



Efeitos da cobertura vegetal na evolução de voçorocas: um estudo de detalhe das variações sazonais

Effects of vegetation cover on gully evolution: a detailed study of seasonal variations

Efectos de la cobertura vegetal en el desarrollo de la erosión en cárcavas: un estudio detallado de las variaciones estacionales

Rafaella Aguiar Silva

UNESP Rio Claro

rafaella.aguiar@unesp.br

Estêvão Botura Stefanuto

UNICAMP

ebs@unicamp.br

Cenira Maria Lupinacci

UNESP Rio Claro

cenira.lupinacci@unesp.br

Resumo: A intervenção humana nos solos a partir da agricultura e da pecuária pode resultar no agravamento de processos erosivos. Neste sentido, este artigo discute a influência do reflorestamento e da pastagem em um sistema em voçorocamento, analisando como estes padrões de uso da terra afetam a dinamização do talude erosivo. A área de estudo localiza-se em Analândia (SP), integrada ao Córrego Santa Terezinha, afluente do Rio Corumbataí. Para desenvolver esta pesquisa, o sistema erosivo foi imageado durante quatro trimestre a partir de um veículo aéreo não tripulado (VANT), sendo os padrões de uso da terra classificados em ambiente SIG (QGis 3.16) a partir do algoritmo Máquina de Vetor de Suporte. Com isso, a classificação detalhada da cobertura revelou a complexa dinâmica do talude erosivo com variações discerníveis influenciadas por sazonalidade, alterações na vegetação e padrões

de precipitação. Concluiu-se que a evolução do talude erosivo não está estritamente ligada à precipitação, sendo significativamente influenciada pela cobertura vegetal circundante, sendo que esta constitui-se em medida eficaz na atenuação de processos erosivos.

Palavras-chaves: Uso de Terra. Cobertura Vegetal. Pastagem. Voçorocas.

Abstract: Human intervention in soils through agriculture and livestock farming can result in the exacerbation of erosion processes. This article discusses the influence of reforestation and pasture on a gully system, analyzing how land use patterns affect the gully sidewall. The study area is in Analândia (SP) and is a tributary of the Santa Terezinha Stream (Corumbataí River Basin). The gully system was imaged over four trimesters by an unmanned aerial vehicle (UAV). Land-use patterns were classified using the Support Vector Machine (SVM) algorithm (QGIS 3.16). Detailed land cover classification revealed the complex dynamics of the gully, with discernible variations influenced by seasonality, vegetation changes, and precipitation patterns. It was concluded that gully evolution is not strictly linked to precipitation but is significantly influenced by the surrounding vegetation cover.

Keywords: Land Use; Vegetation Cover; Livestock; Gully Erosion.

Resumen: La intervención humana en los suelos a través de la agricultura y la ganadería puede provocar el agravamiento de los procesos de erosión. En este sentido, este artículo analiza la influencia de la reforestación y el pastoreo en un sistema de cárcavas, examinando cómo estos estándares de uso del suelo afectan la evolución del talud. El área de estudio está ubicada en Analândia (SP), en la cuenca del Córrego Santa Terezinha, afluente del río Corumbataí. Para desarrollar esta investigación, se obtuvieron imágenes del sistema de erosión durante cuatro trimestres mediante un vehículo aéreo no tripulado (VANT). Posteriormente, los estándares de uso del suelo se clasificaron en un entorno GIS (QGis 3.16) utilizando el algoritmo Support Vector Machine (SVM). La clasificación detallada de la cobertura reveló la compleja dinámica

de la cárcava, con variaciones discernibles influenciadas por la estacionalidad, los cambios en la vegetación y los estándares de precipitación. Se concluyó que la evolución de la cárcava no está estrictamente ligada a la precipitación, sino que está influenciada significativamente por la cobertura vegetal circundante, lo que constituye una medida efectiva para mitigar los procesos de erosión.

Palabras clave: Uso del Suelo; Cobertura Vegetal; Pastizal; Cárcavas.

Introdução

O solo constitui-se em elemento fundamental para a sobrevivência humana (Joffe, 1949) e seu gerenciamento adequado assegura resultados positivos para os produtores e também contribui para a regulação do clima e da biota, promovendo um equilíbrio nos ecossistemas (FAO, 2015). No Brasil, devido a erosão, o estado de São Paulo apresenta perda de cerca de 130.000.000 de toneladas de solo por ano, correspondendo a aproximadamente 25% do total de perdas no Brasil (Bertoni; Lombardi Neto, 2012).

Destaca-se também que a taxa de pobreza na América Latina rural, de 1,7%, é superior à pobreza nas cidades, conforme mostra o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura - IICA (2012). Neste sentido, é importante que estes países elaborem planos de proteção social para um crescimento duradouro, e façam mudanças nas práticas de agricultura para diminuir as diferenças sociais (FAO, 2015). Assim, a agricultura, uma das principais fontes de renda para diversas famílias brasileiras, deve ser bem administrada para evitar problemas futuros, como a erosão do solo, e para manter a produtividade segura (FAO, 2015).

De acordo com Smith (2005), a maioria dos solos passam por um processo de interferência humana, podendo esse ser direto ou indireto. Ações como agricultura e pecuária desempenham um impacto direto no solo, e podem variar de acordo com a sua intensidade. No entanto, algumas formas indiretas de interferência nos solos são causadas por atividades humanas em larga escala. Mesmo que o solo não seja diretamente perturbado, a prática do desmatamento para expansão urbana ou agrícola, por exemplo, altera o ciclo hidrológico e a estabilidade do solo.

De acordo com Zanatta *et al.* (2020), as áreas destinadas à pecuária sofrem degradação nos solos, podendo interferir na fertilidade, causando danos econômicos para a sociedade, devido à redução de recursos naturais. Bertoni e Lombardi Neto (2012) apontam que o uso extensivo do solo, com o pisoteamento do gado altera a capacidade de infiltração, intensificando os processos de escoamento que causam erosão. Ainda, esse pisoteamento cria caminhos que esculpem o relevo, acentuando a formação de sulcos que podem evoluir para ravinas e, até mesmo, para voçorocas.

O efeito das chuvas também merece atenção, pois o impacto das gotas diretamente na superfície do solo acarreta a ruptura dos agregados. O transporte das partículas finas desagregadas ocorre quando o solo está saturado ou quando a velocidade da água da chuva excede a capacidade de infiltração do solo, resultando no escoamento superficial do excesso de água (Eltz, 1984). Neste sentido, o aumento do escoamento superficial e transporte nos sulcos erosivos, pode resultar em feições erosivas com dimensões consideráveis, como as voçorocas (Bertoni; Lombardi Neto, 2012).

Vanmaercke *et al.* (2016) indicam que as consequências da erosão por voçorocas têm impactos tanto no local onde ocorrem quanto em áreas circunvizinhas. No primeiro caso, refere-se à perda de material no próprio local, enquanto no segundo, trata-se do transporte que origina áreas de sedimentação. As voçorocas desempenham o papel de fontes de sedimentos quando analisadas as bacias hidrográficas (Guerra *et al.*, 2017; Poesen *et al.*, 2003), fato que pode desencadear o assoreamento em rios, reservatórios ou lagos.

