014).

Figura 17 – Média de pluviosidade mensal no período de 2008-2018



Fonte: Elaborado pela autora.

Há uma escassez de dados relacionados à precipitação, como variabilidade temporal, eventos intensos, potencial erosivo para Rondônia, especialmente para Porto Velho. Esta falta decorre principalmente da ausência de estações climatológicas que dêem conta de toda área territorial do município e de uma base de dados com maior registro temporal. Neste sentido, os estudos estão normalmente vinculados ao comportamento climatológico mensal, sazonal e anual (Bezerra; Dantas; Trindade, 2010; Fisch; Vendrame; Hanaoka, 2007; Franca, 2015).

Sabemos que a presença da Floresta Amazônica contribui para a umidade e para a formação de sistemas convectivos que geram chuvas intensas através da evapotranspiração, e que persiste mesmo na estiagem por conta das profundas raízes. As chuvas convectivas são fenômenos predominantemente locais, de curta duração e ocorrem de forma intermitente; são os tipos de chuvas frequentes na região da área de estudo e geram grandes volumes de chuva, Porto Velho é apontada como a área com maiores volumes trimestrais de chuva, com 983 mm (Fisch; Vendrame; Hanaoka, 2007; Franca, 2015).

Importa para o entendimento de processos erosivos, características físicas da chuva relacionadas à quantidade ou pluviosidade total, a intensidade ou intensidade pluviométrica e a distribuição sazonal (Buckman; Brady, 1976), a relação estabelecida entre as informações de quando chove e o quanto chove. Esta última é a principal informação que determina a quantidade de energia potencial disponibilizada para se transformar em energia cinética (Crepani; Medeiros; Palmeira, 2000). De maneira geral, as chuvas com maior intensidade pluviométrica podem apresentar poder erosivo maior visto que disponibilizam energia para o desprendimento de partículas.

Para determinar as chuvas que foram simuladas na área de estudo, procuramos estabelecer o critério de simular eventos chamados intensos por alguns autores (Santos Neto, *et al.*, 2014; Costa *et al.*, 1998; Yevjevich, 1972). Apesar de não serem os mais recorrentes durante o ano, são eles os mais agressivos e que promovem maiores danos porque disponibilizam maior energia para ocorrência do processo erosivo (Santos; Griebeler; Oliveira, 2010; Mello; Viola, 2013). Desta forma, os dados obtidos para uma estação automática instalada em Porto Velho (INMET, 2021) foram organizados considerando os eventos caracterizados como intensos.

No município de Porto Velho ocorre, por ano, para cada 11 horas de chuva, 1 hora de precipitação com volume superior a 10 mm que são consideradas chuvas de eventos intensos. Do total de horas de chuva registrado pela estação do INMET, 0,7% de todo o período estudado correspondeu a estes eventos (Santos Neto *et al.*, 2014). Costa *et al.* (1998) também consideram como eventos intensos os que ocorrem superiores a 10mm/h. Yevjevich (1972) considera que

chuvas a partir de 30mm/h é que são consideradas intensas e a partir de 50mm/h a intensidade torna-se considerada crítica.

Santos Neto *et al.* (2014) constataram que o outono, período de meses em que ocorre a transição do período seco para o período chuvoso, é a estação na qual ocorre chuva horária com volume maior do que 10 mm com mais frequência do que nas demais estações do ano. Portanto, os experimentos de simulação de chuvas foram realizados neste trimestre de transição.

Os dados da estação justificam a intensidade aplicada na chuva simulada sobre as parcelas hidroerosivas estudadas na superfície das estradas, para que a intensidade simulada se aproxime de eventos intensos que ocorrem naturalmente na área. O bico aspersor utilizado no simulador com uma pressão entre 48 a 70 Kpa foi capaz de simular estes eventos 25 a 38mm/h, que são chuvas comuns na área de estudo, como podem confirmar os dados da estação instalada no município de Porto Velho.

Para ampliar o conhecimento da dinâmica de chuvas voltada para eventos intensos na área, dentro da série analisada (2008-2018), destaca-se o ano de 2009 pela ocorrência de 74 eventos intensos, de modo que os eventos entre 10 e 20mm são os mais comuns identificados. Em média, aproximadamente 70% dos eventos intensos diários estiveram dentro desta faixa de intensidade pluviométrica.

Quanto à erosividade calculada para as chuvas nesta região, estudo desenvolvido por Neto e Aleixo (2020) explica a variabilidade dos índices de erosividade mensal na região Amazônica de acordo com sua sazonalidade. Os índices de erosividade mensal na região apresentaram índices superiores a $700 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$, para os meses de dezembro a maio. Do mês de junho até o mês de setembro há uma diminuição dos índices em cerca de 29%, registrando erosividade de $500 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ mês}^{-1}$. Nos meses de transição, os valores costumam voltar a aumentar, porém foram valores superiores a $700 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Ou seja, chuvas com maior potencial de ocorrência do processo erosivo ocorrem nos meses de transição, período que foram realizados os experimentos SCPA.

Uma limitação da pesquisa foi a ausência do cálculo de erosividade das chuvas por evento, para que o evento simulado se assemelhasse ao ocorrido na região de Porto Velho em termos de potencial erosivo. Neste caso seria necessário realizar o estudo da estação e aplicação do método EI30, uma vez que há uma lacuna de estudos relacionados ao estudo da erosividade das chuvas por evento, não só para o estado de Rondônia como para a Amazônia. O Índice de Erosividade Padrão EI30 é obtido como o produto da energia cinética total e da intensidade máxima de chuva em 30 minutos, para ser calculado precisa de dados de entrada do qual as estações pluviométricas instaladas não dispõem (Wischmeier; Smith, 1978).

Estudos como o de Trindade *et al.* (2016) mostraram a erosividade de chuvas em nível de Brasil, onde observaram que os índices mais elevados foram dados entre novembro e fevereiro, mas não dá conta do detalhe requerido para esta presente investigação. Júnior (1996) relatou para o Pará, um índice de erosividade médio anual de 11.487,5 MJ.mm/ha.h.ano, no período de outubro a abril, correspondendo a 88% do EI30 anual. Santos Neto *et al.* (2014) realizaram a análise da variabilidade diurna média das precipitações em Porto Velho (RO) entre 1998 e 2013, mas não calcularam o EI30.

Em outras etapas é importante realizar os cálculos de erosividade das chuvas para o município de Porto Velho, o que permite também a calibração do Simulador de chuvas portátil utilizado. Desta forma, poderão ser agregadas informações quanto ao elemento fundamental do processo erosivo que são as chuvas, entendendo seu comportamento frente ao experimento aplicado e se aproximando sempre que possível da realidade observada para a área de estudo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES – NÍVEL PROCESSUAL

Os resultados alcançados no nível processual são relacionados à fase de obtenção de dados da área de estudo, a partir da identificação de pontos para execução dos experimentos na BHARG. Foram realizadas: atualização do banco de dados das estradas; a definição das unidades morfopedológicas; análise morfométrica e hidrológica da BHARG acrescida das estradas; a elaboração de referencial teórico voltado para o estudo do simulador de chuvas e erosão dos solos em estradas; a definição do esboço metodológico e construção de formulários que foram utilizados nas atividades de campo; hierarquização das estradas e setorização da BHARG; definição dos trechos estabelecidos para execução dos testes SCPA e levantamento das características básicas das estradas simuladas.

5.1 TRECHOS ESTABELECIDOS E LOCAIS DE EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO SCPA

Atualmente o desmatamento associado à abertura das estradas é a melhor representação da alteração da paisagem do bioma amazônico e um de seus maiores problemas (Laurance; Goosem; Laurance, 2009; Skidmore *et al.*, 2021). Desde o final da década de 1980, Fearnside (1991) alertou para tal problemática e apresentou seu gráfico de alças causais quando tratou do desmatamento em Rondônia no período da colonização agrícola e, conforme já abordamos, vivemos o mesmo problema nos dias de hoje. Em sua análise, o papel das estradas foi determinante na expansão do desmatamento, além de permitir a expansão humana e a ocupação de terras. Outros estudos levantam a questão de que a construção e/ou pavimentação de estradas e rodovias reflete consequências, condenando a floresta circunvizinha ao desmatamento, isto se deve à estreita relação entre desmatamento e a proximidade com as estradas e rodovias (Aguiar; Augusto, 2017; Barreto; Arima; Brito, 2005; Margulis, 2003; Medeiros, 2006; Rodrigues; Pinheiro, 2011; Walker; Moran; Anselin, 2000).

Considerando as especificidades da área da BHARG, a setorização proposta, o foco da execução dos testes SCPA foram nos setores 1 e 2. Nestes setores foram determinados os trechos que apresentam livre acesso para execução dos testes. Um total de quatro trechos foram selecionados para execução dos testes, dois em cada setor. Em cada trecho foram executadas seis repetições, contabilizando 24 testes no total (Tabela 5 e Figura 18).

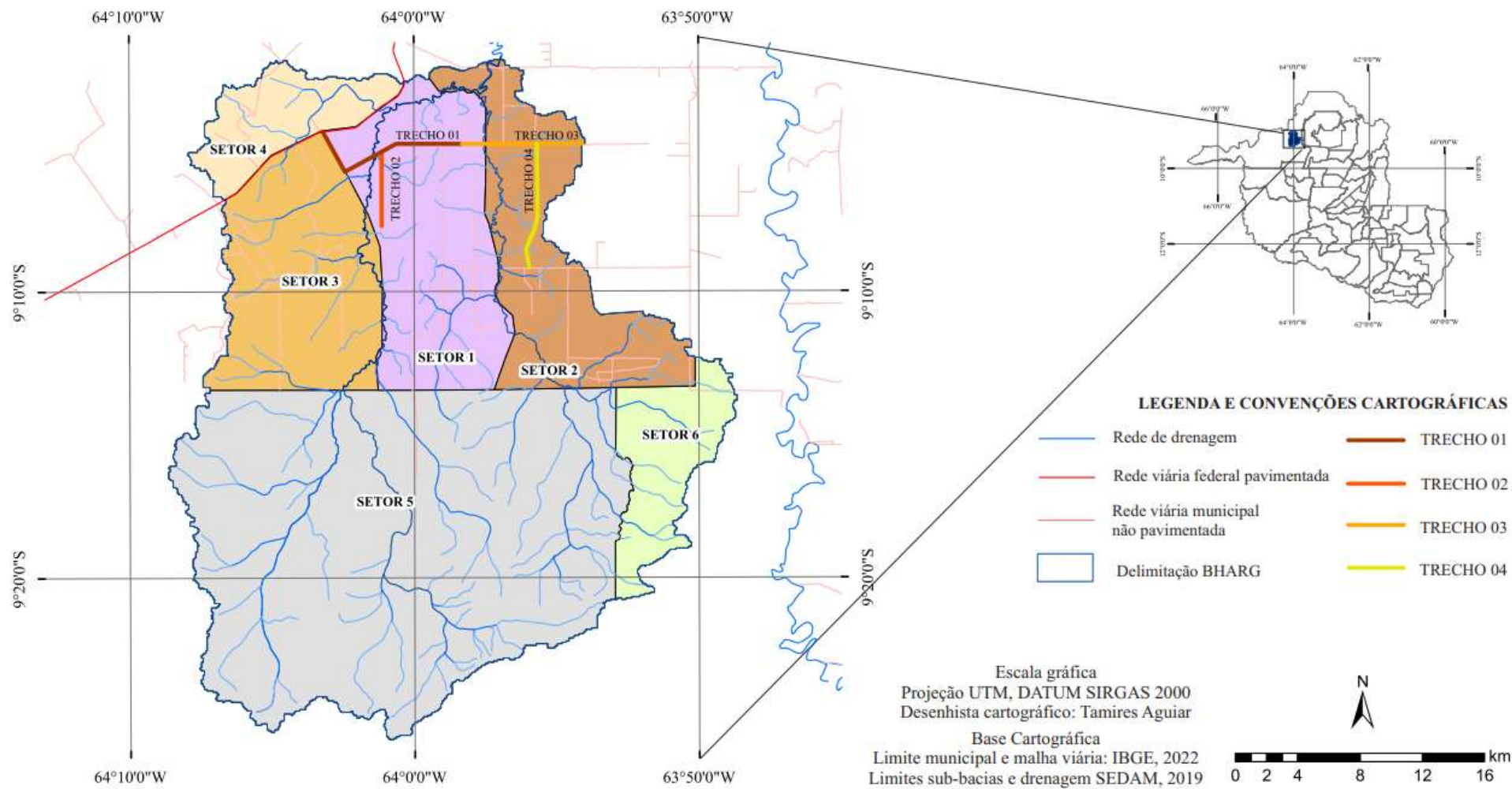
Tabela 5 – Controle de execução dos experimentos

Nome do trecho	Quantidade de simulações realizadas	Hierarquia da estrada do trecho	Tipo de uso	Unidade morfopedológica
TRECHO 1 – SETOR 1	6	3ª ordem	Floresta e pasto	UMF 2
TRECHO 2 – SETOR 1	6	4ª ordem	Floresta	UMF 2
TRECHO 3 – SETOR 2	6	2ª ordem	Pasto e cultura temporária	UMF 1
TRECHO 4 – SETOR 2	6	3ª ordem	Pasto e cultura temporária	UMF 3

Fonte: Organizada pela autora.

Neste contexto, em uma menor escala, a BHARG representa as interações antrópicas relacionadas ao avanço da abertura de estradas em ambiente amazônico. E, devido à extensa rede hidrográfica, procuramos estabelecer alguns critérios para o estudo se desenvolver em uma de suas sub-bacias, e dentro da delimitação de sub-bacia outros critérios foram levados em consideração para efetivamente levar à escolha dos trechos onde os experimentos foram realizados.

Figura 18 – Localização dos Trechos para execução dos experimentos SCPA



Fonte: Organizado pela autora.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS

Durante a execução dos experimentos SCPA foi possível realizar o levantamento da estrutura básica das estradas que estão recebendo os experimentos. Algumas características fundamentais foram levantadas e descritas nos trechos 1, 2, 3 e 4, em cada ponto das 9 repetições dos experimentos nos trechos. O Quadro 5 mostra os pontos mapeados e as principais características observadas. As estradas dos trechos 01 e 02 no setor 1 têm predominantemente a UMF 02 na sua delimitação, as dos trechos 03 e 04 que estão presentes no setor 2 têm predominância das UMF 03 e 01. Em nossas observações e medições de campo, identificamos que a Largura Total (LT) das estradas é semelhante, diferenciando-se em relação à Largura do Leito de Rolamento (LLR).

