BOCA
BOLETIM DE CONJUNTURA

ELABORAÇÃO DO ESTUDO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

PREPARATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT STUDY

PREPARACIÓN DEL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

https://doi.org/10.56238/bocav25n82-018

Data de submissão: 29/08/2026 **Data de publicação:** 29/09/2026

Jefferson João Pereira da Silva
Graduando em Agronomia
Instituição: Faculdade de Tecnologia Paulista
E-mail: joaojefferson820@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho que será apresentado tem por finalidade a caracterização da área afetada, identificar os principais fatores naturais e antrópicos relacionados à evolução de um processo erosivo do tipo voçoroca, localizado no município de Lupércio, Estado de São Paulo. A voçoroca apresenta aproximadamente 300 metros de comprimento, 25 metros de largura e 15 metros de profundidade, ocupando uma área degradada de aproximadamente 7.500 m^2. Para o levantamento de campo foram realizadas análises de caráter físico e químico do solo, levantamento de dados pluviométricos ao longo da série histórica e estimativas hidráulicas aplicadas ao escoamento superficial. A estimativa realizada mostra uma perda média de aproximadamente 165.375 toneladas de solo ao decorrer de 18 anos, resultante de um intenso processo de desprendimento e transporte de partículas pelo escoamento superficial. Diante dos impactos, são propostas medidas de controle, estabilização geotécnica, práticas conservacionistas do solo e monitoramento da área.

Palavras-chave: Erosão do Solo. Voçoroca. Impacto Ambiental. Escoamento Superficial. Perda de Solo.

ABSTRACT

This paper aims to characterize the affected area and identify the main natural and anthropogenic factors related to the evolution of a gully erosion process located in the municipality of Lupércio, São Paulo State. The gully is approximately 300 meters long, 25 meters wide, and 15 meters deep, occupying a degraded area of approximately 7,500 m². Field surveys included physical and chemical soil analyses, historical rainfall data collection, and hydraulic estimates applied to surface runoff. The estimate shows an average loss of approximately 165,375 tons of soil over 18 years, resulting from an intense process of detachment and transport of particles by surface runoff. Given the impacts, control measures, geotechnical stabilization, soil conservation practices, and area monitoring are proposed.

Keywords: Soil Erosion. Gully. Environmental Impact. Surface Runoff. Soil Loss.

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo caracterizar el área afectada e identificar los principales factores naturales y antropogénicos relacionados con la evolución de un proceso de erosión en cárcavas ubicado en el municipio de Lupércio, estado de São Paulo. La cárcava tiene aproximadamente 300 metros de largo, 25 metros de ancho y 15 metros de profundidad, ocupando un área degradada de aproximadamente 7500 m². Los estudios de campo incluyeron análisis físico-químicos del suelo, recopilación de datos históricos de precipitación y estimaciones hidráulicas aplicadas a la escorrentía superficial. La estimación muestra una pérdida promedio de aproximadamente 165 375 toneladas de suelo en 18 años, como resultado de un intenso proceso de desprendimiento y transporte de partículas por la escorrentía superficial. Dados los impactos, se proponen medidas de control, estabilización geotécnica, prácticas de conservación del suelo y monitoreo del área.

Palabras clave: Erosión del Suelo. Cárcava. Impacto Ambiental. Escorrentía Superficial. Pérdida de Suelo.

1 INTRODUÇÃO

O trabalho tem por finalidade apresentar os resultados obtidos pelo diagnóstico ambiental referente ao processo erosivo do tipo voçoroca - termo originado do tupi (ibi-çoroc), que significa "terra rasgada" – sendo protagonista em uma das formas mais severas de degradação avançada dos solos e um dos principais modeladores do relevo terrestre, sendo responsável pelo desgaste, transporte e deposição de sedimentos.

Com os efeitos ocasionados com a Revolução Industrial, no século XVIII, houve uma crescente migração do campo para a cidade, alterando o cenário de uso e ocupação dos solos, atrelado a isso, com o crescimento industrial e o aumento populacional, houve uma grande expansão da fronteira agrícola. Segundo relatórios feitos por Out Word in Data (2019), entre os anos de 1750 a 2010, a área estimada para atividades agrícolas saltou de 6,2 milhões de Km^2 para 16,4 milhões de Km^2, demonstrando um aumento de 164%. Em países subdesenvolvidos como o Brasil, onde a agricultura representa 25% do Produto Interno Bruto (PIB), o mal dimensionamento e ocupações irregulares de terra constitui um dos maiores índices de degradação dos solos e movimentos de massa. "Dos 177 milhões de hectares de pastagens no Brasil, o que representa cerca de 62% (109,7 milhões de hectares) apresentam algum nível de degradação, sendo que 34,5 milhões de hectares são classificados como degradação severa, apresentando solo exposto e baixa capacidade de renovação de biomassa." (Map Biomas, 2023, coleção 8). Conforme a FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura (2019), processos erosivos são responsáveis por retirar entre 25 a 40 bilhões de toneladas de solo fértil do planeta. Segundo dados disponibilizados pelo Relatório UNDRR (Soul Atlas 2024), aproximadamente 30% estão moderadamente ou em alto nível de degradação, em relação aos países do continente africano, esses índices somam um total de 40% e estão em regiões de extrema pobreza e insegurança alimentar.

No município de Lupércio, Estado de São Paulo, observa-se um processo erosivo do tipo voçoroca em estágio avançado, cuja principal causa está relacionada à deficiência do sistema de drenagem urbana presente no município. O atual Plano Diretor de Drenagem Urbana, elaborado no ano de 2008, encontra-se desatualizado frente às mudanças ocorridas no uso e ocupação do solo e ao aumento dos índices pluviométricos registrados nos últimos anos, fatores esses que contribuíram para o agravamento da erosão.

Além das deficiências de drenagem, os elevados índices de precipitação registrados na região favorecem o agravamento do processo com o impacto das gotas dessa chuva - splash - e o escoamento superficial da água. O processo erosivo já apresenta grandes dimensões, com aproximadamente 7.500m^2

de área degradada e cerca de 15 metros de profundidade, bem como a exposição do lençol freático, situação que potencializa o transporte de sedimentos e amplia os impactos.

Os impactos decorrentes desse processo incluem alterações no relevo, perda de solo, assoreamento de corpos hídricos, degradação da vegetação nativa na área, riscos de à qualidade de recursos hídricos subterrâneos devido ao uso de agroquímicos na região e potencial risco à infraestrutura urbana nas proximidades da área. Efeitos que demonstram a necessidade da adoção de medidas mitigadoras e preventivas na área afetada.

2 INFORMAÇÕES GERAIS

O material que será apresentado ao longo deste trabalho tem como objetivo mostrar pesquisas realizadas ao longo de 5 anos relacionadas ao processo erosivo do tipo voçoroca. Fenômeno que ocorre com a ação de agentes exógenos como a água da chuva, que causa o desgaste, fragmentação e transporte de sedimentos, sendo um dos principais agentes modeladores do relevo.

O estudo foi idealizado e desenvolvido pelo estudante de Eng. Agrícola da Faculdade de Tecnologia Paulista, Jefferson João P. Silva, motivado pela premissa de que a curiosidade é a primeira condição para a construção do conhecimento. Buscando por meio desse estudo a propagação do conhecimento e da ciência, movido pelo apreço pelo meio ambiente.

