

Influência do Uso da Terra no Processo Erosivo de Voçorocamento em Cacequi, Rio Grande do Sul

Influence of Land Use on The Gully Erosion Process in Cacequi, Rio Grande do Sul

Lucas Krein Rademannⁱ
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil

François Laurentⁱⁱ
Le Mans Université
Le Mans, França

Romario Trentinⁱⁱⁱ
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil

Resumo: O estudo da erosão nas últimas décadas tem levado ao desenvolvimento de variadas técnicas de modelagem de dados para a compreensão deste fenômeno. Este trabalho objetiva mensurar o impacto do uso da terra em três voçorocas em Cacequi – RS. Foi aplicado o modelo empírico SCS-CN para a estimativa do escoamento superficial durante o período de 1975 a 2022 e o modelo EEFlux para a evapotranspiração dos cultivos atuais. O tipo de solo se mostrou a variável mais importante no escoamento superficial, apesar disso, as áreas de lavouras se mostraram mais propensas ao escoamento e as de silvicultura menos. Os dados de evapotranspiração evidenciam que os eucaliptos utilizam mais água do solo, podendo ter impacto na expansão das voçorocas, como a diminuição dos movimentos de massa e rebaixamento do nível de base, permitindo maior desenvolvimento vertical das voçorocas, sendo que estes impactos necessitam de estudos mais detalhados na área.

Palavras-chave: Erosão; Escoamento Superficial; Scs Curve Number; Evapotranspiração.

Abstract: The study of erosion in the last decades has led to the development of a variety of data modeling techniques to understand this phenomenon. This work aims to measure the impact of land use in three gullies in Cacequi – RS. The SCS-CN empirical model was

ⁱ Doutorando. Laboratório de Geologia Ambiental. lucasrademann@yahoo.com.
<https://orcid.org/0000-0003-3341-3357>

ⁱⁱ Doutor. Professor de Geografia, Laboratório Espace et Sociétés. francois.laurent@univ-lemans.fr.
<https://orcid.org/0000-0002-3833-2022>

ⁱⁱⁱ Doutor. Professor de Geografia, laboratório de geologia ambiental. romario.trentin@gmail.com.
<https://orcid.org/0000-0002-0615-2801>

applied to estimate the runoff from 1975 to 2022 and the EEFflux model to the evapotranspiration of the actual land use. The soil type proved to be the most important variable to runoff, despite that, the farming areas were the most runoff prone and the forestry the least. Evapotranspiration data show that eucalyptus trees use more water from the soil, which may have an impact on the expansion of gullies, such as a decrease in mass movements and lowering of the base level, allowing greater vertical development of gullies, and these impacts require further more detailed studies in the area.

Keywords: Erosion; Runoff; SCS Curve Number; Evapotranspiration.

Introdução

A erosão do solo é um fenômeno que afeta regiões do mundo todo, sendo responsável por diversos impactos ambientais, sociais e econômicos (HERNANI *et al.*, 2002; MORGAN, 2005) através da perda de solo, muitas vezes solo fértil, e a deposição de material em rios e barragens, alterando a dinâmica fluvial ou diminuindo a eficiência das barragens (BERTONI, LOMBARDI NETO, 2012; KUHN *et al.*, 2023; POESEN, 2018). As voçorocas se caracterizam pela maior forma de erosão, com maior perda de solo, tendo consequências ainda mais severas como aumento dos custos do cultivo agrícola, alteração na divisão de talhões, diminuição de produtividade em áreas adjacentes bem como a mudança na paisagem (MARDEN *et al.*, 2018; VALENTIN, POESEN, LI, 2005). Logo, surge a necessidade de estudos para compreender a dinâmica erosiva, estimar a quantidade de solo movimentado em diversos cenários, avaliar as áreas mais suscetíveis à erosão nos dias de hoje e prever futuros problemas relacionados, bem como prover embasamento científico para práticas de manejo mais eficientes a fim de mitigar os impactos erosivos (MORGAN, NEARING, 2011).

