

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CAMPUS LAGOA DO SINO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

TAYNE SAMARA MACHADO DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DE
VOÇOROCA ASSOCIADA A TÉCNICAS DE
CONTROLE ATRAVÉS DO MÉTODO DE
ESTAQUEAMENTO

BURI – SP
2021

TAYNE SAMARA MACHADO DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO E MONITORAMENTO DE VOÇOROCA ASSOCIADA A
TÉCNICAS DE CONTROLE ATRAVÉS DO MÉTODO DE ESTAQUEAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro de Ciências
da Natureza da Universidade Federal
de São Carlos, para obtenção do
título de bacharel em Engenharia
Ambiental

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cláudia
Marisse dos Santos Rotta

Machado da Silva, Tayne Samara

Caracterização e monitoramento de voçoroca associada a técnicas de controle através do método de estaqueamento / Tayne Samara Machado da Silva -- 2021. 87f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Cláudia Marisse dos Santos Rotta

Banca Examinadora: Mariana Consiglio Kasemodel,
Paola Bruno Arab

Bibliografia

1. Voçoroca. 2. Estaqueamento. 3. Técnicas de controle.

I. Machado da Silva, Tayne Samara. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Folha de Aprovação.

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do(a) candidato(a) Tayne Samara Machado da Silva, realizada em 06/05/2021:

Cláudia M.S. Rotta

Profa. Cláudia Marisse dos Santos Rotta – Orientador(a)
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Mariana E. Kasemodel

Profa. Dra. Mariana Consiglio Kasemodel
Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo (UEL-USP)

Paola Bruno Arab

Profa. Dra. Paola Bruno Arab
Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

Dedico à meus pais,
Valdecir e Marlene.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus por todas as oportunidades e desafios que enfrentei durante esses anos, e por todos os sins e nãoos que recebi, pois sei que Ele sempre soube e sabe o que é melhor para mim.

Agradeço à minha família, em especial meus pais, Marlene e Valdecir, por terem sonhado meus sonhos junto comigo e por terem feito o possível e o impossível para que eu chegasse até aqui.

Agradeço ao Jonathan pelo apoio e companheirismo em todos esses anos de alegria, ansiedade, desespero e superação.

Aos amigos que a UFSCar me presenteou, pela amizade, família, risos, lágrimas, desafios e superações que compartilhamos.

À todos os meus professores do *campus* Lagoa do Sino, por terem compartilhado suas experiências de vida e profissão.

Agradeço especialmente a Cláudia, minha orientadora e amiga, pelo apoio no desenvolvimento desse e de outros trabalhos, e pelo incentivo de sonhos futuros.

RESUMO

A erosão consiste em um processo geológico natural que faz parte da dinâmica superficial terrestre. Entretanto, ações antrópicas como desmatamento, atividades agrícolas sem adoção de técnicas conservacionistas e o pastejo excessivo, são os principais responsáveis pelo surgimento de feições erosivas em áreas rurais. Tais ações, juntamente com determinadas características geológico-geotécnicas e ambientais, podem desenvolver processos erosivos de pequeno e grande porte. As voçorocas consistem no estágio mais evoluído e complexo das erosões hídricas lineares, por esse motivo, a recuperação de áreas degradadas por feições erosivas dessa magnitude, em geral é difícil e dispendiosa. Atualmente, há diversas técnicas de controle de erosão, que podem ser adotadas em diferentes contextos, todavia, é comum em áreas rurais como a sub-bacia de estudo, encontrar tais técnicas coexistindo com processos erosivos, indicando a má utilização das mesmas. Nesse cenário, este trabalho objetivou caracterizar e monitorar pelo método do estaqueamento, a evolução dos processos erosivos de uma sub-bacia, na qual estão presentes técnicas de controle, visando identificar se as feições erosivas estão ativas, os condicionantes da formação de tais erosões e a razão da ocorrência das principais falhas das técnicas de controle. Para o seu desenvolvimento, foram reunidos diversos materiais como, mapa topográfico, imagens de satélite, mapa geológico, pedológico e geomorfológico, bem como pesquisas bibliográficas. Ademais, foram realizados trabalhos de campo para caracterizar e monitorar as feições erosivas, identificar e avaliar as técnicas de controle de processos erosivos e comprovar e identificar aspectos ambientais avaliados previamente em etapas de escritório. Verificou-se que na área de estudo ocorre uma voçoroca contínua em relação ao canal de drenagem, que se encontra ativa. Avaliando as imagens dos diferentes anos verificou-se um aumento expressivo da feição erosiva, enquanto que o método do estaqueamento identificou que a evolução da voçoroca se inicia pela desestabilização de suas paredes. As características geológico-geotécnicas e ambientais da área, sobretudo em função do tipo de uso e ocupação, explicam o surgimento da voçoroca, enquanto as técnicas de controle identificadas se mostraram ineficientes, seja pelo uso arbitrário, como é o caso da técnica barreira de galhos, seja por falhas de execução, como foi verificado no caso do terraceamento.

Palavras-chave: Voçoroca. Estaqueamento. Técnicas de Controle.

ABSTRACT

Erosion consists in a natural geological process that is part of the terrestrial surface dynamics. However, human actions such as deforestation, agricultural activities without the adoption of conservationist techniques and excessive grazing, are the main responsible for the appearance of erosive features in rural areas. Such actions, associated with certain geological-geotechnical and environmental characteristics, can develop small and large erosive processes. Gullies are the most evolved and complex stage of linear erosion. For this reason, the recovery of areas degraded by these erosive features is, in general, difficult and expensive. Currently, there are several erosion control techniques, which can be adopted in different contexts, however, it is common, in rural areas such as the study sub-basin, to find these techniques associated with erosive processes, indicating misapplication. In this scenario, this work aimed to characterize and monitor by the staking method the evolution of the erosive processes of a sub-basin, where there are erosion control techniques. It was expected to identify if the erosive features are active, the conditions for their development and the reason for the failure of erosion control techniques. To develop this study, several materials were gathered, such as topographic map, satellite images, geological, pedological and geomorphological maps, as well as bibliographic materials. In addition, fieldworks were carried out to characterize and monitor erosive features, identify and evaluate erosion control techniques, and to verify and identify environmental aspects previously evaluated in office works. It was found in the study area an active gully erosion, continuous to the drainage channel. Analyzing the satellite images of the different years, it was verified a significant increase in the gully dimensions, while the staking method identified that the evolution of the gully is due to the destabilization of its walls. The geological-geotechnical and environmental characteristics of the study area, mainly the land use, explain the development of the gully erosion, at the same time the erosion control techniques proved to be inefficient, either by arbitrary use, as is the case of the brush barrier technique, or due to execution failures, as it was verified in the case of terracing.

Keywords: Gully Erosion. Staking Method. Erosion Control Techniques.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. a) gota d'água caindo no solo. b) splash causado pelo impacto da gota d'água. c) processo de erosão causado pelo splash.	16
Figura 2. Início do runoff após a saturação do solo.	17
Figura 3. Erosão laminar em área de pastagem.	18
Figura 4. Sulcos em área de pastagem em Corumbataí, São Paulo, Brasil.	19
Figura 5. Ravina em área de pastagem em Buri, São Paulo, Brasil.	20
Figura 6. Voçoroca no município de Floreal, São Paulo, Brasil.	21
Figura 7. Piping no município de Casa Branca, São Paulo, Brasil.	23
Figura 8. Relação entre taxa de perda de solo e porcentagem de cobertura vegetal.	25
Figura 9. Esquema ilustrativo das parcelas de erosão.	31
Figura 10. Esquema ilustrativo dos pinos de erosão.	31
Figura 11. Esquema ilustrativo da técnica de estaqueamento.	32
Figura 12. Exemplo de visualização de nuvem de pontos gerada pelo escâner LASER.	33
Figura 13. Barreira de galhos (brush barrier).	40
Figura 14. Estrutura de um terraço.	41
Figura 15. Fluxograma indicando as principais etapas do trabalho.	44
Figura 16. Localização da área de estudo.	48
Figura 17. Mapa geológico.	50
Figura 18. Mapa geomorfológico.	52
Figura 19. Mapa pedológico da área de estudo.	54
Figura 20. Carta de declividade da área de estudo.	56
Figura 21. Inventário das feições erosivas.	59
Figura 22. Área com lâmina d'água sob influência do gado.	61
Figura 23. a) ravinas associados ao solo saprolítico de características argilosas. b) destaque para o fenômeno de empastilhamento da argila.	62
Figura 24. a) Destaque para uma das ramificações da voçoroca associada ao solo pouco coeso de textura arenosa b) Destaque para a textura arenosa.	63
Figura 25. Mapa de uso e ocupação da área de estudo.	64
Figura 26. Caminho preferencial do gado ao lado de uma feição erosiva.	65
Figura 27. Gráfico correspondente ao ano hidrológico da área estudada.	66
Figura 28. Identificação dos trechos de análise das feições erosivas e dos pontos de monitoramento.	68
Figura 29. a) Processo erosivo no trecho 1. b) Plantas no terraço rompido.	69
Figura 30. a) cabeceira próxima as estacas 1,2 e 3. b) erosão decorrente do rompimento de terraço.	69
Figura 31. a) cabeceira principal da voçoroca e destaque para estaca na parede. b) estacas no chão da voçoroca.	70
Figura 32. Trecho 4 com a presença de árvores e da barreira de galhos.	71
Figura 33. Trecho com lâmina d'água evidente, evidências de lixiviação de ferro do solo, e pisoteamento do gado.	71
Figura 34. Trecho intermediário de uma das ramificações do trecho 6.	72
Figura 35. Barreira de galhos na feição erosiva do trecho 7.	73
Figura 36. Evolução na cabeceira principal da voçoroca.	74
Figura 37. a) Estaca 10 associada ao acúmulo de sedimento. b) Estaca 12 indicando erosão do solo em seu entorno.	74
Figura 38. Evolução nas bordas da voçoroca no trecho 6.	75
Figura 39. a) terraços da sub-bacia de estudo. b) esquema representativo das dimensões dos terraços da sub-bacia.	76
Figura 40. a) Barreira de galhos aplicada em uma das ramificações da principal feição erosiva da sub-bacia. b) Detalhe das dimensões e condições da barreira de galhos.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação de voçorocas de acordo com sua profundidade.	22
Tabela 2. Metodologia de autores que utilizaram o método de estaqueamento para monitoramento de erosão.	36
Tabela 3. Evolução das feições erosivas em termos de área superficial.....	60
Tabela 4. Precipitações médias mensais e a porcentagem referente a cada mês.	66

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. PROCESSOS EROSIVOS.....	14
2.2. EROSÃO HÍDRICA.....	15
2.2.1. Erosão Laminar ou Entre Sulcos	17
2.2.2. Erosão Linear	18
2.2.2.1. Sulcos.....	18
2.2.2.2. Ravinas	19
2.2.2.3. Voçorocas.....	20
2.2.3. Piping	23
2.3. FATORES CONDICIONANTES DA EROSÃO HÍDRICA	23
2.3.1. Clima	24
2.3.2. Cobertura Vegetal	24
2.3.3. Relevo	26
2.3.4. Solos	27
2.3.5. Substrato Rochoso	28
2.3.6. Fatores Antrópicos	28
2.4. MONITORAMENTO DE EROSÕES HÍDRICAS	29
2.4.1. Estaqueamento	34
2.5. TÉCNICAS DE CONTROLE DE EROSÃO.....	38
2.5.1. Barreira de Galhos (<i>Brush Barrier</i>)	39
2.5.2. Terraceamento	41
3. METODOLOGIA	44
3.1. ETAPAS DE ESCRITÓRIO	44
3.2. TRABALHOS DE CAMPO	45
3.3. AVALIAÇÃO FINAL.....	46
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
4.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	47
4.2. DADOS CLIMÁTICOS	49
4.3. GEOLOGIA.....	49
4.4. GEOMORFOLOGIA.....	51
4.5. PEDOLOGIA	53
4.6. DECLIVIDADE	55
4.7. VEGETAÇÃO	57
4.8. USO E OCUPAÇÃO	57
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	58

5.1.	AVALIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DOS PROCESSOS EROSIVOS.....	58
5.2.	ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS DA ÁREA DE ESTUDO.....	61
5.3.	USO E OCUPAÇÃO	63
5.4.	PLUVIOSIDADE	65
5.5.	SETORIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS	67
5.6.	MONITORAMENTO DA EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS	73
5.7.	MÉTODOS DE CONTROLE DE EROSIÃO	76
6.	CONCLUSÃO	78
	REFERÊNCIAS	80

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, a espécie humana explora os recursos naturais a fim de suprir suas necessidades básicas. O processo de colonização do Brasil, por exemplo, foi marcado pela exploração do solo, o qual teve sua vegetação removida e substituída por cidades, pastagens e culturas agrícolas. Atualmente, em torno de 30% dos solos do mundo encontram-se degradados, principalmente em função da erosão hídrica e eólica; perda de matéria orgânica, nutrientes e biodiversidade do solo; acidificação, salinização e compactação do solo. Tais ameaças a integridade do solo se associam a atividades antrópicas, como desmatamento, incêndios florestais, intensificação da agricultura e criação de gado, urbanização, mineração, dentre outros. Estima-se que atualmente 25 a 40 milhões de toneladas de solo seja eliminada no período de um ano, somente em razão dos processos erosivos (SILVA, 2007; FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, 2015).

A erosão é um processo extremamente lento que envolve a desestabilização, transporte e deposição de partículas do solo, o qual faz parte da dinâmica terrestre. A problemática se inicia quando os processos erosivos são acelerados, modificando expressivamente a superfície terrestre em poucos meses, ultrapassando as taxas de formação do solo (THOMAS, 1975; ZACHAR, 1982; KAISER, DAL OSTO e FACCO, 2017; OLIVEIRA, SANTOS e ARAUJO, 2018).

A erosão acelerada apresenta inúmeros impactos, como perda da fertilidade do solo, restrição ao uso do solo, contaminação de corpos hídricos, redução de vida útil de reservatórios, prejuízos a infraestruturas, dentre outros. Sua ocorrência está associada a aspectos como o clima, propriedades geológico-geotécnicas, topografia e uso e ocupação do solo (MATHIAS, CUNHA e CARVALHO, 2010; ROTTA e ZUQUETTE, 2015; SLIMANE et al., 2018).

Em regiões de clima tropical, como o Brasil, predominam as erosões hídricas lineares, que se classificam de acordo com seu grau de evolução. As voçorocas representam o estágio mais evoluído e complexo das erosões hídricas, podendo degradar e inutilizar grandes áreas, tornando sua recuperação árdua e dispendiosa.

No município de Buri, localizado no sudoeste do estado de São Paulo, a degradação do solo em função dos processos erosivos é bastante visível, os quais

variam dos mais simples, como erosões laminares, até as mais complexas, como voçorocas que abrangem grandes áreas. Estas são um grande problema para os produtores da região pois acabam diminuindo sua área de produção, exigindo a aplicação de maiores quantidades de insumos agrícolas, assoreiam os corpos hídricos que muitas vezes são utilizados para irrigação e dessedentação dos animais, além de contaminar os mesmos devido ao carreamento de insumos agrícolas.

Atualmente, existem inúmeras metodologias que visam o controle e recuperação de processos erosivos, porém, sua utilização pode ser complexa e demandar altos custos, especialmente se tratando de feições erosivas de grandes dimensões, além de muitas vezes não apresentarem os resultados esperados. Sendo assim, é essencial a realização de estudos de monitoramento de processos erosivos, a fim de compreender o processo de aceleração de seu crescimento, sobretudo no que diz respeito aos fatores que o favorecem. Tal conhecimento é importante no sentido de subsidiar técnica e cientificamente a proposição e adoção de medidas efetivas de prevenção, controle e recuperação. O sucesso do emprego de tais medidas deve ser avaliado através do monitoramento, de modo que, em posse de todo o conjunto de informações verificadas, seja possível evitar futuras complicações, ou até mesmo tornar as metodologias mais eficientes em termos ambientais e financeiros.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar e monitorar uma voçoroca situada em uma sub-bacia hidrográfica no município de Buri – SP, utilizando o método de estaqueamento, bem como averiguar se as técnicas adotadas para o controle deste processo erosivo estavam sendo efetivas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PROCESSOS EROSIVOS

O termo erosão, originado do latim *erodere*, que significa “corroer”, possui diversas definições segundo inúmeros autores, as quais, no geral, se complementam. Basicamente, erosão é um processo natural que envolve a desagregação, transporte e deposição de fragmentos do solo por efeito de um agente erosivo (AYRES, 1936; SILVA, 2007; OLIVEIRA, SANTOS e ARAUJO, 2018). Morgan (2005) afirma que a terceira fase da erosão do solo, a deposição, ocorre quando o agente erosivo não possui mais energia para transportar as partículas do solo.

Os agentes erosivos são a água, o gelo e o vento, todavia, Zachar (1982) considera que os organismos (plantas, animais e o homem) também contribuem para o desenvolvimento de processos erosivos. Barbosa (2010) afirma ainda que as atividades antrópicas interferem ininterruptamente na superfície terrestre, e por esse motivo corresponde a um dos principais agentes de transformação da paisagem.

É de extrema importância ressaltar que os processos erosivos podem ser classificados como erosão natural ou geológica e erosão acelerada. A primeira trata-se de um processo natural que faz parte da dinâmica terrestre e ocorre de maneira extremamente lenta. Lepsch (2011) relata que a erosão natural é compensada pelos processos de formação do solo, de forma que haja contínuas renovações, e graças a isso, a vida no planeta Terra vem sendo mantida por milhões de anos. Em contrapartida, El-Swaify, Dangler e Armstrong (1982) afirmam que a erosão acelerada se inicia quando as taxas de erosão do solo são superiores as taxas de formação do solo, o que em geral ocorre em decorrência das atividades antrópicas, como desmatamento, queimadas, uso do solo, impermeabilização dentre outros.

Morgan (2005) declara que a erosão acelerada afeta a qualidade da água, diminui o tempo de vida útil de reservatórios devido a deposição de sedimentos, e contribui com a perda de fertilidade do solo, uma vez que a camada fértil é perdida. Além disso, afirma que ao promover a quebra do solo e agregados, é liberado o carbono em forma de dióxido de carbono (CO₂), sendo assim, a erosão contribui com as mudanças climáticas, uma vez que o dióxido de carbono é um gás do efeito estufa.

Em regiões tropicais e subtropicais úmidas, a erosão hídrica é a principal responsável pela degradação do solo (MANZATTO, FREITAS JÚNIOR e PERES, 2002). Assim sendo, em função da temática deste trabalho, será abordado de forma mais detalhada os aspectos da erosão hídrica.