Reitero que o presente estudo foi elaborado exclusivamente sob a ótica acadêmica, técnica e científica, sendo fundamentado em revisões bibliográficas, leitura de dados, observações e metodologias reconhecidas na literatura. Ressalto que as conclusões e recomendações apresentadas afastam qualquer caráter ideológico, partidário ou político, nem têm por finalidade promover posicionamento dessa natureza. O único objetivo desse trabalho é contribuir para a compreensão dos processos ambientais identificados fornecer orientações técnicas para a análise, o planejamento e a tomada de decisões relacionadas à gestão e à recuperação da área em questão.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver estudos referentes a erosão localizada no município de Lupércio-SP, identificando suas reais causas, avaliando os danos ambientais decorrentes de sua evolução e propondo medidas mitigadoras e ações de recuperação ambiental que contribuem para a conservação ambiental da área afetada.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizam a área de estudo com seus aspectos físicos e ambientais.
- Identificar os fatores naturais e antrópicos responsáveis pela formação e evolução da erosão.
- Fazer a leitura dos índices pluviométricos da região e sua influência sobre o progresso erosivo.
- Avaliar a perda de solo resultante da erosão e seus efeitos sobre a estabilidade do terreno.
- Identificar os impactos decorrentes da erosão, incluindo mudança no relevo, assoreamento de cursos d'água, degradação da vegetação e riscos à qualidade dos recursos hídricos.
- Avaliar riscos ambientais e socioeconômicos decorrentes do progresso do processo erosivo.
- Subsidiar possíveis ações de planejamento e recuperação de recursos ambientais no município.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada foi realizada por meio da integração de dados climatológicos e por análises laboratoriais de amostragem de solo, empregando procedimentos de nível técnico consolidados e metodologias cientificas.

Pela inexistência de uma unidade meteorológica no município de Lupércio, optou-se por usar uma estação de referência regional, sendo essa localizada na cidade de Marília, uma distância média aproximada a área de estudo de 33,8 km. Os dados pluviométricos foram obtidos mediante análises da série histórica de precipitação, abrangendo os períodos de 2004 a 2023. Devido a distância que se dá foram considerados critérios de proximidade geográfica, condições parecidas quanto às características fisiográficas, de relevo, altitude e condições climáticas.

Após a obtenção dos dados, foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos à análise estatística descritiva, o qual foram inseridos cálculos das médias mensais de precipitação, dos totais anuais e da variabilidade interanual de chuvas ao decorrer da série histórica.

Foram coletados em pontos pré-determinados amostras deformadas e indeformadas de solo na área de estudo, os parâmetros a serem avaliados foram suas características físicas, físico-hídricas, granulométricas e seus aspectos químicos relacionados à estabilidade do solo.

No laboratório, as amostras foram expostas ao ar seco, ao destorroamento, a homogeneização e peneiramento em malha ABNT de 2 mm para obtenção da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), sendo utilizada nas determinações analíticas.Para determinar seus parâmetros de suscetibilidade ao desprendimento e ao transporte foram usados métodos de dispersão química, seguida pela sedimentação, permitindo assim avaliar os teores de areia, silte e argila na porção solo, estabelecendo assim sua base de textura do solo.

Foram ainda analisados a densidade do solo, sua porosidade total – macro e micro – sua capacidade de campo e estabilidade de agregados.

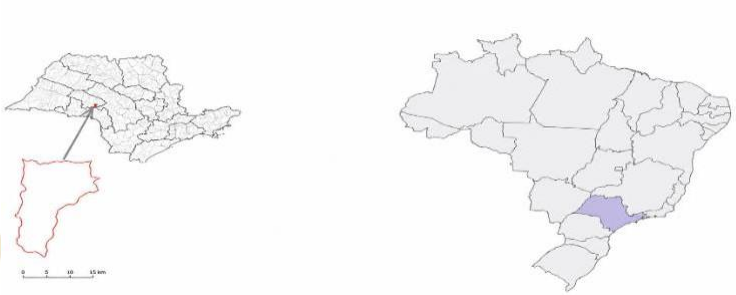
Quando a sua caracterização química, ficou restringida aos atributos com influência direta na base estrutural do solo, sendo avaliada critérios como pH, compostos químicos, acidez potencial (H + Al), soma de bases (SB), (CTC) E (V%), de acordo com metodologias recomendadas na literatura. Para realizar estimativas próximas de perda de solo pela atividade de escoamento concentrado em canal e seu potencial erosivo foi feito uma adaptação do modelo matemático proposto por Foster e Lane (1983), tendo como base avaliações prévias observadas em campo das características hidráulicas e da resistência do solo ao cisalhamento. O modelo original apresenta parâmetros adimensionais obtidos por meio dos ábacos (X_c , R e W) e a profundidade da camada não erodida (d_{ne}), variáveis não disponíveis por limitações técnicas. Na presente adaptação foram mantidas as equações hidráulicas propostas no modelo original.

A vazão média de escoamento superficial foi estimada pelo Método Racional, resultando em Q = 0,602 m^3/s. Para se chegar aos valores referentes a área molhada, velocidade média de escoamento, raio hidráulico e a tensão média resultando do cisalhamento foram usados o coeficiente de rugosidade de Manning, o qual é igual a n=0,035 com declividade média do canal estimada em S=0,142, com largura do canal de escoamento de b=1,40 metros e profundidade da lâmina de água de y=0,22 centímetros.

A resistência do solo ao cisalhamento foi representada pela tensão crítica (c), com o valor de 0,27 kg/dm^3, com a equivalência obtida de 1470 kg/m^3. Referente às estimativas de perda de solo foram consideradas as dimensões médias da voçoroca correspondentes a 300 metros de comprimento, 25 metros de largura e 15 metros de profundidade média, além do tempo estimado de evolução de 18 anos.

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Figura 1 – Área de Estudo



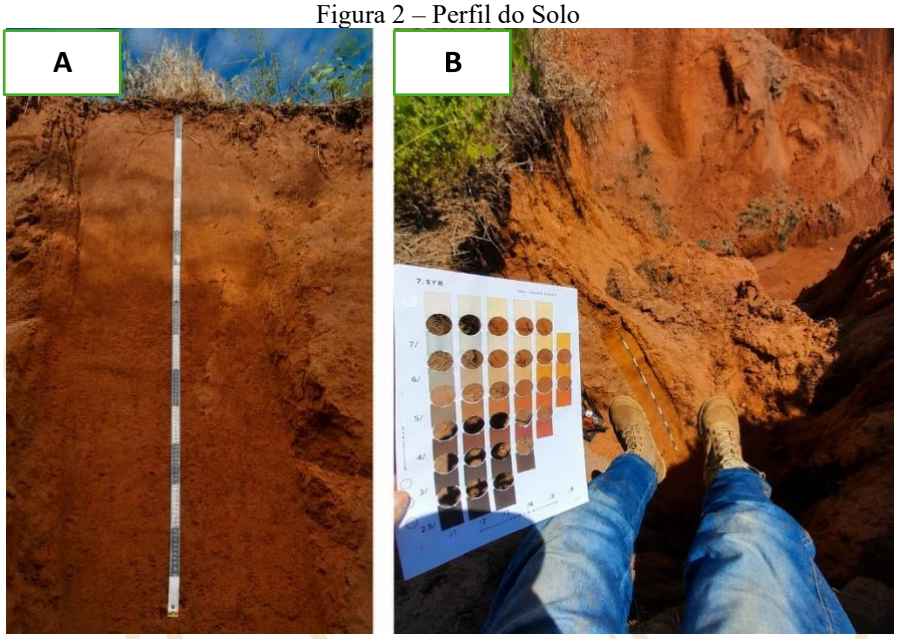
Fonte: O autor (2024).

A área de estudo está situada no município de Lupércio, na região centro-oeste do Estado de São Paulo. A área da propriedade onde a erosão está inserida possui aproximadamente 24 hectares, com coordenadas geográficas de 22º 25’ 01,12” S de latitude e 49° 48’ 48,65” W de longitude.

Quanto à sua característica geomorfológica, o relevo é predominantemente suave ondulado, característica que tem grande influência na dinâmica do escoamento superficial, predominando ARGISSOLOS VERMELHO AMARELO Eutróficos – PVAe - com textura arenosa a média e LATOSSOLO VERMELHO AMARELO Distrófico – LVAd - de textura média Os regimes climáticos apresentam duas estações bem definidas, de acordo com a classificação climática de Köppen a região se encaixa no tipo Cfa, característica com o clima subtropical úmido, sem estação seca definida, apresentando uma precipitação média anual de 1.281,8mm.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Figura 2 – Perfil do Solo



Fonte: O autor (2026).