Em relação à LT da estrada não há diferenças significativas, apenas uma variabilidade mais alta entre as medições de repetições no trecho 02 (48%) e 04 (25%), paralelamente, os trechos mais extensos foram o 01 e 03 (Quadro 5).

Já quanto à LLR há diferenças estatísticas entre todos os trechos, sendo que os trechos 3 e 4 presentes no setor 2 da BHARG foram os que apresentaram LLR maiores. Este dado conversa com o fato de que são estradas hierarquizadas como de 2ª ordem, cuja função é destinada ao escoamento da produção das culturas temporárias desenvolvidas (arroz, milho e soja, essencialmente) e das grandes propriedades com pastagem. Precisam oferecer boa mobilidade aos veículos, porque promovem a distribuição de automóveis das vias de 3ª ordem para as de movimento principal, inclusive dando acesso aos grandes maquinários da produção agrícola dos grandes latifúndios, por isto é visivelmente identificável que o revestimento primário apresenta contínua manutenção e tem alta demanda de veículos (VMT 5,17) quando comparado aos demais trechos.

Estes trechos (3 e 4) estão associados à jurisdição municipal e promovem mobilidade e acesso de veículos pesados, ambas as extremidades das estradas se conectam para escoamento da produção agropecuária em franca expansão, cuja finalidade principal é atender o escoamento da produção. Logo, a LLR que é a parte da estrada efetivamente utilizada para o fluxo de veículos acaba aumentando também.

O trecho 01 trata-se da estrada de acesso do setor 1, é uma estrada utilizada normalmente como via coletora de distribuição e transição, porque coleta o tráfego de veículos provenientes das vias locais de acesso para a via de movimento principal que é a BR-364. Apresenta revestimento primário e, pelos relatos de moradores locais e pelas condições da estrada, é um trecho que não recebia manutenção há pelo menos 4 anos. Porém, nas últimas atividades de

campo, em outubro de 2023, foi constatado uma visível manutenção relacionada à raspagem do leito em todo o trecho. A LLR foi baixa quando comparada aos demais, porém maior que o trecho 2 que se localiza no mesmo setor. Aparenta intensidade de fluxo moderado (VMT 2,33), pois, dá acesso em pelo menos uma das extremidades da estrada a outras vias coletoras de distribuição, sob jurisdição municipal, e acesso à via principal que é a BR-364. Este trecho foi hierarquizado como de 3ª ordem e cruza desde rios efêmeros a rios de 5ª ordem, que é o Rio das Garças, principal da BHARG (Quadro 5).

O Trecho 2 presente ainda no setor 1 da BHARG é, hierarquicamente, de 4ª ordem porque apresenta função local de acesso, ou seja, uma das extremidades do trecho não está conectada com vias de distribuição e não está conectada diretamente com as estradas primárias de movimento principal. Esta via fornece acesso às vias de 5ª ordem, próximas de um assentamento da área onde há várias propriedades redistribuídas pelo INCRA, recentemente, em 2013; associa-se a baixo fluxo de veículos (VMT 0,43) porque não há fluxos de escoamento da produção de cultura temporária plantada em larga escala ou grandes áreas de pastagem. O T2 tem floresta em todo o seu curso e atende áreas de plantio para subsistência e abastecimento local, a LLR foi a menor observada entre os trechos (2,8m) (Quadro 5).

Quadro 5 – Descrição dos pontos onde as estradas foram mapeadas nos trechos do setor 1 e 2 da BHARG

Setor / Trecho/ Extensão em km	Pontos de SCPA	Hierarquia do trecho de estrada	LTE* (m)	LLR** (m)	VMT (unidade por tempo de experimento)***	Talude esquerdo (m)	Talude direito (m)	Interseção Ordem Do Rio
SETOR 1 TRECHO 01 (9,7 km)	SCPA 01 FLORESTA	3ª ORDEM	6,3	3,2	3	1,1	0,6	RIO DE 1ª, 2ª e 5ª ORDEM
	SCPA 02 FLORESTA		6,1	3,4	2	1	0,7	
	SCPA 03 FLORESTA		6,4	3,5	2	1,2	0,8	
	SCPA 04 FLORESTA		6,16	3,2	4	0,7	0,6	
	SCPA 05 FLORESTA		5,91	3,0	2	1,0	0,9	
	SCPA 06 FLORESTA		5,17	2,7	1	0,8	0,5	
		Média geral	6,01	3,17	2,33	0,97	0,68	
SETOR 1 TRECHO 02 (4,9 km)	SCPA 01 FLORESTA	4ª ORDEM	15,4	3,04	0	0,5	0	RIO DE 1ª e 2ª ORDEM
	SCPA 02 FLORESTA		13,1	3,1	1	0,9	0	
	SCPA 03 FLORESTA		13,3	3,1	2	0,7	0	
	SCPA 04 FLORESTA		5,88	2,7	3	0,2	0,6	
	SCPA 05 FLORESTA		5,53	2,5	3	0,06	0	
	SCPA 06 FLORESTA		5,03	2,4	0	0,2	0,2	
		Média geral	9,71	2,81	1,50	0,43	0,13	
SETOR 2 TRECHO 03 (7,3 km)	SCPA 01 CULTURA TEMPORÁRIA E PASTO	2ª ORDEM	7,4	3,7	4	0	0	RIOS DE 1ª ORDEM
	SCPA 02 CULTURA TEMPORÁRIA E PASTO		6,2	4	4	0	0	
	SCPA 03 CULTURA TEMPORÁRIA E PASTO		5,4	3,6	3	0	0	
	SCPA 04 CULTURA TEMPORÁRIA E PASTO		6,8	3,8	13	0	0	
	SCPA 05 CULTURA TEMPORÁRIA E PASTO		5,6	2,8	3	0	0	
	SCPA 06 PASTO		7,8	3,4	4	0,4	0,2	
		Média geral	6,53	3,55	5,17	0,07	0,03	
SETOR 2 TRECHO 04 (1,4 km)	SCPA 01 CULTURA TEMPORÁRIA E PASTO	2ª ORDEM	12,5	3,8	8	0,1	0	RIOS DE 1ª ORDEM
	SCPA 02 CULTURA TEMPORÁRIA E PASTO		10,4	4,1	6	0,4	0,45	
	SCPA 03 CULTURA TEMPORÁRIA E PASTO		10,4	3,8	4	0,6	0	
	SCPA 04 CULTURA TEMPORÁRIA		6,8	3,1	2	0,4	0,1	
	SCPA 05 CULTURA TEMPORÁRIA		8,8	6,1	3	0,1	2,8	
	SCPA 06 PASTO		6,3	4,4	3	0	0,7	
		Média geral	9,20	4,22	4,33	0,27	0,68	

Nota: * Largura Total da Estrada. ** Largura do Leito de Rolamento *** Volume Médio de Tráfego, obtido através da quantidade de veículos que trafegaram durante a execução do experimento SCPA.

Fonte: Organizado pela autora.

Esta descrição morfológica dos trechos é importante para descrever as características dos trechos assentados em distintos setores da área e, principalmente, auxiliar a discussão dos resultados quanto aos dados obtidos ao mapear e isolar variáveis que podem ser controladoras

do processo, tais como volume de tráfego dos veículos que preparam sedimentos para serem transportados ou largura do leito de rolamento.

Considerando que as estradas apresentam características e hierarquias diferentes, procuramos nos subitens subsequentes identificar padrões entre diferenças das médias de produção de escoamento superficial a partir do experimento SCPA.

Para analisar padrões de escoamento superficial e da produção de sedimentos em estradas não pavimentadas da BHARG, os experimentos SCPA foram aplicados nos trechos de estradas com livre acesso, dentro da área delimitada da bacia nos setores 1 e 2. Os testes foram realizados com simulações de chuva na intensidade média de $35 \pm 4,7 \text{ mm h}^{-1}$ com mínima de 27 mm h^{-1} e máxima de 45 mm h^{-1} . As áreas de contribuição das parcelas hidroerosivas foram em média de $3,9 \pm 0,4 \text{ m}^2$, com inclinações médias de $7,6^\circ$, embora tenham máximas e mínimas variáveis entre $16,6^\circ$ e $3,1^\circ$, o que implica necessidade de avaliar particularidades importantes de cada parcela em diferentes trechos instalados.

O desempenho nas repetições de taxas de precipitação foi alcançado. Há baixo desvio padrão obtido entre as médias nas repetições de cada experimento SCPA. O desvio padrão variou entre 0,05 e 0,06, entre as 24 repetições realizadas nos trechos de estradas não pavimentadas. Estes valores, associados ao coeficiente de variação máximo de 12%, demonstram a baixa variabilidade entre elas, o que significa dizer que os eventos de chuva simulados apresentaram taxas de precipitação semelhantes na ordem de até 8% de variação. O Coeficiente de Uniformidade aplicado apresentou uma média entre as precipitações simuladas dentro do limite $>80\%$.

Partindo destes parâmetros gerais que mostraram a dinâmica hídrica estabelecida na execução do experimento SCPA, buscou-se analisar as respostas hidrológicas da parcela hidroerosiva aberta em relação ao tempo do experimento e os efeitos das características físicas do local, tanto no escoamento quanto em relação à produção de sedimentos por meio da correlação de variáveis.

5.3 RESPOSTAS HIDROSEDIMENTOLÓGICAS DO EXPERIMENTO SCPA: PROCESSOS HIDROLÓGICOS NAS PARCELAS HIDROEROSIVAS

As parcelas hidroerosivas abertas que se formaram a partir do início dos experimentos SCPA correspondem a microssistemas pedogeomorfológicos pontuais, que podem expressar em uma maior escala a troca de energia e matéria que se processa em condições de eventos de chuva sobre a superfície das estradas. A escala é pontual, se considerarmos o efeito de

produção-transporte de sedimentos em termos de bacia hidrográfica, visto que há condições (por exemplo) de tempo de residência do sedimento, quando ele fica estocado até ser transportado-exportado do sistema de drenagem. Nem todo sedimento produzido é necessariamente exportado pelo canal fluvial. Os processos que o experimento SCPA realizado explica estão no contexto destes microssistemas estabelecidos na parcela hidroerosiva, de produção de fluxos superficiais e de sedimento (Antoneli; Thomaz, 2016; Thomaz; Vestena; Ramos, 2013). Parcelas pequenas de até 1m² foram úteis para avaliações de curto prazo da erosão do solo (Thomaz; Vestena, 2011).

Uma vez efetivados os fluxos superficiais e o arraste de material nestes microssistemas, foi possível analisar respostas entre as distintas características da superfície das estradas durante a dinâmica hidroerosiva, especialmente no que se refere às condições de escoamento superficial e produção de sedimentos, observando o processo em ocorrência, como preconiza a análise hidrogeomorfológica de processos superficiais (Goerl; Kobiyama; Santos, 2012; Thomaz; Ross, 2006). Como resultado da dinâmica estabelecida após o contato da superfície com a água obtivemos taxas de concentração de sedimentos ($\text{g L}^{-1} \text{min}^{-1}$), taxas de perda de solo (g m^{-2}) e coeficientes de escoamento (%) nas parcelas hidroerosivas formadas.

Pautado na análise dos fatores condicionais, nas parcelas hidroerosivas, o primeiro processo que se efetivou foi o salpico, um efeito causado pelo impacto da gota de chuva que quebra os agregados do solo e disponibiliza as partículas individualmente para transporte. Este processo pode ocorrer de forma ainda mais intensa em áreas como a superfície das estradas, por serem desprovidas de quaisquer coberturas do solo que possam diminuir a colisão direta das gotas de chuva e as consequentes desagregações diretas por este processo (Castro *et al.*, 2006; Guerra; Cunha, 1999; Ramos *et al.*, 2011; Thomaz, 2018); pode ser mais intenso no início da chuva e associa-se também à umidade que o solo apresenta, quanto mais úmido menor é a taxa de salpicamento. Portanto, com o decorrer do evento pluviométrico a umidade aumentou, diminuiu o salpicamento e ampliou a capacidade de escoamento (Bradford; Huang, 1996; Julião *et al.*, 2011).

Logo, no primeiro intervalo (0 a 6 min), o coeficiente de escoamento formado era de apenas 14,8% e o destacamento das partículas gerou valor máximo de $9,45 \text{ g L}^{-1} \text{min}^{-1}$ de concentração de sedimentos. Após a saturação e provável diminuição da taxa de salpicamento (> 6min de experimento), os coeficientes de escoamento aumentaram para valores superiores a 43%, próximos à concentração de $20 \text{ g L}^{-1} \text{min}^{-1}$ de partículas foram concentradas. Estes sedimentos estiveram disponibilizados pelo volume de tráfego e pelo próprio salpico no início do evento.

Conforme o esperado, a média dos coeficientes de escoamento obtidos para os experimentos SCPA ($48,4 \pm 10,5\%$) demonstram uma diferença superior aos valores verificados em áreas florestais com 3% e em áreas de cobertura morta que tiveram valores próximos a 4,3% e 25% (Jordan, 1970; Larsen *et al.*, 1999). Em Zemke (2016) observou-se que o solo florestal mostra um fluxo superficial estável, mas quase insignificante. Não há nenhum padrão perceptível de aumento das taxas de escoamento, o que mostra que mesmo após 90 minutos de chuva com uma intensidade de chuva de 45 mm h^{-1} e 43,6 litros de chuva aplicada à superfície da parcela, a capacidade de infiltração não foi excedida (Zemke, 2016).

Neste estudo, os valores encontrados de Coeficiente de Escoamento (CE) para as estradas assemelharam-se aos obtidos nos estudos com simulação de chuvas já realizados (Tabela 6), ainda que um pouco inferiores aos encontrados na superfície de estradas de Porto Rico e no Paraná/BR por exemplo, e que são de ambientes tropicais, cujos valores estão próximos aos relatados em Ramos-Scharron e LaFevor (2016) e apresentam-se condizentes às respostas obtidas por outros estudos realizados na superfície das estradas descritos resumidamente na Tabela 6.

Tabela 6 – Estudos relacionados aos Coeficientes de escoamento e taxas de erosão em estradas não pavimentadas com uso de simuladores de chuva

Fonte	Coeficiente de escoamento (%)	Taxa de produção de sedimento	Local	Intensidade da chuva aplicada	Tamanho médio da parcela
Cerda (2007)	61,2	$132,8 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ($55,4 \text{ g m}^2$)	Leste da Espanha	45 mm h^{-1}	$0,41 \text{ m}^2$
Ramos-Scharrón e Thomaz (2016)	51	$27 \text{ g m}^{-2} \text{ cm}^{-1}$	Porto Rico - ambiente tropical	25 a 58 mm h^{-1}	3 a 7 m^2
Zemke (2016)	78,6	195 g m^{-2}	Alemanha Ocidental	40 mm h^{-1}	1 m^2
Thomaz e Ramos-Scharrón (2015)	39,7	$42,4 \text{ g m}^{-2}$	Rio das Pedras Guarapuava	$42,9 \text{ mm h}^{-1}$	$5,2 \text{ m}^2$
Thomaz e Pereira (2013)	72,2	$205,2 \text{ g m}^{-2}$	Guariroba, Guarapuava Paraná	$115,5 \text{ mm h}^{-1}$	Microravinas
Este estudo	48,4	$93,25 \text{ g m}^{-2}$	Amazônia	35 mm h^{-1}	3,1 a $5,7 \text{ m}^2$

Fonte: Organizado pela autora.