Devido ao fato das práticas agropecuárias inadequadas ampliarem a dinâmica erosiva e contribuírem na formação de ravinas e voçorocas, em estágios avançados, estas são capazes de modificar a paisagem (Guerra, 1997). As voçorocas, por exemplo, são intensificadas com a passagem de água de maneira repetida, expandindo a formação da cavidade (Bahia *et al.* 1992). A vegetação também pode influenciar a dinâmica evolutiva de voçorocas. Uma maneira discutida por diversos autores para estabilizar a erosão em voçorocas é restabelecer a vegetação natural da área ou outras que se adaptem à região (Gandolfi; Rodrigues, 2017).

De acordo com Bezerra *et al.* (2020), as voçorocas também podem sofrer interferências de estradas não pavimentadas. Neste sentido, cabe atenção aos pontos de intersecção entre estradas e terraços agrícolas, pois, de acordo com os autores, em pesquisa aplicada às bacias hidrográficas afluentes do córrego Barro Frio (Piracicaba - SP), ao longo de 104 interseções, 38 destas (37%) são coincidentes com feições erosivas.

Assim, o presente artigo busca avaliar o uso e cobertura da terra e sua relação com a evolução do talude erosivo de uma voçoroca, verificando o diferencial evolutivo entre um setor em processo de reflorestamento e outro com pastagem destinada à pecuária. A análise foi realizada em escala de detalhe, a partir de imagens produzidas por Veículos

Aéreos Não Tripulados, o que possibilitou verificar certas questões referentes à cobertura vegetal, por estação de ano, não passíveis de serem analisadas em outros produtos de sensoriamento remoto. Considerase que este viés técnico torna os resultados obtidos relevantes.

Metodologia

Área de estudo

A área de estudo constitui-se em um setor em voçorocamento situado no município de Analândia, Centro-Leste do Estado de São Paulo (Figura 1), entre as latitudes 22°6'0"S e 22°7'0"S e as longitudes 47°41'30"O e 47°42'0"O, integrada ao setor da Alta Bacia do Córrego Santa Terezinha, afluente do Rio Corumbataí. Ainda, este sistema em voçorocamento pode ser considerado complexo, por ser composto por uma feição principal e quatro ramificações, como pode ser observado na Figura 2, sendo classificada em formato paralelo, por apresentar um ou mais tributários paralelos que desembocam no canal principal da voçoroca, sendo que o corte frontal gerado pelo canal principal, accentua o desenvolvimento paralelo por um determinado tempo, podendo ocorrer a captura de um canal por outro (Ireland *et al.*, 1939).

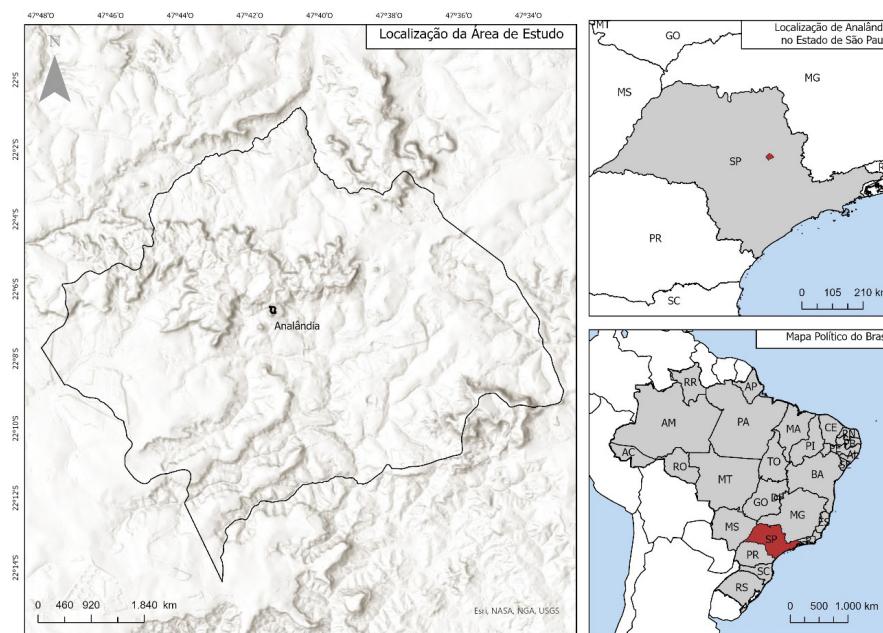


Figura 1 - Localização da Área de Estudo.

Fonte: Os autores (2025).

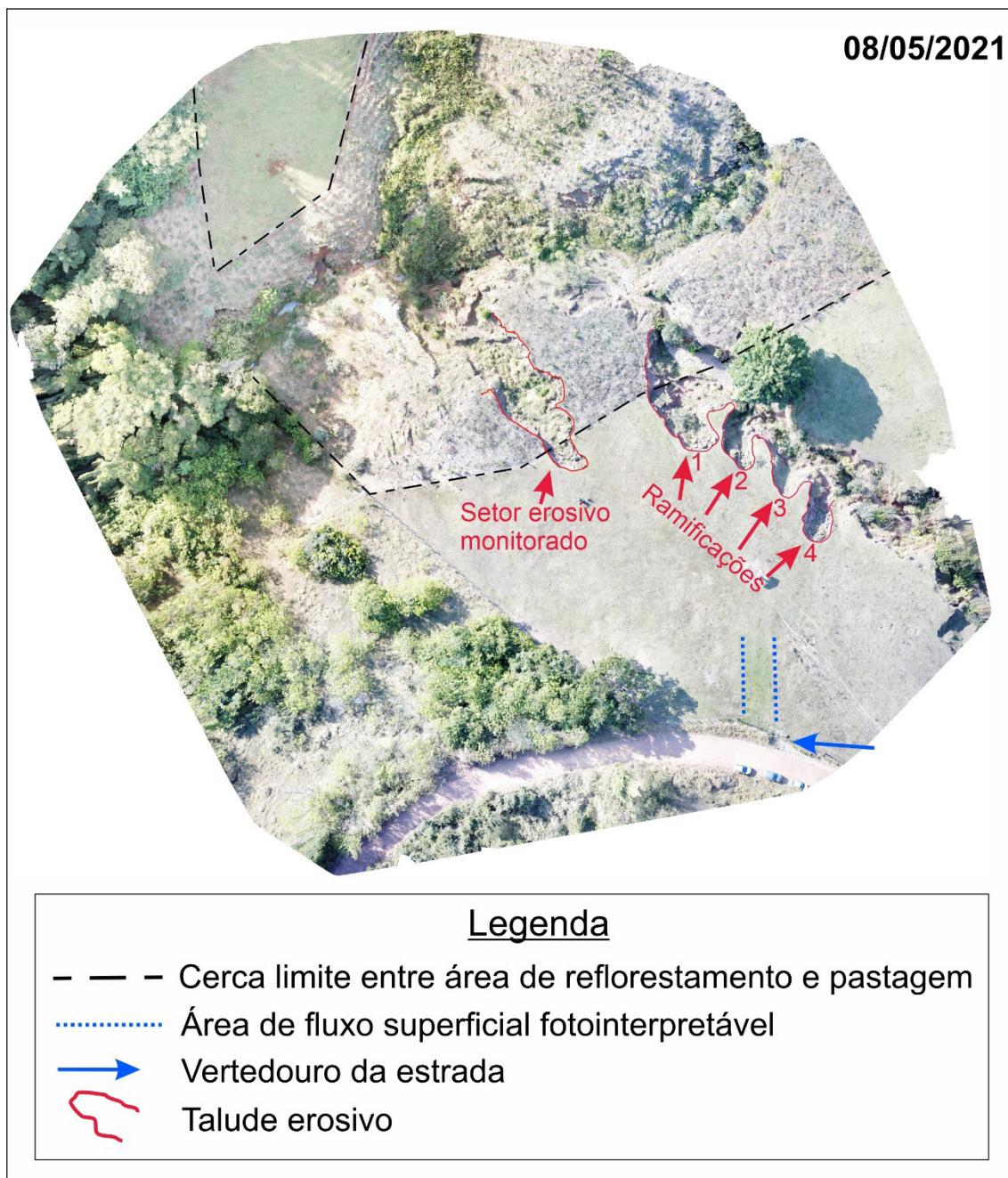


Figura 2 - Ortomosaico do sistema erosivo analisado.