Conforme observado na figura 4a, o perfil analisado apresenta cerca de 150 cm de profundidade, conforme observado na fotografia, foi utilizado uma régua para a medição do perfil. Na figura 4b foi usado a Carta de Munsell para analise visual do solo, o qual apresenta uma coloração predominantemente avermelhada a vermelho-amarelo, com homogenia em boa parte do perfil observado. A carta utilizada em campo indica a avaliação da cor da faixa de 5,0YR , característica de materiais com forte expressão de coloração avermelhada. Por meio na analise física granulométrica, determinou-se a textura média aproximada de 65,2% de areia, 11,3 % de silte e 23,5 % de argila. A predominância da fração areia confere ao solo uma condição relativamente favorável à infiltração de água, mas também pode aumentar sua suscetibilidade a processos de desprendimento e transporte de sedimentos.

Outro aspecto obtido na análise que deve ser levado em consideração quando relacionado a processos erosivos é a condutividade hidráulica do solo, do resultado em questão apresenta aproximadamente 68,8 $mm\,h^{-1}$. O valor obtido indica uma capacidade considerável de condução de água através do solo. O solo localizado na área de estudo é descoberto, favorecendo o início do processo – splash – que é o desgaste inicial do solo, saudado pelo impacto das gotas da chuva; outro aspecto está relacionado a sua intensa compactação, desfavorecendo a infiltração de água, o qual resulta na formação de poças – ponds -, após a água acumulada ceder a capacidade do solo de reter a água e inicia o escoamento

superficial por lençol e depois por fluxos lineares, responsáveis pelo arrasto de partículas.

A análise da estabilidade dos agregados apresenta diâmetro médio ponderado de 3,92mm, diâmetro médio geométrico de 1,98 mm e índice de estabilidade de agregados de aproximadamente 50,2%. Os resultados indicam a importância da manutenção vegetal e do aporte de matéria orgânica para uma melhor resistência.

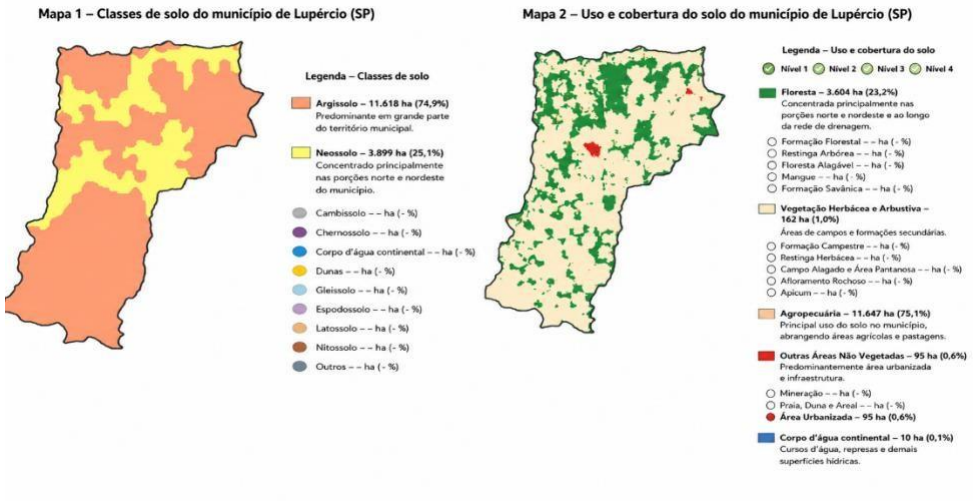
Figura 3 – Análise Física.



Fonte: O autor (2025).

5.2 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Figura 5 – Uso e Ocupação do Solo



Fonte: Map Biomas Brasil.

Após a leitura e interpretação na imagem acima do uso e ocupação do solo do município de

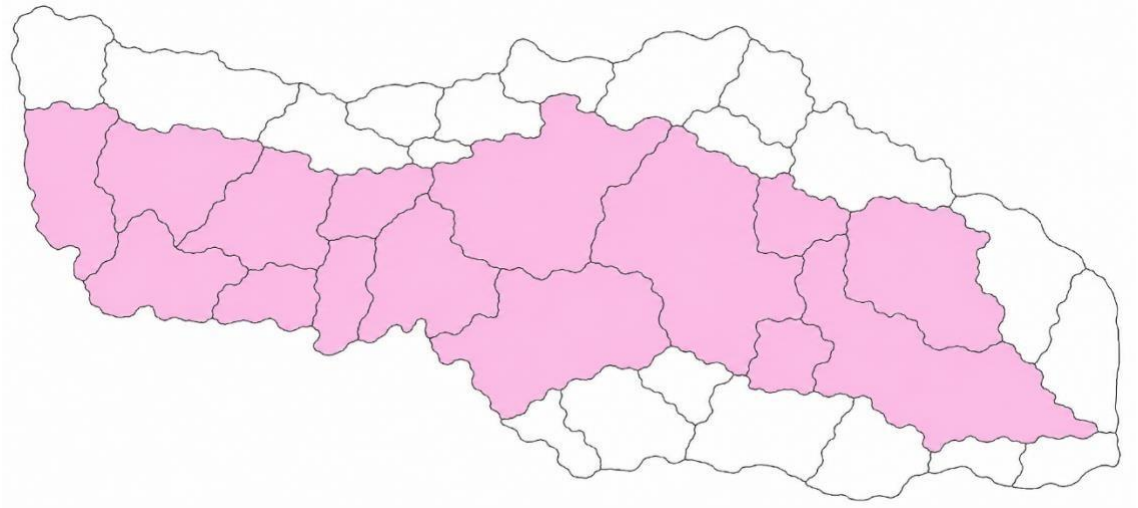
Lupércio, é possível notar o predomínio de atividades agrícolas, com área equivalente a 11. 647 hectares, correspondentes a 75,1 % da área do município, caracterizando uma paisagem predominantemente rural. A cobertura florestal abrange uma área de 3.604 hectares, representando 23,2 % da área municipal. As áreas vegetais herbáceas e arbustivas ocupam uma área de 162 hectares (1%), enquanto áreas não vegetativas, constituindo principalmente pelo perímetro urbano, totalizam 95 hectares (0,6%). Os corpos d'água correspondem a apenas 10 hectares (0,1%).

Em relação às suas características pedológicas, há predomínio da textura Média argilosa, ocupando uma área de 8.306 hectares (53,6%), textura argilosa com 4.742 hectares (30,6%), em relação a sua textura Média arenosa há 2.111 hectares(13,6%), Média siltosa 319 hectares (2,1%), Muito argilosa 16 hectares (0,1%) e Areia média de 16 hectares (0,1%). Em suma, o município mostra-se como uma paisagem dominada por atividades primárias, com fragmentos de vegetação nativa distribuídos em sua maioria afastados de atividades agrícolas. Essa característica reforça a importância do uso de práticas conservacionistas do solo e para a preservação e manutenção da vegetação remanescente.

5.3 BACIA HIDROGRÁFICA

O município de Lupércio está inserido na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema (UGRHI 17). Em razão da localidade, a gestão dos recursos hídricos é vinculada ao Comitê da Bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema (CBH-MP).

Figura 6 - Delimitação da bacia hidrográfica do Médio Paranapanema.



Fonte: O autor (2024).

5.4 CARACTERIZAÇÃO DOS IMÓVEIS RURAIS CONFRONTANTES

A área de estudo abrange dois imóveis rurais confrontantes, ambos afetados pelo processo erosivo em diferentes níveis de intensidade de degradação em decorrência da posição topográfica e da dinâmica desempenhada pelo escoamento superficial. A erosão concentra-se de modo contínuo na propriedade e n° 01, atingindo a propriedade de n° 02, sendo assim há o compartilhando dos danos.O Imóvel Rural n° 01, registrado no Cadastro Ambiental Rural (CAR) sob o registro de n° SP-3527801-23A1E9CF8CAB4185B1D40B514F01AE1C, possui 24 hectares, módulo fiscal de 1,78, localizado sob as coordenadas do centróide Latitude 22°25'01,48"S e Longitude 49°48'44,85"O. Encontra-se neste imóvel a área de origem do processo erosivo, sendo possível observar a erosão em processo ativo de atividade. Trata-se da propriedade com os maiores impactos ambientais observados, concentrando os maiores índices de perda de solo, instabilidade geotécnica, exposição do lençol freático em alguns pontos, desmoronamento de encostas e contínua expansão lateral da erosão. Com o aprofundamento do canal o processo erosivo trabalha ativamente no desprendimento, transporte e deposição de sedimentos em direção às áreas a jusante.