5.3.1 Formação de fluxos hídricos e transporte de sedimentos

Observou-se que a partir do salpicamento, a superfície do solo foi modificada através da ação da desagregação das partículas e pela ruptura por hidratação rápida, o que levou ao empocamento da água e sua interação com os fluxos hídricos iniciais da superfície, dando origem à formação do escoamento superficial que se concentrou na seção inferior da calha

montada na parcela hidroerosiva aberta (Ramos *et al.*, 2011; Thomaz, 2019; Viana; Fernandes Filho; Schaefer, 2004). As parcelas tiveram tamanhos variáveis entre 2,9 a 5,4 m² com média de 3,9±0,4 m².

O tempo necessário para iniciar o escoamento superficial por saturação após o início da simulação das chuvas na parcela variou entre 1,06 minutos (Simulação 6 do Trecho 3) e 4,4 minutos (Simulação 4 e 6 do Trecho 1). Porém, para o escoamento concentrar e chegar até a parte inferior da parcela para coleta efetiva, o tempo mínimo foi de 1,76 minutos e o máximo de 7,3 minutos, representados pela taxa de escoamento inicial de 25,3% e 16,7%. Observou-se, que o tempo de retorno do escoamento superficial foi inversamente proporcional às taxas de escoamento que se formaram até os 7 minutos iniciais do experimento ($r = -0,6$).

Considerando a média geral entre todos os eventos SCPA realizados, foi necessário 4,35 minutos para ocorrer efetivo declínio da capacidade de infiltração da água no solo e iniciar a coleta de escoamento concentrado nos potes, o que concretizou a produção de água e sedimento através do escoamento superficial, demonstrando o tempo que a água interagiu com o solo de baixa umidade até que encontrasse capacidade para o escoamento, em Thomaz e Ramos-Scharrón (2015) a média foi inferior a 6min.

A lâmina d'água média necessária para produzir escoamento concentrado suficiente para ser coletado na parte inferior da parcela foi de 3,47±0,73mm, em outros estudos relacionados à simulação de chuvas em estradas a média obtida foi de 1,8mm (Ramos-Scharron; Lafavor, 2016), 2mm (Thomaz; Pereira, 2013), 4mm (Thomaz; Ramos-Scharrón, 2015) e 6mm (MacDonald; Coe, 2007).

Estes parâmetros são importantes para expressar o tempo que a superfície demora para dar resposta de escoamento superficial frente à chuva simulada, fator que pode estar relacionado à umidade inicial da superfície, condições de infiltrabilidade do leito da estrada ou até mesmo com o grau de declive do leito da estrada, e que auxiliam no entendimento geral do fenômeno hidroerosivo.

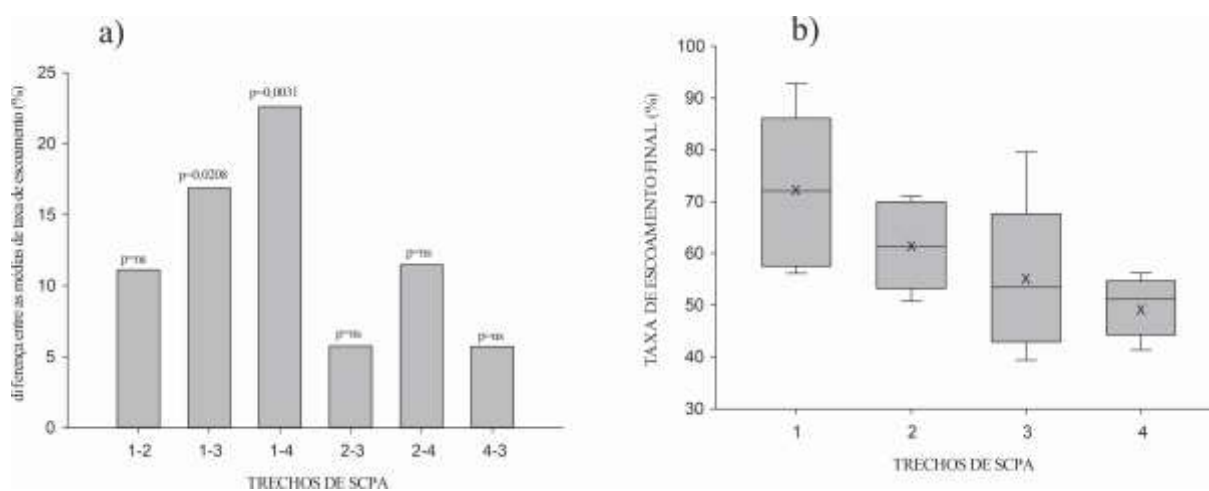
O escoamento total coletado entre os eventos simulados mostrou uma média de produção de água e de concentração de sedimentos equivalentes a 66,2 ml s⁻¹ e 25,2 g L⁻¹ min⁻¹, respectivamente, o que significa afirmar, a partir deste volume de água produzido e da concentração de sedimentos nos potes, que em um evento simulado por 25 min houve a produção de 99,3 litros de água provenientes do escoamento e 630g de sedimentos transportados neste mesmo período. Pode-se por assim dizer que a quantidade de sedimento transportado foi o resultado da interação entre o impacto da gota da chuva formada e do fluxo

superficial, posteriormente concentrado nas calhas, associado às condições de estruturas das estradas que serão detalhadas nas respostas entre os trechos analisados nos itens subsequentes.

5.3.2 Coeficiente de escoamento e taxa de produção de sedimento entre os trechos

Não foram observados valores discrepantes (outliers), ou seja, pontos atípicos, observando a Figura 19b e 20 que demonstra as taxas de escoamento final (%). Ao analisar a dispersão dos dados (Fig. 19b), observamos que não existem dados que fujam da normalidade, causando qualquer tipo de anomalias.

Figura 19 – Gráficos de Perda de solo e de taxas de escoamento final. a) ANOVA – diferença entre as médias dos trechos e b) taxas de escoamento (Coeficiente) entre os trechos



Fonte: Dados obtidos em atividades de campo (2023). Organizado pela autora.

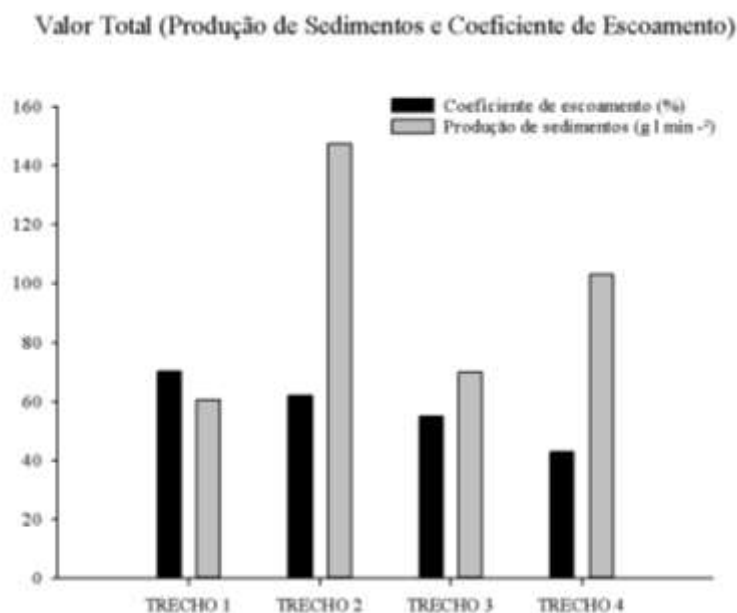
Com relação à tendência mediana, a distribuição simétrica dos dados está presente nos trechos 1 e 2, e assimétrico positivo no trecho 4. Os trechos 1 e 3 demonstram uma maior variabilidade quando comparados com os trechos 2 e 4 no conjunto dos dados analisados. Observamos que o Coeficiente de escoamento superficial médio foi maior no T1 e T2 com 72,5% e 61,37%, respectivamente. Analisando a Figura 20a, que demonstra a diferença entre as médias dos trechos, observamos que o Trecho 1 apresenta as maiores diferenças quando comparadas ao T4 (22,6%) e diferenças significativas entre o T3 (16,9%). Estas diferenças podem reiterar que as distintas variáveis controladoras do processo erosivo observado incidem em diferentes taxas de escoamento na superfície das estradas (Figura 20).

O T1 e T2 (Setor 2 da BHARG) tiveram sua dinâmica hídrica controlada pela declividade da parcela, já o T3 e T4 (setor 2 da BHARG) produzem escoamento superficial menor e que não foi explicado pela declividade da parcela ou pela densidade aparente

observada. Entretanto, as umidades mais baixas foram inferidas para estes trechos (T3 e T4) e as umidades foram bem correlacionadas com o Coeficiente de escoamento, de modo que quanto menor foi a umidade, menores foram também as taxas de escoamento. Destacamos o fato de que estas diferenças podem ser observadas pelos distintos padrões de tipo de uso e cobertura da terra estabelecidos em cada Setor. De forma que estes dados apontam para o fato de que setores da bacia com predominância de agricultura de subsistência (setor 1) apresentaram maior potencial de geração de escoamento nas estradas. Porém, estes valores foram inversamente proporcionais à produção de sedimentos no caso do Trecho 1. As estradas podem apresentar também taxa de compactação diferenciada e, portanto, geração de escoamento também distinto, fatores que dizem respeito à própria hidráulica do escoamento (Figuras 19a e 20).

Quanto aos valores das taxas de perda de solo, no geral, a média geral apresentada foi de $93,25 \pm 76,1 \text{ g m}^{-2}$. Entre os trechos, o Trecho 2 foi o que apresentou maior produção de sedimentos seguido do Trecho 4, estes — apesar de estarem em setores de uso e cobertura da terra distintos — tiveram em comum o fato de que a variável controladora do processo foi a densidade aparente observada. Estas diferenças podem reiterar que as distintas variáveis controladoras do processo erosivo observado incidem também em diferentes taxas de produção de sedimento das estradas.

Figura 20 – Valores totais relacionados à perda de sedimentos e coeficiente de escoamento

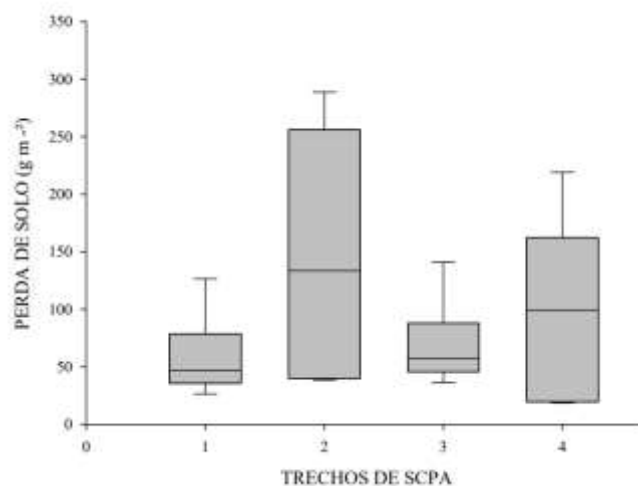


Fonte: Elaborado pela autora.

Também pode ser evidenciada a variabilidade aproximada de 40%, o que demonstrou a alta variabilidade entre os dados (Tabela 8 e Figuras 20 e 21), e se compara à variação da taxa

de escoamento final que foi até menos estável em comparação à produção de sedimento ($59,8 \pm 17,9\%$).

Figura 21 – Gráfico de Perda de solo por trechos de experimento SCPA



Fonte: Dados de atividade de campo (2023). Organizado pela autora.

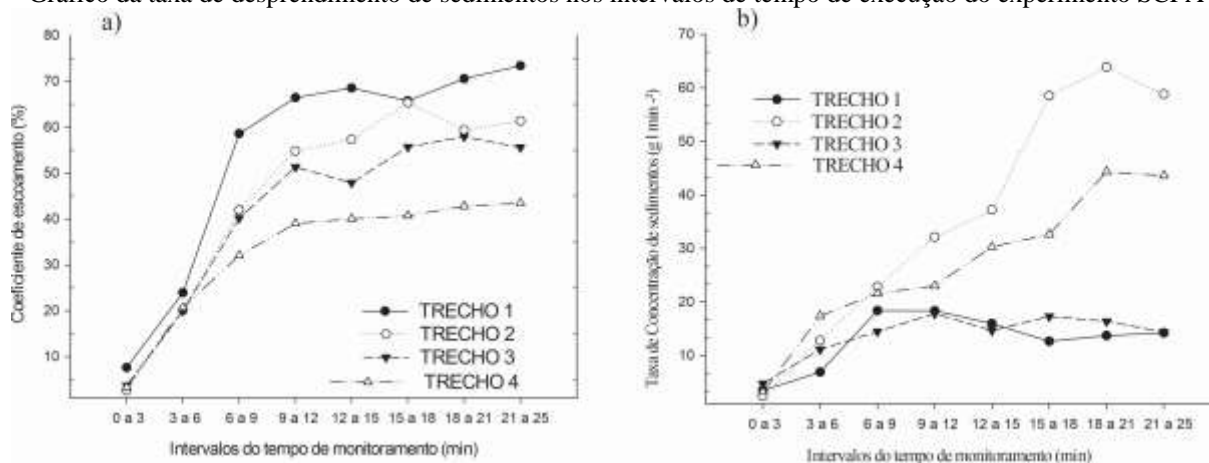
Podemos afirmar que estes valores de perda de solo (Figura 22), em sua maioria, excedem os registros observados em trilhas sujeitas a deslizamento, que são parcialmente ou totalmente cobertas por vegetação ($13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), e em áreas não perturbadas ($5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) (Zemke, 2016). Da mesma forma, ultrapassam os valores associados a solos com cobertura morta ($0,13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm}^{-1}$) (Ramos-Scharrón; Thomaz, 2016). Estes resultados indicam a necessidade de precaução no que diz respeito à produção de sedimentos, especialmente considerando que estamos lidando com superfícies que não apenas têm contato direto com as águas das chuvas, mas também estão sujeitas a uma preparação de sedimentos devido ao fluxo de veículos em sua superfície. Estes fatores combinados resultam em uma produção e transporte de sedimentos muito mais elevados do que em solos que possuem algum tipo de cobertura.