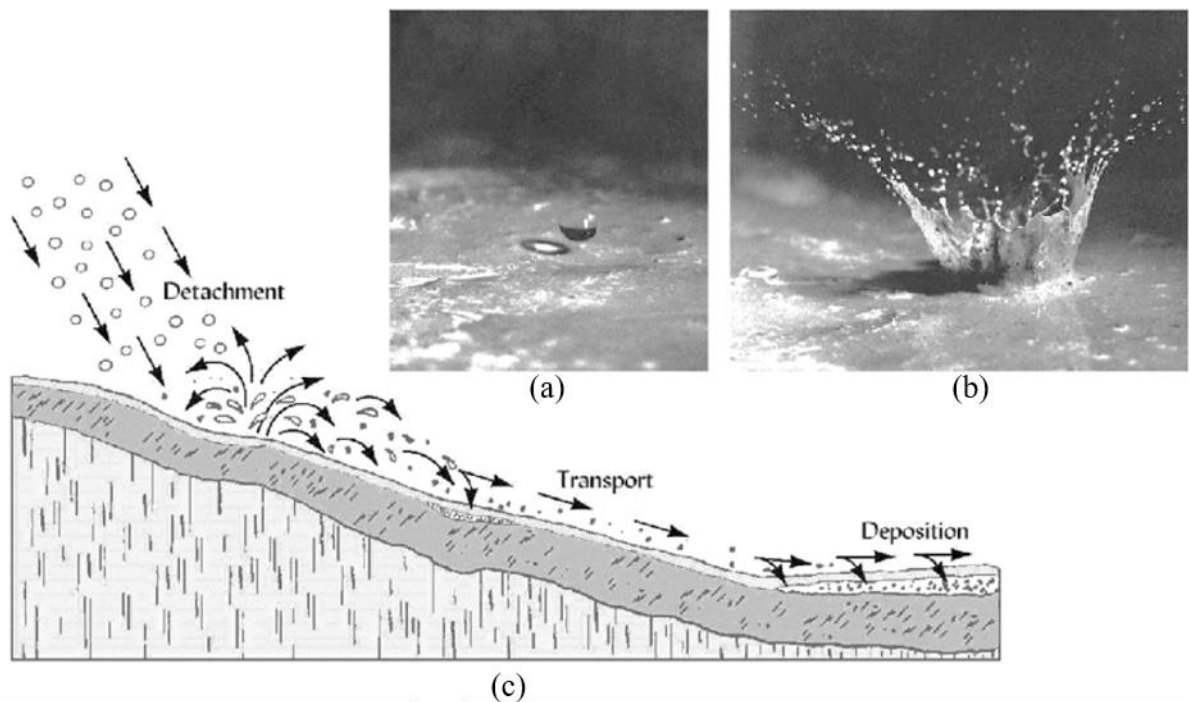
2.2. EROSÃO HÍDRICA

A erosão hídrica ocorre quando a água é o agente responsável pela desagregação, transporte e deposição das partículas do solo. A água pode atuar de diferentes formas, a partir de rios (erosão fluvial), de lagos (erosão lacustrina), do mar (erosão marinha) e da chuva (erosão pluvial) (ZACHAR, 1982).

A erosão pluvial ocorre principalmente em regiões de clima tropical como o Brasil, caracterizadas por apresentarem índices pluviométricos elevados (SANTORO, 2015). A erosão pluvial age basicamente de três formas, inicialmente pelo impacto da chuva no solo (*splash*), pelo escoamento superficial (*runoff*), responsável pela erosão laminar (entre sulcos) e linear, e pelo escoamento subsuperficial, que gera a erosão do tipo *piping*.

O splash possui dois efeitos, primeiramente o de consolidação, pois compacta o solo quando as gotas da chuva o atingem, e em seguida, o de dispersão, pois ao atingir o solo, as gotas formam jatos que lançam as partículas do solo no ar, conhecido como salpicamento, observado na Figura 1 (MORGAN, 2005). Segundo Huang, Brandford e Cushman (1982), a velocidade com que as gotas da chuva atingem o solo variam de 4 a 9 m/s, e seu diâmetro de queda variam de 1 a 5 mm, de acordo com sua velocidade. Este processo ocorre nos primeiros 5 a 10 minutos de precipitação e depende dos fatores condicionantes citados acima (NACINOVIC, 2013).

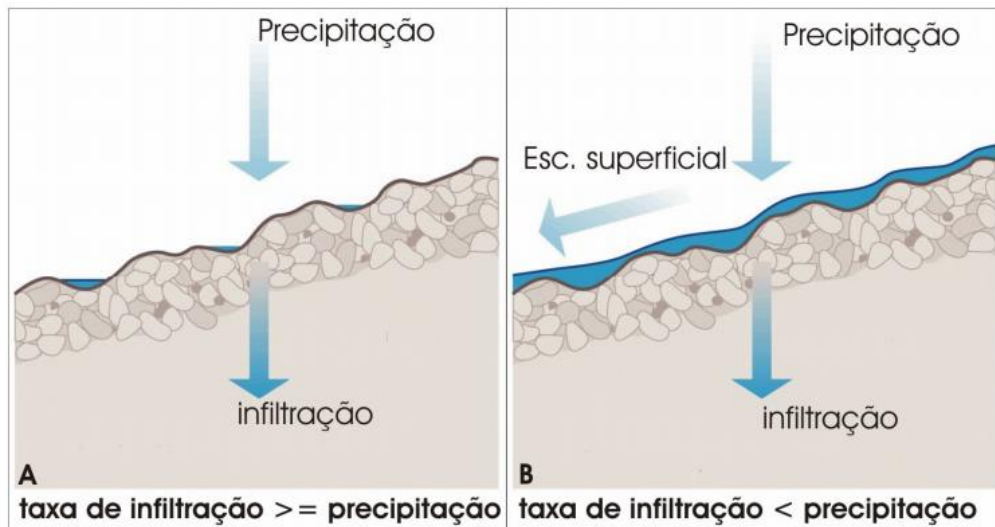
Figura 1. a) gota d'água caindo no solo. b) *splash* causado pelo impacto da gota d'água. c) processo de erosão causado pelo *splash*.



Fonte: Bashir et al. (2017).

Conforme a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração e armazenamento de água no solo, tem-se o início do escoamento superficial (*runoff*) (ROTTA e ZUQUETTE, 2015). A quantidade de solo perdida em função do escoamento superficial varia de acordo com sua velocidade e turbulência. O *runoff* escoia do topo da encosta até área mais baixas, onde seu fluxo aumenta ao longo do percurso e forma canais, formando a erosão laminar e linear (COUTO, 2015; GUERRA, 2015). Na Figura 2 é possível observar a formação de escoamento superficial (*runoff*) após a intensidade da chuva superar a capacidade de infiltração do solo.

Figura 2. Início do *runoff* após a saturação do solo.



Fonte: Paz (2004).

Já a escoamento subsuperficial acontece quando a água presente no subsolo cria um fluxo que começa a retirar as partículas para fora, formando túneis, também conhecido como *piping*. (ZACHAR, 1982; GRAY e SOTIR, 1995). Guerra (2015) afirma que o fluxo subsuperficial pode ocasionar o colapso da superfície, podendo, assim como o escoamento superficial, desenvolver voçorocas.

2.2.1. Erosão Laminar ou Entre Sulcos

A erosão laminar, também conhecida como erosão em lençol (*sheetflow*), ocorre quando após o saturamento do solo, o escoamento superficial escoar de maneira uniforme pelas encostas, transportando as partículas do solo sem formar canais definidos (Figura 3). Ela é o estágio inicial da erosão hídrica, onde o escoamento superficial não é tão abundante, fazendo com que ocorra a remoção gradual dos horizontes do solo e seus nutrientes (SALOMÃO, 1999; FRANCISCO, 2011; SANTORO, 2015; COUTO, 2015). Segundo Guerra (2015), a erosão laminar ocorre sob condições de chuva prolongada.

Figura 3. Erosão laminar em área de pastagem.



Fonte: Queensland Government (2013).

Para Santoro (2015), esse tipo de erosão pode gerar inúmeros prejuízos em áreas agrícolas, pois é responsável por carrear grande quantidade de sedimento aos rios, lagos e represas, contribuindo para o seu assoreamento. Frenzel (1980) diz que por ser difícil notar a erosão laminar, esta pode ser considerada a mais grave, uma vez que não sendo observada logo no início, pode acarretar prejuízos e colaborar para o surgimento de outros tipos de erosões.

Couto (2015) afirma que quando o fluxo laminar se concentra formando linhas de escoamento preferencial, tem-se o início da erosão linear.

2.2.2. Erosão Linear

Neste tipo de erosão o escoamento superficial se concentra formando canais, os quais podem originar três tipos de erosão, sulcos, ravinas ou voçorocas.

2.2.2.1. Sulcos

Os sulcos consistem na segunda fase evolutiva da erosão hídrica, onde o escoamento, que antes era difuso, se concentra formando canais bem definidos (Figura 4) (CANTALICE, 2002). Para Santoro (2015), os sulcos se formam perpendicularmente em relação as curvas de nível e formam incisões de até 0,5 metros de profundidade. Selby (1994) relata que os sulcos ocorrem onde a declividade da encosta supera 2-3%, podendo ter conexão com um sistema de drenagem.

Figura 4. Sulcos em área de pastagem em Corumbataí, São Paulo, Brasil.



Fonte: Rotta (2012).

Segundo Bryan (1987), esse tipo de erosão pode ser resolvido de maneira simples, a partir de operações de lavoura normal, entretanto, Ide (2009) afirma que muitas vezes não é dada atenção aos sulcos até que estes causem interferências.

2.2.2.2. Ravinas

Conforme os sulcos se aprofundam no solo, surgem as ravinas, as quais apresentam forma alongada e seção em “V”, com profundidade superior a 0,5 metro, não atingindo o lençol freático (Figura 5) (IDE, 2009; SANTORO, 2015).

Figura 5. Ravina em área de pastagem em Buri, São Paulo, Brasil.



Figueiredo e Vajapeyam (1989) afirmam que as ravinas se desenvolvem em função da instabilidade das paredes laterais, decorrentes principalmente da infiltração de água no solo. De acordo com El-Swaify, Dangler e Armstrong (1982), neste estágio não é possível utilizar o terreno para cultivo normal, pois a feição erosiva já está muito profunda.

2.2.2.3. Voçorocas

Com origem na língua tupi-guarani, o termo “voçoroca” significa “romper” ou “rasgar” (BASTOS, 1999). As voçorocas fazem parte das erosões hídricas, do tipo linear, sendo seu estágio mais evoluído e complexo. Para Mathias, Cunha e Carvalho (2010), elas são evidências do desequilíbrio do sistema hídrico e geomorfológico. Para Morgan (2005) as voçorocas são canais que possuem cabeceiras definidas e paredes íngremes, caracterizadas por apresentarem mudanças bruscas em sua inclinação ao longo do seu curso, podendo possuir fluxo de água permanente quando a erosão é profunda ao ponto de atingir o lençol freático, ou efêmero em períodos chuvosos (Figura 6). Portanto, as voçorocas se desenvolvem não somente pela ação do escoamento superficial, mas também pela ação do escoamento subsuperficial, fazendo com que a evolução do processo erosivo ocorra tanto lateralmente quanto longitudinalmente (SANTORO, 2015).

Figura 6. Voçoroca no município de Floreal, São Paulo, Brasil.



Fonte: Prefeitura Municipal de Floreal (2015).

Morgan (2005) afirma que uma maneira de distinguir ravinas e voçorocas é que as voçorocas apresentam área transversal superior a 1 m². Já Fullen e Catt (2004) declaram que as ravinas atingem principalmente o horizonte A, enquanto que as voçorocas atingem facilmente os horizontes B e C, podendo atingir a rocha matriz.

Guerra (2015) afirma que as voçorocas estão associadas com processos erosivos acelerados, onde o desmatamento, a agricultura, o superpastoreio e as queimadas, são em geral, os responsáveis diretos pelo desenvolvimento de voçorocas, que agem juntamente com a chuva e as propriedades do solo.

De acordo com Magalhães et al. (2012) e Carey et al. (2015), voçorocas de grandes dimensões geram impactos nos âmbitos social e econômico, promovendo a desvalorização de terrenos, prejudicando infraestruturas como rodovias e prédios, afetando a produtividade do solo e restringindo seu uso, degradando sítios culturais, interferindo no abastecimento de água potável e até expondo a população ao risco de vida.

A classificação de voçorocas pode ser realizada levando em consideração inúmeros fatores, por exemplo, o seu tamanho, profundidade, idade, formato de sua

seção transversal, dentre outros. Acerca do formato de sua seção transversal, Frendrich (1997) as classifica em U ou V, onde as que possuem formato em U são habitualmente encontradas em áreas em que o solo e subsolo são mais susceptíveis a erosão. Neste enquadramento, as paredes são praticamente verticais e ampliação lateral resultante de erosão superficial ou por desmoronamento da base em virtude da ação da água subsuperficial. Já as que possuem formato em V são caracterizadas por estarem presentes em solos mais resistentes à erosão, sendo que neste caso ocorre o predomínio da ação da água superficial. Em geral, o formato V está associado a um processo erosivo inicial, todavia, é possível que ambos os formatos ocorram em uma mesma voçoroca.

Com relação a classificação de voçorocas levando em consideração a sua profundidade e a área da bacia na qual está inserida, tem-se:

Tabela 1. Classificação de voçorocas de acordo com sua profundidade.

Classificação	Profundidade (m)	Área da bacia (ha)
Pequena	< 1	< 2
Média	1 a 5	2 a 20
Grande	> 5	> 20

Fonte: Fernandes (2011) adaptado de Frendrich et al. (1991)

Para Iwaza e Prandini (1980) as voçorocas podem ser classificadas também de acordo com seu local de ocorrência, sendo divididas em rurais e urbanas. As voçorocas classificadas como rurais evoluem em pastagens, em culturas que apresentam má cobertura e aquelas submetidas ao manejo inapropriado. Guerra (2015) concorda e afirma que usualmente o desmatamento, a agricultura, as queimadas e o pastejo excessivo são considerados como responsáveis diretos pelo desenvolvimento desse tipo de erosão, aliados com a pluviosidade da região e as características do solo. As voçorocas urbanas, por outro lado, se desenvolvem em função do crescimento desordenado dos municípios e da impermeabilização do solo, diminuindo a infiltração e aumentando o escoamento superficial (IWAZA e PRANDINI, 1980).

Dado o exposto, é de extrema importância o monitoramento destes processos erosivos.

2.2.3. Piping

Os dutos (*pipes*) são grandes canais formados na subsuperfície do solo, onde seu diâmetro pode variar de centímetros a vários metros (Figura 7). Sua formação ocorre a partir do intemperismo do solo subterrâneo sob condições geoquímicas e hidráulicas que geram a dissolução e o carreamento de minerais. Os dutos são responsáveis por transportar grande quantidade de material, onde sua remoção pode promover o colapso do solo da superfície, favorecendo o surgimento de voçorocas. Em áreas tropicais, a formação desses dutos ocorre associado a chuvas prolongadas (GUERRA, 2015).

Figura 7. *Piping* no município de Casa Branca, São Paulo, Brasil.



Fonte: Rotta (2012).

2.3. FATORES CONDICIONANTES DA EROÇÃO HÍDRICA

Os fatores condicionantes são responsáveis por determinar as variações nas taxas de erosão. É pela interação entre eles que algumas áreas erodem com mais facilidade que outras (GUERRA, 2015).

2.3.1. Clima

Para Almeida Filho (2000), a chuva é o fator que mais influencia o desenvolvimento de processos erosivos no quesito clima, sobretudo em regiões tropicais caracterizadas por apresentarem altos índices pluviométricos. Para Zachar (1982), a chuva atua de duas formas no surgimento de processos erosivos, inicialmente pelas suas gotas (*splash*), onde seu impacto ao atingir o solo promove a desagregação das partículas, facilitando seu transporte, e em seguida, após a saturação do solo, pelo escoamento superficial, que além de desagregar as partículas, pode transportá-las por longas distâncias.

Guerra (2015), afirma que a erosividade da chuva, ou seja, a capacidade da chuva em causar erosão, está relacionado com o total de chuva, a intensidade, o momento e a energia cinética. O total de chuva se trata do somatório de chuva em um determinado período (diário, mensal, sazonal e anual); a intensidade é um parâmetro que relaciona a quantidade de chuva em determinado espaço de tempo, sendo geralmente definida como milímetros por hora; o momento refere-se ao produto da massa e a velocidade da chuva; e a energia cinética se trata da energia devido ao movimento da gota da chuva. Guerra (2015), ressalta ainda que estes dados devem ser analisados juntamente com outros fatores que influenciam a surgimento de processos erosivos.

Segundo Santoro (2015), ocorre uma aceleração no desenvolvimento de processos erosivos durante o verão no Estado de São Paulo, em virtude das chuvas mais intensas neste período, fazendo com que ravinas e voçorocas cresçam de forma rápida, gerando situações de risco a população.

2.3.2. Cobertura Vegetal

Para Morgan (2005) a vegetação atua como uma camada protetora entre a atmosfera e o solo, onde esta, a partir de suas folhas e caules, é capaz de absorver parte da energia contida nas gotas da chuva, escoamento superficial e vento, fazendo com que seu impacto no solo seja diminuído. Além disso, o sistema radicular das plantas favorece a resistência mecânica do solo.

Elwell e Stocking (1976) afirmam que o solo deve possuir ao menos 70% de sua superfície coberta para que haja uma proteção adequada, mas relatam que 40% pode

ser capaz de oferecer uma proteção razoável. De acordo com Guerra (2015), áreas com boa cobertura vegetal apresentam baixas taxas de escoamento superficial e erosão, enquanto que em áreas com menos de 70% de cobertura vegetal, em geral associadas com agricultura e pastoreio, apresentam taxas que podem aumentar rapidamente.

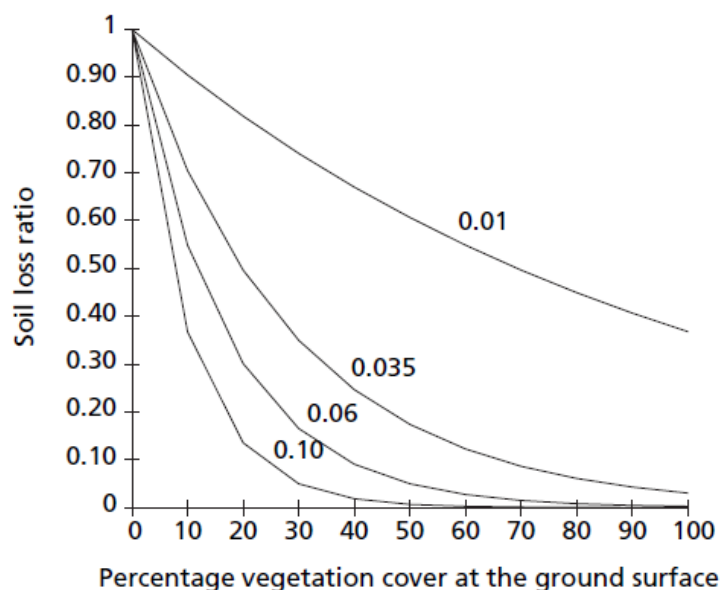
Morgan (2005) apresenta uma fórmula que relaciona a taxa de perda de solo com a porcentagem de cobertura vegetal, sendo esta:

$$SLR = e^{-j*PC}$$

Onde, SLR é a razão entre a perda de solo com cobertura vegetal e a perda em solo descoberto. PC refere-se a porcentagem de cobertura vegetal, e j varia de 0,025 a 0,06, sendo usual adotar o valor de 0,035.

A Figura 8 ilustra a aplicação desta fórmula, sendo possível observar a relação entre taxa de perda de solo e porcentagem de cobertura vegetal adotando diferentes valores para j. Nota-se que tais variáveis são inversamente proporcionais, onde quando a porcentagem de cobertura vegetal se aproxima de 100%, a taxa de perda do solo tende a zero.

Figura 8. Relação entre taxa de perda de solo e porcentagem de cobertura vegetal.



Fonte: Morgan (2005).

Santos et al. (2000), ao analisar a influência do tipo de cobertura vegetal sobre a erosão em uma região do semiárido paraibano, concluiu que a produção de sedimentos diminuiu quando o solo é protegido por vegetação nativa (caatinga) ou cobertura morta. Ademais, os valores para o parâmetro de cobertura e erodibilidade inerentes do solo (α), em parcelas desmatadas se mantiveram entre 10^{-6} e 10^{-8} , enquanto que em parcelas com vegetação, tais valores se mantiveram entre 10^{-8} e 10^{-10} , sendo um indicativo de como o desmatamento influencia na erosão dos solos. Em sua pesquisa, Tartari et al. (2012) observou que a utilização de cobertura vegetal foi responsável por reduzir até 75% das perdas de solo por erosão hídrica durante eventos de chuva em um Argissolo Vermelho-amarelo.

2.3.3. Relevo

O relevo influencia o desenvolvimento de processos erosivos a partir da declividade e do comprimento da encosta, os quais interferem diretamente na velocidade de escoamento (SALOMÃO, 1999).

Ferreira et al. (2010) observou que quanto maior a declividade, maior é a velocidade de escoamento superficial, pois uma declividade mais acentuada proporciona uma maior energia cinética e, conseqüentemente maior capacidade de transporte de partículas, gerando um aumento nas perdas de solo. Lattanzi, Meyer e Baumgardner (1974), e Grosh e Jarret (1994) acrescentam que o aumento da declividade gera um ângulo maior de impacto das gotas da chuva na superfície terrestre, e que há maior facilidade de movimentação das partículas do solo influenciadas pela força da gravidade. Segundo Ayres (1936) a maior velocidade de escoamento interfere também na infiltração de água no solo, pois faz com que este tenha menos tempo para absorver a água.