Tabela 1 – Demonstrativo CAR Área 01

Demonstrativo da Situação das Informações Declaradas no CAR		
---	Data da Inscrição: 12/12/2025	Data da Última Retificação: 12/12/2025
Situação do Cadastro: Ativo		

Fonte: Autores.

Tabela 2 – Cobertura do Solo Área 01

Cobertura do Solo	
Descrição	Área (ha)
Área de Remanescente de Vegetação Nativa	3,04
Área Rural Consolidada	21,81
Área de Servidão Administrativa	0,00

Fonte: Autores.

O Imóvel n° 02, registrado no Cadastro Ambiental Rural (CAR) sob o registro de n° SP-3527801-43A5606D9B044118B3816CB1B8DF920D, possui uma área de 16,87 hectares, módulo fiscal de 1,20 e apresenta como coordenadas do centróide Latitude 22°24'44,11"S e Longitude 49°48'46,05"O.

Tabela 3 – Demonstrativo CAR Área 02

Demonstrativo da Situação das Informações Declaradas no CAR		
----------	Data da Inscrição: 15/08/2019	Data da Última Retificação: 18/08/2024
Situação do Cadastro: Ativo		

Fonte: Autores.

Tabela 4- Cobertura do Solo Área 02

Cobertura do Solo	
Descrição	Área (ha)
Área de Remanescente de Vegetação Nativa	0,00
Área Rural Consolidada	16,87
Área de Servidão Administrativa	0,00

Fonte: Autores.

Embora à área citada não corresponda ao local de origem da erosão, a propriedade foi atingida pelo impacto ambiental decorrente do transporte de sedimentos provenientes do Imóvel Rural de n° 01. Sendo possível observar a perda de solo resultante do escoamento superficial, extensas áreas de deposição sedimentar e processo de assoreamento do curso d'água existente na propriedade. Com resultado do acúmulo de sedimentos observa-se a redução significativa na profundidade do leito, ameaça a capacidade hidráulica do rio, mudança no curso de escoamento do leito e degradação dos habitats e da vegetação ciliar.

Figura 7 – Localização dos Imóveis Rurais Inseridos na Área de Influência da Erosão



Fonte: Car.Gov.br

A Figura 3 apresenta a delimitação dos imóveis rurais confrontantes, identificados como Imóvel 01 e Imóvel 02, sobrepondo à imagem de satélite. É possível observar que ambos são pertencentes na mesma microbacia hidrográfica, sendo interceptadas pelo processo erosivo.3

Figura 8 – Área de Abrangência do Processo Erosivo por Voçoroca.



Fonte: Car.Gov.br

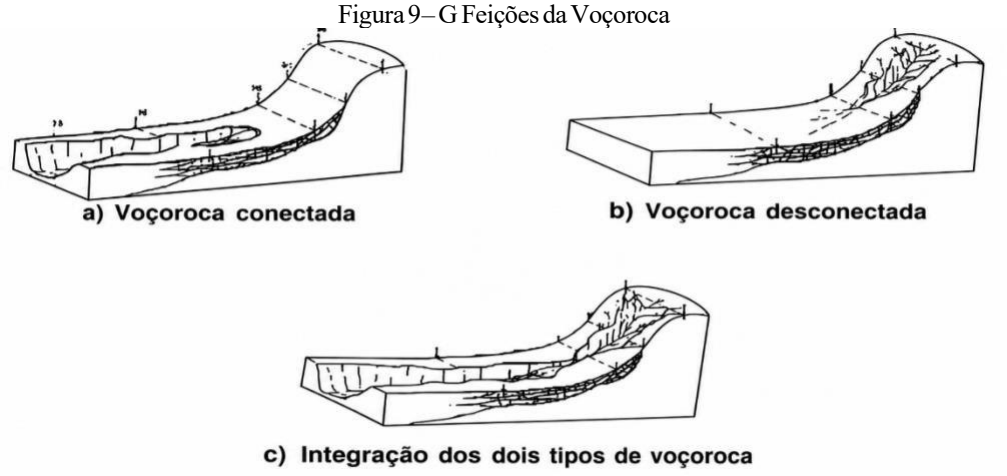
A Figura 4 apresenta a área afetada pelo processo de erosão, sendo destacada pelo círculo vermelho. A imagem evidência que o processo erosivo tem origem no Imóvel n° 01, onde se concentra os maiores impactos ambientais.

5.5 CARACTERIZAÇÃO DA VOÇOROCA

Levantamentos de campo e com o apoio de sistemas de informação geográfica foram possíveis estimar dimensões próximas de 300 metros de comprimento de comprimento, 25 metros de largura e 15 metros de profundidade, resultando em uma área aproximada de 7.500 m^2. Em alguns trechos observa-se a exposição do lençol freático, condição que mantém o fluxo hídrico dentro do canal da erosão, favorecendo a continuidade dos processos erosivos mesmo em períodos com menor precipitação, favorecendo sua expansão lateral e longitudinal. Seus aspectos geomorfológicos apresentam diferentes feições erosivas associadas, incluindo locais afetados por erosão em lençol, sulcos, ravinas, bifurcações e canais escavados pela erosão linear concentrada.

Quanto à sua feição, é do tipo conectada, segundo a classificação apresentada por Oliveira (1989), descrição que se dá por sua feição estar direcionada a um curso d'água, a qual a conecta com a rede hidrográfica local.

Figura 9– G Feições da Voçoroca



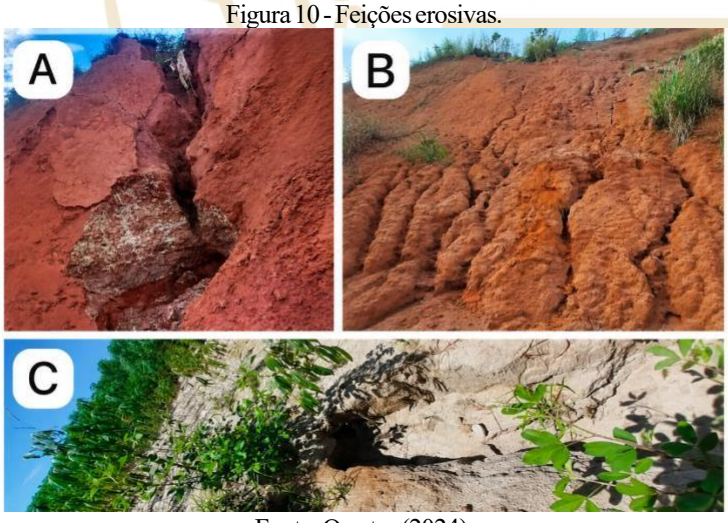
Fonte: Oliveira (1989).

Tabela 9 - Classificação por (m^3)

Por Ordem	Volume erodido (m^3)	Tamanho
01	**Até GGG**	**Muito pequeno**
02	**De 1.000 – G.GGG**	**Pequeno**
03	**Entre 10.000 – 1G.GGG**	**Médio**
03	**Entre 20.000 – 40.000**	**Grande**
05	**+ de 40.000**	**Muito Grande**

Fonte: Vieira e Albuquerque, 2004.