Fonte: Os autores (2025).

Em relação às características geomorfológicas, a área de estudo está situada a leste da Bacia Sedimentar do Paraná, localizada na província das Cuestas Basálticas, evidenciando relevo escarpado nos limites com a Depressão Periférica e desníveis entre o topo das escarpas a sua base que podem oscilar desde menos de uma centena de metros até quase meio milhar de metros (IPT, 1981a).

De acordo com Troppmair (2000), a região engloba tanto uma porção de vegetação de Cerrado quanto de Mata Atlântica. Na frente da *cuesta*, o solo é caracterizado por uma classe associada de Neossolos Litólicos Eutróficos e de Nitossolos Eutróficos ou Distróficos, conforme descrito por Kloffler et al. (1992). Os Neossolos Litólicos, são pouco evoluídos, rasos, e predominantemente compostos por material mineral (Embrapa, 2006). Já, os Nitossolos, apresentam estrutura que favorece a retenção de água, porém com uma boa drenagem, fato que torna necessária sua conservação e preservação, por possuir propriedades físicas que favorecem a atuação de processos erosivos de acordo com a sazonalidade bioclimática (IAC, 2014). Em relação a litologia, a área de estudo está localizada sobre a Formação Botucatu (IG, 1984), a qual data do Triássico-Médio Superior ao Cretáceo Inferior, constitui-se em uma formação de ambiente de deposição dominante desértico, com atuação de dinâmica eólica, formada, em grande parte, por arenitos silicificados, possui apenas nas parcelas mais altas do relevo pontos em contato com rochas da Formação Serra Geral (IPT, 1981b).

Por fim, sobre a dinâmica pluviométrica, Analândia registra ocorrência de chuvas, em média, durante 82 dias do ano, totalizando média pluviométrica anual de 1.272,7 mm. O mês mais chuvoso do ano constitui-se em janeiro, no qual o índice pluviométrico ultrapassa 215 mm, tendo como mês mais seco julho ou agosto, com média pluviométrica que alcança 30,9 mm. Ainda, a temperatura média do município está entre 19°C e 18,5°C, sendo janeiro o mais quente (22°C/média) e julho o mês mais frio (15,5°C/média) (Brino, 1973).

Monitoramento do talude, imageamento e processamento dos ortomosaicos

O talude foi monitorado trimestralmente, nos meses de maio, agosto e novembro de 2021, e fevereiro de 2022. O processo ocorreu analogicamente a partir de estacas, conforme apresenta Stefanuto e Lupinacci (2023), baseado em uma proposta de Guerra (2002). Foram instaladas estacas em 22 pontos diferentes, distribuindo-se pela margem direita, margem esquerda e cabeceira do talude.

Foi realizado o imageamento da área a partir de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), seguido pelo processamento das imagens. O VANT utilizado foi o DJI MAVIC Pro, que possui especificações como uma duração máxima de voo de 27 minutos, sistema de posicionamento por satélite GPS/GLONASS, e alcance de precisão em voo estacionário com posicionamento visual ativo de +/- 0,1 m (vertical) e +/- 0,3 m (horizontal), de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante (DJI, 2021). O equipamento estava equipado com um sensor RGB de 1/2.3" (CMOS), com pixels efetivos de 12.35 M (pixels totais 12.71 M). O software DroneDeploy foi utilizado para realizar os voos, com um plano de voo que incluía uma altitude de 40 metros, resolução espacial de 1,3 cm, e imagens com 75% de sobreposição frontal e 70% de sobreposição lateral.

Na etapa seguinte, as imagens foram processadas para formulação dos ortomosaicos utilizando o software Open Drone Map (ODM) em sua versão online (WebODM). Foi utilizado o Docker Desktop para conectar o servidor ao programa WebODM, acessado via Firefox. Quatro projetos distintos foram criados para processar imagens capturadas, seguindo por testes para determinar as melhores configurações. Concluiu-se que usar um nó de processamento manual, "high resolution" e sem redimensionamento produz resultados satisfatórios. Como resultado, foram gerados quatro ortomosaicos correspondentes a 08/05/2021, 07/08/2021, 06/11/2021 e 05/02/2022.

Os ortomosaicos foram então georreferenciados no QGis versão 3.16, com base em coordenadas de marcos físicos coletadas em campo usando um receptor GNSS RTK SP60. Estabeleceu-se como critério manter todos os pontos com erro residual abaixo de 2 cm. Portanto, as estacas que apresentaram resíduos acima do esperado foram removidas, proporcionando um ajuste preciso no georreferenciamento.

Classificação da cobertura e uso da terra

Os ortomosaicos foram submetidos a classificação da cobertura e uso da terra no SIG ArcGIS Pro a partir de uma chave de interpretação (Figura 3). Inicialmente, as imagens passaram pelo processo de segmentação, que consiste na agrupação de pixels semelhantes. Os parâmetros empregados para a segmentação foram os seguintes: detalhe espectral de 20, detalhe espacial de 15 e tamanho mínimo de segmen-

tos em pixels de 40, nas datas dos cenários de 07/08/2021, 06/11/2021 e 05/02/2022. Já para o cenário de 08/05/2021, foram adotados os seguintes parâmetros: detalhe espectral de 15,5, detalhe espacial de 15 e tamanho mínimo de segmentos em pixel de 80. Essa adaptação foi essencial devido às discrepâncias entre cada cenário, influenciadas por fatores sazonais, mudanças na vegetação, incidência solar e sombras.

Em pastagem	
Em reflorestamento	
Solo exposto	
Vegetação herbácea	

Figura 3 - Chave de interpretação do Uso e Cobertura da Terra.

Fonte: Os autores (2025).

Para a análise, foram selecionados cinco tipos de amostras: reflorestamento, pastagem, solo exposto, sombra e gramíneas. No entanto, a categoria sombra tem apenas a finalidade de distinção de áreas mais escuradas, afinal, não é de fato uma cobertura de solo. Em relação ao cenário específico de 05/02/2022, houve uma reclassificação exclusiva das classes solo exposto e gramíneas, denominada de solo recoberto. Isso se deve a intensa cobertura de vegetação nesse período ao longo do ta-

lude, com muitas formas de gramíneas misturadas (brachiarias, claras e baixas), no meio da pastagem e do reflorestamento.