Já o comprimento das encostas é responsável por aumentar e concentrar o volume de escoamento superficial quando seu percurso é longo (RODRIGUES, 1982; NISHIYAMA, 1998; INFANTI JR. e FORNASARI FILHO, 1998).

Hodges e Arden-Clarke (1986) e Santoro (1991) afirmam que a forma das encostas também influencia no surgimento de erosões. Os primeiros relatam que encostas convexas com topo plano podem formar ravinas e voçorocas quando a água armazenada no topo é liberada. Já Santoro (1991) diz que encostas côncavas estão

mais relacionadas com o surgimento de voçorocas pois concentram escoamento superficial.

Guerra (2015) ressalta que tais características do relevo atuam juntamente com outros fatores condicionantes, como erosividade da chuva e propriedades do solo, interferindo na maior ou menor resistência erosão.

2.3.4. Solos

Segundo Morgan (1986), erodibilidade consiste na resistência do solo em ser removido e transportado. Wischmeier e Mannering (1969) afirmam que a erodibilidade é o fator mais relevante na predição de processos erosivos. Bastos (1999) considera a erodibilidade como sendo uma propriedade complexa por envolver fatores químicos, físicos, mecânicos, biológicos e morfológicos. Para Guerra (2015) as propriedades do solo que interferem na erodibilidade são a textura, densidade aparente, porosidade, teor de matéria orgânica, teor e estabilidade dos agregados e o pH do solo.

De acordo com Guerra (2015), a textura interfere na erodibilidade do solo pois há frações granulométricas que são removidas com mais facilidade que outras. Guerra e Botelho (1996) afirmam que a areia fina e o silte se tratam de frações granulométricas que não oferecem muita resistência a erosão, tendo em vista que são partículas leves e de pouca coesão, facilitando a ação da água tanto no fenômeno *splash*, quanto no escoamento superficial. Por outro lado, a areia grossa por possuir maior diâmetro e peso, e a argila por possuir boa coesão, em especial associada a matéria orgânica, oferecem maior resistência a erosão.

Já a densidade aparente está fortemente relacionada com a porosidade. Para Guerra (2015), a densidade aparente se trata da maior ou menor compactação do solo, sendo assim, quanto maior a densidade aparente, maior será a compactação do solo, o que conseqüentemente gera uma diminuição em sua porosidade e a redução da sua capacidade de infiltração. Guerra e Botelho (1996) relatam que a mecanização na agricultura, o pisoteamento do gado e até mesmo as gotas na chuva em solo desprotegido, são responsáveis pelo aumento da densidade do solo.

Santoro (2015) afirma ainda que a profundidade do solo também afeta a capacidade de infiltração do solo, pois em solos rasos a água encontra uma barreira gerada pela rocha matriz impermeável, fazendo com que esta se acumule e sature o solo, promovendo o escoamento superficial e como conseqüência a erosão. Já solos

profundos, com textura homogênea não se saturam com facilidade, até mesmo com chuvas intensas.

Com relação a estabilidade dos agregados, esta é relacionada por vários autores com a matéria orgânica presente no solo. A matéria orgânica pode ser considerada como o melhor agente agregador do solo, promovendo o aumento da porosidade, da retenção de água e da sua estabilidade, principalmente quando associado a argilas, fazendo com que este seja menos suscetível a processos erosivos (LAL, 1990; SALOMÃO e IWASA, 1995; SANTORO, 2015; GUERRA, 2015).

2.3.5. Substrato Rochoso

Para Bowen (1928), a velocidade do intemperismo de uma rocha depende de sua composição mineralógica. Aqueles minerais que se cristalizam primeiro, sob uma alta temperatura, como olivina e calcita, apresentam menor estabilidade e por esse motivo, sua velocidade de intemperismo é maior. Por sua vez, os minerais que se cristalizam por último, sob temperaturas mais baixas, como o quartzo, apresentam maior estabilidade e são menos susceptíveis ao intemperismo.

Para Santoro (2015), o substrato rochoso é responsável por determinar boa parte das características dos solos que se formam a partir dele. Segundo Selby (1993), Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998), grande parte das voçorocas encontradas no país estão associadas a solos arenosos provenientes de formações geológicas sedimentares clásticas.

2.3.6. Fatores Antrópicos

O homem contribui para o desenvolvimento de processos erosivos de inúmeras formas. Para Ide (2009), a ação do homem é um dos fatores que mais influenciam o desenvolvimento de erosões, tendo em vista que gera desequilíbrios que desencadeiam processos erosivos. Para Couto (2015) as atividades antrópicas geram o aumento da erosividade da água e deixam o solo exposto, tornando-o mais vulnerável e, conseqüentemente, aumentando sua erodibilidade.

Zachar (1982), relata que o desmatamento, a pastagem de animais e o cultivo de culturas com pouca proteção do solo, aumentam o escoamento superficial e alteram a qualidade do solo, contribuindo para o surgimento de erosões. Wild (1993)

consente e acrescenta que as trilhas criadas por animais e pelo homem e a construção de rodovias compactam os solos e conseqüentemente favorecem o escoamento superficial, além disso, atividades econômicas como a mineração, que deixam o solo exposto e sem proteção também são uma das principais causas do surgimento de erosões.

Para Rotta (2012), as atividades antrópicas que mais contribuem para o surgimento de feições erosivas são a construção de barragens, abertura de estradas sem obras de drenagem, loteamentos feitos de forma inadequada, ocupação desordenada de encostas e fundos de vale, criação de valetas perpendiculares às curvas de nível, desmatamentos que em geral são acompanhados por queimadas e capinas, e agricultura e pecuária sem controle.

2.4. MONITORAMENTO DE EROSÕES HÍDRICAS

O monitoramento de processos erosivos consiste em mensurações sistemáticas dos mesmos, onde para isso faz-se necessário a coleta de dados, em períodos que podem ser fixos ou não, sendo isso determinado de acordo com o estudo a ser realizado. Essas técnicas de mensurações são sequencias de passos ou operações que atribuem um valor que representa a magnitude da variável selecionada. O monitoramento é utilizado para analisar como ocorre a evolução dos processos erosivos, permitindo seu posterior controle e recuperação (TOY, FOSTER e RENARD, 2002; GUERRA, 2005).

Toy, Foster e Renard (2002) afirmam que a escolha do tipo de monitoramento depende do processo erosivo e dos processos a serem mensurados, das escalas temporal e espacial de medição, dos usos dos dados coletados e a disponibilidade de tempo, pessoal e recursos financeiros. Além disso, declaram que existe quatro maneiras fundamentais para o monitoramento de erosões, sendo elas, mudança no peso, mudança da elevação da superfície, mudanças na seção transversal do canal e coleta de sedimentos em parcelas de erosão e bacias hidrográficas.

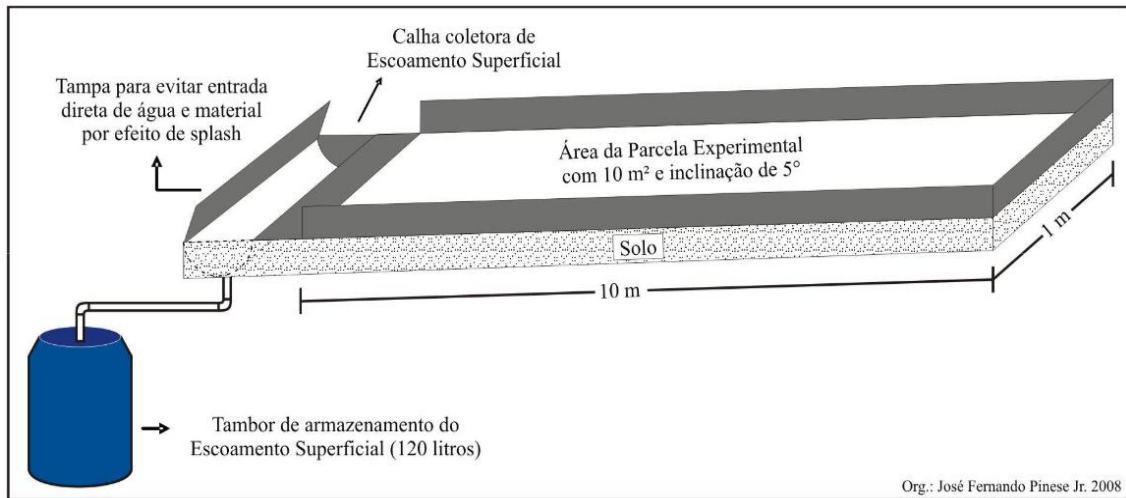
O monitoramento que leva em consideração as mudanças no peso é baseada no princípio de que o processo erosivo remove material da área de origem, ou seja, o solo é depositado em um compartimento, por exemplo, e o peso desse solo é medido antes e depois de um evento erosivo, sendo assim, a alteração nesse peso é a

medição da erosão. Neste caso, as medidas são realizadas em laboratório utilizando pequenas quantidades de solo. O monitoramento que leva em consideração as mudanças na elevação da superfície é baseado no princípio de que a erosão e deposição altera a elevação do terreno. Caso a elevação diminua, é um indicativo de que as partículas do solo estão sendo destacadas, ocorrendo a erosão, caso a elevação aumente, é um indicativo de deposição de solo (TOY, FOSTER e RENARD, 2002).

O monitoramento com base nas mudanças na seção transversal do canal é baseado no princípio de que a erosão e deposição alteram as dimensões do canal, onde um aumento indica erosão, e uma diminuição indica deposição. Por fim, o monitoramento com base na coleta de sedimentos é baseado no princípio de que a erosão produz sedimento e que este pode ser coletado para posterior mensuração de erosão e deposição de solo (TOY, FOSTER e RENARD, 2002).

Pinese Júnior, Cruz e Rodrigues (2008) realizaram um estudo de monitoramento de erosão laminar aplicando o método de parcelas de erosão. Essas parcelas consistem em áreas onde é possível simular diversos usos da terra, onde estas são monitoradas por meio da coleta da água e dos sedimentos gerados através do escoamento superficial. O interessante desta técnica é a possibilidade de analisar e comparar a dinâmica do processo erosivo em diversos usos de solo. Neste experimento foi simulado áreas de solo exposto, monocultura de milho, soja, sorgo, revegetação natural, brachiaria e mata. Foi possível observar que nas parcelas com cobertura foliar densa, o material transportado era composto por material fino, como silte, argila e areia fina, já a parcela com solo exposto foi responsável pelo transporte da maior parte dos sedimentos. Na Figura 9 é possível observar um esquema ilustrativo das parcelas de erosão.

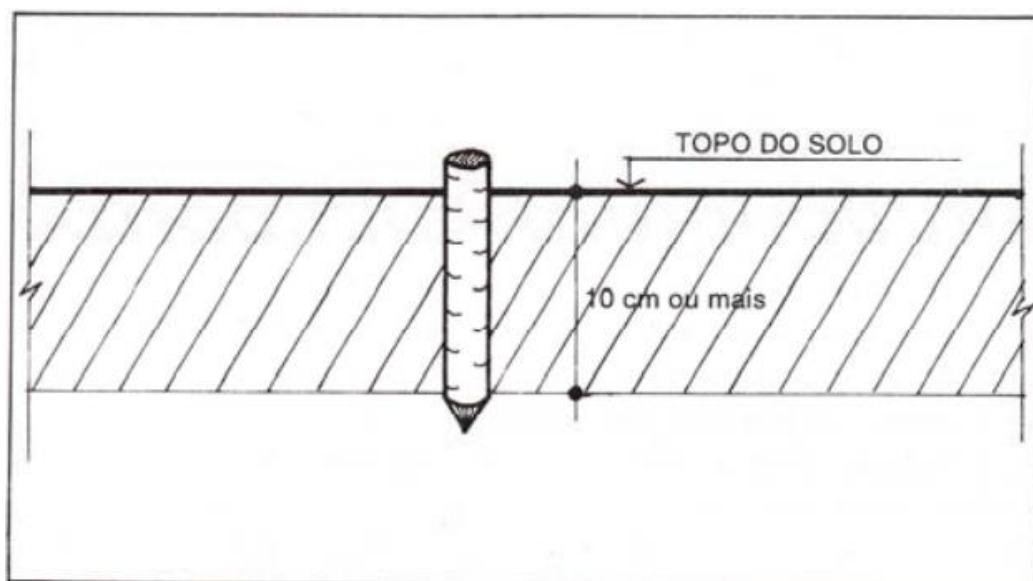
Figura 9. Esquema ilustrativo das parcelas de erosão.



Fonte: Pinese Júnior, Cruz e Rodrigues (2008).

Além das parcelas de erosão, Guerra (2005) aborda outros dois métodos bastante simples e baratos, sendo estes, os pinos de erosão e o estaqueamento. O primeiro é utilizado para analisar a erosão em lençol (entre sulcos), provocada pelo escoamento superficial difuso. Nesta técnica são cravados pinos no solo de uma encosta, podendo ser pregos ou vergalhões, onde estes são monitorados periodicamente medindo o quanto os pinos estão ficando expostos com relação ao solo (Figura 10).

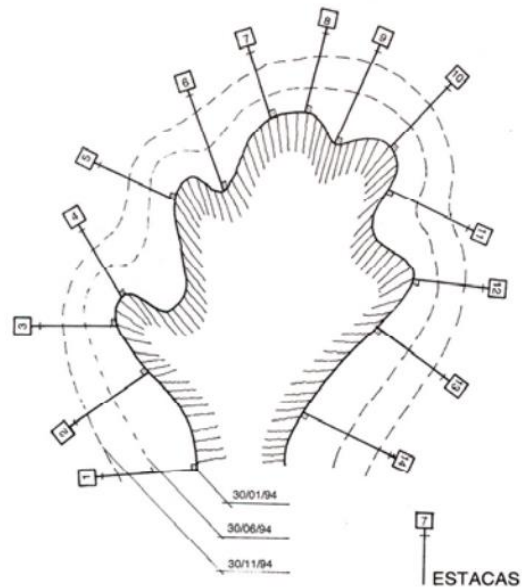
Figura 10. Esquema ilustrativo dos pinos de erosão.



Fonte: Guerra (2002).

Já o estaqueamento é utilizado para erosões mais evoluídas, como é o caso das voçorocas, neste caso são colocadas estacas ao redor do processo erosivo, sendo verificada a variação da distância entre a estaca e a borda da voçoroca com o passar do tempo (Figura 11) (GUERRA, 2005).

Figura 11. Esquema ilustrativo da técnica de estaqueamento.

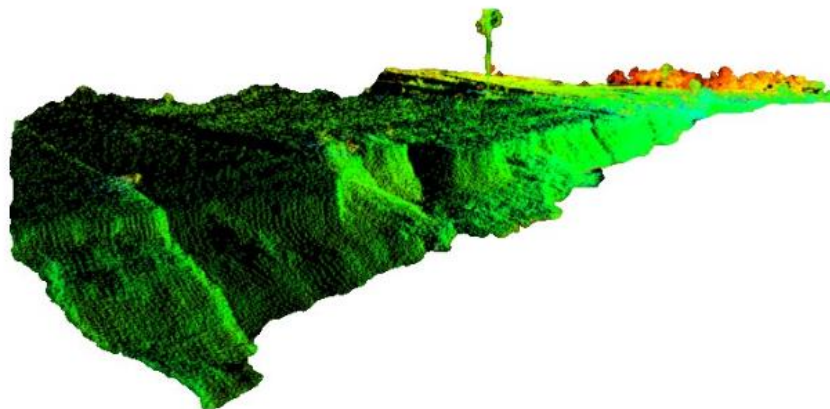


Fonte: Guerra (2002).

Durante o estudo de uma área erosiva em Uberlândia – MG, Leal e Rodrigues (2011) realizaram a comparação de três métodos de monitoramento de erosão, sendo elas, o método de estaqueamento, o DGPS (Sistema de Posicionamento Global Diferencial) e o geoprocessamento. O método do DGPS consiste na coleta de pontos por meio do GPS diferencial, sendo que alguns aparelhos são utilizados para coleta de pontos ao redor do processo erosivo, e outro é utilizado como estação de controle, com o intuito de eliminar erros, em seguida esses dados são processados com auxílio do SIG. Com relação ao geoprocessamento utilizou-se da cartografia digital e também a fotointerpretação, onde foi possível analisar fotografias aéreas de diversos períodos. Por fim, Leal e Rodrigues (2011), chegaram a conclusão de que o primeiro método é útil como monitoramento mensal, o DGPS para monitoramento semestral e o geoprocessamento em mensurações anuais.

Para o monitoramento e avaliação de processos erosivos marginais em reservatórios de usinas hidrelétricas, Moraes (2016) optou pela varredura a LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Neste estudo, Moraes (2016) utilizou o escaneamento a laser terrestre móvel, que apresenta operação simples, rápida e acurada, muito vantajosa para projetos de grandes proporções. O escâner LASER foi acoplado a um barco, onde este navega paralelamente à margem erodida com velocidade e distância pré-estabelecidas. Os dados obtidos a partir do escâner são posteriormente processados por softwares, cujo produto final consiste em uma nuvem de pontos. A Figura 12 ilustra uma nuvem de pontos gerada pelo escâner LASER.

Figura 12. Exemplo de visualização de nuvem de pontos gerada pelo escâner LASER.



Fonte: Moraes (2016).

Em conclusão, Moraes (2016) afirma que os levantamentos realizados a partir da metodologia empregada exibem precisão similar aos produtos topográficos comuns em monitoramento de erosões, com o acréscimo da possibilidade de outras análises.

Carey et al. (2015) afirmam que é mais sensato evitar o surgimento de processos erosivos, sobretudo as voçorocas, do que tentar controlá-los, tendo em vista que as estruturas construídas para estabilização são difíceis e dispendiosas, muitas vezes propensas ao fracasso. Ademais, apesar dessas estruturas de controle serem aplicadas em áreas de maior interesse social e econômico, como ocorre quando o avanço da voçoroca ameaça estradas e edifícios, o uso de tais estruturas para controle de diversos processos erosivos em grandes áreas de solos propensos a

estes, é impraticável. Portanto, o monitoramento de erosões é de extrema importância pois permite a implantação de uma técnica de controle logo no início, poupando dinheiro, tempo e vidas.

Como pode-se observar existem inúmeros métodos de monitoramento de processos erosivos, os quais são empregados de acordo com as necessidades e limitações existentes no projeto. Sendo assim, será abordado de forma mais detalhada apenas a metodologia empregada neste estudo.

2.4.1. Estaqueamento

O estaqueamento é um método utilizado no monitoramento de processos erosivos, em especial as voçorocas. Ele consiste na colocação de estacas no solo ao redor da voçoroca, onde essas serão verificadas a cada dois ou três meses, ou após eventos chuvosos, sendo medida a distância entre a estaca e a borda da voçoroca (GUERRA, 2005).

Brasil et al. (2010) aplicaram este método em uma voçoroca localizada em São Desidério no estado da Bahia. Foram escolhidos oito pontos de monitoramento que eram medidos em intervalos de quinze dias, os quais foram determinados por possuírem indícios de fluxo de material, o que denotava crescimento da voçoroca. Por meio disso, Brasil et al. (2010) puderam observar que a erosão analisada se desenvolvia de maneira não uniforme, onde as áreas que recebiam maior fluxo de água apresentavam maior evolução, chegando a se desenvolver mais de um metro, por outro lado, houveram pontos cuja variação foi pequena em função de estarem localizados na parte mais estável da voçoroca, onde já havia vegetação rasteira fixada.