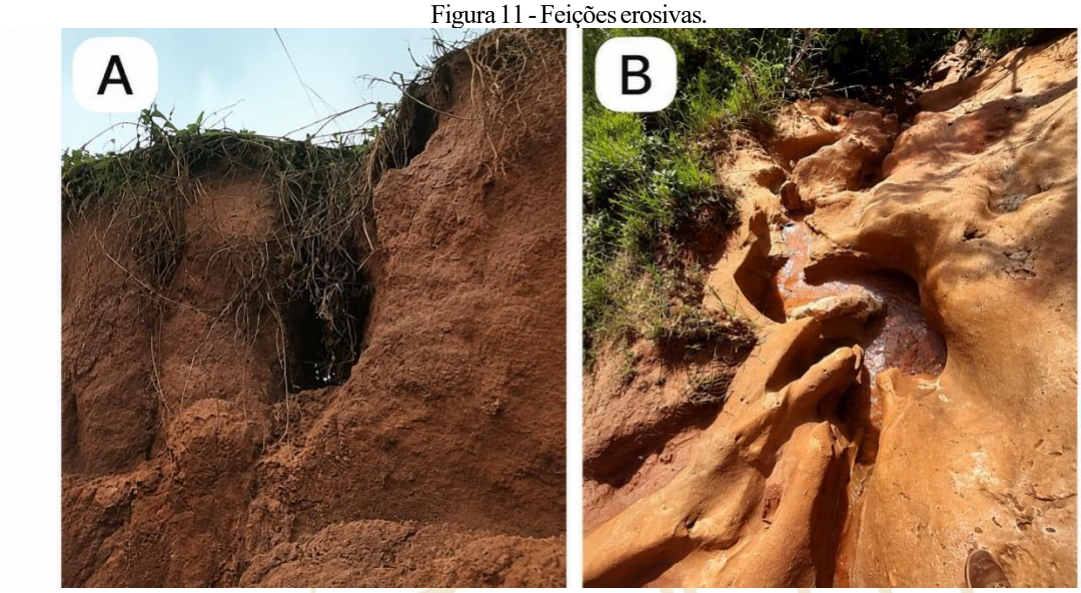
Figura 10 - Feições erosivas.



Fonte: O autor (2024).

A Figura 10 a mostra o efeito cachoeira, decorrente da existência de uma descontinuidade topográfica no interior da voçoroca. Figura 10b mostra os sulcos profundos em talude da voçoroca, caracterizado por seu severo processo de lixiviação e desagregação mecânica do solo e a Figura 10c mostra uma feição de alcova de regressão, característico pelo solapamento do solo provocando pelo escoamento linear.

Figura 11 - Feições erosivas.



Fonte: O autor (2024).

As imagens acima mostram as diferentes manifestações da dinâmica erosiva na área de estudo. A Figura 11a mostra uma alcova de regressão na cabeceira da voçoroca, sendo resultante da saturação do solo pela ação da água. A Figura 11b evidência o escoamento superficial concentrado, esculpindo o sulco erosivo meandratório, responsável pelos sulcos orientados perpendicularmente.

Figura 12 - Escoamento superficial e transporte de sedimentos.



Fonte: O autor (2024).

As imagens acima ilustram as condições de escoamento observadas em campo. A Figura 12 a mostra o escoamento superficial concentrado, com elevada carga de sedimentos em suspensão,

demonstrando intensa mobilidade de partículas e elevada potencial de transporte de sedimentos. Figura 12b apresenta a medição da profundidade do fluxo no interior da voçoroca, com 23 cm de lâmina d'água e sedimentos, mostrando sua elevada capacidade de escoamento em transporte de sedimentos e intensificar a erosão do canal. A Figura 12c mostra o escoamento superficial concentrado no interior da voçoroca, promovendo simultaneamente processos de transporte e deposição de sedimentos, uma feição característica de processo erosivo hidrologicamente ativo.

5.6 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E PLUVIOMÉTRICA

Para a caracterização pluviométrica da área de estudo foram obtidos dados de precipitação referentes ao período de 2004 a 2023, obtidos na estação pluviométrica situada no município de Marília, sendo utilizada como referência devido sua proximidade.

Figura 13 – Gráfico de médias anuais de Marília.

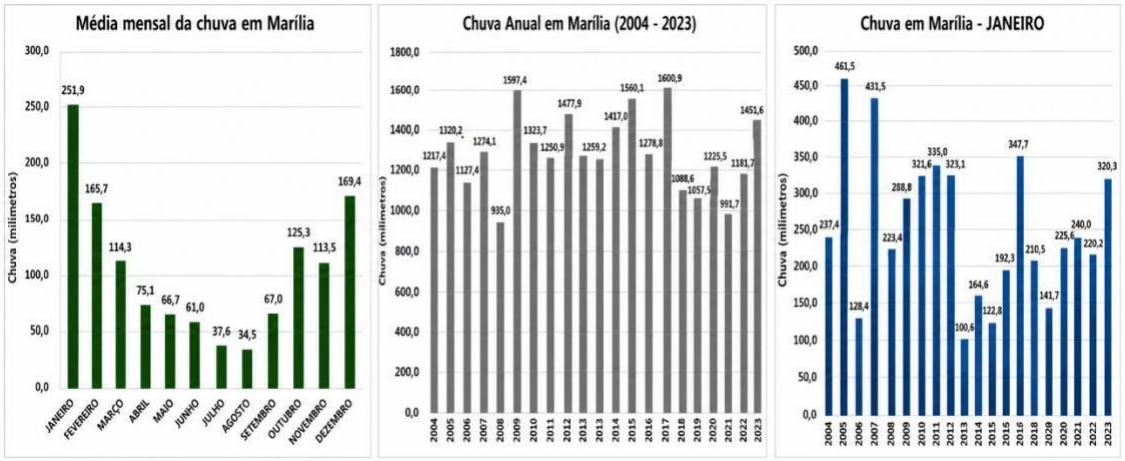


Gráfico 1. Média da chuva mensal em Marília obtida do período entre 2004 e 2023.

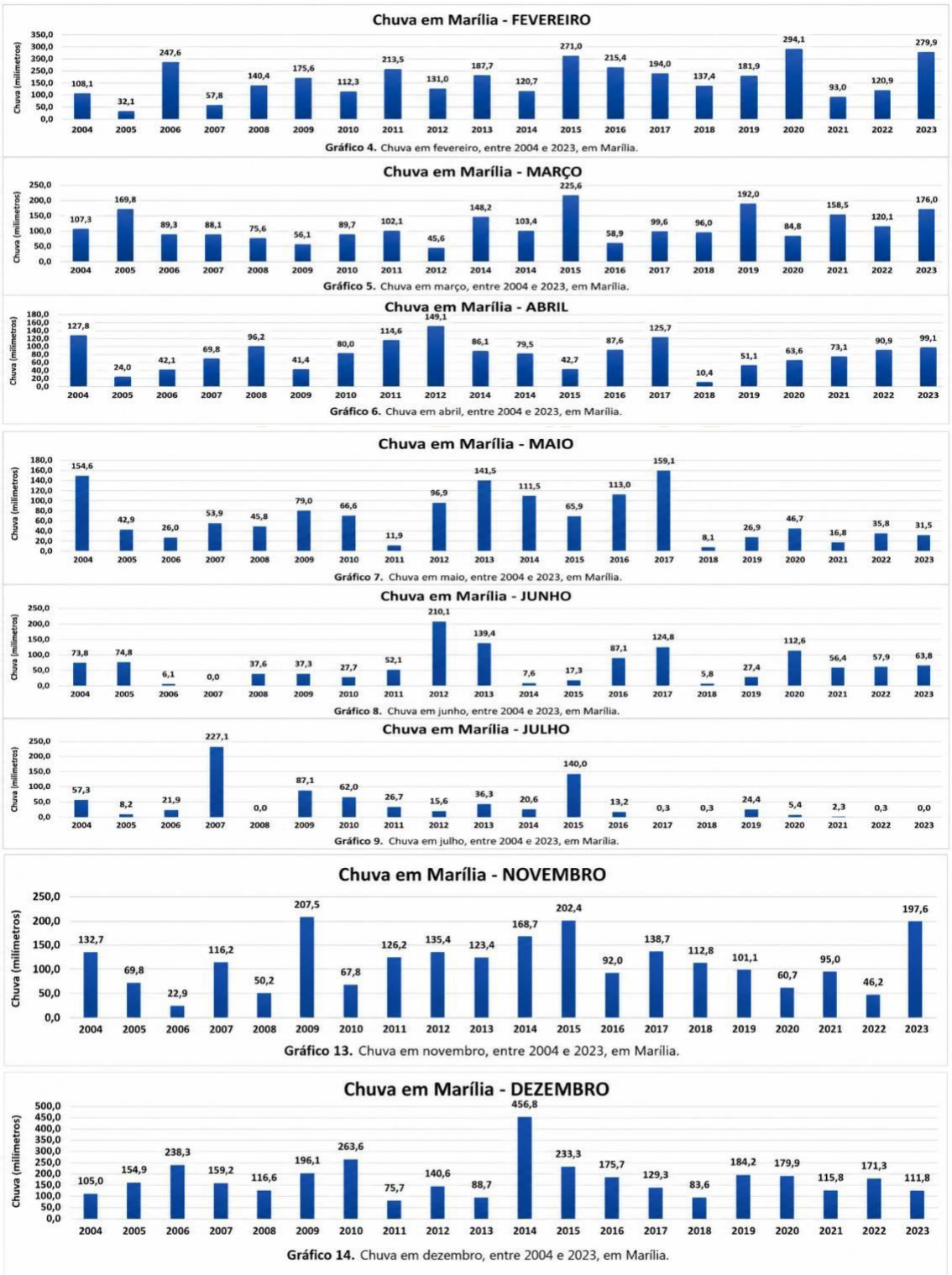
Gráfico 2. Chuva anual, entre 2004 e 2023, em Marília.