Embora na produção total dos trechos não tenhamos observado diferenças estatísticas significativas nas perdas de solo entre os trechos, com um valor de p igual a 0,19, um F crítico de 3,09 e um F de 1,07, podemos inferir que a hipótese de que os trechos apresentariam produção de sedimentos diferenciadas foi comprovada, pois, verifica-se uma produção significativa de sedimentos no Trecho 02 e Trecho 04 e uma alta concentração de sedimentos no escoamento em todos os trechos, que podem ser justificáveis por conta das variáveis controladoras dos processos que são distintas.

5.3.3 Análise da dinâmica têmporo-espacial durante eventos simulados

Considerando os dados que foram levantados é possível realizar uma análise do comportamento hidroerosivo ao longo do tempo de experimento, observando a dinâmica têmporo-espacial da ocorrência no evento entre os trechos analisados, conforme a Figura 22. A dinâmica de escoamento inicial apresentada durante os 9 minutos iniciais é semelhante entre todos os trechos, bem como a perda de solo (Figuras 22a e 22b, respectivamente), porém, no decorrer do experimento demonstraram tendências diferentes entre os trechos para produção de escoamento e de sedimentos.

Figura 22 – a) Gráfico que expressa o coeficiente de escoamento no decorrer do tempo do experimento; b) Gráfico da taxa de desprendimento de sedimentos nos intervalos de tempo de execução do experimento SCPA



Fonte: Organizado pela autora.

A média de Coeficiente de escoamento superficial para os experimentos foi de $14,2 \pm 7,9\%$, correspondente a uma taxa média de escoamento de $17,64 \text{ ml s}^{-1}$, atingindo o pico de escoamento nos minutos finais com uma média de $68,18 \text{ ml s}^{-1}$ e CE de $57,7\%$. As concentrações máximas de sedimento se deram a partir do intervalo de 18 a 20 minutos, apresentando uma média geral de $34,57 \text{ g L}^{-1} \text{ min}^{-1}$.

Esta dinâmica é esperada dentro da perspectiva hidrogeomorfológica de que os efeitos das estradas na produção de sedimentos estão relacionados à geração de escoamento superficial e processos de redistribuição, e indica ainda que a chuva aplicada durante o experimento SCPA foi suficiente para gerar um excesso de precipitação que ocasionou os fluxos superficiais difusos e/ou concentrados após 6 minutos de experimento, o que a partir de então aumentou em $43,5\%$ deste período para o pico nos 12 minutos. Estes fluxos puderam sucessivamente dar origem ao desprendimento de sedimento e a partir de 15 minutos as tensões de cisalhamento excederam a resistência do solo ocasionando o pico de desprendimento no intervalo entre 18 a 21 minutos, quando se observou um aumento da taxa de perda na ordem de $348,9\%$, sendo que a concentração nos minutos iniciais foi de $7,7 \text{ g L}^{-1} \text{ min}^{-1}$ para $34,5 \text{ g L}^{-1} \text{ min}^{-1}$ no intervalo acima mencionado. Nestas parcelas ocorreu erosão entre a ravina que envolveu processos associados ao salpico e ao fluxo superficial difuso durante o período de execução do SCPA. Normalmente erosão em ravina ocorre em tempos de execução de experimentos mais longos e se estabelece quando o fluxo é concentrado (Thomaz, 2019).

De maneira geral, após o intervalo de 12 a 15 minutos houve entre os trechos a diminuição do aumento de água do fluxo de escoamento (Figura 22a), momento em que se mantiveram os coeficientes de escoamento. Os Coeficientes de escoamento apresentaram

condições estáveis após os 15 minutos de experimento SCPA, fato que se observa por meio dos baixos coeficientes de variação do volume de escoamento nos últimos 10 minutos de experimento inferiores a 5% (T1 2,2 %; T2 1,5%; T3 0,6 %; e T4 0,5) (Zemke, 2016).

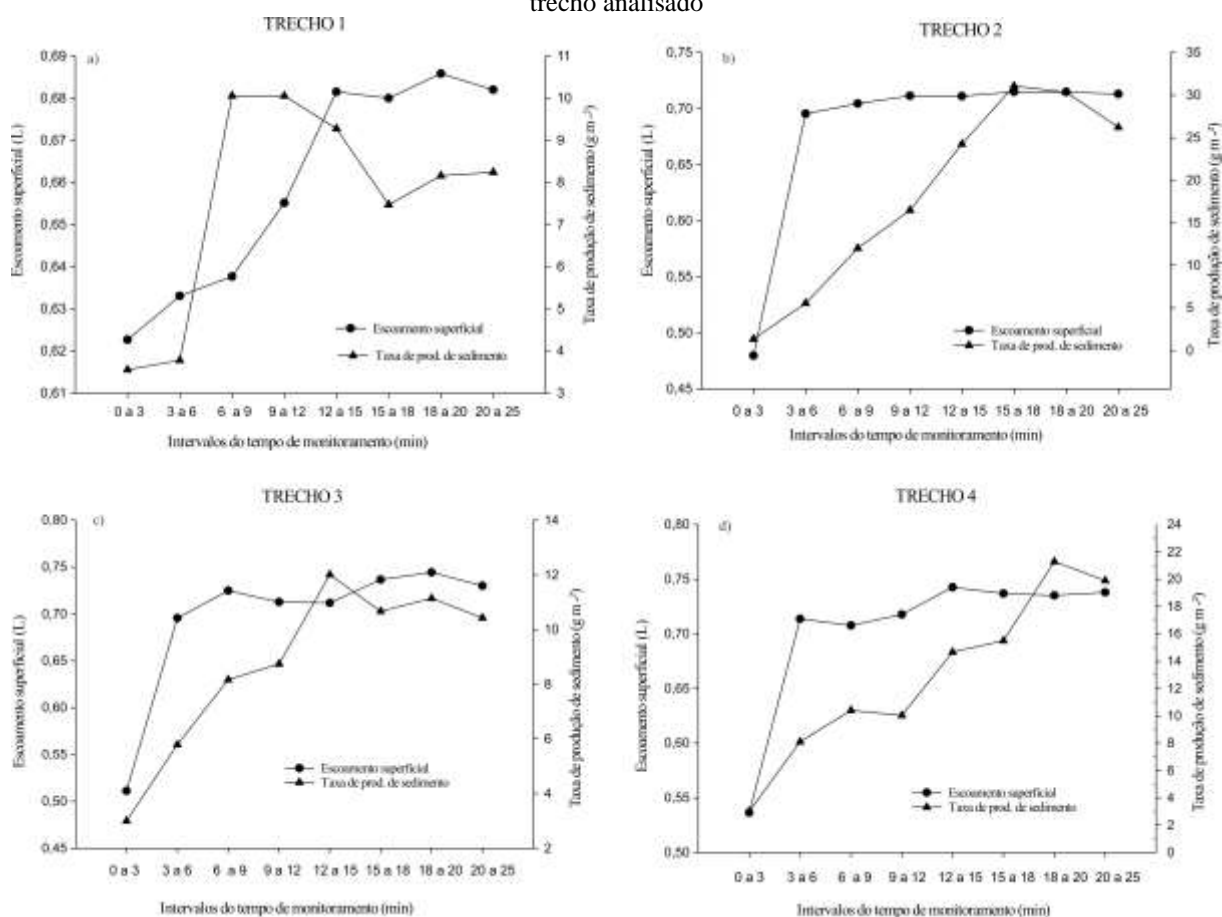
Para as taxas de desprendimento de sedimentos, esta tendência de manter percentuais semelhantes de perda se dá após o intervalo de 15 a 18 minutos. Estudos recentes mostraram o pico de concentração de sedimentos numa faixa de 12 minutos de experimento, enquanto a taxa de escoamento se manteve constante durante a chuva aplicada (Thomaz; Ramos-Scharrón, 2015). As concentrações máximas de escoamento ocorreram nos minutos de intervalos finais do experimento, variando entre 73,4% para o Trecho 1 (máxima) e 43,4% (mínima) para o trecho 4, fato também observado em Thomaz e Pereira (2013).

Ao analisar as variações que ocorreram durante os experimentos entre os trechos (Figura 23), duas observações principais merecem destaque.

Primeiro nota-se que o Trecho 2, cuja variável controladora do processo hidroerosivo foi a densidade aparente da estrada, registrou desprendimentos de sedimento mais expressivos em comparação com os outros trechos. Estes últimos tiveram sua dinâmica influenciada por outras variáveis controladoras, como a umidade e a declividade da parcela.

A segunda refere-se ao Trecho 1, onde as taxas de produção de sedimentos foram inversamente proporcionais à produção de escoamento. Enquanto o escoamento ainda apresentava uma média de $18,8 \text{ ml s}^{-1}$ (CE 19%), as taxas de produção de escoamento alcançaram seu pico ($10,5 \text{ g m}^{-2}$), e embora o escoamento superficial tenha permanecido aumentando constantemente, as taxas de produção de sedimento decaíram substancialmente, como pode ser observado no gráfico da Figura 23a. Este fato pode estar relacionado a duas condições: 1. a quantidade de sedimento preparado pelo tráfego de veículos disponível em relação aos demais trechos proporcionou maior destacamento no início da chuva simulada (embora não tenha sido o trecho com os maiores valores de produção de sedimento total, ele apresentou maior percentual de sedimento preparado para o transporte nos eventos simulados); 2. a quantidade de escoamento superficial produzido e a própria hidráulica de escoamento que pode ter atuado nesta parcela, no que se refere ao destacamento-limitado, quando a erosividade do escoamento se torna menor que a resistência do material a ser erodido (Govers, 1991; Thomaz, 2019).

Figura 23 – Gráficos da variação temporal de produção de sedimentos e de coeficientes de escoamento para cada trecho analisado



Fonte: Organizado pela autora.

Nos Trechos 2, 3 e 4 a produção de sedimentos aumentou gradativamente no decorrer do experimento. Neste caso, o trecho 2 se destacou pelo fato de ter produzido a maior média total de sedimentos (146,6 g m²), mesmo a taxa de escoamento se mantendo, desde o intervalo de 3 a 6 minutos, com cerca de 60% do total de água disponibilizada pelo evento em superfície, atuando no carregamento das partículas de sedimentos que estavam preparados para transporte (Figura 23). Podemos destacar que os processos hidrodinâmicos relacionados à erosão na superfície ocorreram de maneira temporalmente distinta nos trechos 1 e 2, mesmo se tratando do mesmo setor 1 da BHARG

Na dinâmica hidrossedimentológica entre processos que ocorreram no evento SCPA, as respostas mostraram que os sedimentos foram preparados pelo primeiro processo hidrodinâmico estabelecido (salpico) logo no início da chuva, e foram transportados ao longo dos 25 minutos de experimento, passando por estágios de picos de concentração, por um segundo processo: o de escoamento superficial difuso.

Estes processos observados em uma dinâmica integrada e interdependente controlam o escoamento superficial e a carga de sedimento do microsistema pedogeomorfológico das parcelas. É importante reconhecer que no compartimento microgeomorfológico das parcelas abertas há limitação quanto aos processos hidrodinâmicos analisados, considerando o contexto espacial formado nas parcelas, seu tamanho e os locais de sua instalação. Nos detemos a explicar as variações que ocorreram nas duas variáveis analisadas (Coeficiente de Escoamento e Taxa de produção de sedimentos) e ainda assim foi possível identificar variáveis controladoras e obter um perfil e tendências do desprendimento de sedimentos nas estradas vinculadas ao sistema hidrográfico da Bacia do alto rio das Garças.

5.3.4 Umidade relacionada às Taxas de Escoamento e ao Tempo de Retorno

O tempo de retorno está relacionado ao tempo para início da ocorrência dos primeiros fluxos observados na superfície da parcela. A chuva simulada através do experimento SCPA entrou em contato com o solo de umidade média de 8,9% na camada superficial das estradas analisadas e formou os fluxos hídricos na parcela em média em 2, 26 minutos. Outros estudos realizados mostraram uma média de 1,8 e 2 minutos (Thomaz; Ramos-Scharrón, 2015) e 5 minutos para formação de fluxo concentrado para coleta na calha (Ramos-Scharrón; Thomaz, 2016). Todos corroboram o fato de que as estradas apresentam uma rápida resposta frente aos eventos de chuva e se agregam aos estudos do potencial transformador dos ciclos hidrológicos nas bacias hidrográficas.

Foi importante mensurar a umidade estabelecida para os solos no início do experimento, porque dela podem derivar diferentes intensidades de processos efetivos na dinâmica hidroerosiva. O processo de salpicamento, por exemplo, associa-se à umidade destacando as partículas do solo pelo impacto da gota e preparando os sedimentos para serem transportados nos processos de escoamento superficial, que se dá após o salpico atuar na superfície durante o experimento SCPA, podendo causar ou não o selamento, associado à diminuição da retenção, infiltração e redistribuição de água no solo, aumentando o escoamento superficial (Thomaz, 2012, 2018).

Neste sentido, as médias de umidade para cada trecho são bem correlacionadas à taxa de escoamento inicial, calculada até os 6 minutos iniciais de experimento ($r = 0,95$), bem como às médias de coeficiente de escoamento gerado para cada trecho ($r = 0,7$). Umidade correlacionada à perda de solo apresenta fraca correlação negativa, mostrando uma leve tendência de maior perda de solo em solos que apresentam menores umidades (Tabela 7), fato

não observado em Cerda (2007) (por exemplo), em que a maior umidade do solo induziu maior escoamento superficial e, como consequência, maiores taxas de erosão.

Os valores de umidade explicaram as taxas de escoamento apresentadas, de modo que quanto maior foi o percentual de umidade, maiores também foram os valores para taxas de escoamento inicial e na média geral de cada trecho. O Trecho 1 foi o que apresentou os maiores valores de coeficiente de escoamento na média geral (57%) e na taxa de escoamento final (72%) e também apresentou umidade de 13% para as camadas iniciais, a maior umidade observada. Este fato também foi observado em Ramos-Shárron e Thomaz (2016), em que os mais altos coeficientes de escoamento estiveram relacionados ao teor de umidade mais alto pré-simulação. A taxa de escoamento final foi destaque por apresentar baixas variações entre as repetições em cada trecho simulado.