Leal e Rodrigues (2011), utilizaram este método em uma área erosiva em Uberlândia, no estado de Minas Gerais. Estes escolheram dezesseis pontos também levando em consideração os locais que apresentavam maior fluxo de escoamento superficial, e as mediações eram realizadas mensalmente. Por meio deste estudo, Leal e Rodrigues (2011) observaram que em um primeiro momento a precipitação e o crescimento da voçoroca andavam juntas, todavia, posteriormente, este padrão não foi observado. Isso ocorreu pois, segundo eles, a taxa de crescimento do processo erosivo está associado ao volume de precipitação por dia, e que as erosões

superficiais variam de acordo com a intensidade da chuva, enquanto que as erosões subsuperficiais variam em função da água da chuva acumulada.

Por fim, Leal e Rodrigues (2011) concluíram que este é um método bastante útil em monitoramentos mensais e permite mais interação entre o pesquisador e a área afetada pela erosão, possibilitando uma avaliação mais precisa da dinâmica do processo erosivo.

A Tabela 2 reúne a metodologia aplicada por diferentes autores na aplicação do método de estaqueamento para o monitoramento de voçorocas.

Tabela 2. Metodologia de autores que utilizaram o método de estaqueamento para monitoramento de erosão.

Autor	Local de estudo	Método	Material da estaca	Dimensões da estaca	Profundidade de cravação no solo	Quantidade de estacas por linha	Espaçamento entre estacas	Método de leitura	Frequência da leitura
LOUREIRO, H.A.S. e GUERRA, A.J.T. (2012)	-	Estacas ao redor da borda e nas paredes da voçoroca	Madeira	- Estacas de 20 cm de comprimento e 2x3 de largura; - Estacas com 10 cm de comprimento. - Estacas de 40 cm de comprimento (paredes)	-	- 3 estacas	- 10 m em relação à borda (pino para medição efetiva); - paredes: primeira estaca de 0,5 a 1 m da superfície; - paredes: 1 m entre estacas da mesma coluna; - paredes: 2 m entre estacas de colunas distintas.	-	Mensal
	Uberlândia - MG	Estacas ao redor da borda	Vergalhões	20 cm de comprimento	-	- 2 estacas	- 1 m em relação à borda. - 1 m entre as estacas da mesma linha.	- 90° entre a estaca e a borda.	Mensal

FRANCISCO, A.B. (2011)	Rancharia - SP	Estacas ao redor da borda.	Vergalhões	50 cm de comprimento	-	- 2 estacas	- 3 m em relação à borda; - 3 m entre as estacas da mesma linha; - 20 m entre as estacas de linhas diferentes.	- 90° entre a estaca e a borda.	Mensal
BRASIL, J. et al. (2010)	São Desidério - BA	Estacas ao redor da borda.	Pinos de ferro	40 cm de comprimento	30 cm	2 estacas	1,5 m em relação à borda	90° entre a estaca e a borda.	Intervalos de 15 dias
MATHIAS, D.T., CUNHA, C.M.L. e CARVALHO, P.F. (2010)	São Pedro - SP	Estacas ao redor da borda.	Vergalhão	40 cm de comprimento e diâmetro de 3/8"	30 cm	1 estaca	Espaçamento variável com relação à borda.	90° e 45° entre a estaca e a borda.	Intervalos de 6 meses podendo variar
GUERRA, A.J.T. (2005)	-	Estacas ao redor da borda.	Madeira	-	-	1 estaca	Ao menos 10 m com relação a borda e 20 m entre as estacas	90° entre a estaca e a borda.	Intervalo de 2 a 3 meses
VIANA, J.D. et al. (2014)	São José de Ribamar - MA	Estacas ao redor da borda.	Madeira	40 cm de comprimento e 5,5 cm de largura	-	1 estaca	-	90° e 45° entre a estaca e a borda.	Período chuvoso

2.5. TÉCNICAS DE CONTROLE DE EROSÃO

Os princípios básicos para o controle de processos erosivos se baseiam na manutenção da cobertura protetora do solo, aumento da infiltração de água e controle do escoamento superficial (WEILL e PIRES NETO, 2007).

Salomão e Iwasa (1995) e Almeida Filho (2015), as classificam as técnicas de controle de erosão em vegetativas, edáficas e mecânicas. Nas técnicas vegetativas faz-se o uso da cobertura vegetal, por exemplo o método de cobertura morta, onde os restos de culturas são utilizadas para o recobrimento do solo fornecendo proteção contra as gotas da chuva e o escoamento superficial. Já nas técnicas edáficas, são utilizadas práticas conservacionistas que atuam mantendo e melhorando a fertilidade do solo, controlando os processos erosivos de forma indireta, como a rotação de cultura, que consiste na alternância de plantas que recuperam o solo e aquelas que o exaurem. Por fim, as técnicas mecânicas consistem na implantação de estruturas, como no terraceamento, que é composto por um canal e um camalhão, feitos com o solo, os quais permitem a redução da velocidade do escoamento da água e facilita sua infiltração no solo.

Ainda de acordo com Almeida Filho (2015), as duas primeiras técnicas são mais acessíveis, e por esse motivo, devem ser privilegiadas, todavia, em regiões vulneráveis à erosão deve-se utilizar também as técnicas mecânicas.

Para Rotta (2012), os tipos de técnicas de controle são divididos em ecológicas, agrícolas, mecânicas, estruturais e de bioengenharia. Apesar da denominação diferente, as técnicas ecológicas e agrícolas correspondem as técnicas vegetativas e edáficas definidas anteriormente por Salomão e Iwasa (1995) e Almeida Filho (2015). Quanto as técnicas estruturais, estas abrangem elementos mecânicos e estruturais, sendo divididas em dois grupos, microdrenagem e macrodrenagem. Já as técnicas de bioengenharia englobam materiais vivos, em especial a vegetação, juntamente com elementos mecânicos e estruturais, como a geogrelha vegetada e manta de gramíneas.

A mesma autora afirma ainda que as técnicas de controle de erosão podem ser classificadas quanto ao seu objetivo, podendo ser estes a prevenção, mitigação, controle e recuperação de uma área. As técnicas que visam a **prevenção** são aquelas

que visam evitar a ocorrência da feição erosiva, inibindo a ação do agente erosivo, ou interferindo na vulnerabilidade dos fatores condicionantes. As técnicas de **mitigação** são aquelas que buscam reduzir ou eliminar algum impacto prejudicial relacionado à erosão, por exemplo, o transporte de sedimentos a corpos hídricos. As técnicas de **controle** propõem-se a impossibilitar a evolução da erosão já existente, porém sem modificar a situação atual desta. E as técnicas de **recuperação** objetivam a eliminação total dos processos erosivos existentes e das condições de vulnerabilidade.

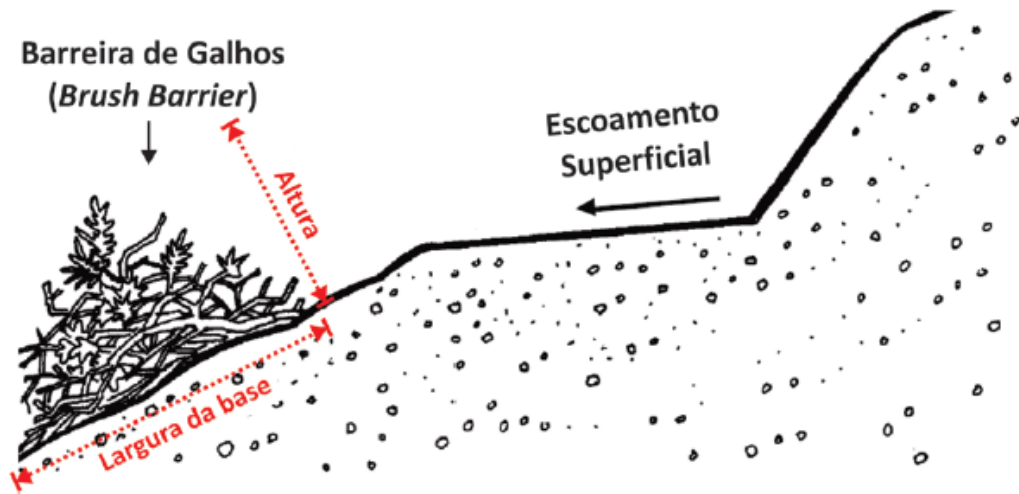
Tendo em vista grande quantidade de técnicas de controle de erosão, serão tratadas de forma mais detalhada, somente as aplicadas na área de estudo.

Vale ressaltar, que na maioria dos casos, após a aplicação de técnicas de controle de erosão, não ocorre um acompanhamento que garanta a sua eficiência e funcionalidade, ou ao menos que verifique a necessidade de manutenção. Sendo assim, entende-se que os mesmos princípios aplicados ao monitoramento do desenvolvimento de erosões de maior porte podem ser aplicados para o monitoramento da eficiência das técnicas de controle aplicadas.

2.5.1. Barreira de Galhos (*Brush Barrier*)

A barreira de galhos (*brush barrier*) consiste em uma barreira de sedimentos temporária que pode ser composta por galhos de árvores, ervas daninhas, videiras, e até mesmo rochas e solo, os quais são colocados próximos a declives, com o intuito de interceptar os sedimentos e diminuir a velocidade de escoamento da água (Figura 13). Tal técnica é possivelmente a mais simples para o controle de erosão, além de utilizar resíduos vegetais que em geral seriam queimados no local (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1990; VIRGINIA DEPARTMENT OF CONSERVATION AND RECREATION, 1992).

Figura 13. Barreira de galhos (*brush barrier*)



Fonte: Modificado de Keller e Sherar (2003).

Para construir uma barreira de galhos é necessário seguir algumas recomendações, sendo estas (VIRGINIA DEPARTMENT OF CONSERVATION AND RECREATION, 1992; ALASKA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION AND PUBLIC FACILITIES, 2001):

- Altura entre 0,9 a 1,5 metros;
- Largura da base entre 1,5 a 4,6 metros;
- O comprimento máximo da encosta a montante não deve ser superior a 30 metros;
- Para uma barreira com comprimento de até 30 metros, a área de captação não deve ultrapassar 2500 m²;
- A inclinação máxima da encosta de ser igual a 50% ou 26,56°;
- Realizar vistorias periódicas, especialmente após eventos chuvosos.

Além disso, o material utilizado na construção da barreira de galhos deve possuir diâmetro inferior a 6 polegadas, o que equivale a aproximadamente 15 centímetros, a fim de não criar espaços vazios, os quais tornarão a barreira ineficaz. Para evitar a movimentação dos galhos, bem como melhorar a eficácia do método, pode-se colocar um tecido similar a um filtro sobre a barreira de galhos, onde a extremidade deste tecido deve ser enterrada em uma vala com 10 centímetros de profundidade e 15 centímetros de largura. O sedimento acumulado deve ser retirado quando a sua altura

atingir um terço da altura da barreira (URBAN DRAINAGE AND FLOOD CONTROL DISTRICT, 2010).

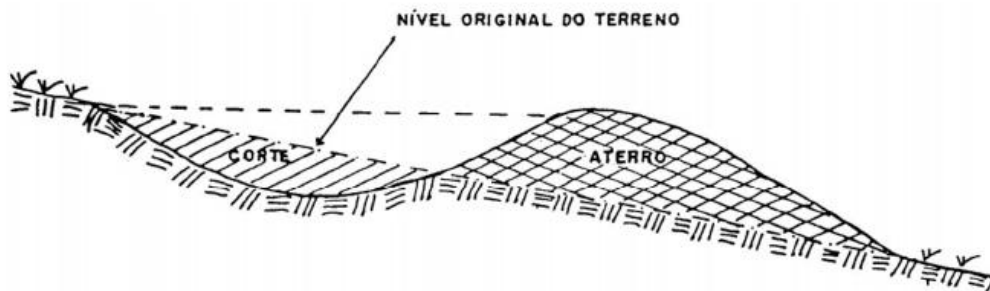
Vale ressaltar que esta técnica deve ser empregada juntamente com outras técnicas de controle de erosão, e não deve ser utilizada em áreas que apresentam fluxo de escoamento superficial muito intenso. Uma vez que a área tenha sido estabilizada, deve-se retirar a barreira de galhos e vegetar a área (URBAN DRAINAGE AND FLOOD CONTROL DISTRICT, 2010).

2.5.2. Terraceamento

O terraceamento consiste em uma técnica de controle de erosão baseada na construção de terraços, os quais promovem a redução do comprimento das vertentes e, conseqüentemente a diminuição da velocidade do escoamento superficial e maior infiltração de água no solo. Ademais, os terraços permitem a deposição das partículas do solo que foram erodidas, fator que reduz a perda de solo e o assoreamento de corpos hídricos (VERDUM, VIEIRA e CANEPPELE, 2016).

O terraço é composto por um canal e um camalhão, construídos transversalmente em relação ao declive do terreno (Figura 14). O canal refere-se a parte de solo onde foi feito o corte, e tem como intuito armazenar a água proveniente do escoamento superficial, permitindo a infiltração lenta da água no solo. Já o camalhão trata-se do aterro construído a partir do solo retirado para a formação do canal, e tem como objetivo barrar o escoamento e os sedimentos erodidos (VERDUM, VIEIRA e CANEPPELE, 2016).

Figura 14. Estrutura de um terraço



Fonte: Bertolini e Cogo (1996) apud ANA (2015)

Os terraços são classificados quanto à função (retenção, drenagem ou mistos); tipo de construção (Nichols ou Mangum); faixa de movimentação de terra (base estreita, base média ou base larga) e quanto a forma do perfil do terreno (comum, patamar, comum embutido e Murundum).

Os **terraços de retenção** são construídos em nível com suas extremidades bloqueadas a fim de reter o escoamento superficial e promover a infiltração. Esse tipo de terraço é recomendado para solos com declividade de até 12% e para solos com boa permeabilidade, como os latossolos e nitossolos, e arenosos, como os neossolos quartzarênicos (PRUSKY, 2009; MACHADO e WADT, 2017).

Os **terraços de drenagem** possuem canal em pequeno declive, o qual permite o acúmulo da água e seu escoamento lento para fora da área protegida, através de uma ou duas extremidades abertas. São indicados para terrenos com declividade de até 20% e com permeabilidade moderada ou lenta, como cambissolos e argissolos (MACHADO e WADT, 2017).

Os **terraços mistos** possuem um canal em pequeno declive em uma área de acúmulo de água, na qual um tubo retira de forma lenta o excesso de água que não se infiltrou no solo (VERDUM, VIEIRA e CANEPPELE, 2016).

Na construção dos terraços do tipo **Nichols**, utiliza-se um arado que movimenta o solo de cima para baixo, ou seja, para a formação do camalhão retira-se a massa de solo da faixa superior, resultando na formação do canal. Esse tipo de terraço pode ser utilizado em declividades de até 15%, porém em casos onde o solo apresenta boa cobertura de palhada, esse limite chega a 18% (MACHADO e WADT, 2017).

Já na construção de terraços do tipo **Mangum**, o solo é movimentado tanto de cima para baixo, quanto de baixo para cima, formando um canal mais largo e raso que permite o armazenamento de maiores volumes de água quando comparado aos terraços do tipo Nichols. Esse tipo de terraço é indicado para terrenos com menores declividades (PRUSKY, 2009).

Os terraços de **base estreita** possuem largura de 2 a 3 metros e são aplicados em áreas com declividade superior a 15%. Sua principal desvantagem é a perda de área agricultável (8 a 10%), pela impossibilidade de cultivo sobre o camalhão. Os terraços de **base média** possuem largura de 3 a 5 metros, aplicados em áreas com declividade entre 10% a 15%, e as perdas de área agricultável variam de 2,5% a 3,5%. Os terraços de **base larga** possuem largura de 8 a 12 metros, aplicados em áreas com declividade inferior a 10%, com nenhuma perda de área agricultável. Esse tipo

de terraço é aplicado em área de agricultura mecanizada (VERDUM, VIEIRA e CANEPPELE, 2016).

Os terraços do tipo **comum** é o tipo mais utilizado no Brasil, e é indicado para áreas com declividade inferior a 18%. Os do tipo **patamar** são compostos por uma plataforma, onde é realizado o plantio da cultura, e por um talude, o qual deve ser estabilizado a partir de uma cobertura vegetativa. Os terraços do tipo comum **embutido** possuem canal triangular, formando um talude vertical que o separa do camalhão. E por fim, os do tipo **Murundum**, são caracterizados por possuírem canal triangular e camalhão extremamente alto, podendo ser superior a 2 metros. Pela grande movimentação de solo, possui alto custo e não permite a movimentação de máquinas. É indicado somente quando é necessário o reter grandes volumes de água (PRUSKY, 2009).

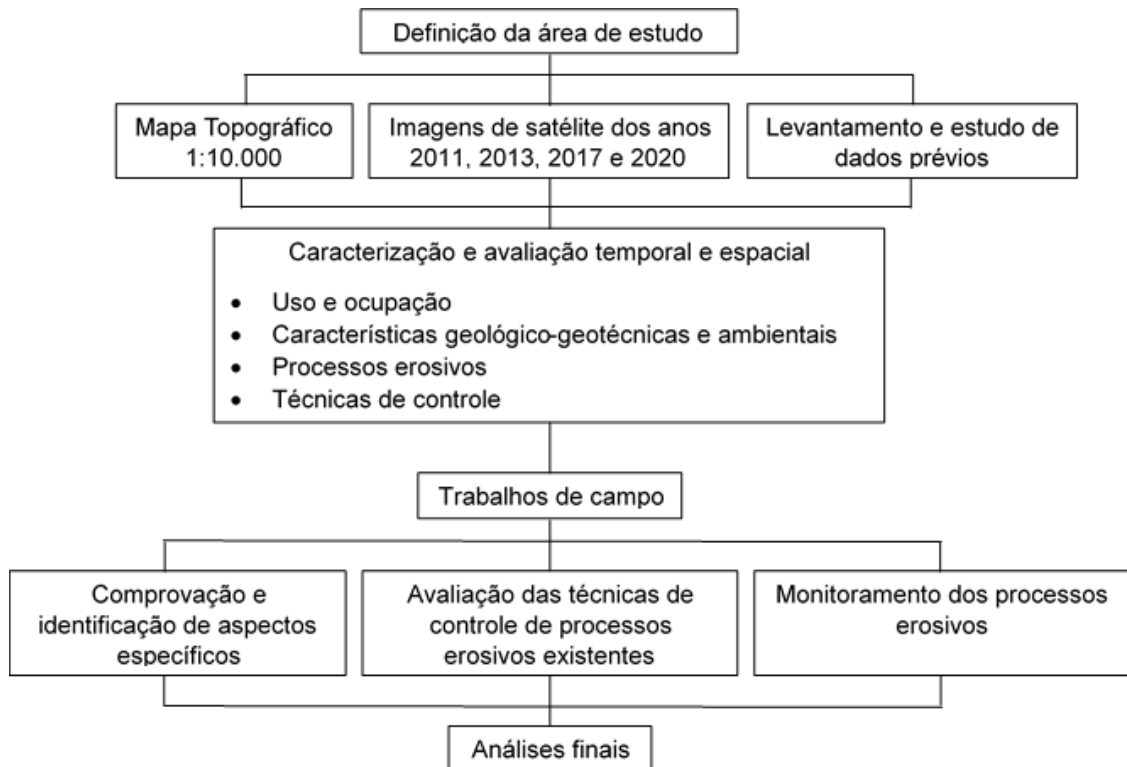
É importante ressaltar que as dimensões e espaçamentos dos terraços variam de acordo com o volume de escoamento superficial, declividade, comprimento da vertente, tipo de solo, uso e manejo do solo, cobertura vegetal, grau de consolidação e índice de rugosidade da superfície do solo (VERDUM, VIEIRA e CANEPPELE, 2016). Prusky (2009) afirma que a permeabilidade do solo e do subsolo determinam se o terraceamento deverá ser de retenção, drenagem ou misto.

Quando bem planejados, bem construídos e utilizados em conjunto com outras práticas conservacionistas, os terraços podem ser uma das técnicas mais eficientes contra a perda de solo e o surgimento de processos erosivos (BERTONI e LOMBARDI, 1985). Pires e Souza (2006) concordam e afirmam que nesses casos o terraceamento pode reduzir as perdas de solo em até 80% e a de água em 100%.

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho envolveu uma série de etapas, as quais abrangeram trabalhos de escritório e de campo, que posteriormente serviram de base para a avaliação final. Tais etapas estão sumarizadas no fluxograma da Figura 15.