Gráfico 3. Chuva em janeiro, entre 2004 e 2023, em Marília.

Fonte: O autor (2024).

A análise tem como objetivo facilitar a identificação de períodos com maiores e menores disponibilidades hídricas ao longo da série histórica. Os resultados obtidos mostram os totais anuais e sua variabilidade interanual, com acúmulos anuais próximos de 1.281,8 mm, com grande sazonalidade.

Figura 14 - Gráfico de médias anuais de Marília.



Fonte: O autor (2024).

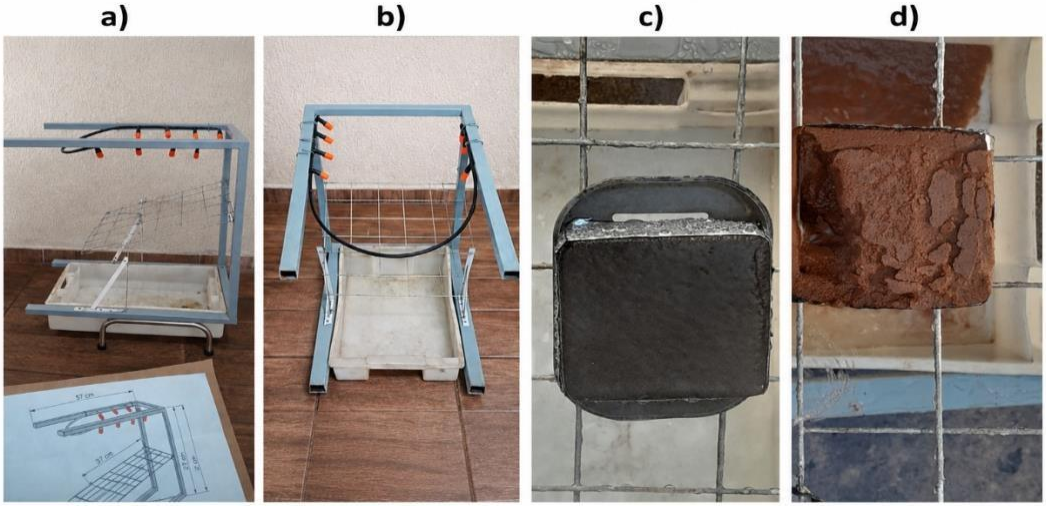
É possível observar pelos registros tabelados que o clima presente na região de estudo se caracteriza pelo inverno seco (Aw), com duas estações bem definidas, com estação chuvosa com maiores concentrações nos meses de janeiro, com médias de 165,7mm, outubro com 125,3mm, março com 114,3mm e o mês de novembro com médias de 113,5mm. Os menores índices se concentram nos meses de maio a agosto, com destaque para julho com 27,6mm e agosto com 34,5mm. Além da sazonalidade, observa-se uma alternância interanual, com totais anuais variando de 935,0 mm a 1.600,9 mm no período analisado. Importante destacar que períodos com maiores volumes de chuvas tendem a intensificação os efeitos splash e aumento do escoamento superficial e dos processos erosivos.

Vale ressaltar que, as oscilações apresentadas em relatório se devem pelas diferentes condições atmosféricas impostas sobre a região, a exemplo a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), frentes frias e fenômenos de variabilidade em larga escala, como El Niño e La Niña. Essa variabilidade interfere diretamente na intensidade do escoamento superficial e na suscetibilidade à processos erosivos.

6 ENSAIO DE INDERBITZEN APLICADO AO ESTUDO DE ERODIBILIDADE DO SOLO

O ensaio de Inderbitzen foi adotado no presente trabalho como ferramenta experimental para avaliar a suscetibilidade do solo à processos erosivos. Vale ressaltar que, o ensaio em questão não tem como finalidade reproduzir diretamente uma erosão linear, uma vez que as variáveis geomorfológicas e hidráulicas – In Situ – são muito complexas. No entanto, o ensaio permite avaliar a progressão do processo erosivo em estágios iniciais.

Figura 4 - Ensaio de Inderbitzen



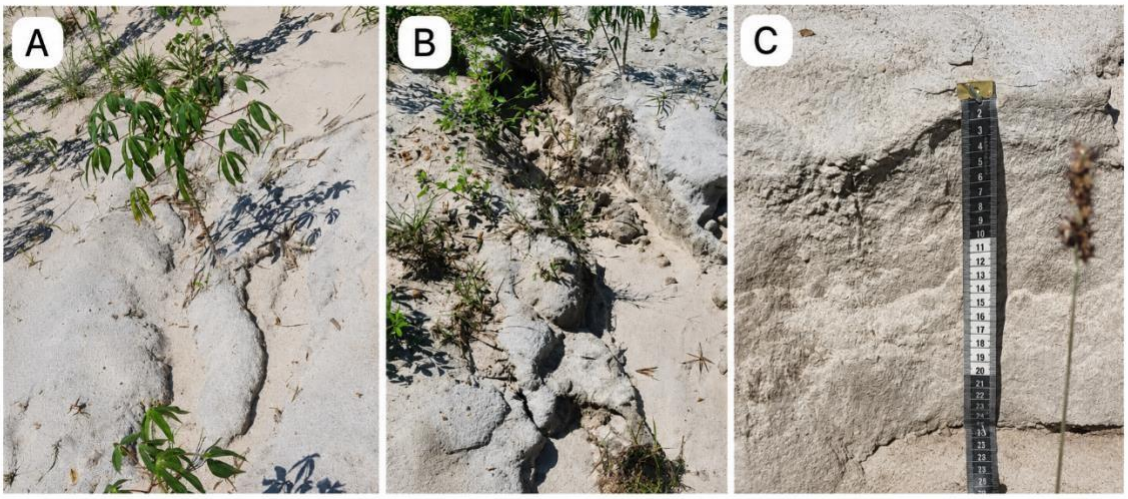
Fonte: O autor (2026).

É possível observar a Figura 4c demostra o início do escoamento superficial – runoff – ocorrendo quando a água supera a capacidade de infiltração do solo, em seguida inicia-se o segundo estágio. Na figura 4d mostra parte do corpo de prova visivelmente arrastado pela ação das águas.

7 IMPACTOS AMBIENTAIS IDENTIFICADOS

Tendo como base o diagnóstico ambiental realizado na área de estudo, verificou-se que processo erosivo acumulou perda estimada de 165.375 toneladas de solo ao longo de 18 anos, o qual caracteriza um quadro elevado de degradação ambiental.

Figura 15 – Feições Erosivas de Sulcos



Fonte: O autor (2024).

A análise das feições erosivas obtidas em campo permitiu compreender o progresso da erosão, corroborando os resultados obtidos pelas estimativas de perda de solo. É possível observar por meio da Figura 15 os estágios iniciais da erosão linear. Na Figura 10a há a presença de pequenos canais escavados no solo arenoso, fator que pode indicar a atividade de intenso escoamento superficial nas camadas mais baixas do terreno. Na figura 15b esses caminhos se tornam gradualmente mais profundos e definidos, mostrando a intensificação do transporte de sedimentos e o aumento da capacidade erosiva das enxurradas. A Figura 15c apresenta os sulcos em um estágio evolutivo mais avançado, o qual é possível observar, por meio de uma trena, que as incisões já mostram dimensões maiores, característica que confirmam, que na ausência de medidas de controle, os sulcos tendem a evoluir para ravinas e, posteriormente, para o último e muitas vezes irreversível estágio de erosão, conhecido como voçoroca.