Em face a esta necessidade, houve o desenvolvimento de inúmeros modelos matemáticos para a análise da erosão através da interação das diversas variáveis ambientais e antrópicas que influenciam o processo erosivo em várias escalas, níveis de complexidade e com uma variação grande de parâmetros necessários (MORGAN, NEARING, 2011). Um dos primeiros estudos de modelagem de erosão foi desenvolvido por Wischmeier e Smith (1958) através da proposta da Equação Universal de Perda de Solo (USLE, sigla em inglês) que utiliza parâmetros de erosividade da chuva, erodibilidade do solo, condições topográficas e uso e manejo do solo, permitindo obter valores de volume de solo erodido em condições geomorfológicas e de uso e manejo do solo específicas (WISCHMEIER, SMITH, 1978).

Posteriormente foram realizadas diversas adaptações deste mesmo modelo, integrando dados de variação do escoamento superficial (WILLIAMS, BERNDT, 1977), melhoramento dos parâmetros de solo e topografia na nova RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*) (RENARD *et al.*, 1991). A partir de então, novos modelos matemáticos foram desenvolvidos e adaptados para diferentes áreas, atendendo as diferentes demandas de informações, permitindo obter dados de produção de sedimentos, consequências de eventos extremos de precipitação, mudanças no uso e manejo do solo (CHARLES R. MEYER *et al.*, 2001; DRAGIČEVIĆ, KARLEUŠA, OŽANIĆ, 2017; GODOI *et al.*, 2021; TAKKEN *et al.*, 2001).

Utilizando uma combinação de modelos empíricos e físicos, os modelos conceituais possuem uma abordagem mais sistêmica, integrando o balanço hídrico aos aspectos da erosão (RAZA *et al.*, 2021) e a influência dos cultivos de forma mais abrangente. Estes modelos tornaram a modelagem erosiva mais complexa, de maneira que integra diversos submodelos para descrever o comportamento da água, solo e vegetação (MORGAN, NEARING, 2011).

Um dos modelos conceituais mais utilizados é o *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). Este modelo hidrológico desenvolvido por Arnold *et al.* (1998) consiste em um modelo computacional que conjuga uma série de parâmetros físicos que permite simular diversos cenários com variadas condições de manejo do solo, erosão, transporte de sedimentos e químicos agrícolas em uma bacia hidrográfica (TRENTIN, ROBAINA, LAURENT, 2021). Por permitir a análise de uma ampla variedade de cenários e possuir vários submodelos relacionados à erosão, o SWAT é comumente utilizado para estudos de erosão em bacias hidrográficas, integrando o modelo SCS CN para estimar o escoamento superficial e o MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) para modelar a erosão (ADMAS *et al.*, 2022; DOS SANTOS *et al.*, 2023; VIGIAK *et al.*, 2015; ZANTET OYBITET, SAMBETO BIBI, ABDULKERIM ADEM, 2023).

O grande obstáculo para a aplicação dos modelos conceituais é a necessidade de um grande volume de dados de entrada devido a sua complexidade, tendo uma estreita relação entre a quantidade de variáveis obtidas através de dados primários e a precisão do resultado da modelagem (JAKEMAN, HORNBERGER, 1993). Os modelos semi-empíricos buscam um equilíbrio entre os modelos físicos e empíricos através da estimativa de dados de difícil acesso e formas de calibração para validar o modelo (LAURENT, RUELLAND, 2011), mesmo assim ainda são modelos complexos. Desta forma, o uso de equações empíricas tende a ser mais simples, podendo variar de complexidade de acordo com os dados disponíveis ao pesquisador.

O método *SCS curve number* (SCS-CN) para a determinação do escoamento superficial é uma equação empírica desenvolvida pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) dos Estados Unidos (USDA, 1986) que permite estimar o escoamento superficial de um local variando o uso e o tipo de solo. Este modelo necessita de menor número de variáveis de entrada e apresenta uma boa assertividade de estimativa do escoamento, sendo muito comum o seu uso nos estudos hidrológicos, de engenharia e geomorfologia (KRISNAYANTI *et al.*, 2021; PATHAN, JOSHI, 2019; WANG *et al.*, 2015; XIAO *et al.*, 2011; ZAKWAN, 2018), sendo um dos submodelos incorporados ao SWAT (NEITSH *et al.*, 2009) e diversos outros modelos.