Tabela 7 – Correlações entre variáveis associadas à umidade obtida para a camada de 0 a 10cm de profundidade da superfície das estradas

Variáveis	Valor de r
Umidade versus Tempo de retorno na coleta efetiva	0,43
Umidade versus Coeficiente de Escoamento	0,70
Umidade versus Taxa de escoamento inicial	0,95
Umidade versus Perda de solo	-0,35

Fonte: Organizado pela autora com base em dados de campo e laboratório.

Individualmente, apenas para o trecho 3 os percentuais de umidade obtidos explicaram o tempo de retorno obtido nas parcelas e taxa de escoamento inicial (r 0,88); nos demais trechos, por conta de grande variabilidade nestes parâmetros (47%), não foi observada correlação entre os dados.

Porém, entende-se a complexidade que envolve o processo erosivo na desagregação e transporte de sedimentos, de forma que diversas variáveis hidráulicas relacionadas ao próprio escoamento superficial, declividade da parcela, ou às características dos sedimentos da superfície das estradas, atuaram simultaneamente durante os experimentos SCPA realizados. A interação dinâmica e interdependente dada entre estas variáveis dificulta o entendimento dos mecanismos controladores que podem explicar as variações físico-hidráulicas observadas durante o experimento. É necessário procurar detalhes do processo que ocorreu ao longo dos 25 minutos de realização do experimento SCPA, comparando características específicas em relação aos trechos analisados, juntamente com o padrão de escoamento superficial formado e a qualidade e quantidade de sedimentos produzidos no período de ocorrência hidroerosiva.

5.3.5 Fatores controladores da dinâmica hidrogeomorfológica estabelecida entre os trechos

O Coeficiente de escoamento (CE) variável analisado, que contabilizou e retratou a quantidade de retorno de água em relação ao que foi disponibilizado durante a chuva simulada, foi calculado como a razão entre o escoamento total e a precipitação média em dado período, e a taxa de produção de sedimento estabelecida considerando o total desprendido e a área da parcela (Thomaz; Ramos-Scharrón, 2015).

Os CE variaram conforme as condições da estrutura do solo, especialmente relacionados às primeiras camadas que estão expostas aos processos analisados durante os 25 minutos de experimento SCPA. Entre todos os experimentos SCPA realizados, o Coeficiente de escoamento variou entre mínimo de 35,4% na Simulação 1 do Trecho 4, e máximo de 68,7% na Simulação 2 do Trecho 1. Contrastando com o acumulado de escoamento entre os trechos, a taxa de sedimento desprendido com estes coeficientes de escoamento foi, respectivamente, de 69,9 e 29,8 g L⁻¹ min⁻¹ (Tabela 8).

Tabela 8 – Resumo dos parâmetros mensurados durante as SCPA das estradas do Setor 1 (trecho 1 e 2) e Setor 2 (trecho 3 e 4)

TRECHOS	SCPA	Taxa de precipitação (mm min ⁻¹)	Coefficiente de escoamento (%)	Concentração de sedimentos (g L ⁻¹ min ⁻¹)	Taxa de perda de sedimentos (g m ⁻²)	Declividade da parcela (°)	Tempo para início do escoamento (min)	Taxa de escoamento inicial (mm min ⁻¹)	Umidade (%)	Densidade aparente (g cm ⁻³)
TRECHO 1	1	0,63	67,9	29,87	65,97	13	4	2,52	10,41	1,83
	2	0,61	68,72	10,83	20,39	16	5,33	3,25	16,61	1,98
	3	0,46	40,05	6,16	12,84	6,36	6,7	3,08	9,55	1,97
	4	0,68	58,49	9,92	24,43	3,19	2,33	1,58	17,09	1,77
	5	0,6	50,11	16	32,09	7,17	3,25	1,95	14,05	1,71
	6	0,61	60,66	10,75	21,21	9,87	3,56	2,17	12,58	1,91
	<i>Média</i>	<i>0,59</i>	<i>57,65</i>	<i>13,92</i>	<i>29,48</i>	<i>9,26</i>	<i>4,19</i>	<i>2,42</i>	<i>13,38</i>	<i>1,86</i>
<i>D.P</i>	<i>0,067</i>	<i>10,03</i>	<i>7,68</i>	<i>17,28</i>	<i>4,27</i>	<i>1,43</i>	<i>0,59</i>	<i>2,84</i>	<i>0,10</i>	
<i>C.F</i>	<i>11,22</i>	<i>17,40</i>	<i>55,21</i>	<i>58,60</i>	<i>46,09</i>	<i>34,23</i>	<i>24,49</i>	<i>21,28</i>	<i>5,52</i>	
TRECHO 2	1	0,75	57	9,72	18,39	12,2	2,61	3,47	9,04	1,64
	2	0,68	56,42	14,7	25,80	8,94	2,51	3,16	12,97	1,56
	3	0,61	48,83	53,11	93,45	13,9	2,66	1,98	7,04	1,73
	4	0,61	41,43	10,53	16,46	7,31	2,46	1,50	9,49	1,59
	5	0,65	51,59	84,35	111,94	8,53	2,4	1,56	12,52	1,86
	6	0,49	36,13	53,06	87,40	7,92	2,86	1,40	8,31	1,61
	<i>Média</i>	<i>0,63</i>	<i>48,56</i>	<i>37,578</i>	<i>58,91</i>	<i>9,8</i>	<i>2,58</i>	<i>2,18</i>	<i>9,90</i>	<i>1,66</i>
<i>DVP</i>	<i>0,079</i>	<i>7,61</i>	<i>27,98</i>	<i>39,48</i>	<i>2,40</i>	<i>0,15</i>	<i>0,83</i>	<i>2,15</i>	<i>0,1</i>	
<i>C.F</i>	<i>12,54</i>	<i>15,67</i>	<i>74,47</i>	<i>67,03</i>	<i>24,52</i>	<i>5,85</i>	<i>38,05</i>	<i>21,77</i>	<i>6,18</i>	
TRECHO 3	1	0,58	35,4	9,94	20,17	5,06	3,36	2,61	4,66	1,67
	2	0,59	54,88	27,14	50,12	6,45	3,15	2,15	6,32	1,67
	3	0,46	35,4	17,72	31,10	4,71	4	2,38	7,97	2,13
	4	0,59	53,24	11,24	20,09	3,75	2,76	1,62	8,04	1,9
	5	0,61	36,62	9,97	17,19	2,16	7,33	4,47	11,47	1,71
	6	0,59	51,92	13,9	24,76	5,63	2,08	1,22	19,88	1,85
	<i>Média</i>	<i>0,57</i>	<i>44,57</i>	<i>14,98</i>	<i>27,24</i>	<i>4,62</i>	<i>3,78</i>	<i>2,41</i>	<i>9,72</i>	<i>1,82</i>
<i>DVP</i>	<i>0,05</i>	<i>8,82</i>	<i>6,06</i>	<i>11,15</i>	<i>1,37</i>	<i>1,69</i>	<i>1,02</i>	<i>4,98</i>	<i>0,16</i>	
<i>C.F</i>	<i>8,77</i>	<i>19,78</i>	<i>40,50</i>	<i>40,95</i>	<i>29,76</i>	<i>44,73</i>	<i>42,69</i>	<i>51,28</i>	<i>9,04</i>	
TRECHO 4	1	0,47	35,4	69,9	102,89	7,3	3,51	2,57	12,23	1,82
	2	0,56	37,7	45,5	66,36	8	3,75	2,58	10,56	1,35
	3	0,49	36,9	19,45	29,87	4,88	2,17	2,03	12,01	1,77
	4	0,49	40,21	4,87	8,22	3,55	2,96	1,42	14,21	1,72
	5	0,45	41	6,09	7,94	8,28	6,93	3,11	9,07	1,74
	6	0,6	65,29	31,8	61,46	7,35	1,76	1,05	10,94	1,91
	<i>Média</i>	<i>0,51</i>	<i>42,75</i>	<i>29,60</i>	<i>46,12</i>	<i>6,56</i>	<i>3,51</i>	<i>2,13</i>	<i>11,50</i>	<i>1,72</i>
<i>DVP</i>	<i>0,052</i>	<i>10,25</i>	<i>22,90</i>	<i>34,22</i>	<i>1,73</i>	<i>1,67</i>	<i>0,71</i>	<i>1,59</i>	<i>0,17</i>	
<i>C.F</i>	<i>10,31</i>	<i>23,99</i>	<i>77,39</i>	<i>74,19</i>	<i>26,46</i>	<i>47,78</i>	<i>33,41</i>	<i>13,85</i>	<i>10,16</i>	

Nota: DP: Desvio Padrão e CF: Coeficiente de Variação.

Fonte: Organizado pela autora com base nos dados obtidos nos experimentos de campo (2021).

Nestes casos mencionados, o alto coeficiente de escoamento indica que do total precipitado que foi disponibilizado no evento, aproximadamente 70% estiveram em superfície podendo mobilizar as partículas. Logo, esperava-se que em locais cujas taxas de Coeficiente

fossem altas, os resultados de mobilização e transporte de sedimentos se correlacionassem positivamente a eles, fato não observado.

Nos valores gerais, entre todos os trechos não houve correlação entre as variáveis de coeficientes de escoamento e de taxa de perda de sedimento ($r = -0,10$), e a correlação dada entre os trechos foi baixa. A variabilidade pode ser vista pontualmente, por exemplo, entre a taxa de produção de sedimentos em simulações SCPA com coeficientes de escoamento iguais a 35,4% (SCPA 1 e 3 do trecho 3; e SCPA 1 do trecho 4). Ambos os trechos (3 e 4) pertencentes ao mesmo setor da BHARG, com coeficientes de escoamento iguais, apresentaram diferenças superiores a 85% entre as taxas de transporte de sedimentos (Tabela 8). Isto é, médias de coeficiente de escoamento semelhantes produziram sedimentos de forma completamente diferentes em alguns trechos. Neste caso, outras condicionantes de características do leito e trafegabilidade da estrada podem explicar melhor a produção de sedimentos do que somente o coeficiente de escoamento, pois, a variável controladora neste caso não é esta mencionada.

Neste contexto, os desprendimentos podem ser explicados a partir do fato de que os trechos possuem características diferentes de leito e diferentes condições de trafegabilidade que acabam preparando partículas para arraste. Embora com menores condições de escoamento formadas, as partículas podem ser deslocadas caso estejam preparadas para o transporte, por causa da trafegabilidade contínua de veículos no caso do setor 2, já que são efetivados usos voltados para produção de grãos e criação bovina em larga escala e as estradas são usadas (neste caso) para escoamento da produção agropecuária da região.

Embora a correlação entre os parâmetros analisados para cada trecho seja variável conforme se observa na Tabela 9, eles ajudam a explicar algumas condições hidrogeomorfológicas das estradas. As taxas de perda de sedimento mostraram uma relação linear com a declividade da parcela, ou seja, as perdas de sedimento no experimento SCPA foram explicadas pela declividade da parcela em todos os trechos, exceto para o trecho 2. Neste caso, é possível afirmar que – embora a declividade da parcela exerça um papel fundamental no aumento da velocidade de escoamento superficial que decorre da possível disponibilização de energia para desprendimento de particulados da estrada – para o trecho 2, a declividade da parcela não foi decisiva para controlar processos de escoamento superficial e taxas de produção de sedimentos.

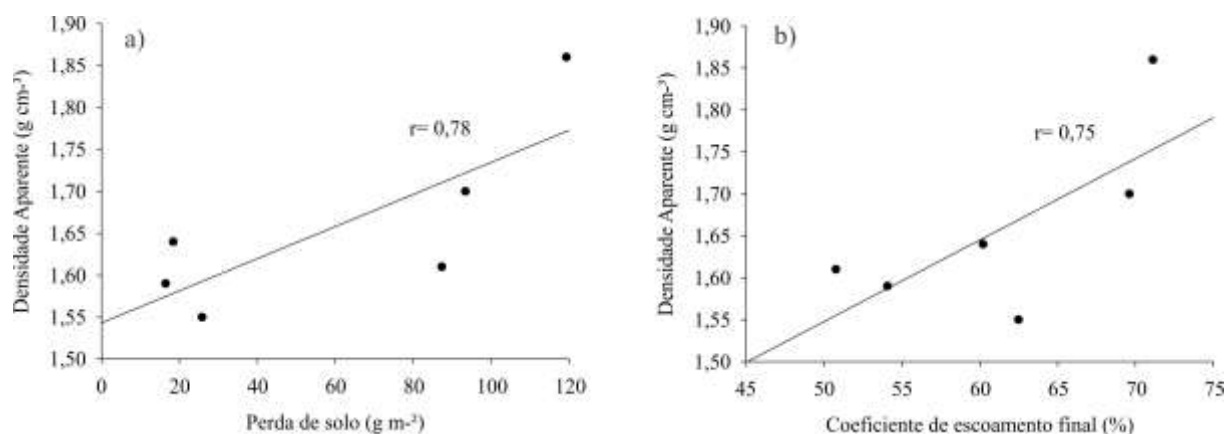
Tabela 9 – Correlação (r) entre os parâmetros de dinâmica hidroerosiva

Parâmetros analisados	T1	T2	T3	T4
Coefficiente de escoamento <i>versus</i> declividade da parcela	0,65	0,52	0,13	0,18
Taxa de perda de sedimento <i>versus</i> declividade da parcela	0,64	0,002	0,69	0,44
Taxa de perda de sedimento <i>versus</i> coeficiente de escoamento	0,51	-0,23	-0,45	-0,4
Densidade aparente <i>versus</i> perda de solo	-0,42	0,78	-0,20	-0,01
Densidade aparente <i>versus</i> Coeficiente de escoamento final	0,005	0,75	-0,07	-0,11

Fonte: Organizado pela autora com base nos levantamentos de campo (2023).

A variável que explicou as taxas de perda de solo para o Trecho 2 esteve associada com a densidade aparente (Dap) (Tabela 8 e 9). Na correlação entre a perda de solo e densidade aparente, as menores Dap ($1,5 \text{ g/cm}^3$) representaram as menores taxas de perda de solo ($16,6 \text{ g m}^{-2}$) para a superfície das estradas. Isto ocorre porque a densidade aparente está associada à alteração das características superficiais do solo e que podem desencadear fatores do processo erosivo a partir da ruptura dos agregados. As partículas menores acabam preenchendo poros vazios que diminuem a permeabilidade da superfície, reduzem a infiltração da água no solo, que culminam com maior percentual de escoamento superficial, neste caso, influenciando diretamente as taxas de perda de solo com $r = 0,75$ (Antoneli, Bednarz, Thomaz, 2012; Guerra, 1999) (Tabela 9). Os parâmetros físicos que a estrada apresentou, tais como Dap, umidade e porosidade, se estabeleceram como variáveis controladoras dos processos hidrodinâmicos ocorridos no evento de chuva simulada, assim como já se reconheceu uma relação positiva importante entre Coeficiente de escoamento produzido e taxas de Densidade aparente em que as superfícies com densidades menores produziram coeficientes de escoamento menor (Ramos-Scharrón e Thomaz, 2016) (Figura 24).