Figura 16– Feições Erosivas de Ravinamento



Fonte: O autor (2024).

É possível observar a Figura 16a formação de ravinas na porção mais baixa do terreno. A Figura 16a mostra a formação de micro ravinas – (micro rills) bem definidas, embora pequenas, com enorme potencial evolutivo de transição ao voçorocamento. Na Figura 16b, observa-se o desenvolvimento de uma bifurcação em formato de "U", por pontos de ruptura, comumente associado a alta energia destrutiva gerado pelas águas, associada ao escoamento concentrado de sedimentos.

O sedimento erodido é continuamente transportado para as porções mais baixas da paisagem, conhecidas como áreas de deposição de sedimentos, favorecendo o assoreamento dos cursos d ' água localizados a jusante da área degradada.

Como consequência, ocorre a redução da capacidade dos corpos hídricos, aumentando a turbidez da água, a alteração da dinâmica hidráulica e degradação da vida aquática.

Figura 17 – Processo de sedimentação.



Fonte: O autor (2024).

Observa-se pela Figura 17 o processo de sedimentação, gerado pelo fluxo linear (sheetflow). A Figura 17a mostra uma cova escavada de sedimentação, resultante do fluxo linear e pela ação da gravidade, sendo possível observar uma espessa camada de material sedimentar arenoso. Na Figura 17b mostra o mapeamento dessa camada sedimentar por meio de uma trincheira de aproximadamente 50 cm de profundidade, onde foi instalado uma trena métrica sobre a seção transversal da abertura. O registro de campo constitui um importante indicador da intensidade erosiva na área.

Outro impacto possível - passível de análise - é em relação à exposição do lençol freático de corrente pelo afundamento da voçoroca. Com o avanço da erosão e o transporte de sedimentos para áreas baixas, ocorre a aproximação e, em alguns trechos, a exposição direta da água subterrânea, aumentando significativamente a vulnerabilidade do aquífero à contaminação pelo uso de fertilizantes, herbicidas, pesticidas e demais insumos utilizados em larga escala em atividades agrícolas. O atual cenário apresenta risco potencial à qualidade das águas subterrâneas e superficiais pertencentes à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema.

A degradação da cobertura vegetal e a constante movimentação do solo ameaçam a perda de habitats naturais, reduzindo áreas de alimentação, abrigo e reprodução da fauna silvestre e dificultando a regeneração da vegetação nativa Os impactos ambientais também apresentam grandes reflexos socioambientais, com a remoção acumulada de solo, representa perda irreversível de áreas potencialmente agricultáveis, redução da produtividade rural na área, aumento dos custos de recuperação

ambiental e a necessidade de elevados investimentos em obras de drenagem, estabilidade de encostas e recuperação ambiental.

8 MEDIDAS MITIGADORAS E PLANO DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL

A fim de se adotar medidas e planos de recuperação ambiental torna-se necessário a adoção de medidas integradas destinadas ao controle do processo erosivo em curso e evitar com que novas áreas sejam afetadas, necessitando de estabilização geotécnica, recuperação da drenagem superficial e restauração do habitat natural afetado pela degradação.

Inicialmente, recomenda-se o isolamento do perímetro onde a erosão está inserida por meio de cercamento e sinalização, restringindo o acesso da população, animais e máquinas pesadas às áreas de maior instabilidade, a fim de evitar riscos de acidentes e intensificação do processo erosivo. Como medida estrutural, necessita-se na implantação de dispositivos hidráulicos com o objetivo de controlar a velocidade do escoamento superficial, o qual inclui canaletas revestidas, dissipadores de energia, caixas de retenção, bacias de infiltração e estruturas a fim de amortecer as vazões de água, permitindo maior infiltração de água no solo e reduzindo significativamente a energia gerada pelas enxurradas.

Para controlar a velocidade do escoamento superficial a fim de evitar o aprofundamento do solo e novas aberturas, é necessário a implantação de dispositivos hidráulicos, os quais incluem canaletas com alta aderência dissipadores de energia das águas, caixas de retenção, bacias de infiltração e estruturas a fim de amortecer as vazões de água. Reduzindo a energia destrutiva das águas e facilitando a infiltração da mesma no solo.

Medidas a fim de estabilização geotécnica das paredes da voçoroca devem ser realizadas, sendo elas a mais essencial o terraceamento de nível, a fim de diminuir a energia gerada por escoamentos laterais no talude, instalação vertical de paliçadas no interior da voçoroca e instalação de mantas geotêxtil e demais técnicas de bioengenharia, compatível com o terreno.

Levando em consideração a elevada suscetibilidade dos Argissolos ao desprendimento de partículas, é recomendável o uso de técnicas conservacionistas destinadas ao manejo adequado do solo, incluindo terraceamento, curvas de nível, cobertura permanente do solo, adoção de práticas de plantio direto, sem o afundamento do perfil do solo, controle de tráfego de maquinário pesado a fim de favorecer o aumento da infiltração de água do perfil do solo.

Após as medidas de contenção terem sidas realizadas, é importante fazer o monitoramento da voçoroca, especialistas recomendam o acompanhamento pelo período de 12 a 24 meses, para avaliar a

eficácia ou possíveis alterações no plano de recuperação. Um índice de comprovação é por meio do acompanhamento dos índices de perda de solo, a qualidade da água e a manutenção e regeneração da cobertura vegetal.

Em virtude do relatório apresentado ao longo deste estudo, é aconselhável que as intervenções necessárias sejam realizadas em conjunto do Poder Público e os proprietários da área atingida, para garantir sugestões, críticas e um trabalho integrado, assegurando a compatibilidade das obras e minimizando os passivos ambientais existentes.

Além das medidas sugeridas acima, recomenda-se a implantação de programa municipal de educação ambiental, voltada a comunidade local, sendo preceito assegurado na Política Nacional do Meio Ambiente, citada na Lei n° 6.938/1981. As ações de educação ambiental deverão conter palestras, oficinas de solo e compostagens, elaboração e distribuição de materiais informativos como cartilhas e ações de divulgação escolar.

9 ESTIMATIVAS DE PERDA DE SOLO

Os cálculos inseridos abaixo permitem de forma consistente apresentar estimativas constantes na ordem de grandeza relacionados a perda de solo pela atividade erosiva, sendo adotado o modelo físico original proposto por Foster e Lane. Os resultados podem ser considerados desde que sejam interpretados como uma aproximação.

Os parâmetros utilizados na análise foram: vazão de pico do escoamento superficial igual a : Q = 0,602m^3 /s declividade do canal:S = 14,2% = 0,142 m/m, coeficiente de rugosidade de Manning: n=0,035, largura estimada do canal de escoamento: b=1,40m, profundidade da lâmina de água: y=0,22m, tensão crítica de cisalhamento: c=0,27 Pa , densidade média do solo: s=1,47 kg/ dm^3, Os resultados obtidos equivalem a: ρ1470 Kg/m^3.

A voçoroca conta com o comprimento próximo de: L = 300 m, largura média de B = 25 m, profundidade média de P= 15 m, e tempo estimado de evolução aproximado de 18 anos.

Inicialmente foi estabelecida a área molhada da seção de escoamento, admitindo-se uma seção transversal da erosão, endo assim: A = b·y

Realizando os valores conhecidos de: A=1,40 X 0,22; A=0,308 m^3

Obtém-se a velocidade média percorrida de escoamento pelaequação da continuidade, que se da em: Q = A · V

Isolando-se a velocidade de: V=$\frac{Q}{A}$ substituindo por V $\frac{0,602}{0,308}$ V-1,95 m/s

O valor obtido acima pelo escoamento concentrado é frequentemente citado na literatura como fator responsável pelo desenvolvimento de voçorocas.