Foram conduzidos diversos testes com diferentes classificadores, mantendo os parâmetros sugeridos pelo software. Os testes incluíram o classificador K-Vizinhos Mais Próximos, Árvores Aleatórias, Agrupamento ISO, Máxima Verossimilhança e Máquina de Vetor de Suporte, cada um com e sem o uso de imagem segmentada. Em todos os casos, a ausência de imagem segmentada produziu resultados com menos ruído. A comparação final entre os classificadores, sem o uso de imagem segmentada, mostrou que a Máquina de Vetor de Suporte teve a melhor correspondência com as coberturas e os usos.

A etapa de validação dos produtos da classificação foi realizada através de uma matriz de confusão, exigindo a criação de uma malha de pontos amostrais. Para o procedimento utilizaram-se as ferramentas: *create accuracy assessment point* e *compute confusion matrix*. Quanto aos parâmetros da ferramenta, uma modificação foi feita no parâmetro da função *sampling strategy* (da ferramenta *create accuracy assessment point*) para a opção *random*, pois essa função gera uma malha de pontos amostrais de forma aleatória, minimizando a influência de áreas específicas na amostragem. A matriz de confusão revela o valor Kappa dos mapeamentos, o qual é um sólido indicador da precisão dos resultados (Quadro 1).

Quadro 1 - valor de Kappa em cada período

Períodos	Valor Kappa
08/05/2021	0,8425196850393701
07/08/2021	0,841688654353562
06/11/2021	0,7251992305570856
05/02/2022	0,8757763975155278

Resultados e discussão

Foi conduzida uma análise comparativa das características da cobertura vegetal em cada cenário investigado, segmentando o setor erosivo monitorado em margem direita (estacas de 1 a 12), cabeceira (estacas 13 e 14) e margem esquerda (estacas de 15 a 22), a fim de facili-

tar a compreensão do fenômeno erosivo (Figura 4). O setor apresentou variação de acordo com a sazonalidade (Figura 5), conforme pode ser observado nas fotografias do período seco (agosto) e úmido (fevereiro).

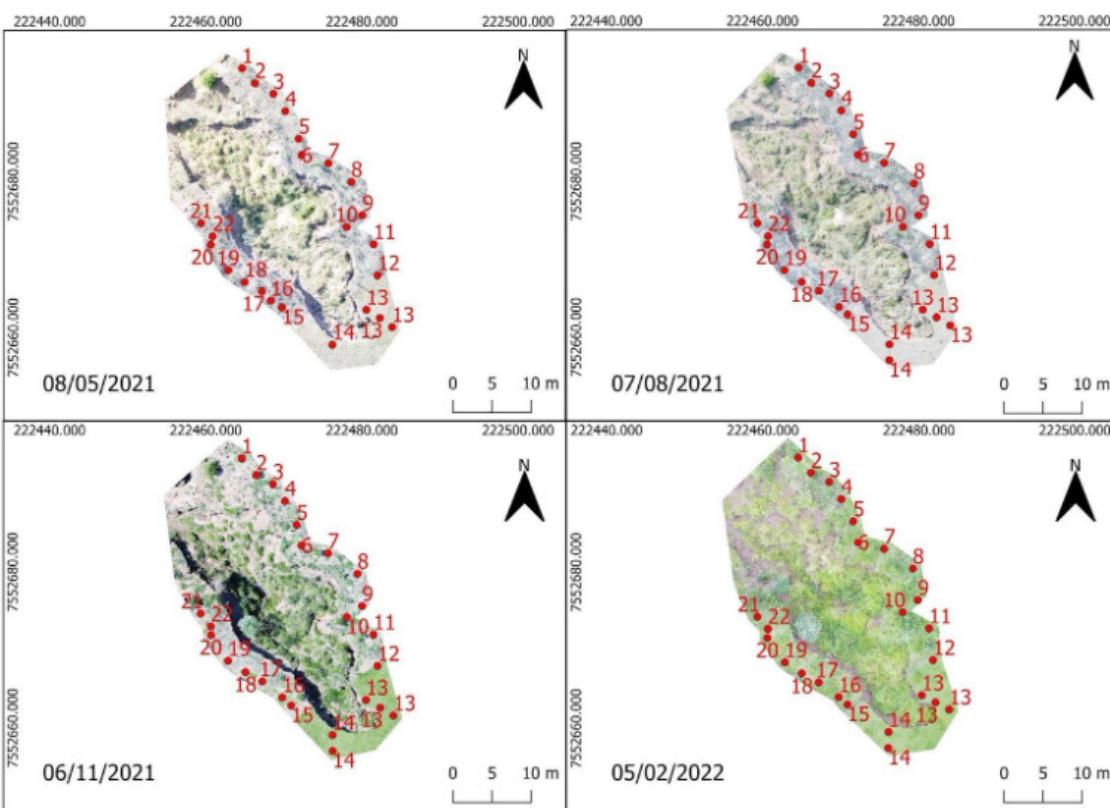


Figura 4 - Localização das estacas na feição principal por período de monitoramento.

Fonte: Os autores (2025).

No primeiro cenário (08/05/2021), observa-se, que a maioria das estacas da margem direita localizam-se em uma área em reflorestamento a qual ocupa 30,5% do setor (Tabela 2). O mesmo padrão é observado na margem esquerda. Quanto à cabeceira, as estacas 13 e 14 localizam-se em um setor de pastagem (Figura 6). Nota-se que, neste cenário, a porção interna da voçoroca apresenta uma considerável cobertura de vegetação herbácea (32,2%), com áreas de solo exposto próximas ao talude erosivo e um pouco de vegetação em reflorestamento. A vegetação herbácea, a qual apresenta a maior área de cobertura no setor, é representada principalmente por gramíneas que não estão submetidas ao pastejo do gado e que por isso conseguem expandir com certa facilidade sua área de cobertura.