Figura 15. Fluxograma indicando as principais etapas do trabalho.



3.1. ETAPAS DE ESCRITÓRIO

A primeira etapa compreendeu a definição da área de estudo, para isso foi considerado a ocorrência de processos erosivos de grandes dimensões, em especial voçorocas. Após a escolha da área de estudo, foram reunidos materiais cartográficos que a abrangesse, sendo eles, uma carta topográfica na escala 1:10.000, identificada como Córrego Água da Areia, SF-22-Z-D-V-2-SE-B, elaborada pelo Governo do Estado de São Paulo (1978), bem como imagens de satélite dos anos de 2011, 2013, 2017 e 2020, disponíveis na série história do Google Earth Pro, tendo sido considerado critérios como boa visualização da área de estudo e evolução das feições erosivas.

Para a realização da caracterização da área de estudo foram utilizados mapas disponibilizados pelo DataGEO Sistema Ambiental Paulista, incluindo Mapa Geológico, escala 1:250.000 (LANDIM et al., 1984), Mapa Geomorfológico, escala 1:500.000 (ROSS e MOROZ, 1997), Mapa Pedológico, escala 1:250.000 (ROSSI, 2017), Biomas do Estado de São Paulo (IBGE e MMA, 2004), e também o Inventário Florestal do Estado de São Paulo (INSTITUTO FLORESTAL, 2020).

Para o processamento desses dados, utilizou-se o software ArcGIS 10.5, com o Sistema de Projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), Zona 22 Sul, Datum Sirgas 2000. Com a carta topográfica georeferenciada foi possível delimitar a sub-bacia hidrográfica de estudo, digitalizar as curvas de nível e a rede de drenagem. E as imagens de satélites georeferenciadas foram utilizadas para elaborar o mapa de uso e ocupação do solo e o mapa de evolução das feições erosivas, tendo como base a fotointerpretação e observações em campo.

Para a elaboração do gráfico correspondente ao ano hidrológico da área de estudo utilizou-se os dados obtidos pela série histórica (1943 a 2012) disponibilizada pela Agência Nacional de Águas (ANA), referente a estação pluviométrica do município de Campina do Monte Alegre – SP. Para o processamento desses dados, foi utilizado o software Excel 2013.

Além disso, foi realizado um levantamento bibliográfico de estudos relacionados à temática erosiva, especialmente sobre o método de estaqueamento utilizado para monitorar processos erosivos de grandes dimensões.

3.2. TRABALHOS DE CAMPO

Os trabalhos de campo foram essenciais para complementar os trabalhos desenvolvidos em escritório, identificando aspectos não identificados a partir da fotointerpretação, como dimensões, evolução e estabilidade dos processos erosivos, sistema de drenagem, materiais geológicos, pisoteamento do gado, e presença de lâmina d'água, além de possibilitar a confirmação de características previamente identificadas, como vegetação e uso e ocupação do solo.

Os trabalhos de campo, permitiram também realizar o monitoramento das feições erosivas a partir do método de estaqueamento. Para a realização desta etapa foram necessárias 52 estacas de madeira, com dimensões de 5x5 cm e 30 cm de

comprimento, tendo sido enterrado 15 cm no solo. Dessas estacas, 34 foram colocadas nas bordas das feições erosivas, respeitando um distanciamento de 1,5 m de distância entre a estaca e a borda, objetivando identificar a evolução horizontal dos processos erosivos. Ademais, 9 estacas foram colocadas no fundo da voçoroca, e 9 foram colocadas em suas paredes, com o intuito de verificar o acúmulo de sedimentos erodidos e a evolução vertical da feição erosiva, respectivamente. Em todas as estacas foram coletados pontos no GPS para posterior processamento no software ArcGIS 10.5.

Por fim, foi possível identificar e caracterizar as medidas de controle de erosão existentes, verificar se estas estavam sendo efetivas e indicar possíveis erros.

3.3. AVALIAÇÃO FINAL

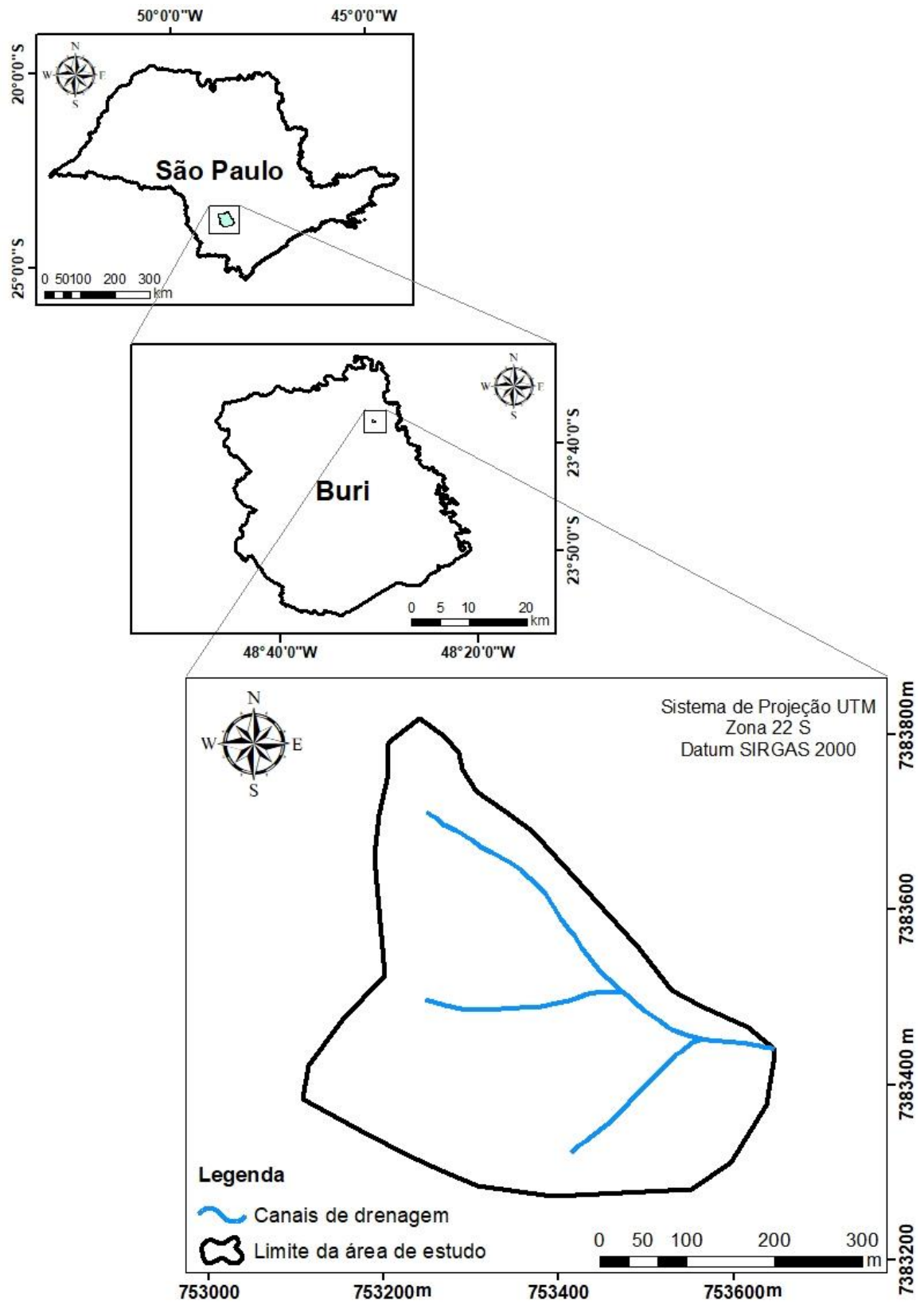
A partir de todas as informações, obtidas tanto em laboratório quanto em campo, foi realizada uma análise objetivando avaliar a evolução dos processos erosivos, bem como verificar o sucesso ou fracasso das medidas de controle de erosão adotadas na área de estudo.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo consiste em uma sub-bacia hidrográfica de aproximadamente 0,161 km², a qual é tributária do Córrego Mandaçaia, que por sua vez é tributário do Rio Paranapanema. A sub-bacia se localiza em uma propriedade rural situada no município de Buri, sudoeste do estado de São Paulo, próxima a Universidade Federal de São Carlos, *campus* Lagoa do Sino. A Figura 16 mostra a localização da área de estudo.

Figura 16. Localização da área de estudo.



4.2. DADOS CLIMÁTICOS

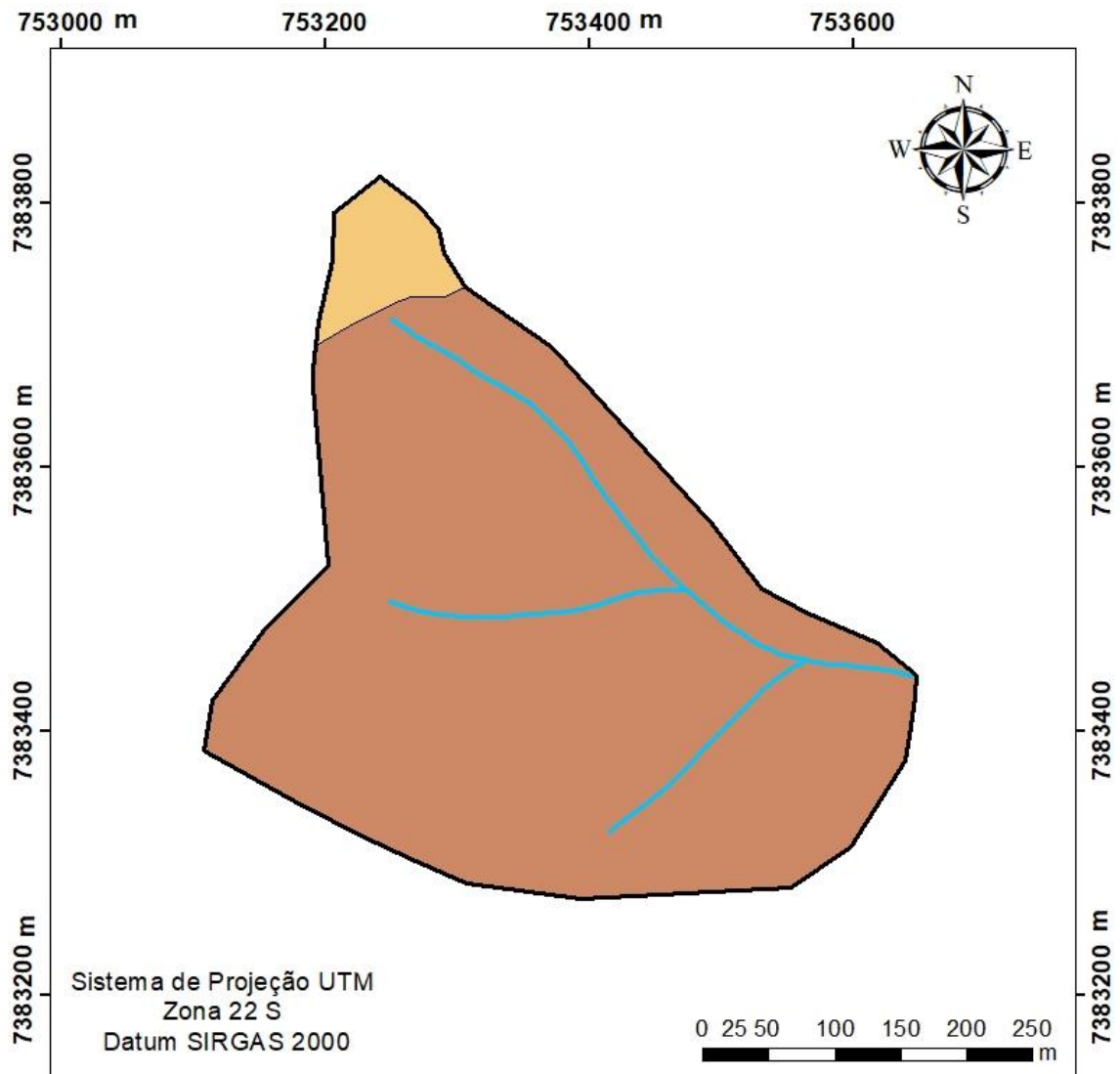
De acordo com a classificação climática de Köppen (1948), o município de Buri está a aproximadamente 652 metros de altitude e pertence ao clima Cfa, caracterizado como clima subtropical, o qual possui verão quente com temperaturas acima de 22°C e precipitações ao longo de todos os meses do ano, apresentando uma média de 1241,5 mm/ano. Tal fato contribui para a ocorrência de processos erosivos, em especial erosões hídricas lineares, que são um grande problema em países tropicais como o Brasil.

4.3. GEOLOGIA


Com relação a Geologia, de acordo com o Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:250.000, publicado por Landim et al. (1984), a sub-bacia ocorre no contexto da bacia sedimentar do Paraná, Grupo Tubarão, sobre duas unidades litoestratigráficas de idade permocarbonífera (Figura 17).

A primeira, situada em uma pequena área na cabeceira da sub-bacia, trata-se da Formação Tatuí. Esta é caracterizada por possuir siltitos arenosos e argilosos, arenitos lamíticos e raras lentes de calcário. Já na maior parte da sub-bacia tem-se o Subgrupo Itararé, o qual é composto por arenitos finos e grosseiros, siltitos, lamitos, diamictitos e ritmitos, majoritariamente nas cores cinza, amarelo e vermelho.

Figura 17. Mapa geológico.



Legenda

 Limite da área de estudo

 Canais de drenagem

Geologia

Grupo Tubarão

 Pt - Formação Tatuí

 PCi - Subgrupo Itararé



Universidade Federal de São Carlos
Centro do Ciências da Natureza



MAPA GEOLÓGICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Ambiental

Autora: Tayne S.M. da Silva
Orientadora: Cláudia M. dos S, Rotta

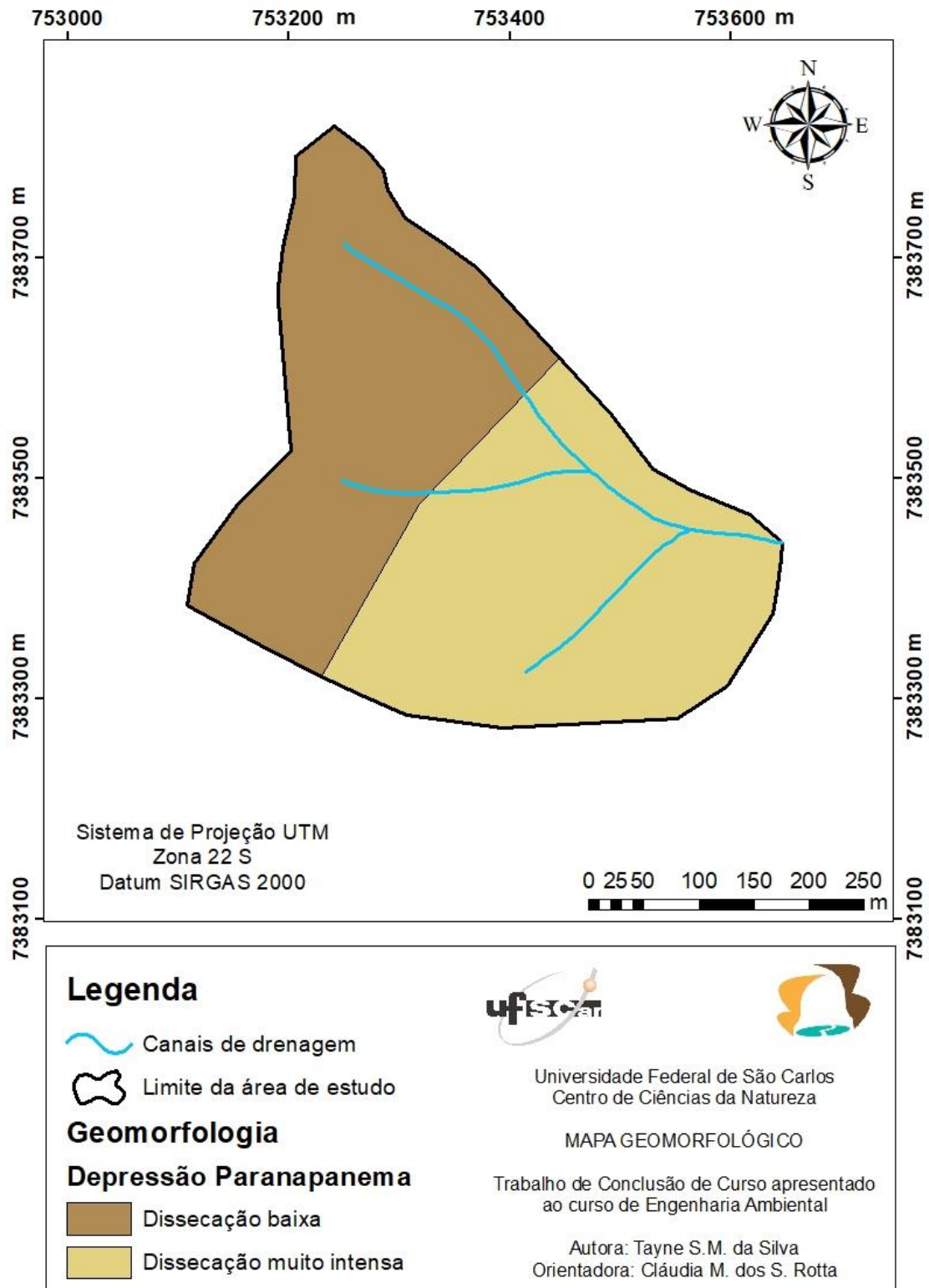
Fonte: Modificado de Landim et al. (1984).

4.4. GEOMORFOLOGIA

De acordo com o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, publicado por Ross & Moroz (1997), a sub-bacia hidrográfica em estudo está inserida na Depressão Paranapanema, porém, por apresentar características divergentes, é dividida em duas classes, sendo elas, com dissecação baixa e com dissecação muito intensa (Figura 18).

A área com dissecação baixa abrange a parte superior da sub-bacia e se caracteriza por possuir vales pouco entalhados e baixa densidade de drenagem. Já a área com dissecação muito intensa abrange a parte inferior da sub-bacia e pode apresentar vales de entalhamento pequeno e densidade de drenagem alta ou, vales muito entalhados com densidade de drenagem menores. Esta área é suscetível a processos erosivos agressivos e movimentos de massa.

Figura 18. Mapa geomorfológico.