A equação SCS-CN possui apenas um parâmetro chamado *curve number* que é determinado pelo tipo de cobertura vegetal, manejo do solo, características físicas do solo, como textura e condição hidrológica, e a sua umidade antecedente (NEITSH *et al.*, 2009). Neste modelo o valor do escoamento superficial é altamente dependente do índice de abstração inicial (I_a), que é dado na equação original como valor $0,2S^1$ (USDA, 1986). O valor de abstração inicial consiste na evaporação, interceptação, infiltração e capacidade de retenção de água em superfície (KRAJEWSKI *et al.*, 2020). Porém diversos autores têm chamado a atenção para o valor do I_a , que pode variar de forma significativa nas diferentes condições de solo, vegetação e clima, tendo sido adotado um novo valor padrão de 0,05S, definido através da obtenção primária deste dado em diversas bacias

hidrográficas em diferentes condições geomorfológicas (BALTAS, DERVOS, MIMIKOU, 2007; SHI *et al.*, 2009; WOODWARD *et al.*, 2012).

Estimar o escoamento superficial é uma etapa importante para conhecer o balanço hídrico de uma região, sendo este crucial para compreender a dinâmica da erosão da água. É sabido que as voçorocas possuem uma forte relação com a disponibilidade de água, tanto superficial quanto em subsuperfície (BERNATEK-JAKIEL, POESEN, 2018; ZEGEYE *et al.*, 2020). A medição da evapotranspiração (Eta) das plantas é uma forma de complementar os dados de escoamento superficial, possibilitando saber o consumo de água dos diferentes cultivos e consequentemente a água disponível no solo e capacidade de recarga do lençol freático (PEARCE *et al.*, 1987; SCOTT, BRUIJNZEEL, MACKENSEN, 2005; TU *et al.*, 2023; ZHUO, 1992).

Considerando os parâmetros da equação SCS-CN, é possível obter dados da influência das características pedológicas e do uso da terra no escoamento superficial sem a necessidade de grande volume de dados. O presente trabalho busca mensurar o impacto da dinâmica do uso da terra nas últimas décadas em uma área de voçorocamento, estabelecendo o valor de escoamento superficial para áreas próximas às voçorocas com diferentes tipos de ocupação antrópica em solos de variadas texturas utilizando o modelo SCS-CN e avaliando a evapotranspiração dos diversos cultivos, a fim de mensurar o impacto destas classes de uso no balanço hídrico e, portanto, na erosão.

Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho é situada na cabeceira de drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Areal do Limeira de 6ª ordem, no município de Cacequi, sul do Brasil (Figura 1) em uma extensão que abrange três voçorocas (V1, V2 e V3). A litologia da região é composta pela Formação Piramboia (CPRM, 2006) que é constituída por depósitos de arenitos finos e médios, moderadamente selecionados, avermelhados, portadores de estratificações cruzadas. O relevo é composto por colinas onduladas com declividades entre 5 a 15% e amplitude altimétrica inferior a 50 metros (RADEMANN, TRENTIN, ROBAINA, 2016). O regime pluviométrico é de aproximadamente 1600mm bem distribuídos ao longo do ano, definido como Cfa, com verões quentes, subtropical de acordo com a classificação Köppen-Geiger (ALVARES, STAPE, SENTELHAS, 2013).

As feições erosivas da área de estudo apresentam mecanismos e intensidades distintos, sendo que as voçorocas V1 e V2 são mais profundas, aproximadamente 23,5m e 21,5m, respectivamente, com comprimento de 801 (V1) e 492m (V2), e possuem a ocorrência de movimentos de massa em quase toda a feição erosiva, apresentando fundo de materiais retrabalhados tomando forma em V. Já a V3 é a que possui menor profundidade (19m), tendo menor ocorrência de movimentos de massa e com fundo ligeiramente plano e paredes laterais com declividades mais suaves nos seus 696m de comprimento. Nestas voçorocas o lençol freático atua como limite para o desenvolvimento vertical. Estima-se que as feições erosivas nesta área possuam mais de 200 anos de idade, antecedendo a ocupação antrópica intensiva da área (CABRAL, 2004), porém, nas últimas décadas, houve grandes mudanças no uso da terra (RADEMANN, TRENTIN, ROBAINA, 2019), havendo alternância entre campos nativos e de pastoreio do gado, lavouras e mais recentemente a silvicultura através do plantio de eucaliptos