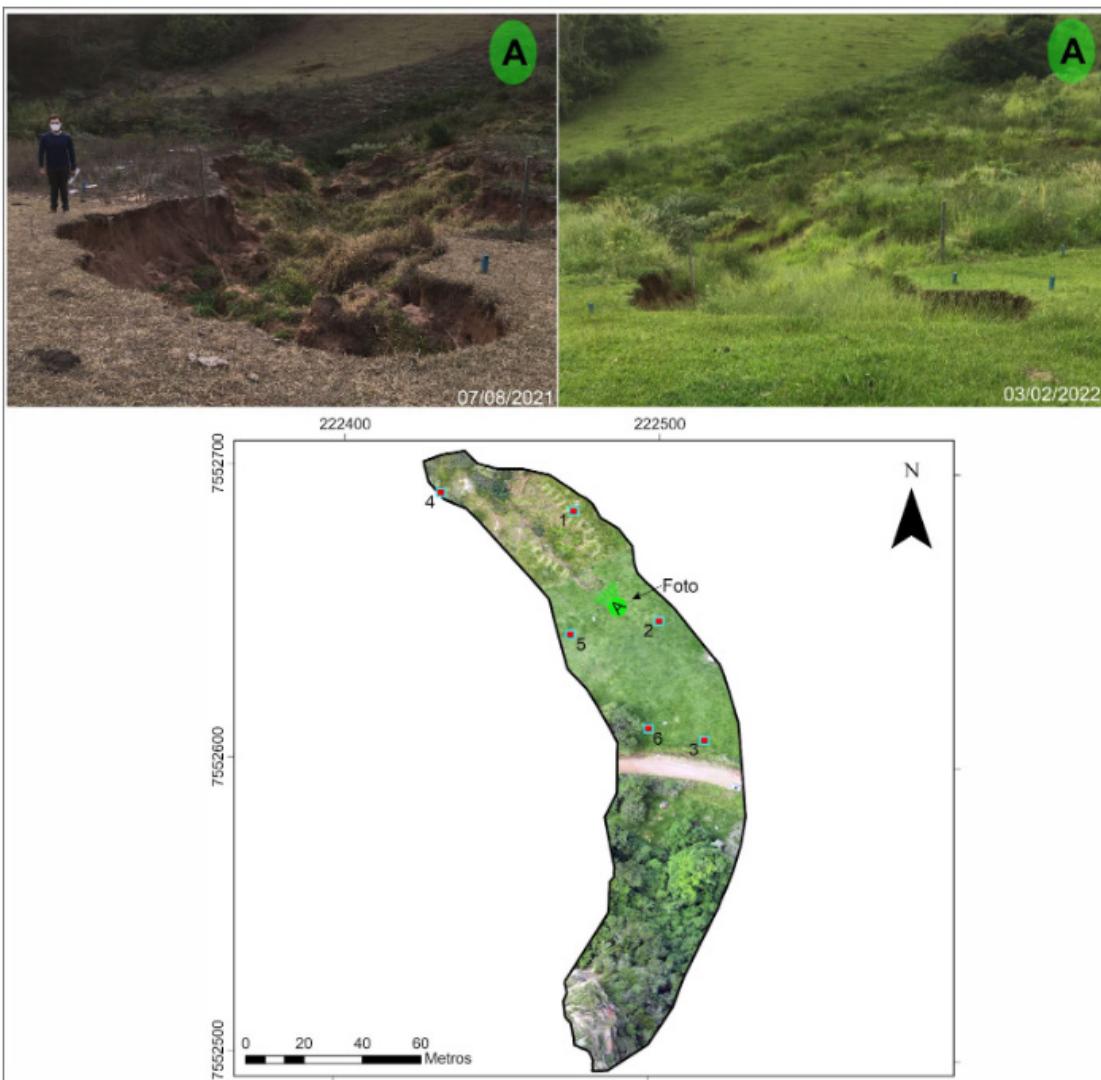


Figura 5 - Cabeceira da voçoroca em período seco e úmido.

Fonte: Os autores (2025).

Nesse contexto, a área em reflorestamento apresenta-se diversificada, incorporando também zonas de pastagem (Figura 6). A área de pastagem estende-se para o setor interno da voçoroca, coexistindo com áreas de solo exposto e vegetação herbácea. A ocorrência de áreas de pastagem na área cercada se justifica devido ao acesso do gado em períodos específicos fruto da ineficiência das cercas, fazendo com que o pastejo do gado reduzisse o volume das gramíneas, indicando ao classificador uma resposta espectral mais próxima das pastagens do que da vegetação herbácea. Ainda, no período de fevereiro a maio de 2021, o setor de cabeceira apresentou 1,14 m (estacas 13 e 14) de perda de material, sendo este predominantemente recoberto por pastagens des-

tinadas à pecuária. Também, é relevante mencionar que as estacas 3 e 4, situadas na margem direita e em área em reflorestamento, apresentaram, de fevereiro a maio de 2021, perdas de 0,15 e 0,20 metros, respectivamente. Por fim, na margem esquerda (reflorestamento), as estacas 15, 16 e 19 registraram dinâmica de expansão do material. De acordo com Stefanuto e Lupinacci (2023), a expansão de material caracteriza-se pelo aumento da distância entre a estaca de monitoramento e o talude erosivo, fruto da inclinação de blocos do talude erosivo devido ao processo de solapamento.

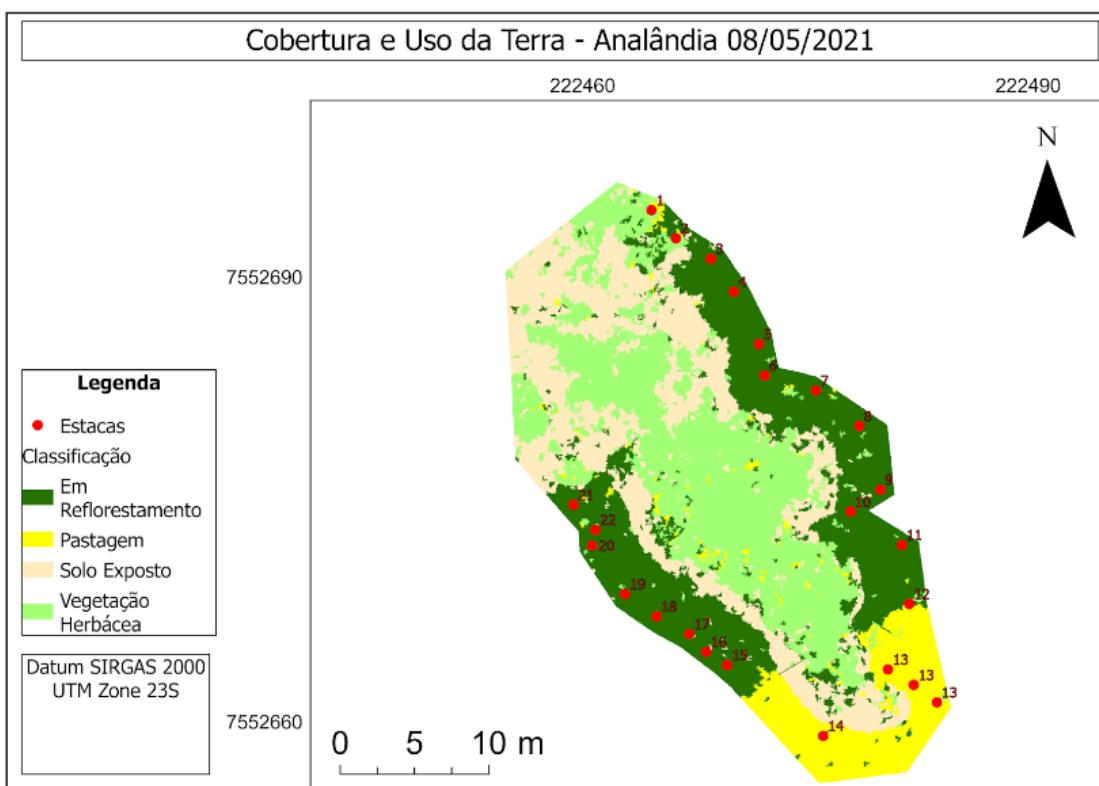


Figura 6 - Mapa de cobertura e uso da terra em 08/05/2021.

Fonte: Os autores (2025).

Já no cenário seguinte, 07/08/2021, no que se refere a porção interna da voçoroca, nota-se que parte desta está ocupada por vegetação herbácea, com o solo exposto sendo uma classe representativa na base dos taludes erosivos (Figura 7), fato similar ao cenário anterior (08/05/2021). Além disso, é possível identificar um aumento em áreas classificadas como pastagem em meio ao reflorestamento, situação também registrada em 08/05/2021 somente em setor específico, como

é possível observar na Tabela 2. Vale ressaltar que, durante este trimestre (05/2021 a 08/2021), a precipitação pluviométrica foi de 57,8 mm, indicando uma redução em comparação com o trimestre anterior, que foi de 211,3 mm. Os baixos volumes pluviométricos não são favoráveis a algumas espécies, fato que abre espaço para a expansão de gramíneas resistentes vinculadas a pastagem. Destaca-se ainda, que a invasão do gado no setor de reflorestamento foi frequentemente registrada em campo, fato que, conforme apontado, pode ter caracterizado setores de gramíneas com respostas típicas de pastagens, reduzindo a homogeneidade do setor de reflorestamento (Figura 7).