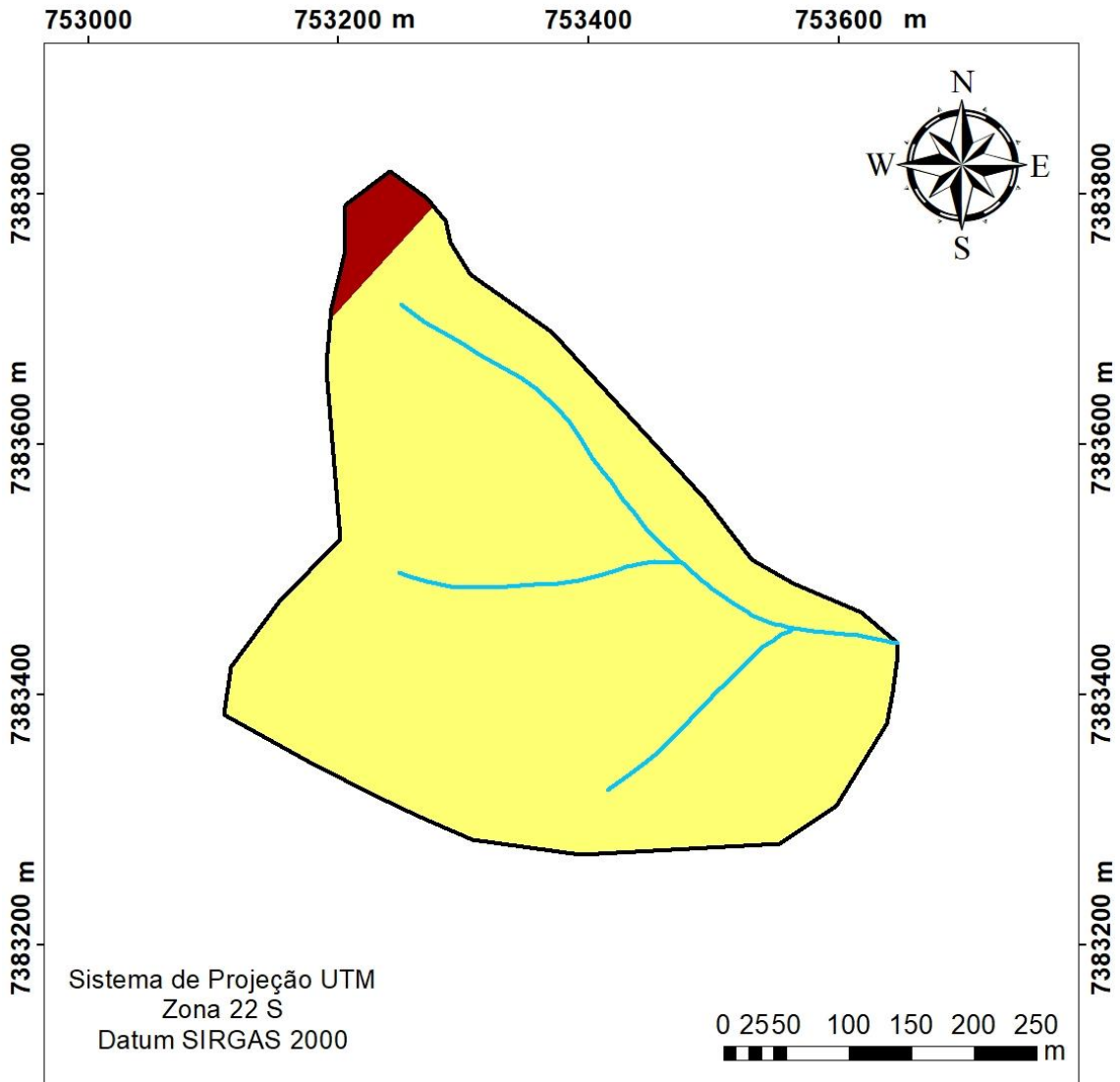
Fonte: Modificado de Ross e Moroz (1997).






4.5. PEDOLOGIA

A partir do Mapa Pedológico do Estado de São Paulo, escala 1:250.000, publicado por Rossi (2017), foram identificadas duas classes pedológicas na área de estudo, sendo elas Latossolo Vermelho e Argissolo Vermelho-amarelo (Figura 19).

Em uma pequena área situada na parte superior da sub-bacia tem-se a classe de Latossolo Vermelho, sendo descrita pelo autor como associação entre Latossolo Vermelho distrófico típico de textura média e Latossolo Vermelho distrófico típico de textura argilosa, sendo ambos profundos. E abrangendo grande parte da sub-bacia foi identificada a classe de Argissolo Vermelho-amarelo, o qual é descrito como uma associação entre Argissolo Vermelho-amarelo com vermelho abrupto e, Argissolo Vermelho-amarelo com vermelho típico, onde ambos são profundos e apresentam textura arenosa média ou média argilosa.

Figura 19. Mapa pedológico da área de estudo.



Legenda		
	Canais de drenagem	
	Limite da área de estudo	Universidade Federal de São Carlos Centro de Ciências da Natureza
Pedologia		MAPA PEDOLÓGICO
Classe		Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental
	Latossolo Vermelho	Autora: Tayne S. M. da Silva
	Argissolo Vermelho-Amarelo	Orientadora: Cláudia M. dos S. Rotta

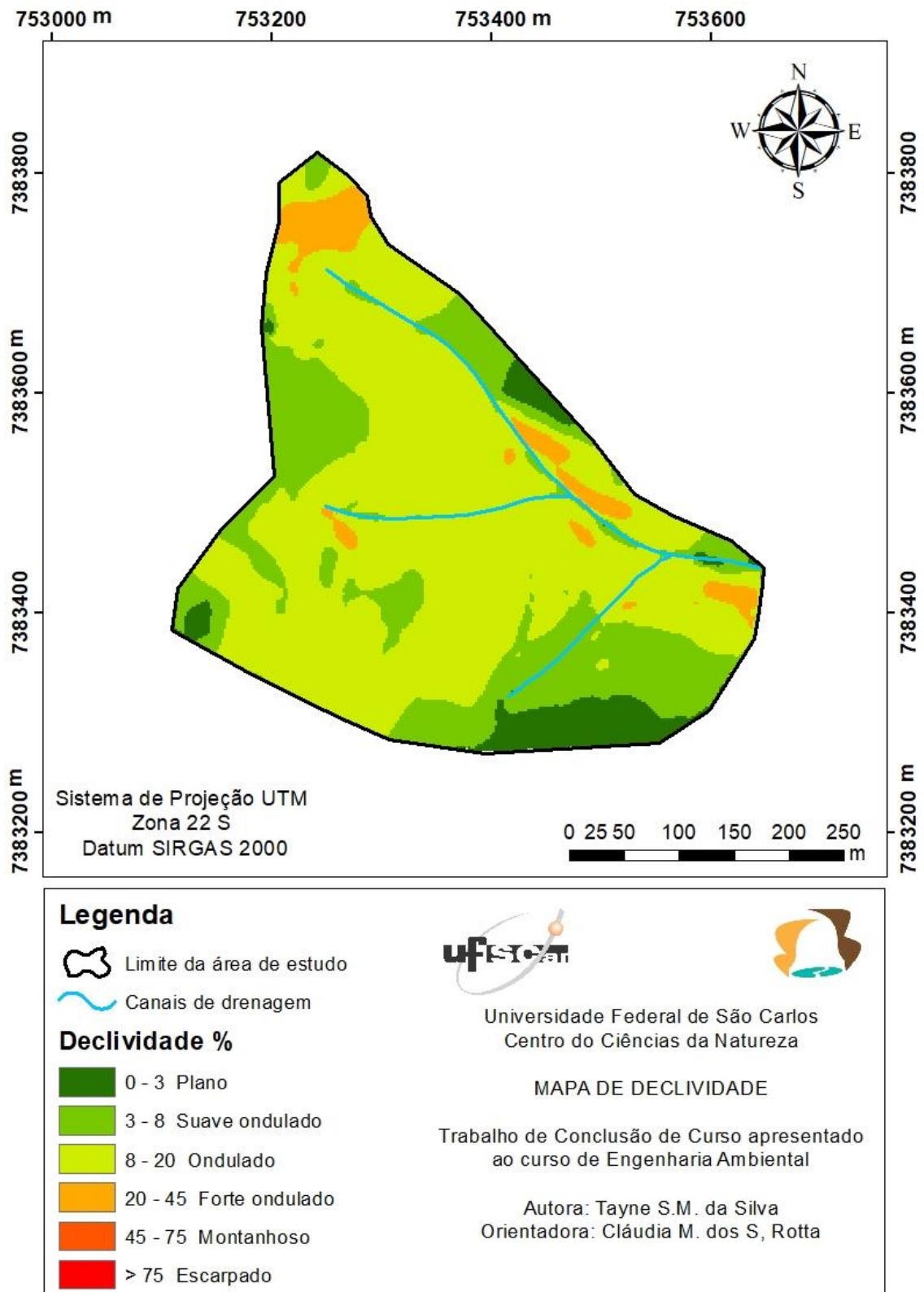
Fonte: Modificado de Rossi (2017).

4.6. DECLIVIDADE

A carta de declividade apresenta informações referentes ao relevo da área de estudo, onde a inclinação do terreno, tendo como referência um plano horizontal, é expressa em porcentagem. Em sua elaboração foi utilizada a carta topográfica elaborada pelo Governo do Estado de São Paulo (1978), de escala 1:10.000, e as classes de declividade foram definidas de acordo com a Embrapa (2006).

É possível observar que o relevo predominante na área de estudo trata-se do relevo ondulado (8-20%), seguido do relevo de ondulação suave (3-8%). A declividade mais acentuada trata-se do relevo forte ondulado (20-45%), estando presente próximo aos canais de drenagem e na região superior da bacia, os quais estão associados aos processos erosivos mais intensos (Figura 20).

Figura 20. Carta de declividade da área de estudo.



4.7. VEGETAÇÃO

A sub-bacia se encontra em uma região de transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado, porém de acordo com o mapa Biomas do Estado de São Paulo, publicado em 2004 pelo IBGE e o Ministério do Meio Ambiente, a área da sub-bacia engloba apenas o bioma Mata Atlântica.

O inventário florestal de 2020, de escala 1:10.000, publicado pelo Instituto Florestal (2020), mostra que o fragmento de vegetação remanescente na área consiste na Floresta Estacional Semidecidual em estágio médio, caracterizada por possuir uma estação chuvosa e outra seca, sendo que na seca as árvores perdem até 50% de suas folhas.

4.8. USO E OCUPAÇÃO

A sub-bacia consiste em uma área destinada para a pecuária bovina, por esse motivo, a cobertura vegetal predominante é a pastagem. Há pequenos remanescentes de Floresta Estacional Semidecidual, os quais encontram-se na parte inferior na sub-bacia, não estando associados a áreas de maior declividade e nem aos canais de drenagem.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

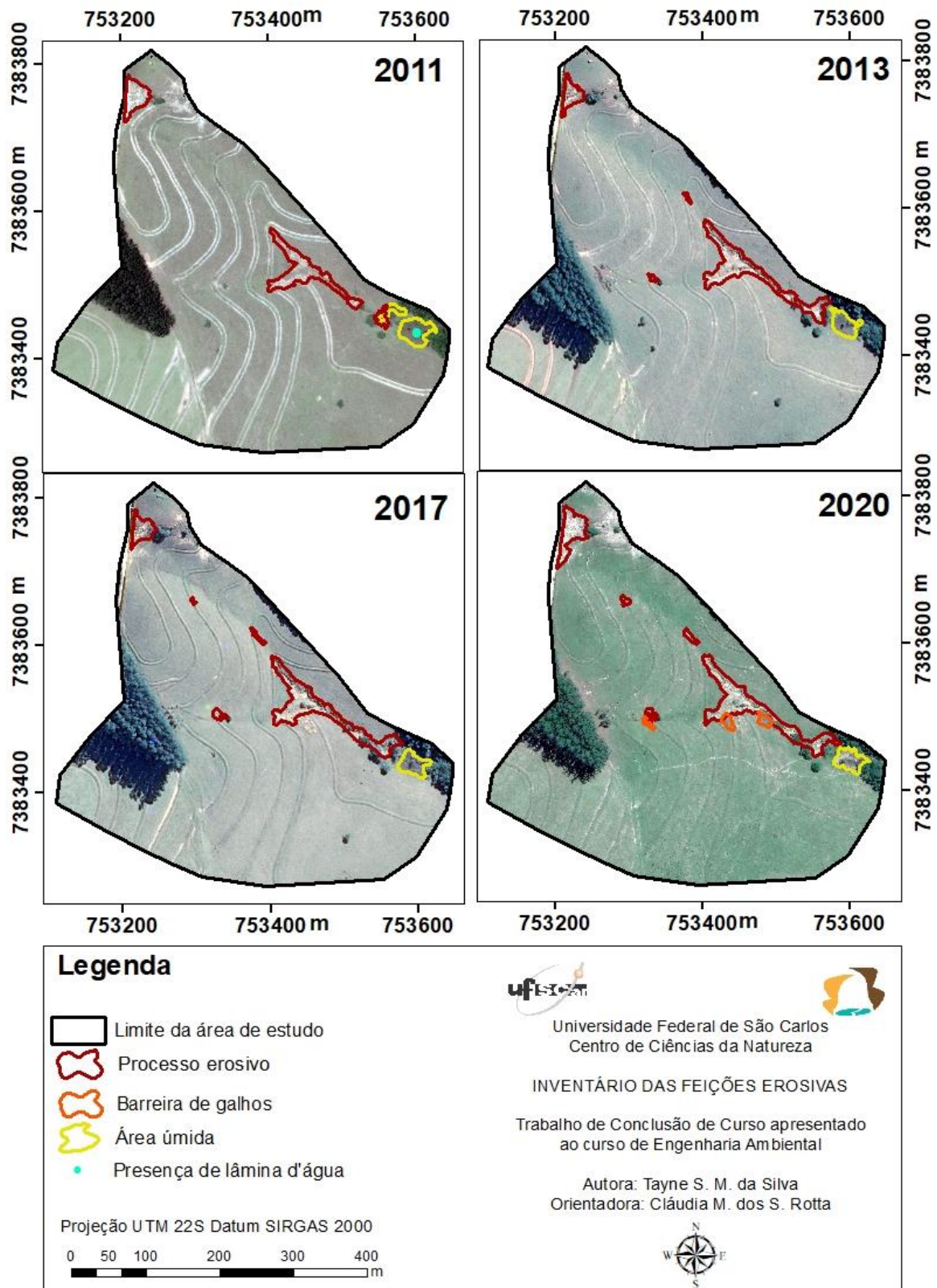
5.1. AVALIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DOS PROCESSOS EROSIVOS

Inserida na sub-bacia de estudo encontra-se uma voçoroca contínua em relação ao canal de drenagem. Analisando as imagens de satélite mais atuais e comparando-as ao mapa topográfico de 1978, verifica-se que as ramificações da voçoroca se localizam sob o que antes era ocupado pelos canais de drenagem desta sub-bacia.

A substituição da vegetação nativa pela pastagem, associada às características de relevo (sobretudo ao formato côncavo) levaram à concentração do escoamento superficial que deflagrou tal processo erosivo. Apesar de a voçoroca ser a principal feição erosiva desta sub-bacia hidrográfica, também foram identificadas feições de menor porte em diferentes pontos, todos descontínuos em relação ao sistema de drenagem.

As atividades de fotointerpretação permitiram identificar e analisar tais feições espacial e temporalmente. A Figura 21 mostra o resultado dessa etapa, que foi elaborado tendo como base as imagens dos anos de 2011, 2013, 2017 e 2020.

Figura 21. Inventário das feições erosivas.



A partir da Figura 21, é possível observar algumas mudanças na área de estudo. Primeiramente, nota-se uma evolução expressiva nos processos erosivos, os quais

aumentaram aproximadamente 48% de sua área superficial, considerando os anos de 2011 e 2020 (Tabela 3). Três destas feições erosivas estão associadas ao rompimento de terraços, os quais foram construídos com a finalidade de controlar as erosões já existentes, podendo ser um indicativo de que o terraceamento não foi implantado de forma correta.

Tabela 3. Evolução das feições erosivas em termos de área superficial.

Ano	Área superficial dos processos erosivos (m²)
2011	4.000
2013	4.619,5
2017	5.316,77
2020	5.946,83

Outro aspecto observado pela Figura 21, refere-se a área úmida existente na região inferior da sub-bacia. No ano de 2011, é possível notar uma grande área úmida com ocorrência de lâmina d'água, porém, nos anos seguintes esta área teve uma diminuição considerável, não sendo mais possível identificar a presença de água pela fotointerpretação. Tal fato pode ser justificado pela inexistência de mata ciliar, pela deposição de sedimentos erodidos, bem como pelo pisoteamento de gado, o qual é muito observado em toda área de estudo. Vale ressaltar, que apesar da lâmina d'água não ter sido observada pela fotointerpretação nos anos de 2013, 2017 e 2020, por meio dos trabalhos de campo foi identificado sua presença em algumas épocas (Figura 22).

Tais fatos, juntamente com a análise do mapa topográfico de 1978, notou-se que o uso e ocupação que se desenvolveu na área levou ao rebaixamento do lençol freático, diminuição da disponibilidade hídrica e desaparecimento dos dois canais de primeira ordem.

Figura 22. Área com lâmina d'água sob influência do gado.



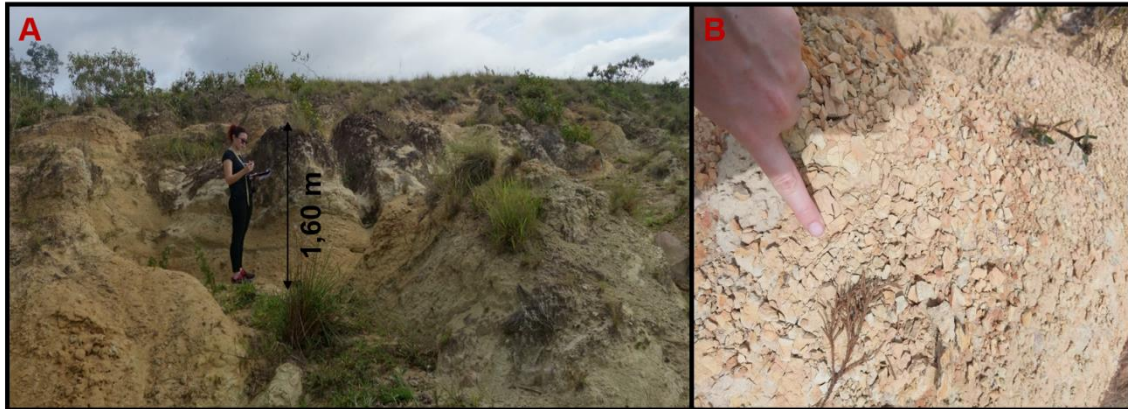
5.2. ASPECTOS GEOLÓGICO-GEOTÉCNICOS DA ÁREA DE ESTUDO

Para caracterizar a área estudada no quesito pedologia, utilizou-se o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo, escala 1:250.000, sendo esta uma escala de reconhecimento mais genérica, a qual não possui detalhamento suficiente para caracterizar corretamente a área de estudo. Por esse motivo, optou-se por substituir a classificação pedológica do Mapa Pedológico do Estado de São Paulo, por características identificadas nos trabalhos de campo. Sendo assim, o solo previamente classificado como Latossolo Vermelho, será chamado de solo saprolítico de características argilosas e coloração clara, enquanto que o solo previamente classificado como Argissolo Vermelho-amarelo, será chamado de solo pouco coeso de textura arenosa e coloração clara a alaranjada.

Conforme apresentado anteriormente, o substrato rochoso da área de estudo abrange duas unidades litoestratigráficas do Grupo Tubarão, sendo elas a Formação Tatuí e o Subgrupo Itararé. A Formação Tatuí, presente na parte superior da sub-bacia, descrita por apresentar siltitos arenosos e argilosos, se associa com um solo saprolítico de características argilosas e coloração clara. Nesta área, situada em relevo forte ondulado (20-45%), foram identificados sulcos e ravinas com grandes

comprimentos, sendo possível observar o fenômeno de empastilhamento decorrente da presença de argilas que sofreram contração (Figura 23).

Figura 23. a) ravinas associados ao solo saprolítico de características argilosas. b) destaque para o fenômeno de empastilhamento da argila.



O Subgrupo Itararé, presente em grande parte da sub-bacia, é caracterizado por apresentar arenitos finos e grosseiros, e se associa a um solo pouco coeso, com textura arenosa e coloração clara a alaranjada. Nesta área, situada em relevo predominantemente ondulado (8-20%), está presente a principal feição erosiva da área de estudo, que consiste em uma voçoroca de dimensões expressivas. A partir da Figura 24, é possível observar que na área de desenvolvimento da voçoroca, o solo apresenta características arenosas e de pouca coesão.