Figura 24 – Gráficos de correlação entre as variáveis hidrológicas: a) Correlação entre Perda de solo e Densidade Aparente; b) Correlação dada entre Coeficiente de escoamento final e Densidade Aparente



Fonte: Dados de atividade de campo (2023). Organizado pela autora.

Observa-se também nas Tabelas 8 e 9 que a declividade das parcelas tem explicado as médias de taxa de produção de sedimentos e de coeficiente de escoamento para os trechos 1 e 3, de 29,5 g m⁻² e 57% e, 27,2 g m⁻² e 44,5%, respectivamente. A declividade, no caso dos trechos em questão, foi fator controlador do processo erosivo, visto que colaborou no aumento da velocidade de fluxos superficiais que ampliaram a força de cisalhamento exercida pelo escoamento, resultando em transporte de partículas do solo (Guerra, 1999; Shirin; Ahmadi; Jafari, 2011). Em Cunha, Thomaz e Vestena (2013) observou-se que a declividade também foi um fator/causa da maior perda de solo na estrada devido ao aumento na velocidade do escoamento, ocasionando inclusive a criação de pequenos sulcos erosivos nos caminhos preferenciais da via.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As respostas obtidas por meio do experimento SCPA estabeleceram um padrão de dinâmica de fluxos hidrológicos relacionados ao escoamento e à produção de escoamento dos trechos de estradas analisadas no ambiente Amazônico.

A hipótese de que os trechos apresentariam diferentes padrões de respostas hidrossedimentológicas associadas à produção de sedimentos e de escoamento superficial foi confirmada entre os setores com distintas UMF. Entre os trechos nota-se uma produção significativa e uma alta concentração de sedimentos no escoamento, porém as variáveis controladoras dos processos são distintas. Portanto, podemos dizer que o efeito das distintas UMFs que estão em contextos de setores com características de uso e cobertura também diferentes, foi percebido através da produção de sedimentos e do escoamento superficial durante o evento simulado. A quantidade de perda de solo das estradas da BHARG é próxima de estudos já realizados com chuvas simuladas e alta para todos os trechos e explica padrões erosivos distintos na produção de sedimentos da superfície das estradas abertas em distintas UMFs.

No entanto, é possível afirmar que as respostas de escoamento e produção de sedimento na superfície destas estradas, de acordo com o experimento SCPA, neste nível de escala de abordagem, estiveram mais relacionadas às variáveis controladoras que dizem respeito à Umidade, Declividade e Densidade Aparente do leito.

Notamos que a Densidade Aparente, enquanto variável controladora nos processos hidrodinâmicos, indicou uma tendência de gerar maior desprendimento de sedimentos em comparação com outras variáveis, como umidade e declividade da parcela, embora estas diferenças não tenham sido estatisticamente significativas.

Observou-se uma tendência na qual a umidade da superfície exerceu influência sobre o tempo de resposta do escoamento nas parcelas. Isto é evidenciado pelos valores observados até o momento, indicando que o tempo de resposta do escoamento foi determinado pela umidade na camada inicial até uma profundidade de 10 cm, reiterando condições de infiltrabilidade e saturação da superfície na hidrodinâmica. E a variável declividade pôde explicar os coeficientes de escoamento e as taxas de perda de sedimento para o trecho 2.

Já em relação à produção de escoamento superficial, as médias comparadas de coeficiente de escoamento entre os trechos mostraram padrões de fluxos hidrológicos suficientes para provar que o Trecho 1 presente no setor 1 da BHARG na UMF 2 é distinto estatisticamente dos trechos 3 e 4 assentados no setor 2 na UMF 1 e 3. Neste caso, setores da

bacia com predominância de agricultura de subsistência (setor 1) apresentaram maior potencial de geração de escoamento nas estradas, porém estes valores foram inversamente proporcionais à produção de sedimentos. Este fato pode estar relacionado à própria hidráulica de escoamento que pode ter atuado nesta parcela, no que se refere ao destacamento-limitado, quando a erosividade do escoamento é menor que a resistência do material a ser erodido e a quantidade de sedimento preparado para o transporte através do escoamento superficial (Govers, 1991; Thomaz, 2019).

Ao analisar os processos hidroerosivos em ocorrência por meio dos eventos experimentais, não foi possível observar, somente nos 25 minutos, uma tendência de redução na intensidade do desprendimento de sedimentos. Possivelmente, seria necessário prolongar a duração da simulação para uma análise mais precisa das tendências relacionadas à estabilização do desprendimento de sedimentos nestas estradas da Amazônia.

A investigação teórico-metodológica adotada nesta pesquisa possibilitou evidenciar o papel hidrogeomorfológico crucial das estradas na Amazônia e compreender as dinâmicas hídricas das suas superfícies. Isto foi possível ao analisarmos o funcionamento hidrodinâmico do processo erosivo em ocorrência e explorarmos fatores condicionais para explicar variáveis controladoras através da simulação de eventos de chuva.

Os efeitos das variáveis controladoras observadas nos processos hidrológicos analisados são reflexos dos fluxos produzidos pelas estradas não pavimentadas na Amazônia, na dimensão dos sistemas de paisagem, e são direta e indiretamente relacionados aos fluxos sociais da dimensão territorial. Conseguimos observar o resultado da interação antrópica neste ambiente de bacias hidrográficas através da investigação realizada. Alerta-se para a tendência de ampliação da rede de estradas, visto que a área está em franca expansão, uma vez que identificamos constantemente regiões de desmatamento recente e de queimadas na área, pressionando unidades de conservação e terra indígena vulneráveis em resistir a estas pressões, principalmente porque atores sociais com poder de mando político ou econômico demonstram não reconhecer a importância em manter unidades territoriais de proteção ecológica ao propor e legalizar a diminuição destas áreas, fato evidenciado pelas flexibilidades institucionais e susceptibilidade da gestão do poder público na aplicabilidade da legislação.

O estudo pôde contribuir com a discussão de ampliação da rede de estradas na Amazônia associando fluxos sociais aos fluxos hidroerosivos em bacias hidrográficas. Esta discussão amplia o conhecimento acerca do fato que as estradas continuam a atuar constantemente neste cenário por meio dos fluxos sociais, e por consequência ampliando também o potencial de degradação das bacias hidrográficas ao potencializar os fluxos hidroerosivos. Destacamos a

hierarquização das estradas realizada com predomínio de estradas de 4ª ordem em mais de 37% do total mapeado, mostrando um predomínio de segmentos de estradas com hierarquia funcional local de acesso, em que pelo menos uma das extremidades do trecho não está conectada com vias de distribuição de 3ª e 2ª ordem.

Porém, ainda identificamos algumas lacunas que podem ser abordadas em futuras investigações. Para contribuir com uma compreensão mais aprofundada dos processos hidrodinâmicos que justifiquem o comportamento hidroerosivo das estradas, é importante ampliar a quantidade de experimentos como os que realizamos em diferentes regiões da Amazônia. Para otimizar o simulador, é necessário calibrá-lo a fim controlar a energia cinética das chuvas aplicadas no ambiente amazônico, incluindo o cálculo do diâmetro médio da gota. Além disto, é crucial estender a duração dos experimentos para compreender a dinâmica de estabilização da perda de sedimentos nestas superfícies. A ampliação do número de trechos observados e a caracterização mais detalhada do tipo de sedimento desprendido podem fornecer uma compreensão mais completa das diferenças entre os trechos, considerando a escala dos setores das bacias hidrográficas.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o Quaternário. **Geomorfologia, São Paulo**, v. 18, p. 1-23, 1969.
- ACHARD, F. et al. Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. **Global change biology**, v. 20, n. 8, p. 2540-2554, 2014.
- AGUIAR, T. C.; AUGUSTO, A. R. Contexto de ocupação na Amazônia em área de impactos dos empreendimentos hidroelétricos: evolução temporal do desmatamento na sub-bacia do rio Mutum-Paraná. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, n. 2017-09, 2017.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test methods for determining sediment concentration in water samples**. D 3977-97, 2000.
- ANDERSON, E. P. et al. Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydropower dams. **Science advances**, v. 4, n. 1, p.1642, 2018.
- ANTONELI, V.; THOMAZ, E. L.; BEDNARZ, J. A. Produção de sedimento em caminhos de animais em Sistema de Faxinal na região centro-sul do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 3, 2012.
- ANTONELI, V.; THOMAZ, E. L. Perda de solo em estradas rurais em área de cultivo de tabaco na bacia do Arroio Boa Vista-Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 2, 2016.
- ARMAND, D. L. Relations fonctionnelles et corrélatives en géographie physique. **Mémoires de la Société géographique de l'URSS АРМАНД Д.Л.**, p. 81-94, 1949.
- ARNAEZ, J.; LARREA, V.; ORTIGOSA, L. Surface runoff and soil erosion on unpaved forest roads from rainfall simulation tests in northeastern Spain. **Catena**, v. 57, n. 1, p. 1-14, 2004.
- ASHER, S.; NOVOSAD, P. Rural Roads and Local Economic Development. **American Economic Review**, n. 110, p. 797-823, 2019.
- AUGUST, P.; IVERSON, L.; NUGRANAD, J. Human conversion of terrestrial habitats. **Applying landscape ecology in biological conservation**, p. 198-224, 2002.
- AZEVEDO-RAMOS, C.; MOUTINHO, P. No man's land in the Brazilian Amazon: Could undesignated public forests slow Amazon deforestation? **Land use policy**, v. 73, p. 125-127, 2018.
- BACCINI, A. G. S. J. et al. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature climate change**, v. 2, n. 3, p. 182-185, 2012.
- BARRETO, P.; ARIMA, E.; BRITO, M. Pecuária e desafios para a conservação ambiental na Amazônia. **Imazon**, n. 5, p. 4, 2005.

BASTOS, T. X.; DINIZ, T. D. de A. S. Avaliação do clima do Estado de Rondônia para desenvolvimento agrícola. **Embrapa Amazônia Oriental-Séries anteriores (INFOTECA-E)**, 1982.

BECKER, B. K.; MIRANDA, M.; MACHADO, L. O. **Fronteira Amazônica: Questões sobre a gestão do território**. Brasília: Ed. Universidade de Brasília, 1990, p. 219.

BERTOL, I. et al. Erosão hídrica em campo nativo sob diversos manejos: perdas de água e solo e de fósforo, potássio e amônio na água de enxurrada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1421-1430, 2011.

BERTOL, I.; BERTOL, C.; BARBOSA, F. T. Simulador de chuva tipo empuxo com braços movidos hidráulicamente: fabricação e calibração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1905-1910, 2012.

BERTRAND, G.; BERTRAND, C. **Uma geografia transversal e de travessias: o meio ambiente através dos territórios e das temporalidades**. Maringá: Massoni, 2007.

BEZERRA, R. B.; DANTAS, R. T.; TRINDADE, A. G. Caracterização temporal da precipitação pluvial do município de Porto Velho/RO no período de 1945 a 2003. **Sociedade & Natureza**, v. 22, p. 609-623, 2010.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 565-573, 2006.

BRANDES, H. et al. CRESI: A susceptibility index methodology to assess roads threatened by coastal erosion. **Ocean & Coastal Management**, v. 213, p. 105845, 2021.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7ª. ed. Rio de Janeiro, Livraria Freitas Bastos, 1989, 878 p.

BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1976. 595p.

CAO, L.; WANG, Y.; LIU, C. Study of unpaved road surface erosion based on terrestrial laser scanning. **Catena**, v. 199, p. 105091, 2021.

CARVALHO, D. F. et al. Soil loss and runoff obtained with customized precipitation patterns simulated by InfiAsper. **International Soil and Water Conservation Research**. v. 10, n. 3, p. 407-413, 2022.

CARVALHO, M. P.; HERNANI, L. C. Parâmetros de erosividade da chuva e da enxurrada correlacionados com perdas de solo e erodibilidade de um Latossolo Roxo de Dourados (MS). **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 25, p. 137-146, 2001.

CASSOL, E. A.; LIMA, V. S. de. Erosão em entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 117-124, 2003.

CASTRO, L. G.; COGO, N. P.; VOLK, L. B. S. Alterações na rugosidade superficial do solo pelo preparo e pela chuva e sua relação com a erosão hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.339-352, 2006.

CASTRO, S. S.; SALOMÃO, F. X. T. Compartimentação morfopedológica e sua aplicação: considerações metodológicas. GEOUSP, São Paulo, n. 7, p. 27-37, 2000.

CERDÀ, A. Soil water erosion on road embankments in eastern Spain. **Science of the total environment**, v. 378, n. 1-2, p. 151-155, 2007.

CERDÀ, A.; IBÁÑEZ, S.; CALVO, A. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. **Soil technology**, v. 11, n. 2, p. 163-170, 1997.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R. Applied hydrology. New York: McGraw-hill Book, 1988. 572p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Editora Blucher, 1988.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1999.

COE, M. T.; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B. S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River–Land surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of hydrology**, v. 369, n. 1-2, p. 165-174, 2009.

COLTRINARI, L. Paleosurfaces in southeastern Brazil: São José dos Campos plateau landform evolution. **Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 113-120, 2011.

COMINO, R. J. et al. Soil erosion processes in European vineyards: a qualitative comparison of rainfall simulation measurements in Germany, Spain and France. **Hydrology**, v. 3, n. 1, p. 6, 2016.

CONFESSOR, J. G.; RODRIGUES, S. C. Method For Calibration, Validation And Usage Of Rainfall Simulator Applied To Hydrogeomorphological Studies On Erosion Plots. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 19, n. 1, p. 221-229, 2018.

CONFESSOR, J. G.; SILVA, L. L.; RODRIGUES, S. C. Confecção de um simulador de chuvas móvel como ferramenta de disseminação do conhecimento Geomorfológico e preservação de ambientes. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 22, n. 4, 2021.

CORRÊA, R. L.; ROSENDAHL, Z.; MARAFON, G. J. Paisagem, Tempo e Cultura. **Geo UERJ**, n. 5, p. 105, 1999.

COSTA, R. F. da et al. Variabilidade diária da precipitação em regiões de floresta e pastagem na Amazônia. **Acta amazônica**, v. 28, n. 4, p. 395-395, 1998.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; PALMEIRA, A. F. **Intensidade pluviométrica: uma maneira de tratar dados pluviométricos para análise da vulnerabilidade de paisagens à perda de solo**. São José dos Campos: INPE, 2004.