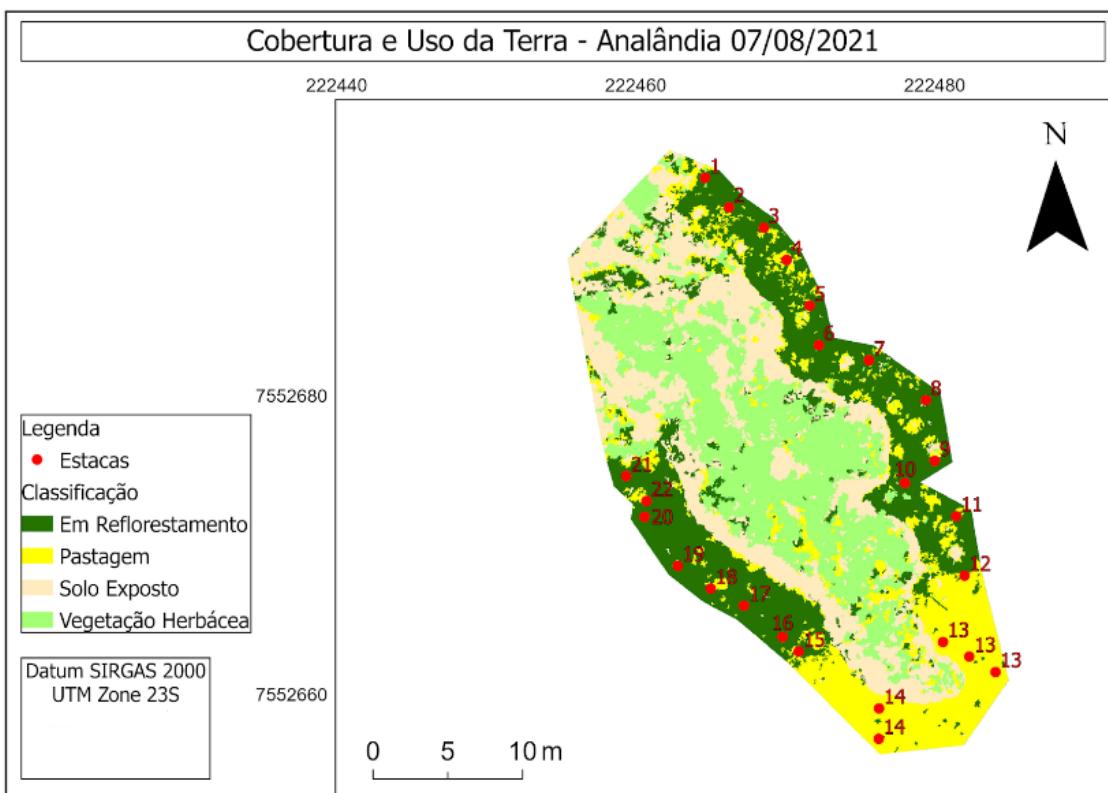


Figura 7 – Mapa de cobertura e uso da terra em 07/08/2022.

Fonte: Os autores (2025).

Tabela 2 - Área ocupada pelas diversas classes em 08/05/2021 e em 07/08/2021.

08 maio de 2021		
Classe de uso	m ²	%
Pastagem	78,78	11,4
Solo Exposto	179,47	25,9
Reflorestamento	211,38	30,5
Vegetação Herbácea	223,17	32,2
TOTAL		100

07 de agosto de 2021		
Classe de uso	m ²	%
Pastagem	127,89	19,2
Solo Exposto	166,36	24,9
Reflorestamento	190,84	28,6
Vegetação Herbácea	181,81	27,3
TOTAL		100

Em relação a perda de material, na margem direita, as estacas 3, 4, 6, 11 e 12 apresentaram perda de material, totalizando em 0,08 m, sendo esta consideravelmente menor em relação ao trimestre anterior, fato que pode estar relacionado à redução no volume de chuvas, conforme mencionado. Também na cabeceira a perda foi menor, totalizando 0,04 m. Por fim, na margem esquerda, ocorreram perdas nas estacas 15, 17 e 22, totalizando 0,12 m, sendo esta uma perda mais significativa do que no período anterior.

Neste sentido, nota-se que um aumento da classe pastagem no talude do setor margem esquerda, pode caracterizar um processo de transição entre as coberturas reflorestamento (08/05) e pastagem (07/08), fato que indica um período entre os imageamentos em que o solo pode ter ficado exposto à agentes geomorfológicos e, com isso, aumentando a perda de material.

Ao analisar a Tabela 2, percebe-se que houve um aumento significativo na área de pastagem entre os dois cenários analisados (7,8%), e uma redução nas áreas de reflorestamento, solo exposto e vegetação herbácea. Essa mudança indica uma transição de áreas reflorestadas para pastagens, expondo o solo a agentes erosivos e aumentando a perda de material na margem esquerda.

Já em 06/11/2021 (Figura 8), é evidente, tanto na margem direita quanto na esquerda, que a área em reflorestamento exibe uma presença significativamente maior de manchas de solo exposto e vegetação herbácea (Tabela 3). Na cabeceira, a vegetação herbácea também avança em uma área designada como pastagem. Além disso, o interior da voçoroca revela uma mescla mais pronunciada em comparação ao cenário anterior, evidenciando classes como pastagem, solo exposto, vegetação herbácea e reflorestamento.