O perímetro molhado da seção foi calculado considerando sua geometria que se comporta como um canal aberto, o qual foi de:

$$W\,P = b + 2\,y, \quad (1)$$

Substituindo

$$W\,P - 1{,}40 + 2\,(0{,}22)\;W\,P = 1{,}84\ m \quad (2)$$

Em seguida determina-se o raio hidráulico:

$$R = \frac{A}{WP} \quad (3)$$

Substituindo os valores, $R = \frac{0{,}308}{1{,}84}$ R = 0,167 m

A tensão de cisalhamento tendo sido calculada, adota-se a expressão de Foster e Lane: $\tau a = \gamma RS$, em que $\gamma = 9810;\ N/m^3$ representa o peso específico da água.

Substituindo os valores:

$$\tau_a = 9810x0{,}167x0{,}142 \quad (4)$$

$$\tau_a\ 232{,}5\ Pa \quad (5)$$

A tensão máxima trabalhando sobre o leito de um determinado canal poderá ser estimado usando os parâmetros de Foster e Lane:

$$\tau_{max} = 1{,}35a \quad (6)$$

Assim,

τ_{max} = 1,35 x 232,5 (7)

τ_{max} = 313,9 Pa (8)

A comparação entre tensão máxima atuante e tensão crítica do solo foi realizada por meio da relação que se dá por:

τ_{max} = 313,90,27=1162 (9)

Observa-se que τ_{max} »τ_{max}

Observa-se que a tensão hidráulica gerada pela erosão linear supera à resistência dada pelo solo ao cisalhamento, resultando na retirada de solo e ao aprofundamento da voçoroca.

Foi realizada a estimativa de perda de solo a partir das dimensões observadas em campo, admitindo uma geometria aproximada, pelo fato de voçorocas normalmente apresentarem formato de "U", isso se deve pela indisponibilidade do Ábaco de Foster e Lane, não sendo possível determinar a profundidade média referente a camada não erodida do solo.

Assim o valor foi obtido por: V=L x B x P.

Substituindo, V=300 x 25 x 15

V= 112.500 m^3 (10)

Sendo a massa estimada erodida pela expressão: M = Vρ_S, substituindo,

M= 112.500 x 1470 (11)

M = 165.375,00 kg (12)

O qual convertido em toneladas resulta e:

$$\boxed{M = 165\ 375\ t} \quad (13)$$

Considerando o tempo aproximado de 18 anos, a perda média anual de solo foi estimada e por: $m_{anual} = \frac{165\ 375t}{18}$

$$\boxed{m_{anual} = 9\ 187{,}5\ t/ano} \quad (14)$$

Os resultados obtidos mostram que a tensão cisalhante supera em mais de mil vezes a tensão crítica oferecida pelo solo, mostrando que o escoamento superficial apresenta uma alta capacidade erosiva. No entanto, deve-se lembrar que foi feita uma adaptação do modelo original, sendo por tanto os valores obtidos como estimativas aproximadas, o valor real tende a ser inferior ao calculado.

10 RESPONSABILIDADE JURÍDICA E PASSIVO AMBIENTAL

Pela visão do aspecto jurídico, o agente causal pelo dano ao meio ambiente poderá ser atribuído ao Município, isso se comprovado que o rompimento da galeria de água pluvial se deu pela ingerência governamental, especialmente se houver demonstração de que a Administração Pública tinha o prévio conhecimento da precariedade e se ausentou das medidas necessária a fim de evitar o dano. Tal responsabilidade se encontra fundamentada pelo artigo de número 37, § 6°, da Constituição Federal, o qual estabelece a responsabilidade civil das pessoas jurídicas de direito público por eventuais danos causados a terceiros, também nos artigos 3°, inciso IV, e no 14, § da Lei 6.938/1981, define como poluidor toda e qualquer pessoa seja ela física ou jurídica, pública ou privada, responsável de modo direto ou indireto pela degradação ambiental e lhes impõe obrigações de reparo integral ao dano ambiental. . Sendo assim, quando o dano decorre da atuação pública, o Município passa a enquadrar-se juridicamente como poluidor indireto ou, conforme a situação concreta, como agente direto pelo dano. O artigo 2° estabelece que é dever governamental a manutenção do equilíbrio ecológico (inciso I), pela racionalização do uso do solo e da água (inciso II), pelo planejamento e fiscalização do uso dos recursos ambientais (inciso III), pela recuperação das áreas degradadas (inciso VIII) e pela proteção das áreas ameaçadas de degradação (inciso IX).

O artigo 14, § da mesma lei afirma a responsabilidade possui caráter de natureza objetiva solidária

ao estabelecer que o agente poluidor é obrigado independente de comprovação de dolo ou culpa, a indenizar ou reparar os danos causados ao meio ambiente e a terceiros. Por meio disso, a demonstração do dano e do nexo causal são suficientes para gerar o dever de reparação, embora o processo erosivo em curso tenha sido desencadeado pela ruptura da drenagem pública, levantamentos técnicos realizados em campo podem evidenciar que sua evolução ocorreu durante período prolongado, sem a adoção de medidas de contenção, estabilização e conservação do solo pelos proprietários das citadas áreas atingidas.

As fotografias tiradas em campo demonstram que a erosão evoluiu de pequenas fissuras no solo, evoluindo-se para ravinas profundas que poderia ter sido significativamente reduzida mediante implantação de práticas e medidas conservacionistas por parte dos proprietários.

Por esses aspectos, os proprietários passam a responder pelo agravamento do dano ambiental decorrente da omissão em adotar medidas necessárias em observância ao artigo 1.228, § 1°do Código Civil, que impõe ao proprietário o dever de exercer seu direito preservando o equilíbrio ecológico, bem como pelos artigos 186 e 927 do Código Civil, que atribuem responsabilidade que, por ação ou omissão, causar dano a terceiros.

Pelo entendimento do aspecto ambiental, verifica-se a hipótese de concorrência de condutas lesivas ao meio ambiente, tendo em vista que diferentes agentes contribuíram, em momentos distintos, para a formação e ampliação do dano ambiental. O município se configura como agente causal responsável pelo processo inicial erosivo em razão da deficiência da infraestrutura pública de drenagem, enquanto os proprietários rurais respondem pelo agravamento decorrente da ausência de medidas efetivas de controle da erosão.

Na esfera civil, a consequência jurídica consiste na obrigação de reparação integral do dano ambiental, por meio de ações de obras de estabilização geotécnica, recuperação de cursos de drenagens, implantação de estruturas de dissipação hidráulica, além de planos de recuperação ambiental. Sendo amparadas pelo Projeto de Recuperação de Área Degradada (PRAD), nos termos do artigo 14, § 1°, da Lei n° 6.938/1981.

Na esfera administrativa, os responsáveis poderão sofrer penalidades previstas no artigo 70 da Lei n° 9.60/1998 e no Decreto Federal n° 6.514/2008.

Na esfera penal, a para que os responsáveis sejam responsabilizados depende da demonstração de dolo ou culpa, nos termos da Lei n° 9.605/1998, podendo ser analisados as incidências dos artigos 38, 54 e demais dispositivos pertinentes.

Diante do conjunto probatório e dos fundamentos técnicos e jurídicos expostos, conclui-se que a

situação caracteriza hipótese típica de responsabilidade ambiental objetiva, solidária e de reparação integral, recaindo sobre o município, pela deficiência da infraestrutura pública que iniciou o processo de erosão, e sobre os proprietários onde a erosão se encontra, pela omissão em adotar medidas capazes de impedir ou minimizar os danos causados.

REFERÊNCIAS

BERTONI, j.; Lombardi NETO, F. Conservação do solo. 9° edição. São Paulo.

DIAS, N. S.; BRÍGIDO, A. C. M. Manejo e conservação dos solos e da água. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2013.

OUT WORD IN DATA. Porcentagem de Terras Degradadas,2019. 2020. Disponível em: Out Word in Data. Acesso em: 2022.

ROSS, J. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. Revista do Departamento de Geografia/FFLCH/USP, n°8,1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAL TÉCNICAS.NBR 6502: Rochas e Solos. Rio de Janeiro. 1998.

GALERANI, C. et al., Controle da erosão urbana. In: TUCCI, C. E. M., PORTO, R. L. e BARROS, M. T. Drenagem Urbana. Porto Alegre: EDUFRGS, 1995.