CUNHA, M. C.; OLIVEIRA, A.; THOMAZ, E. L. Intercepção de fluxo subsuperficial causado por estradas rurais na bacia do rio Guabiroba, Guarapuava-PR. **Revista GEONORTE**, ed. esp. 4, v. 10, n. 1, p.164-169, 2014.

CUNHA, M. C. Avaliação da Eficácia das Caixas de Contenção de Sedimento em Estradas Rurais Não Pavimentadas na Bacia do Rio das Pedras, Guarapuava-Pr. **Ambiência**, 2011.

CUNHA, M. C. Caracterização das estradas rurais não pavimentadas como elementos presentes na paisagem da bacia hidrográfica do rio das pedras, Guarapuava-PR. **Revista GEOMAE**, v. 1, n. 2, p. 73-91, 2010.

CUNHA, M. C.; THOMAZ, E. L. Fluxo subsuperficial interceptado por estrada rural: características e distribuição na paisagem. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 37, n. 3, p. 429-447, 2017.

CUNHA, M. C. da; THOMAZ, E. L.; VESTENA, L. R. Medidas de controle de erosão em estradas rurais na bacia do Rio das Pedras, Guarapuava-PR. **Sociedade & Natureza**, v. 25, p. 107-118, 2013.

LUZ, C. C. et al. Simulated rainfall in Brazil: An alternative for assesment of soil surface processes and an opportunity for technological development. **International Soil and Water Conservation Research**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.05.002>

DA SILVA, M. F. et al. Contribution of tillage systems and crop succession to soil structuring. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104924, 2021.

DE MELO, L. B. B. et al. Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 208, p. 104876, 2021.

DE MOURA, M. S. et al. Soil management and diverse crop rotation can mitigate early-stage no-till compaction and improve least limiting water range in a Ferralsol. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106523, 2021.

DE MOURA-FÉ, M. M. Paisagem e a aplicabilidade geomorfológica do conceito. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 04, p. 1231-1237, 2019.

DE SY, V. et al. Land use patterns and related carbon losses following deforestation in South America. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 12, p. 124004, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (ed.). **Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais**. 1. ed. Rio de Janeiro, 1999. 195 p.

DIAS-ARIEIRA, C. R. et al. Correlations between nematode numbers, chemical and physical soil properties, and soybean yield under different cropping systems. **Rhizosphere**, p. 100386, 2021.

DOS SANTOS, J. Y. G.; SANTOS, C. A. G.; DA SILVA, R. M. Perdas de água e solo utilizando chuva simulada em diferentes coberturas superficiais e condições de umidade no Semiárido Paraibano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, p. 217-228, 2012.

DUBREUIL, V. et al. Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 3, p. 1446-1456, 2019.

DUNNE, T.; DIETRICH, W. Sediment sources in tropical drainage basins [Soil erosion, Kenya]. **ASA Special Publication-American Society of Agronomy (USA)**, 1982.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

ESPINDOLA, C. R. A pedologia e a evolução das paisagens. **Revista do Instituto Geológico**, v. 31, n. 1-2, p. 67-92, 2010.

FACHIN, P. A.; GONÇALVES, E. V. J.; THOMAZ, E. L. Comparação entre dois modelos de Agitador de Yoder na avaliação da estabilidade de agregados de solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n.2, p. 697-704, 2019.

FAIZ, A. et al. Sustainable rural roads for livelihoods and livability. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 53, p. 1-8, 2012.

FEARNSIDE, P. M. Extractive reserves in Brazilian Amazonia. **BioScience**, v. 39, n. 6, p. 387-393, 1989.

FEARNSIDE, P. M. Rondônia: Estradas que levam à devastação. **Revista Ciência Hoje**, Rio de Janeiro, v. esp. Amazônia, p. 116-122, 1991.

FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. **Environmental Conservation**, v. 28, n. 1, p. 23-38, 2001.

FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates, and consequences. **Conservation biology**, v. 19, n. 3, p. 680-688, 2005.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta amazônica**, v. 36, p. 395-400, 2006.

FEARNSIDE, P. M. BR-319 e a destruição da Floresta Amazônica. **Amazônia Real**, v. 19, 2018.

FENDRICH, R. et al. **Drenagem e controle da erosão urbana**. Curitiba: Champagnat, v. 4, 1997.

FILHO, João Meirelles. **O Livro de ouro da Amazônia**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2007. p. 133-134.

FOLTZ, R. B.; COPELAND, N. S.; ELLIOT, W. J. Reopening abandoned forest roads in northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters. **Journal of environmental management**, v. 90, n. 8, p. 2542-2550, 2009.

FONTES, A. L. **Geomorfologia fluvial e hidrografia**. São Cristóvão: EDUFS/CESAD, 2010.

Forman, R. T. T. et al. **Road Ecology: Science and Solutions**. Washington, D.C.: Island Press, 2003.

FRANCO, H. H. S. et al. Global applications of the Visual Evaluation of Soil Structure method: A systematic review and meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 190, p. 61-69, 2019.

FREITAS, F. J. de et al. Erosão em entressulcos sob caatinga e culturas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1743-1751, 2008.

FROLOVA, M. A paisagem dos geógrafos russos: a evolução do olhar geográfico entre o século XIX e XX. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 13, 2007.

FU, B.; NEWHAM, L. T. H.; FIELD, J. B. Modelling erosion and sediment delivery from unsealed roads in southeast Australia. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 79, n. 9, p. 2679-2688, 2009.

FU, B.; NEWHAM, L. T. H.; RAMOS-SCHARRÓN, C. E. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n. 1, p. 1-14, 2010.

GARRETT, R. D. et al. Intensification in agriculture-forest frontiers: Land use responses to development and conservation policies in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 53, p. 233-243, 2018.

GEBLER, L. et al. Comportamento do arraste superficial de fósforo reativo por enxurrada sob diferentes coberturas vegetais na cultura da maçã em regime de chuvas simuladas. **Embrapa Uva e Vinho-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2012.

GILLEY, J. E. Surface Detention on Cropland, Rangeland, and Conservation Reserve Program Areas. **Transactions of the ASABE**, v. 61, n. 3, p. 955-966, 2018.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M.; SANTOS, I. Hidrogeomorfologia: princípios, conceitos, processos e aplicações. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, 2012.

GOETTEN, V.; GOETTEN, W. J. Construção De Um Simulador De Chuva Para Análise Da Eficiência De Pavimentos Permeáveis. **Extensão em Foco**, v. 7, n. 1, p. 124-129, 2019.

GIBBS, H. K. et al. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. **Environmental research letters**, v. 2, n. 4, p. 045023, 2007.

GOODRICH-STUAR, E. J. **Mitigating confusion: classification of road subtypes and socioeconomic and environmental impacts of roads in the Amazon**. 2012. Tese - Faculty of the Department of Environmental Studies, University of Richmond, 2012.

GOVERS, G. Rill erosion on arable land in central Belgium: rates, controls and predictability. **Catena**, v.18, n.2, p. 133-155, 1991.

GRIGORIEV, A. A. The theoretical fundamentals of modern physical geography. *In*: TALMY, V.; LEVINSON, V. **The interaction of sciences in the study of the earth**. Moscou: Progress Publishers, 1968, p. 77-91.

GRILO, R.C.; ENAMI, L. Gestão de bacias hidrográficas com o uso de modelo preditivo de erosão dos solos e sistemas de informação geográfica. **Revista UNAR**, Araras, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2008.

GUERRA, A. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009.

GUERRA, J. T.; CUNHA, S. B. da. **Geomorfologia: técnicas e aplicações**. São Paulo: Bertrand Brasil, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Agropecuário 2017. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/index.html.

JENNY, H. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. Massachusetts: Courier Corporation, 1994.

JENNY, H. **The soil resource: origin and behavior**. New York: Springer Science & Business Media, 2012.

JULIÃO, L. G. F. et al. Atributos mecânicos e erosão por salpicamento em amostras de Latossolo vermelho-amarelo sob efeito de vinhaça. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 35, n. 1, p. 19-27, 2011.

KERNISKI, M. M.; CUNHA, M. C. Estradas rurais e os impactos em bacias hidrográficas gerados pela sua implantação e manutenção. **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**, v. 1, p. 406-416, 2017.

LAURANCE, W. F. et al. The future of the Brazilian Amazon. **Science**, v. 291, n. 5503, p. 438-439, 2001.

LAURANCE, W. F. et al. A global strategy for road building. **Nature**, v. 513, p. 229-232, 2014.

LAURANCE, W. F.; GOOSEM, M.; LAURANCE, S. G. W. Impacts of roads and linear clearings on tropical forests. **Trends in ecology & evolution**, v. 24, n. 12, p. 659-669, 2009.

LAURANCE, W.; VASCONCELOS, H.; LOVEJOY, T. Perda e fragmentação florestal na Amazônia: Implicações para a conservação da vida selvagem. **Órix**, v. 34, n. 1, p. 39-45, 2000. DOI: 10.1046/j.1365-3008.2000.00094.x

LENSE, G. H. E. et al. Effects of deforestation on water erosion rates in the Amazon region. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 4, p. 1-7, 2020.

LEAL, J. L. **A Amazônia brasileira e o seu caráter transnacional: O aproveitamento do seu patrimônio estratégico para garantia do desenvolvimento**. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade do Vale do Itajaí, 2019.

LEVIEN, R.; VAN LIER, Q. de J.; ALVES, A. G. C. Influence of surface crust on water infiltration rates measured by a rotating-boom rainfall simulator and a double-cylinder device. **Revista brasileira de ciência do solo**, Campinas, v. 24, n. 3, p. 479-486, 2000.

LOHMANN, M.; SANTOS, L. J. C. A Morfopedologia Aplicada À Compreensão Dos Processos Erosivos Na Bacia Hidrográfica Do Arroio Guassupi, São Pedro Do Sul–Rs. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, n. 2, 2005.

LU, X. et al. The effect of grid size on the quantification of erosion, deposition, and rill network. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 5, n. 3, p. 241-251, 2017.

LUCIANO, R. V. et al. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1733-1744, 2012.

MACDONALD, L. H.; COE, D. Influence of headwater streams on downstream reaches in forested areas. **Forest Science**, v. 53, n. 2, p. 148-168, 2007.

MARGULIS, S. Causes of Deforestation of the Brazilian Amazon. **World Bank working paper**, n. 22, v.1, 2003.

MAXIMIANO, L. A. Considerações sobre o conceito de paisagem. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 8, 2004.

MEDEIROS, R. Evolução das tipologias e categorias de áreas protegidas no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 9, p. 41-64, 2006.

MEDEIROS, R. B.; JESUS, A. D. de; ALVES, L. B. Erosões em estradas não-pavimentadas da bacia hidrográfica do Rio Formoso, Bonito/MS: diagnóstico e medidas de controle. **Confinis**, n. 57, 2022.

MELLO, C. R. de; VIOLA, M. R. Mapeamento de chuvas intensas no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 37-44, 2013.

MENDOZA, E. et al. Participatory stakeholder workshops to mitigate impacts of road paving in the Southwestern Amazon. **Conservation and Society**, v. 5, n. 3, p. 382-407, 2007.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. The expansion of Brazilian agriculture: soil erosion scenarios. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 1, n. 3, p. 37-48, 2013.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, v. 22, n. 1, p. 100-0103, 1979.

MILLOT, G. Géochimie de la surface et forms du relief - présentation. **Sci. Géol. Bull.**, Strasbourg, v. 30, n. 4, p. 229-233, 1977.

MINASNY, B.; HARTEMINK, A. E. Predicting soil properties in the tropics. **Earth-Science Reviews**, v. 106, n. 1-2, p. 52-62, 2011.

MONTEBELLER, C. A. et al. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 1-5, 2001.

MORAES, A. C. R. **Geografia**. Pequena história crítica. 14. ed. São Paulo: Hucitec, 1998.

MOURA, D. V.; SIMÕES, C. da S. A evolução histórica do conceito de paisagem. **Ambiente & Educação**, v. 15, n. 1, 2010.

NASCIMENTO, E. de S. et al. Roads in the Southwestern Amazon, State of Acre, between 2007 and 2019. **Land**, v. 10, n. 2, p. 106, 2021.

NEPSTAD, D. C.; STICKLER, C. M.; ALMEIDA, O. T. Globalization of the Amazon soy and beef industries: opportunities for conservation. **Conservation biology**, v. 20, n. 6, p. 1595-1603, 2006.

NETO, I. A. **Uso de Ferramentas de SIG e Sensoriamento Remoto para o monitoramento do desmatamento em Unidades de Conservação: Estudo de caso da Floresta Nacional do Bom Futuro-RO**. 110 f. 2009. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de pós-graduação em Geografia, Universidade Federal de Rondônia. Rondônia, 2009.

NOVAIS, J. M. et al. Manutenção dos recursos naturais na Floresta Nacional do Bom Futuro e seu entorno, Rondônia, Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET**, v. 18, n. 1, p. 597-606, 2014.

OLIVEIRA, J. F. de et al. Erodibility and critical shear stress on unpaved road soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 955-960, 2009.

OLIVEIRA, J. R. de et al. Erosão hídrica em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 140-147, 2010.

PERZ, S. et al. Unofficial road building in the Amazon: socioeconomic and biophysical explanations. **Development and change**, v. 38, n. 3, p. 529-551, 2007.

PRUSKI, F. F.; FERREIRA, P. A.; RAMOS, M. M.; CECON, P. R. Model to design level terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.23, n.1, p.8-12, 1997.

QUEIROZ NETO, J. P. O Estudo das Formações Superficiais no Brasil. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 22, n. 1/2, p. 65-78, 2001.

QUEIROZ NETO, J. P. Relações entre as vertentes e os solos: revisão de conceitos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, 2012.

RAMOS, F. T. et al. Erosão por salpicamento sob diferentes sistemas de manejo em um Neossolo Quartzarênico em Cáceres (MT). **Global Science and technology**, v. 04, n. 01, p. 38-50, 2011.

RAMOS-SCHARRÓN, C. E. Impacts of off-road vehicle tracks on runoff, erosion and sediment delivery—A combined field and modeling approach. **Environmental Modelling & Software**, v. 136, p. 104957, 2021.

RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; MACDONALD, L. H. Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St John, US Virgin Islands. **Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group**, v. 30, n. 10, p. 1283-1304, 2005.

RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; MACDONALD, L. H. Runoff and suspended sediment yields from an unpaved road segment, St John, US Virgin Islands. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 21, n. 1, p. 35-50, 2007a.

RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; MACDONALD, L. H. Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St. John, US Virgin Islands. **Catena**, v. 71, n. 2, p. 250-266, 2007b.

RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; THOMAZ, E. L. Runoff development and soil erosion in a wet tropical montane setting under coffee cultivation. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 3, p. 936-945, 2017.

RODRIGUES, E.; PINHEIRO, E. O desflorestamento ao longo da rodovia BR-174 (Manaus/AM-Boa Vista/RR). **Sociedade & Natureza**, v. 23, p. 513-528, 2011.

RODRIGUEZ, J. M. **Apuntes de Geografía de los Paisajes**. 468p. 1984. Facultad de Geografía, Universidad de La Habana, Ciudad de la Habana, 1984.

RUBIRA, F. G. et al. Pedogeomorphological Systems In The Interpretation Of The Evolution Of Quaternary Landscapes In Humid Tropical Climates. **Mercator (Fortaleza)**, v. 18, 2019.

SALGADO, A. A. R. Superfícies de aplainamento: antigos paradigmas revistos pela ótica dos novos conhecimentos geomorfológicos. **Revista Geografias**, p. 64-78, 2007.

SANTOS NETO, Luiz Alves dos et al. Distribuição horária da precipitação em Porto Velho no período de 1998–2013. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, n. 10, p. 213-228, 2014.

SANTOS, A. M.; SCHOTT, E. F. C. S.; SOARES, D. de O. Vulnerabilidade natural à perda de solos na FLONA bom futuro e seu entorno próximo/Estado de Rondônia. **Revista GEONORTE**, v. 9, n. 32, p. 24-44, 2018.

SANTOS, C. G. et al. The wetted area uniformity of the rainfall generated by different sprinkler nozzles. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 41689-41702, 2020.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; DE OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 115-123, 2010.

SANTOS, J. D. S.; PEREIRA, L. A. G. Logística de transportes do agronegócio e exportações de soja no Centro-Oeste brasileiro. **Geoambiente On-line**, [S. l.], n. 34, p. 131-154, 2019.

SANTOS, R. S. et al. Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. **Geoderma**, v. 400, p. 115149, 2021.

SCHICK, J. et al. Erosividade das chuvas de Lages, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 38, n. 6, p. 1890-1905, 2014.

SECCO, D. et al. Crambe oil yield and soil physical properties responses to no-tillage, cover crops and chiseling. **Industrial Crops and Products**, v. 161, p. 113174, 2021.

SHELTON, C. H.; VON BERNUTH, R. D.; RAJBHANDARI, S. P. A continuous-application rainfall simulator. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 4, p. 1115-1119, 1985.

SHERIDAN, G. J. et al. Using rainfall simulation and site measurements to predict annual interrill erodibility and phosphorus generation rates from unsealed forest roads: Validation against in-situ erosion measurements. **Catena**, v. 73, n. 1, p. 49-62, 2008.

SHIRIN, M.; AHMADI, H.; JAFARI, M. Relationship between soil erosion, slope, parent material, and distance to road (Case study: Latian Watershed, Iran). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 4, p. 331-338, 2011.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 2007, 138 p.

SILVA, J. F. G. et al. Are the yield of sunflower and Paiaguas palisadegrass biomass influenced by soil physical quality? **Soil and Tillage Research**, v. 208, p. 104873, 2021.

SILVA, R. G. da C. Globalização, Agricultura e a Formação do Meio Técnico-Científico-Informacional em Rondônia (Globalization, agriculture and the formation of the technico-informational-scientific space of Rondônia). **Acta Geográfica**, v. 7, n. 15, p. 69-83, 2013.

SILVA, R. G. da C. Amazônia globalizada: da fronteira agrícola ao território do agronegócio – o exemplo de Rondônia. **Confins, Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 23, 2015.

SILVA JUNIOR, C. H. L. et al. The Brazilian Amazon deforestation rate in 2020 is the greatest of the decade. **Nature Ecology & Evolution**, v. 5, n. 2, p. 144-145, 2021.

SKIDMORE, M. E. et al. Cattle ranchers and deforestation in the Brazilian Amazon: Production, location, and policies. **Global Environmental Change**, v. 68, p. 102280, 2021.

SOARES, M. B. et al. Use of cover crops in the southern Amazon region: What is the impact on soil physical quality? **Geoderma**, v. 384, p. 114796, 2021.

SOBRINHO, et al. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Engenharia de Água e Solo**, v. 30, n. 1, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000100005>

SOUZA, C. C.; CUNHA, M. C. da. Análise dos Parâmetros Morfométricos da Rede de Drenagem e Rede Viária da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Paraíso, Jataí-GO. **Sociedade & Natureza**, v. 34, 2022.

STEEGE, H. et al. Biased-corrected richness estimates for the Amazonian tree flora. **Sci Rep.**, v. 10, p. 10130, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66686-3>

STRAHLER, A. N. Hypsometric (Area-altitude) analysis of erosional topography. **Bull. G.S.A.**, v. 63, p. 1117-1142, 1952.

TAVANTI, R. F. R. et al. Least limiting water as a soil indicator in an integrated crop-livestock systems of the Cerrado, Brazil. **Geoderma regional**, v. 19, p. e00232, 2019.

THOMAZ, E. L. Escoamento e transporte de sedimento em uma área degradada. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 36, n. 1, p. 243-252, 2012.

THOMAZ, E. L. Fire changes the larger aggregate size classes in slash-and-burn agricultural systems. **Soil Tillage Res.**, v. 165, p. 210–217, 2017.

THOMAZ, E. L. Ash physical characteristics affects differently soil hydrology and erosion subprocesses. **Land degradation & development**, v. 29, n. 1, p. 690-700, 2018.

THOMAZ, E. L. **Erosão dos solos: teorias, métodos e perspectivas**. Curitiba: CRV, 2020.

THOMAZ, E. L. Effects of fire on the aggregate stability of clayey soils: A meta-analysis. **Earth-Science Reviews**, v. 221, p. 103802, 2021.

THOMAZ, E. L.; ANTONELI, V.; DIAS, W. A. Estimativa de Proveniência de Sedimento em Cabeceira de Drenagem com Alta Densidade de Estradas Rurais não Pavimentadas. **RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 2, p. 25-37, 2011. DOI: 10.21168/rbrh.v16n2.p25-37.

THOMAZ, E. L.; GUARAPUAVA, P. R. Experimentação, monitoramento e tratamento de dados como fundamento à modelagem em geografia física. **XV Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, v. 1, 2013.

THOMAZ, E. L.; NUNES, D. D.; WATANABE, M. Effects of tropical forest conversion on soil and aquatic systems in southwestern Brazilian Amazonia: A synthesis. **Environmental Research**, v.183, p. 109-220, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109220>

THOMAZ, E. L.; PEREIRA, A. A. Estrada rural não pavimentada como fonte de escoamento superficial e sedimento. **Revista Brasileira de geomorfologia**, v. 14, n. 1, 2013.

THOMAZ, E. L.; PERETTO, G. T. Hydrogeomorphic connectivity on roads crossing in rural headwaters and its effect on stream dynamics. **Science of the Total Environment**, v. 550, p. 547-555, 2016.

THOMAZ, E. L.; RAMOS-SCHARRÓN, C. E. Rill length and plot-scale effects on the hydrogeomorphologic response of gravelly roadbeds. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, n. 15, p. 2041-2048, 2015.

THOMAZ, E. L.; VESTENA, L. R. Measurement of runoff and soil loss from two differently sized plots in a subtropical environment (Brazil). **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 37, n. 4, p. 363-373, 2012.

THOMAZ, E. L.; VESTENA, L. R.; RAMOS-SCHARRON, C. E. The effects of unpaved roads on suspended sediment concentration of third-to fifth-order streams-A case study from southern Brazil. In: **AGU Fall Meeting Abstracts**. 2012. p. EP13D-0880.

THOMAZ, E. L.; VESTENA, L. R.; RAMOS SCHARRÓN, C. E. The effects of unpaved roads on suspended sediment concentration at varying spatial scales—a case study from Southern Brazil. **Water and environment journal**, v. 28, n. 4, p. 547-555, 2014.

TOSSELL, R. W. et al. The Guelph Rainfall Simulator II: Part 2-a comparison of natural and simulated rainfall characteristics. **Canadian Agricultural Engineering**, v. 32, n. 2, p. 215-223, 1990.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE/SUPEN, 1977.

TRICART, J.; KILIAN, J. **La eco-geografía y la ordenación del medio natural**. Barcelona: Anagrama, 1979. 288 p.

TRINDADE, A. L. F. et al. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1918-1928, 2016.

TRUEBA, J. J. G. Carl Troll y la geografía del paisaje: vida, obra y traducción de un texto fundamental. **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles**, n. 59, p. 173-200, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004. 943p.

VASQUES, I. C. F. et al. Improved management increases carrying capacity of Brazilian pastures. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 282, p. 30-39, 2019.

VERÍSSIMO, A.; RIBEIRO, M. B. N. Áreas Protegidas na Amazônia: oportunidades para conservação e uso sustentável. **Agricultura Tropical**, p. 325, 2008.

VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de Latossolos. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 28, n. 1, p. 11-19, 2004.

VILELA, T. et al. A better Amazon road network for people and the environment. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 13, p. 7095-7102, 2020.

VILLELA, F. N. J.; ROSS, J. L. S.; MANFREDINI, S. Análise geomorfopedológica na borda leste da Bacia Sedimentar do Paraná, Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 4, 2015.

DUBREUIL, V. et al. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins**, v. 37, 2018. Acesso em: 06 nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.15738>.

VITTE, A. C. **Etchplanação em Juquiá (SP): relações entre o intemperismo químico e as mudanças climáticas no desenvolvimento das formas de relevo em margem cratônica passiva**. 1998. 276 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

VITTE, A. C. O desenvolvimento do conceito de paisagem e a sua inserção na geografia física. **Mercator-Revista de Geografia da UFC**, v. 6, n. 11, p. 71-78, 2007.

VITTE, A. C.; NIEMANN, R. S. Uma introdução à história da geomorfologia no Brasil: a contribuição de Aziz Nacib Ab'Saber. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 1, p. 41-50, 2009.

WALKER, R.; MORAN, E.; ANSELIN, L. Deforestation and cattle ranching in the Brazilian Amazon: external capital and household processes. **World development**, v. 28, n. 4, p. 683-699, 2000.

WANG, C. et al. Unpaved road erosion after heavy storms in mountain areas of northern China. **International Soil and Water Conservation Research**, 2021.

WATANABE, M. et al. Análise do impacto do desmatamento no aporte sedimentar de bacias pareadas na Amazônia Ocidental: bacias do rio Mutum-Paraná, Rondônia (Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 3, p. 601-605, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i3.1287>

WEMPLE, B. C. et al. Ecohydrological disturbances associated with roads: Current knowledge, research needs, and management concerns with reference to the tropics. **Ecohydrology**, v. 11, n. 3, p. e1881, 2018.

XU, X.-L. et al. Runoff and water erosion on road side-slopes: Effects of rainfall characteristics and slope length. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 14, n. 7, p. 497-501, 2009.

YEVJEVICH, V. M. **Probability and statistics in hydrology**. Colorado: Water Resources Pubns, 1972.

YU, W. et al. Contributions of runoff from paved farm roads to soil erosion in karst uplands under simulated rainfall conditions. **CATENA**, v. 196, p. 104887, 2021.

ZHANG, P. et al. Experimental study on soil erosion prediction model of loess slope based on rill morphology. **Catena**, v. 173, p. 424-432, 2019a.

ZHANG, Y. et al. Rill and gully erosion on unpaved roads under heavy rainfall in agricultural watersheds on China's Loess Plateau. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 284, p. 106580, 2019b.

ZIEGLER, A. D. et al. Towards better design and management of tsunami evacuation routes: a case study of a Jak Beach Road. **Geol. Soc. Special. Publ.** London, v. 361, n. 4, p. 107-114, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1144/SP361.9>. Acesso em: 23 jul. 2017.

ZONNEVELD, I. S. The land unit—a fundamental concept in landscape ecology, and its applications. **Landscape ecology**, v. 3, p. 67-86, 1989.

APÊNDICES

APÊNDICE I – Formulário utilizado durante as execuções do experimento SCPA



FORMULÁRIO CONTROLE PARA EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO SCPA – Simulação de Chuvas com simulador Portátil acoplado de bico aspersor						
TRECHO	Simulação:	Amostras para umidade: 0-5 cm prof. Peso inicial: _____ / 5-10 cm prof. Peso inicial: _____				
COORDENADA:		horário de início da simulação:	Tempo para início do escoamento na parcela	Tempo para início de coleta do escoamento nos gotes	Data do experimento:	Área de contribuição da parcela:
Tempo de simulação de chuva:		Tempo de recessão:		Tempo total de simulação:	Distância para a próxima simulação:	Tipo de uso e cobertura:
POTES DE COLETA DOS SEDIMENTOS (Nº do pote / início da coleta / fim da coleta)		Intervalos de coleta	INCLINAÇÃO DA PARCELA	PLUVIÔMETROS MANUAIS (Nº / água coletada em ml)		
Nº _____ / _____ / _____		0 - 3 3 - 6 6 - 9 9 - 12 12 - 15 15 - 18 18 - 21 21 - 25	Rep. 1 _____	Nº _____ / _____		
Nº _____ / _____ / _____			Rep. 2 _____	Nº _____ / _____		
Nº _____ / _____ / _____			Rep. 3 _____	Nº _____ / _____		
Nº _____ / _____ / _____			Rep. 4 _____	Nº _____ / _____		
Nº _____ / _____ / _____			Rep. 5 _____	Nº _____ / _____		
Nº _____ / _____ / _____			Rep. 6 _____	Nº _____ / _____		
Nº _____ / _____ / _____			Rep. 7 _____	Nº _____ / _____		
Nº _____ / _____ / _____			Rep. 8 _____	Nº _____ / _____		
Nº _____ / _____ / _____			Rep. 9 _____	Nº _____ / _____		
Nº _____ / _____ / _____		Rep. 10 _____	Nº _____ / _____			

APÊNDICE II – Formulário para mapeamento da estrutura básica de estradas não pavimentadas



Formulário para mapeamento da estrutura básica de estradas não pavimentadas		
Unidade Morfolpedológica _____	Trecho do experimento SCPA _____	
Setor da BHARG _____	Tipo de estrada hierarquizada _____	
Frequência de manutenção das estradas	() últimos 6 meses	() último ano () > 1 ano
Altitude _____		
Coordenada	x: _____	y: _____
Largura total do leito de rolamento (m)	_____	
Largura do leito de rolamento (m)	_____	
Presença de talude:	() sim	() não
altura talude direito _____	altura talude esquerdo _____	
Morfologia do leito	() côncavo	() convexo () plano
Fotos e observações gerais		