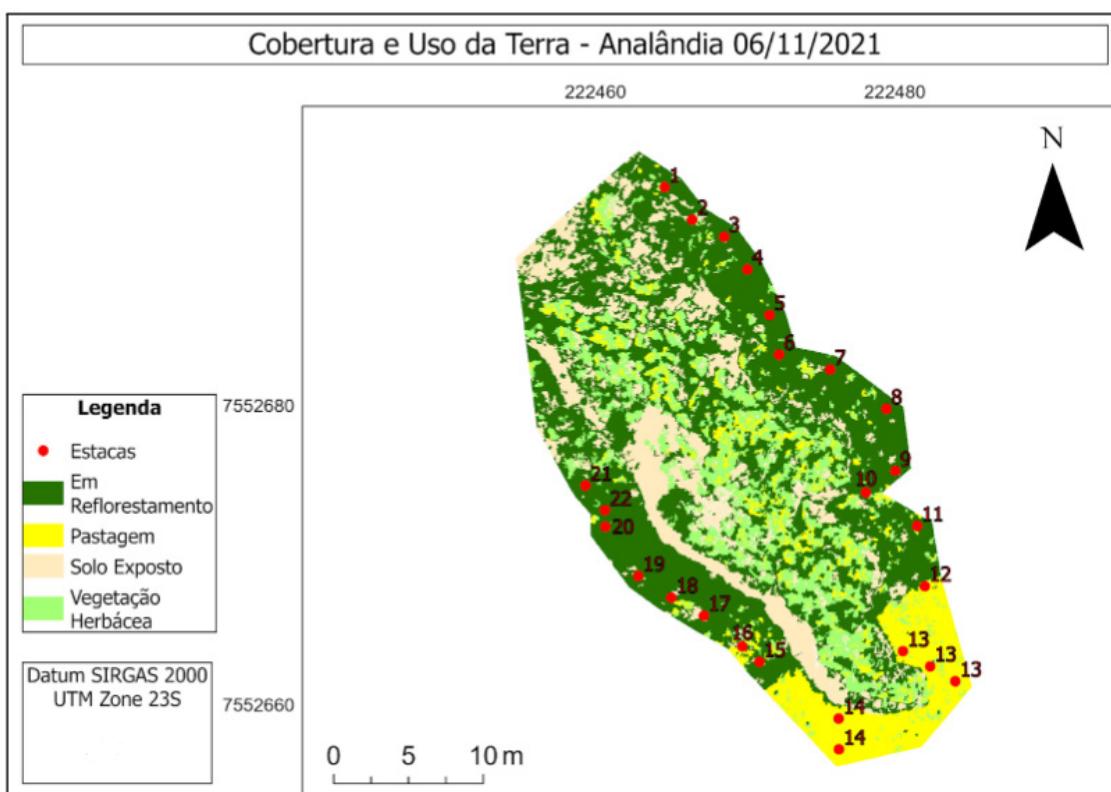


Figura 8 - Mapa de cobertura e uso da terra em 06/11/2021.

Fonte: Os autores (2025).

Tabela 3 - Área ocupada pelas diversas classes em 06/11/2021

06 de novembro de 2021		
Classe de uso	m ²	%
Pastagem	93,05	13,6
Solo Exposto	115,65	16,9
Reflorestamento	349,61	51,1
Vegetação Herbácea	126,17	18,4
TOTAL		100

Os setores da margem direita e esquerda apresentam uma cobertura vegetal diversificada, contendo solo exposto, vegetação herbácea e um pouco de pastagem (Figura 8). Na margem direita, foi registrada uma perda de material nas estacas 2, 3, 5, 7, 8, 9, 11 e 12, de 0,15 metros. Em comparação com o cenário anterior, essa margem experimentou um aumento nas perdas. Já na margem esquerda ocorreram perdas significativas, como na estaca 16, com 0,27 m de perda de material, e na estaca 19, com perda de 0,25 m.

Neste contexto, a margem direita sofreu uma maior perda do que o cenário anterior e, parte dessa mudança, além da influência da cobertura vegetal, pode estar relacionada à quantidade de chuva registrada neste período, que totalizou 237,1 mm. Outro fator, é que a margem esquerda apresentou mais solo exposto em relação à margem direita, podendo ser outro potencializador da perda total de material no trimestre neste setor.

Neste cenário, a pastagem, o solo exposto e a vegetação herbácea reduziram, porém se marcaram presentes em área de reflorestamento. O reflorestamento teve um grande aumento (51,1%), sendo este um fator que mesmo assim não impediu a dinamização dos processos erosivos.

Por fim, no último cenário em 05/02/2022 (Figura 9), ocorreu uma combinação de diferentes tipos de vegetação, incluindo várias gramíneas, pastagem e áreas de reflorestamento. Isso ocorreu devido ao fato que este período apresenta uma grande dispersão de vegetação, por todo o talude, sejam estas gramíneas brachiarias, gramíneas claras, gramíneas baixas, pastagem e o próprio reflorestamento. Neste período, há presença de solo exposto, especialmente na parte inferior do sistema erosivo. Entretanto, na porção central e na cabeceira, observa-se uma redução em comparação com 06/11/2021, devido à presença marcante de vegetação. Neste trimestre, outro fator decisivo é a pluviosidade, a qual totalizam 562,8 mm.

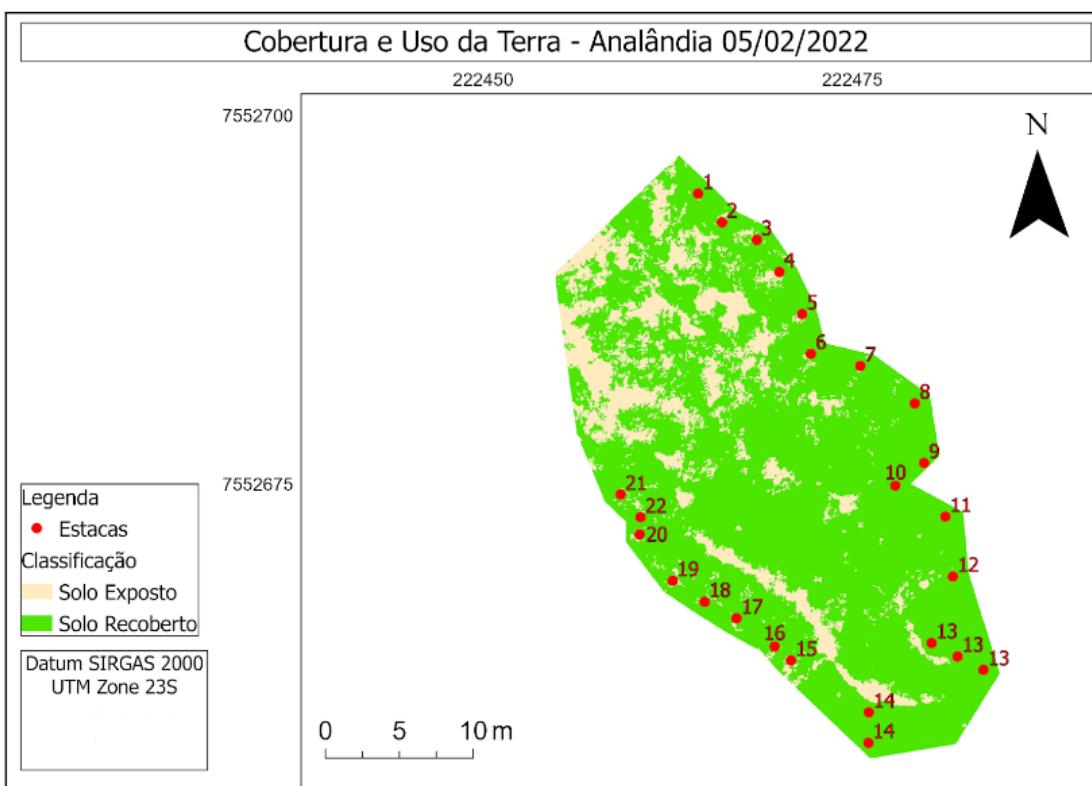


Figura 9 - Mapa de cobertura e uso da terra em 05/02/2022.

Fonte: Os autores (2025).

Em relação à evolução do talude, na margem direita, oito estacas apresentaram perda de material, sendo estas as estacas 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10 e 11, com um padrão notável de duas estacas consecutivas perdendo material. Até a estaca 7, nota-se maior presença de setores com solo exposto, registrando-se uma perda total de 0,10 m neste setor. Já a partir das estacas 8 a 12, observa-se maior presença de solo recoberto e uma redução na perda de material para 0,04 m. Na cabeceira, as estacas 13 e 14 encontram-se em solo recoberto, sendo que a estaca 13 permaneceu estável, enquanto a estaca 14 teve uma perda de 0,02 m. Por fim, na margem esquerda, apenas a estaca 19 registrou perda de material (0,02 m). Todas as outras estacas mantiveram-se estáveis ou apresentaram expansão de material, sendo a maior delas de 0,04 metros na estaca 17. Essa dinâmica, caracterizada por pouca perda de material, pode estar relacionada ao fato de que, de maneira geral, este período apresenta uma grande parte do solo ocupada por vegetação (81,8%), indicando que o projeto de reflorestamento está sendo eficaz. O solo exposto corresponde a 18,8%.