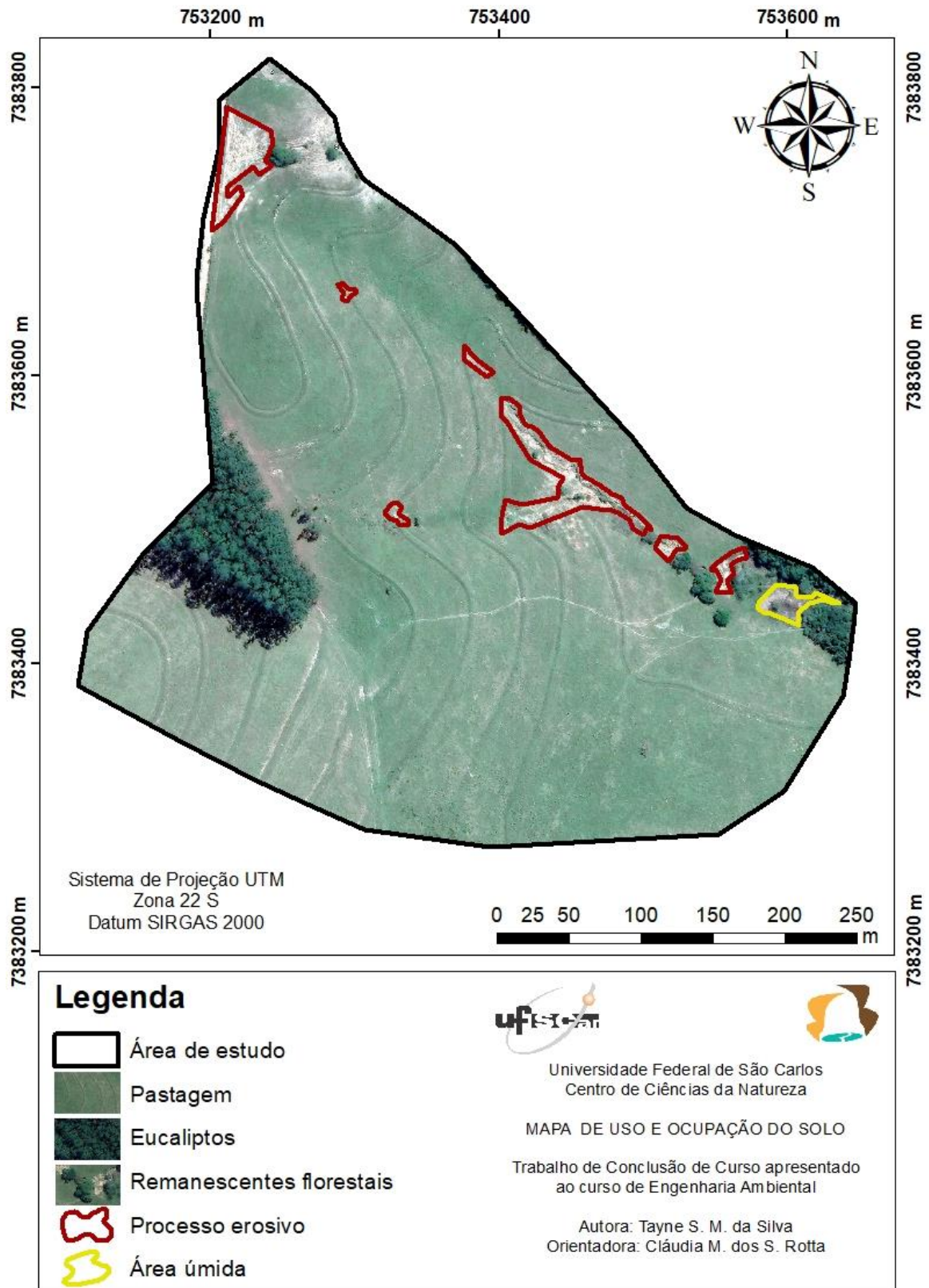
Figura 24. a) Destaque para uma das ramificações da voçoroca associada ao solo pouco coeso de textura arenosa b) Destaque para a textura arenosa.



5.3. USO E OCUPAÇÃO

O uso e ocupação da área de estudo consiste na criação de gado, sendo que a cobertura vegetal predominante é a pastagem. A pouca vegetação nativa ainda existente ocorre de forma concentra na região inferior da sub-bacia, não estando associada aos canais de drenagem e nem as áreas que apresentam declividade mais acentuada (Figura 25). Na parte superior da área de estudo há também um fragmento florestal composto por eucalipto, o qual tem sido utilizado pelo gado como área de descanso.

Figura 25. Mapa de uso e ocupação da área de estudo.



Associado ao uso de pastagem, existe a adoção de duas práticas de conservação do solo, sendo elas o terraceamento e a barreira de galhos (*brush burrier*), que compreendem métodos que necessitam de uma construção e manutenção adequada para que se alcance os objetivos esperados.

Nenhuma das feições erosivas existentes na sub-bacia possuem isolamento, estando disponível para livre acesso do gado, sendo possível observar a criação de caminhos preferenciais que facilitam o escoamento superficial (Figura 26). O mesmo ocorre na região inferior da área de estudo, onde a área úmida se encontra completamente pisoteada pelo gado.

Figura 26. Caminho preferencial do gado ao lado de uma feição erosiva.

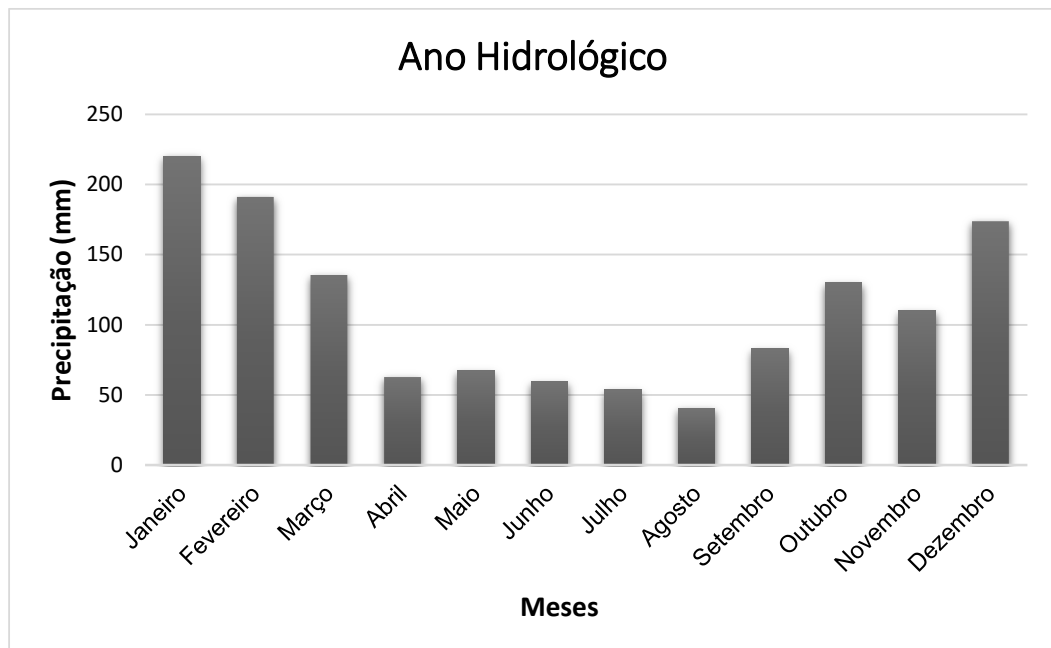


5.4. PLUVIOSIDADE

Os dados de precipitação foram obtidos a partir da série histórica (1943 a 2012) disponibilizada pela Agência Nacional de Águas (ANA), referente a estação pluviométrica localizada no município de Campina do Monte Alegre – SP, sendo esta a mais próxima da área de estudo.

A partir desses dados, foi gerado um gráfico correspondente ao ano hidrológico da sub-bacia estudada (Figura 27), sendo possível observar que os meses de outubro a março se caracterizam como período úmido, apresentando grandes volumes de chuva, enquanto que os meses de abril a setembro apresentam pluviosidade consideravelmente inferior aos demais meses, sendo então caracterizados como período de estiagem.

Figura 27. Gráfico correspondente ao ano hidrológico da área estudada.



A partir da Tabela 4, é possível analisar também a contribuição de cada mês no volume de chuva anual, se destacando janeiro e fevereiro com 17% e 14%, respectivamente, enquanto que os meses de junho, julho e agosto não chegam a 5% das chuvas anuais.

Tabela 4. Precipitações médias mensais e a porcentagem referente a cada mês.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Média (mm)	220,1	191,1	135,5	62,83	67,09	59,57	53,83	40,62	83,06	130,2	109,9	173,9	1327,7
%	17%	14%	10%	5%	5%	4%	4%	3%	6%	10%	8%	13%	100%

Dado o exposto, entende-se que os meses que apresentam maior pluviosidade são aqueles que possuem maior influência no surgimento de processos erosivos na sub-bacia em estudo, tendo em vista que o grande volume de chuva é capaz de

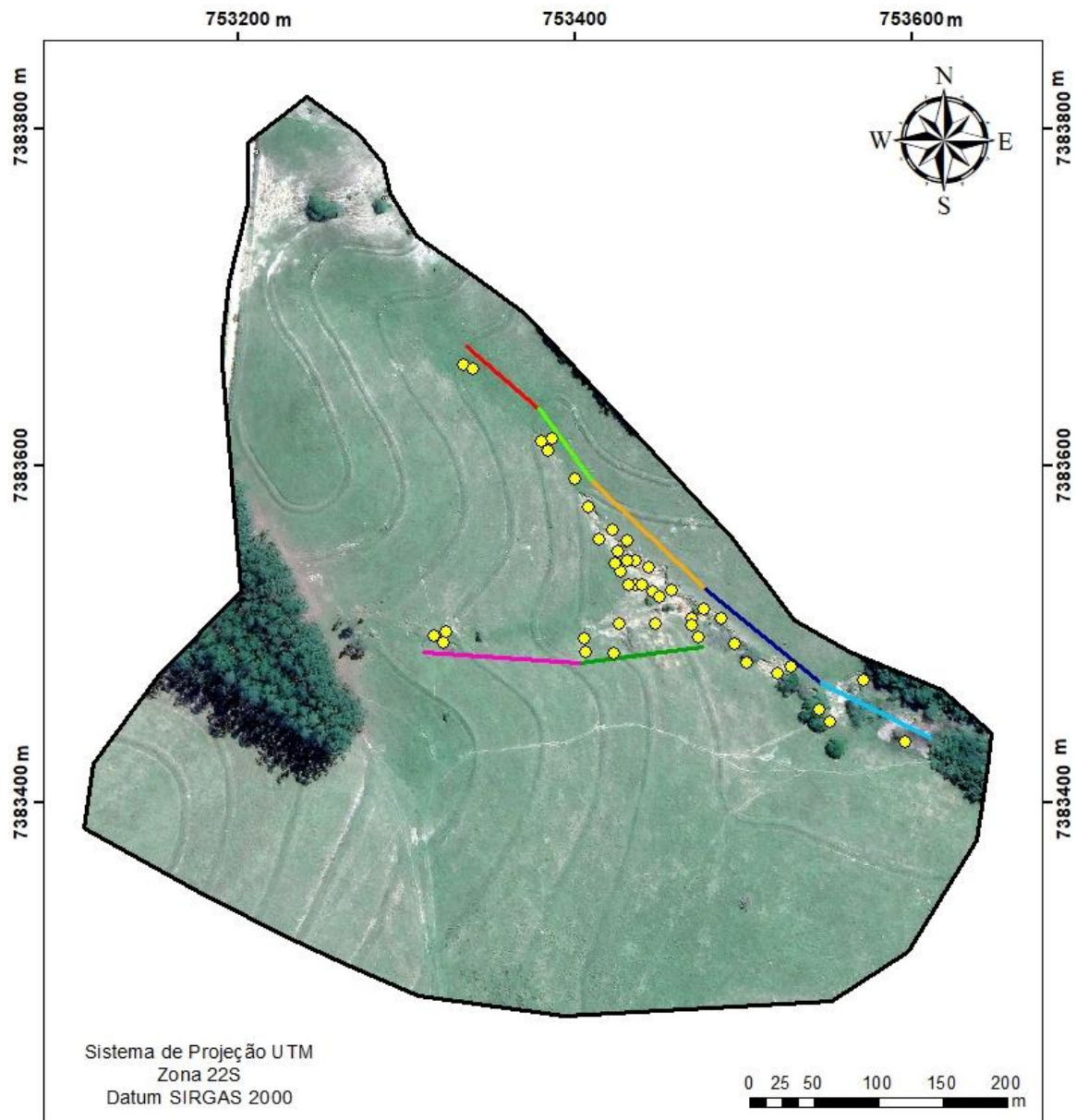
saturar o solo com mais rapidez, dando início ao escoamento superficial, o qual irá desagregar e transportar as partículas do solo.

Associadas a precipitação, a área de estudo apresenta inúmeras características que contribuem para o surgimento de erosões pluviais. O solo arenoso e de pouca coesão é desagregado e transportado com facilidade pela ação das gotas da chuva (*splash*) e pelo escoamento superficial. Este, por sua vez, é intensificado ao ganhar energia pela inclinação do relevo ondulado, e a falta de vegetação nativa deixa o solo desprotegido, não havendo barreiras que diminuam a velocidade do escoamento superficial. Além disso, o pisoteamento do gado gera a compactação do solo e a criação de caminhos preferenciais, diminuindo a porosidade e capacidade de infiltração do solo e aumentando o volume de escoamento superficial.

5.5. SETORIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS

Para facilitar o estudo das feições erosivas inseridas na área de estudo, optou-se pela definição de 7 trechos de análise (Figura 28). Tais trechos buscaram agrupar as feições erosivas, ou trechos das mesmas, em função de características similares. O posicionamento das estacas também considerou as particularidades de cada trecho, buscando monitorá-los adequadamente.

Figura 28. Identificação dos trechos de análise das feições erosivas e dos pontos de monitoramento.



Legenda

- Limite da área de estudo
- Estacas
- Trecho 1
- Trecho 5
- Trecho 2
- Trecho 6
- Trecho 3
- Trecho 7
- Trecho 4



Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciência da Natureza



ESTAQUEAMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Ambiental

Autora: Tayne S. M. da Silva
Orientadora: Cláudia M. dos S. Rotta

No **trecho 1**, notou-se o rompimento de um terraço, que iniciou um processo erosivo cuja profundidade varia de 40 a 80 cm (Figura 29a). Além disso, foi identificada a presença de vegetação nesse terraço rompido, possivelmente na tentativa de conter tal processo (Figura 29b).

Figura 29. a) Processo erosivo no trecho 1. b) Plantas no terraço rompido.



No **trecho 2**, estão presentes as estacas 1, 2, 3 e 6. Próximo as estacas 1, 2 e 3, notou-se mais uma erosão decorrente do rompimento de um terraço, apresentando profundidade entre 20 e 60 cm (Figura 30a). Já próximo a estaca 6, foi encontrada a cabeceira de um processo erosivo, cuja profundidade é de aproximadamente 20 cm (Figura 30b).

Figura 30. a) cabeceira próxima as estacas 1,2 e 3. b) erosão decorrente do rompimento de terraço.



No **trecho 3**, próximo à estaca 7, tem-se a cabeceira principal da voçoroca, que possui aproximadamente 1,5 metros de profundidade e 2 metros de largura (Figura 31a). Este trecho, apesar de não ser tão profundo, chega a ter cerca de 10 metros de largura. Foram colocadas também, estacas na parede da voçoroca, para acompanhar a evolução vertical da erosão, bem como no chão, para verificar o acúmulo de sedimentos erodidos (Figura 31b).

Figura 31. a) cabeceira principal da voçoroca e destaque para estaca na parede. b) estacas no chão da voçoroca.



O **trecho 4** é caracterizado por apresentar canal estreito e profundo, com largura menor que 1 metro e profundidade de aproximadamente 3 metros, e presença de árvores na borda e no interior da voçoroca. Nesta área, foi colocada pelo proprietário uma barreira de galhos na borda da voçoroca, ao lado esquerdo, com o intuito de diminuir a evolução da feição erosiva através da interceptação do escoamento superficial (Figura 32).

Figura 32. Trecho 4 com a presença de árvores e da barreira de galhos.



O **trecho 5**, apresenta maior umidade se comparado aos demais, possuindo partes com lâmina d'água visível em alguns períodos do ano. Foi possível observar manchas laranjas no solo, possivelmente devido a lixiviação do ferro. Essa área sofre bastante influência do gado, deixando o solo úmido revirado e pisoteado (Figura 33).

Figura 33. Trecho com lâmina d'água evidente, evidências de lixiviação de ferro do solo, e pisoteamento do gado.



O **trecho 6** apresenta duas ramificações paralelas, sendo que a maior possui aproximadamente 2 m de profundidade e 1,5 m de largura (Figura 34). Neste braço foram colocadas 4 estacas para monitorar a erosão que ocorre nas paredes internas. Nesta área o proprietário também optou por colocar uma barreira de galhos.

Figura 34. Trecho intermediário de uma das ramificações do trecho 6.



Já no **trecho 7**, próximo as estacas 41 e 42 houve o rompimento de um terraço, o que contribuiu para a evolução de um processo erosivo com profundidade máxima de 60 cm e largura de 2,5 m. Próximo a estaca 43, tem-se a cabeceira de outro processo erosivo com largura que varia de 1 a 2 m. Neste trecho também foram colocados galhos com a finalidade de controlar a erosão (Figura 35).

Figura 35. Barreira de galhos na feição erosiva do trecho 7.



5.6. MONITORAMENTO DA EVOLUÇÃO DOS PROCESSOS EROSIVOS

As estacas foram posicionadas em campo no dia 7 de dezembro de 2019 e, no dia 31 de janeiro de 2020, foi realizada a primeira medição, porém não foi detectado nenhum crescimento horizontal das feições erosivas. Já no dia 06 de julho de 2020, foi realizada uma segunda visita em campo, não sendo observada nenhuma evolução horizontal da voçoroca, porém notou-se a evolução vertical em alguns pontos, ou seja, o desprendimento de partículas do solo das paredes da feição erosiva, sobretudo nas cabeceiras dos trechos 3 e 6, além disso, foi identificado também o acúmulo de sedimentos em alguns trechos no fundo da voçoroca.

A Figura 36 apresenta tal fenômeno, na cabeceira do **trecho 3**, deixando visível as raízes da vegetação.

Figura 36. Evolução na cabeceira principal da voçoroca.



Ainda no **trecho 3**, associada a estaca 10, posicionada no fundo da voçoroca, observou-se o acúmulo de 3 cm de sedimento erodido, deixando exposta apenas 12 cm da estaca (Figura 37a). Já na estaca 12, também posicionada no fundo da voçoroca, foi identificado o escavamento de 2 cm no solo, deixando exposto 17 cm da estaca (Figura 37b).

Figura 37. a) estaca 10 associada ao acúmulo de sedimento. b) estaca 12 indicando erosão do solo em seu entorno.



No **trecho 4**, foi observado na estaca 30, cerca de 5,75 cm de acúmulo de sedimento erodido, estando exposta apenas 9,25 cm da estaca, além disso, notou-se também a evolução nas paredes da feição erosiva.

No **trecho 6**, na cabeceira de braço maior, foi identificado o desprendimento de partículas de solo na parede da voçoroca, deixando expostas as raízes da vegetação (Figura 38). Neste trecho, houve ainda o desprendimento de uma das estacas instaladas.

Figura 38. Evolução nas bordas da voçoroca no trecho 6.



A partir dos resultados obtidos com o monitoramento da voçoroca, foi possível verificar que a mesma se encontra ativa. Entretanto, seu crescimento não ocorre em função do destacamento de partículas de solo superficiais das áreas de borda, mas sim em decorrência da erosão das paredes das cabeceiras das ramificações.