Considerações finais

Do primeiro (maio/21) para o segundo (agosto/21) cenário ocorre uma maior exposição do solo, que pode ser justificada pela baixa pluviosidade, a qual dificulta a expansão da cobertura vegetal. Já no terceiro cenário (novembro/21), a cobertura está mais diversificada do que no cenário anterior, mas com uma presença das classes de pastagem e solo exposto dentro da área destinada ao reflorestamento, fato que pode ter dinamizado o talude erosivo nas margens direita e esquerda, mesmo com uma porcentagem de reflorestamento maior do que nos cenários anteriores. Por fim, o último cenário (fevereiro/22) proporciona uma cobertura vegetal distinta dos demais, sendo este um cenário com alta cobertura vegetal, fato interessante, pois mesmo com a elevada pluviosidade, registrou-se a menor dinamicidade do período, com 0,23 m de perda de material total, fato que sugere uma redução da perda de material do talude erosivo a partir do aumento da cobertura vegetal. A cabeceira se mostrou mais resistente à erosão, especialmente nos últimos cenários, onde a vegetação herbácea e o reflorestamento promoveram a estabilização do solo. A redução das perdas em comparação com as margens sugere uma proteção efetiva proporcionada pela vegetação. As margens apresentaram uma dinâmica mais volátil, com variações significativas nas perdas de material. A margem direita, embora tenha enfrentado perdas, teve uma estabilidade maior quando comparada à margem esquerda, que experimentou perdas significativas em certos períodos, particularmente devido ao aumento da pastagem e solo exposto.

Referências bibliográficas

- BAHIA, V. G., CURI, N., CARMO, D. N., MARQUES, G. G. **Fundamentos de erosão dos solos: tipos, formas, mecanismos, fatores determinantes e controle.** Informe Agropecuário. 1992.
- BERTONI, J.; NETO, F. L. **Conservação do Solo.** 8 ed. São Paulo: Ícone, 2012.

BEZERRA, M.O., BAKER, M., PALMER, M.A., FILOSO, S. Gully formation in headwater catchments under sugarcane agriculture in Brazil. **J. Environ. Manage.** v. 270, p. 110271, 2020.

BRINO, W. C. **Contribuição à definição climática da Bacia do Corumbataí e adjacências (SP), dando ênfase à caracterização dos tipos de tempo.** 1973. 119 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, Rio Claro, 1973.

ELTZ, F.L.F.; CASSOL, E.A.; SCOPEL, I. GUERRA, M. Perdas de solo e água por erosão em diferentes sistemas de manejo e coberturas vegetais em solo laterítico Bruno – avermelhado distrófico (São Jerônimo) sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, n.1, p.117-125, 1984.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Brasília, 2006.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Status of the World's Soil Resources**. Roma, 2015.

GANDOLFI, S. RODRIGUES, S. S. Metodologias de Restauração Ambiental. São Paulo, 2017.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. **Geomorfologia: uma Atualização de Bases e Conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1994.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Org.). **Geomorfologia: Exercícios, Técnicas e Aplicações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.

GUERRA, A. J. T.; FULLEN, M. A.; JORGE, M. C. O.; BEZERRA, J. F. R.; SHOKR, M. S. Slope Processes, Mass Movement and Soil Erosion: A Review. **Pedosphere**, v. 27, n. 1, 27 - 41, 2017.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS - IAC. **Solos do Estado de São Paulo**. 2014. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/solossp/> Acesso em: 07 de abril de 2024.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

- IPT. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo.** São Paulo: IPT, 1981a. Escala:1.000.000

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

- IPT. **Mapa geológico do estado de São Paulo.** São Paulo: IPT, 1981b. Escala:1.000.000

INTITUTO GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – IG. **Formações**

Geológicas de Superfície. Folha Corumbataí, 1984.

IRELAND, H. A.; SHARPE, F. S. EARGLE, D. H. Principles of gully erosion in the piedmont of South Carolina. **Technical Bulletin**, v. 633, p. 1-143, 1939

JOFFE, J. S. **The ABC of Soils.** Pedology Publications, Universidade da Califórnia, 1949.

KAY, B. D. Rates of change in soil structure under different cropping systems. **Adv. Soil Sci.** 1990.

KOFFLER, N. F. et. al. **Solos da bacia do Rio Corumbataí.** Rio Claro: Departamento de Cartografia e Análise da Informação Geográfica - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Escala: 1:50.000, 1992.

POESEN, J., NACHTERGAELE, J., VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena**, 50 (2-4), p. 91-133. 2003.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo.** Escala 1:500.000. Volume 1. FFLCH - USP, São Paulo, 1997.

SMITH, P. An overview of the permanence of soil organic carbon stocks: influence of direct human induced, indirect and natural effects. **European Journal of Soil Science**, 56: p. 673-680. 2005.

STEFANUTO, E. B.; LUPINACCI, C. M. Análise da dinâmica do talude erosivo de um sistema em voçorocamento: causas e processos. **RAEGA**. 2023.

STEFANUTO, E. B. **Análise dinâmica erosiva linear e seu potencial evolutivo em ambiente agrícola**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2019.

TROPPMAIR, H. **Geossistemas e geossistemas paulistas**. Rio Claro: Helmut Troppmair, 2000.

VANMAERCKE, M., POESEN, J., VAN MELE, B., DEMUZERE, M., BRUYNSEELS, A., GOLOSOV, V., & ERMOLAEV, O. How fast do gully headcuts retreat? **Earth-Science Reviews**, 154, p. 336-355. 2016.

WELLS, R.R., MOMM, H.G., RIGBY, J.R., BENNETT, S.J., BINGNER, R.L., DABNEY, S.M. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows. **Catena**, v. 101, p. 114–121, 2013.

ZANATTA, F.A.S., LUPINACCI, C.M., BOIN, M.N. Dinâmica erosiva linear: estudo de caso em área rural no oeste paulista. **Geografia**, v. 44, p. 273–294, 2020.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento dos projetos de pesquisa número 2023/16492-1 e 2024/00296-1.

Rafaella Aguiar Silva

Graduanda em Geografia pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) Campus de Rio Claro.
Avenida 24 A, 1515, CEP: 13506-900, Rio Claro – SP.
E-mail: rafaella.aguiar@unesp.br
Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-5591-7615>

Estêvão Botura Stefanuto

Doutor e mestre em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual Paulista (UNESP) Campus de Rio Claro. Atualmente é pesquisador em nível de pós-doutorado pelo Departamento de Geografia da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

Rua Carlos Gomes, 250, CEP: 13083-855, Campinas - SP
E-mail: ebs@unicamp.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6580-2563>

Cenira Maria Lupinacci

Doutora de Geociências e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) Campus de Rio Claro, Mestra em Geografia pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) Campus de Rio Claro. Atualmente é Professora Titular do Departamento de Geografia e Planejamento Ambiental – DGPA/IGCE/UNESP.

Avenida 24 A, 1515, CEP: 13506-900, Rio Claro – SP.
E-mail: cenira.lupinacci@unesp.br
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4732-1421>

Recebido para publicação em novembro de 2024.

Aprovado para publicação em agosto de 2025.