O escoamento superficial ao atingir as cabeceiras, encontra os materiais geológicos dispostos em ângulos retos (ou próximos à isso), e inicia a erosão a cerca

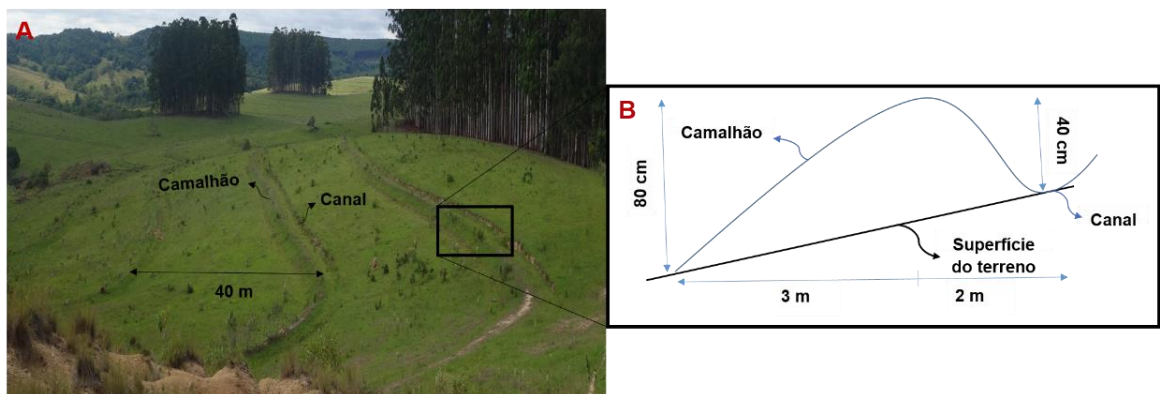
de 60 cm de profundidade, onde não há ação protetora das raízes das pastagens. Conforme o material vai sendo erodido neste trecho intermediário das paredes, cria-se uma situação de instabilidade para a camada superficial que, em dado momento, cede e desprende-se da cabeceira, causando então o aumento horizontal da feição.

Apesar as condições geológico-geotécnicas e ambientais da área de estudo favorecerem os processos erosivos, sobretudo após as modificações impostas pelo uso e ocupação, para que as feições erosivas aumentem suas dimensões é necessário que haja chuva suficiente. Em outras palavras, é necessário que chova quantidade e tempo suficientes para saturar a camada de solo superficial a ponto de a mesma perder resistência e não ser mais retida pelas raízes da pastagem, e para erodir as paredes das voçorocas, abaixo da ação das raízes.

5.7. MÉTODOS DE CONTROLE DE EROSÃO

Na área de estudo, conforme mencionado anteriormente, existem duas técnicas para controle de erosão, sendo estas o terraceamento e as barreiras de galhos (*brush barrier*). A primeira é composta por um canal e um camalhão, os quais tem como intuito interceptar a água e promover sua infiltração lenta no solo. A partir da Figura 39 é possível observar as dimensões e o espaçamento entre os terraços presentes na sub-bacia.

Figura 39. a) terraços da sub-bacia de estudo. b) esquema representativo das dimensões dos terraços da sub-bacia.



Como já citado previamente, o método de terraceamento deve ser construído seguindo inúmeros critérios, dentre eles, declividade, tipo de solo, taxa de infiltração de água, uso do solo, dentre outros. Entretanto, na área de estudo muitos terraços se romperam, desencadeando novas feições erosivas. Apesar de o monitoramento não ter verificado o crescimento de tais feições, foi possível compreender que o surgimento das mesmas se deu tanto em função das condições ideais de chuva, quando das características do relevo e dos terraços. Tais feições situam-se em pontos do terreno associados à concavidade dos canais de primeira ordem que já existiram na sub-bacia estudada. Isso, associado ao fato de o desenho dos terraços não acompanhar adequadamente a morfologia do terreno, levou a concentração do escoamento superficial ao invés de sua dispersão.

Já a barreira de galhos, que foi implantada na sub-bacia no ano de 2019, tem como objetivo barrar os sedimentos e o escoamento superficial. Entretanto, assim como o terraceamento, este método deve seguir alguns parâmetros para que consiga cumprir sua função. Como pode-se notar a partir da Figura 40, os galhos foram colocados de forma aleatória e com grande espaçamento entre eles, não sendo capazes de cumprir a função esperada, tendo em vista que os sedimentos e o escoamento superficial são capazes de passar com facilidade entre os espaços abertos na barreira de galhos. Além disso, é possível que as áreas abertas contribuam para a criação de caminhos preferenciais, fazendo com que o escoamento nestas áreas concentre maior volume de água e apresente maior velocidade.

Figura 40. a) Barreira de galhos aplicada em uma das ramificações da principal feição erosiva da sub-bacia. b) Detalhe das dimensões e condições da barreira de galhos.



6. CONCLUSÃO

Tendo em vista os aspectos observados, foi possível realizar a caracterização da área de estudo, associando seus aspectos ao desenvolvimento de processos erosivos. Grande parte das feições erosivas presentes na sub-bacia, em especial a voçoroca, está relacionada ao relevo ondulado (8 a 20%), sob geologia e pedologia com propriedades arenosas e de pouca coesão, em área de pastagem de gado. Em sua maioria, os processos erosivos ocorrem nas partes média e baixa da sub-bacia, associada as redes de drenagem, entretanto, na parte superior foram identificados sulcos e ravinas de extensões consideráveis.

A análise da evolução espacial e temporal dos processos erosivos a partir de imagens de satélite dos anos de 2011, 2013, 2017 e 2020, permitiu verificar que houveram mudanças significativas nas feições erosivas, especialmente se tratando do rompimento de terraços, os quais contribuíram para o surgimento de novas erosões. Entretanto, ao realizar o monitoramento a partir do estaqueamento, não foi possível verificar maiores detalhes quanto à evolução das erosões na sub-bacia, em razão do pequeno número de medições realizadas.

Foi possível observar pelo inventário de feições erosivas, que a quantidade de água existente na área próxima ao exultório da sub-bacia vem diminuindo ao longo dos anos, não sendo mais possível sua identificação por imagens de satélite desde o ano de 2011. De acordo com as informações apresentadas na carta topográfica, os canais de drenagem da sub-bacia eram efêmeros, ou seja, ocorriam apenas em período chuvosos, porém atualmente, em função da ausência de mata ciliar, do carreamento de partículas erodidas, e pisoteamento do gado, só há presença de água próximo ao exultório da sub-bacia, similar a uma nascente difusa, que poderá ser extinta caso não sejam tomadas as medidas de proteção necessárias.

Quanto as técnicas de controle de erosão, sendo elas o terraceamento e a barreira de galhos, foi verificado que a falta de planejamento compromete a eficiência dessas técnicas. Sendo assim, recomenda-se a consideração de parâmetros, como declividade, comprimento da encosta, propriedades e índices físicos do solo, cobertura vegetal e uso e manejo do solo, para definir os tipos de

técnicas conservacionistas que devem ser empregadas na área, bem como suas dimensões.

Apesar das deficiências identificadas nas técnicas de controle existentes na área de estudo, os processos erosivos estão evoluindo de forma lenta, porém, pode-se observar pelo inventário de feições erosivas, no período de 2011 a 2020, que mesmo havendo o terraceamento, as erosões evoluíram consideravelmente, portanto, acredita-se que caso o monitoramento fosse mantido por períodos mais longos, seria identificado um crescimento mais expressivo dessa erosão, associado a períodos chuvosos.

Por fim, recomenda-se que mais estudos sejam realizados nesta sub-bacia, objetivando não somente analisar a evolução dos processos erosivos, mas também indicar métodos de recuperação das áreas degradadas.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (ANA). **Práticas Mecânicas de Conservação de Água e Solo**. 2015. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/62/2/Unidade_1.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.

Alaska Department of Transportation and Public Facilities. Erosion and Sediment Control. In: **Alaska Highway Drainage Manual**. 2001. Disponível em: <http://www.dot.state.ak.us/stwddes/desbridge/pop_hwydrnman.shtml>. Acesso em: 17 fev. 2020.

ALMEIDA FILHO, G. S. Controle de erosão. **Fundações & Obras Geotécnicas**, v. 5, p. 66-77, 2015.

ALMEIDA FILHO, G.S. **Diagnóstico de processos erosivos lineares associados a eventos pluviosos no município de Bauru, SP**. Dissertação (Mestrado). FEC – UNICAMP, Campinas, 2000, 222p.

AYRES, Q.C. **Soil Erosion and its Control**. 1.ed. New York, London: McGraw-Hill, 1936.

BARBOSA, R.S. **Diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica do Riacho Açaizal em Senador La Rocque/MA**. 2010. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 303f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livroceres, 1985.

BOWEN, N.L. **The Evolution of the Igneous Rocks**. England: Oxford University Press, 1928.

BRASIL, J. et al. “Voçoroca”: Estudo de Caso de Monitoramento e Análise de Solo em São Desidério – BA. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 8., 2010, Recife. **Proceedings...** Recife, 2010.

BRYAN, R.B. Processes and significance of rill development. **Catena**, v.8, p.1-15, 1987.

CANTALICE, J.R.B. **Escoamento e erosão em sulcos e em entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 2002. 141f. Tese de Doutorado, Universidade Federal Rural do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

CAREY, B.W. et al. Gully erosion and its control. In:_____. **Soil conservation guidelines for Queensland**. Brisbane: Department of Science, Information Technology and Innovation, 2015. cap. 13, 80 p.

COUTO, B.O.C. **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. 2015. 125f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

EL-SWAIFY, S.A.; DANGLER, E.W.; ARMSTRONG, C.L. **Soil erosion by water in the tropics**. College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, 1982, 173 p.

ELWELL, H.A.; STOCKING, M.A. Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhosedia. **Geoderma**, v.15, p. 61-70, 1976.

FENDRICH, R. Erosão Urbana. In: FENDRICH, R. et al. **Drenagem e controle da erosão urbana**. 4.ed. Curitiba: Champagnat, 1997. 481p.

FERNANDES, J. A. **Estudo da erodibilidade de solos e rochas de uma voçoroca em São Valentim, RS**. 2011. 129f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

FERREIRA, A.O. et al. Influência da declividade e de níveis de cobertura do solo no processo de erosão com chuva simulada. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.5, n.5, p.182-190, 2010.

FIGUEIREDO, D.C.; VAJAPAYAM, S. **A influência do lençol freáticos e de fendas de tração na erosão em ravinas**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, ABRH, v. 2, p. 450-459, 1989.

Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. **Status of the World's Soil Resources**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2021.

FRANCISCO, A.B. A erosão de solos no extremo oeste paulista e seus impactos no campo e na cidade. **Revista GEOMAE**, v.2, n.2, p.57-68, 2011.

FRENZEL, A. **Medidas preventivas contra os processos erosivos**. In: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE). Simpósio sobre o controle de erosão. Curitiba, 1980, p.201-213.

FULLEN, M.A.; CATT, J.A. **Soil management: problems and solutions**. Oxford: Oxford University Press, 2004, 269p.

GHIMIRE, S.K.; HIGAKI, D.; BHATTARAI, T.P. **Estimation of Soil Erosion Rates and Eroded Sediment in a Degraded Catchment of the Siwalik Hills, Nepal.** Land, v. 2, p. 370-391, 2013.

GRAY, D. H., SOTIR, R. B. **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control.** John Wiley & Sons, Inc., 1995. 378p. LEAL, P.C.B.; John Wiley & Sons, Inc., 1995. 378 p.

GROSH, J.L.; JARRETT, A.R. Interrill erosion and runoff on very steep slopes. **Transactions of the ASAE**, v.37, n.4, p.1127-1133, 1994.

GUERRA, A.J.T. Processos erosivos em encostas. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** 3.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. cap. 4, p.149-209.

GUERRA, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. **Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações.** 2.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002. p.139-155.

GUERRA, A.J.T.; BOTELHO, R.G.M. Características e propriedades dos solo relevantes para os estudos pedológicos e análise dos processos erosivos. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 19, p. 93-114, 1996.

GUERRA, A.T.J. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA B.S. **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** 13 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015. p. 149-210.

HODGES, R.D.; ARDEN-CLARKE, C. Soil erosion in Britain: levels of soil damage and their relationship to farming practices. **The Soil Association**, 45 p., 1986.

HUANG, C.; BRADFORD, J.M.; CUSHMAN, J.H. A numerical study of raindrop impact phenomena: the rigid case. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, p.14-19, 1982.

IDE, D.M. **Investigação geotécnica e estudo de um processo erosivos causa por ocupação urbana.** 2009. 143f. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

INFANTI JÚNIOR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de dinâmica superficial. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia.** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, cap. 16, p. 271-281, 1998.

IWASA, O.Y.; PRANDINI, F.L. Diagnóstico da origem e evolução das boçorocas: condições fundamentais para a prevenção e correção. In: Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 1980, Curitiba. **Anais...**Curitiba, 1980.

KAISER, E.A.; DAL OSTO J.V.; FACCO, D.S. Influência da ação antrópica sobre processos erosivos e solapamento de margens no bairro Nova Santa Marta e vila Bela Vista, Santa Maria – RS. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada,

17, 2017, Campinas. **Anais...** Campinas: Instituto de Geociências – Unicamp, 2017.

KELLER, G., SHERAR, J. Erosion Control. In: **Low-volume roads engineering: best management practices, field guide**. US Agency for International Development, 2003, p.129-140.

KÖPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra**. México: Fondo de Cultura Economica, 1948, 478 p.

LAL, R. **Soil erosion in the tropics: principles and management**. McGraw-Hill, New York, 1990, 580p.

LATTANZI, A.R.; MEYER, L.D.; BAUMGARDNER, M.F. Influences of mulch rate and slope steepness on interrill erosion. **Soil Science Society of America**, v. 38, n. 6, p. 946-950, 1974.

LEAL, P.C.B.; RODRIGUES, S.C. Uso e comparação do método de estaqueamento, o método DGPS e geoprocessamento no monitoramento de uma área erosiva na fazenda do Glória – Uberlândia, MG. **GEOUSP – Espaço e Tempo**, n. 29, p. 18-35, 2011.

LEPSCH, L.F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2011.

LOUREIRO, H.A.S.; GUERRA, A.J.T. **Monitoramento de voçorocas: adaptações metodológicas no uso de estacas e pinos de erosão**. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 9, 2012, Rio de Janeiro, Anais..., 2012.

MACHADO, P.L.O.A.; WADT, P.G. **Boas práticas agrícolas: Terraceamento**. Acre: Embrapa, 2017. 9 p.

MAGALHÃES, R.C. et al. Monitoramento e caracterização de duas voçorocas no bairro Vila Buriti, Manaus (AM). **Revista Geonorte**, v. 1, n. 6, p. 84-100, 2012.

MANZATTO, C.V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J.R.R. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 174 p.

MATHIAS, D.T.; CUNHA, C.M.L.; CARVALHO, P.F. Avaliação de técnicas de monitoramento de processos erosivos acelerados em área peri-urbana – São Paulo. In: SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA, 6., 2010, Coimbra. **Proceedings...** Coimbra: Universidade de Coimbra, 2010.

MORAES, M.V.A. **Monitoramento e avaliação de processos erosivos marginais em reservatórios de usinas hidrelétricas por meio de varredura a laser**. 2016. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da FCT/UNESP de Presidente Prudente, Presidente Prudente, 2016.

MORGAN, R.P.C. **Soil Erosion and Conservation**. 3.ed. United Kingdom: Blackwell Publishing, 2005.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**. Inglaterra: Longman Group: 1986.

NACINOVIC, M. G. G. **Avaliação de erosão hídrica superficial em parcelas experimentais**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, 2013.

NUSHIYAMA, L. **Procedimentos de mapeamento geotécnico como base para análise e avaliações ambientais do meio físico em escala 1:100.000 aplicação no município de Uberlândia – MG**. 1998. Tese (Doutorado), São Carlos, 1998.

OLIVEIRA, F.F.; SANTOS, R.E.S.; ARAUJO, R.C. Processos erosivos: dinâmica, agentes causadores e fatores condicionantes. **Rev. Bras. De Iniciação Científica**, v. 5, n. 3, p. 60-83, 2018.

PINESSE JÚNIOR, J.F., CRUZ, L.M., RODRIGUES, S.C. Monitoramento de erosão laminar em diferentes usos da terra, Uberlândia – MG. **Sociedade & Natureza**, n. 20, p. 157-175, 2008.

PIRES, F. R.; SOUZA, C. M. **Práticas mecânicas de conservação do solo e da água**. 2 ed. Viçosa. 2006. 216p.

PRUSKY, F. F. **Conservação de solo e água: Práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. Viçosa. Ed. UFV. 2009. 279p

QUEENSLAND GOVERNMENT. **Types of erosion**. 2013. Disponível em: <<https://www.qld.gov.au/environment/land/management/soil/erosion/types>>. Acesso em: 25 mai. 2021.

RODRIGUES, J.E. **Estudo de fenômenos erosivos acelerados: boçorocas**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982.

ROTTA, C.M.S. **Estudo da recuperação de áreas degradadas por processos erosivos: procedimento e eficiência dos métodos**. 2012. 180f. Tese (Mestrado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

ROTTA, C.M.S.; ZUQUETTE, L.V. Processos erosivos. In: ZUQUETTE, L.V. **Geotecnia Ambiental**. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. cap. 5, p. 113-152.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Betrand Brasil, cap. 7, 1999. p. 229-267.

SALOMÃO, F.X.T.; IWASA, O.Y. Erosão e ocupação rural e urbana. In: Bitar, O.Y. **Curso de Geologia aplicada ao meio ambiente**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1995. p. 31-57.

SANTORO, J. Erosão Continental. In: TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. 3 ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015. 196 p.

SANTORO, J. **Fenômenos erosivos acelerados na região de São Pedro – SP. Estudo da fenomenologia com ênfase geotécnica**. 1991. 140f. Dissertação de Mestrado, IGCE – UNESP, Rio Claro, 1991.

SANTOS, C.A.G. et al. Influência do tipo da cobertura vegetal sobre a erosão no semi-árido paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.1, p. 92-96, 2000.

SELBY, M.J. Erosion of Hillslope by Raindrops and Flowing Water. In: **Hillslope materials and processes**. New York, Oxford University Press, p. 219-248, 1993.

SELBY, M.J. Hillslope sediment transport and depositional. In: PYE, K. **Sediment transport and depositional processes**. Oxford, Osney Mead, 1994, 397 p.

SILVA, A.M. **Caracterização dos fatores naturais e antrópicos responsáveis pelo desencadeamento de feições erosivas na cabeceira do córrego Campo Alegre**. 2007. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

SLIMANE, A.B. et al. Combining field monitoring and aerial imagery to evaluate the role of gully erosion in Mediterranean catchment (Tunisia). **Catena**, n. 170, p. 73-83, 2018.

TARTARI, D.A. et al. Perda de solo e água por erosão hídrica em Argissolo sob diferentes densidades de cobertura vegetal. **Rev. Bras. de Agroecologia**, v.7, n.3, p. 85-93, 2012.

THOMAS, D.B. **The effects of gully plugs and contour furrows on erosion and sedimentation in Cisco Basin, Utah**. 1975. 60f. Tese (Mestrado) – Utah State University, Utah, 1975.

TOY, T.J.; FOSTER, G.R.; RENARD, K.G. **Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement, and Control**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Sediment and Erosion Control: An Inventory of Current Practices**. 1st. ed. Washington: ERIC Clearinghouse, 1990.

URBAN DRAINAGE AND FLOOD CONTROL DISTRICT. **Urban Storm Drainage: Criteria Manual Volume 3 – Best Management Practices**. Denver: Urban Drainage And Flood Control District, 2010.

VERDUM, R.; VIEIRA, C.L.; CANEPPELE, J.C.G. **Métodos e técnicas para controle da erosão e conservação do solo**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016.

VIANA, J.D. et al. Monitoramento dos processos erosivos por voçorocamento no município de São José de Ribamar, Ilha do Maranhão (MA). **Revista Geonorte**, edição especial 4, v.10, n.1, p.188-192, 2014.

VIRGINIA DEPARTMENT OF CONSERVATION & RECREATION. **Virginia Erosion and Sediment Control Handbook**. 3rd. ed. 1992. Disponível em: <<https://www.deq.virginia.gov/Programs/Water/StormwaterManagement/Publications/ESCHandbook.aspx>>. Acesso em: 17 fev. 2021.

WEILL, M.A.M.; PIRES NETO, A.G. Erosão e assoreamento. In: SANTO, R.F. **Vulnerabilidade Ambiental: Desastres Naturais ou Induzidos?**. Brasília: MMA, 2007.

WILD, A. **Soils and the environment: an introduction**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993, 287 p.

WISCHMEIER, W.H.; MANNERING, J.V. Relation of soil properties to its erodibility. **Proceedings Soil Science Society of America**, v. 33, p. 133-137, 1969.

ZACHAR, D. **Soil Erosion - Developments in Soil Science**. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.