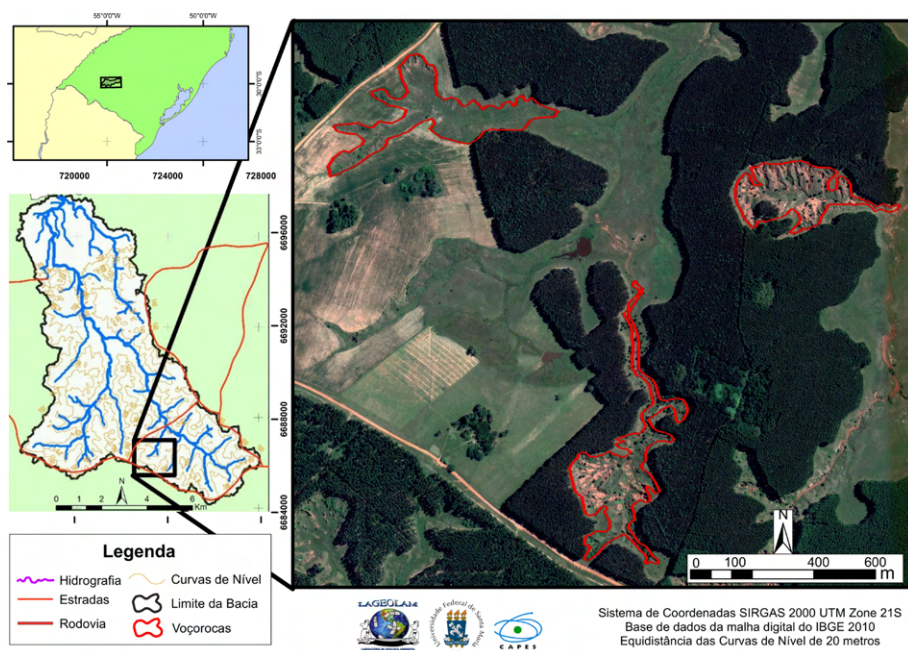


Figura 1 – Localização da área de estudo no município de Cacequi, RS.

Metodologia

O mapeamento do uso da terra na área de estudo ocorreu através da interpretação visual de imagem, avaliando o padrão de vegetação, rugosidade da forma, cor e outros elementos fotogramétricos. Para o ano de 1975 foram utilizadas imagens aéreas disponibilizadas pelo Departamento de Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro. As imagens foram as utilizadas pelo mesmo órgão federal para a elaboração de cartas topográficas em escala de 1:50.000, que foram utilizadas como apoio para a interpretação dos usos nesta data. Para o mapa do uso da terra no ano de 2003 foi utilizada uma imagem disponível gratuitamente no software *Google Earth*.

Já as imagens utilizadas para a interpretação do uso da terra no ano de 2022 foram obtidas através do uso de um VANT onde foi aplicada a ferramenta SfM-CMVS descrita e utilizada por diversos autores (MICHELETTI, CHANDLER, LANE, 2015; MLAMBO *et al.*, 2017; WESTOBY *et al.*, 2012). Para tanto, foram realizados três voos com o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) Phantom 4 Pro da fabricante DJI a uma altura de 150m, coletados 30 GCPs na área e posteriormente processados no software Agisoft Metashape onde foi obtido o ortomosaico com resolução espacial de 10,8cm que possibilitou a interpretação do uso da terra.

Visando obter as informações de solo foram coletadas 14 amostras da camada superficial em duas inspeções de campo distintas, sendo as amostras 1, 5, 7, 9, 10, 11, 12 e A

realizadas em março de 2023 e as amostras 4_2, 5_2, 6_2, 7_2, 9_2 e 10_2 realizadas em julho de 2023. A partir destas amostras de solo foi realizado o ensaio de granulometria seguindo as normas da NBR 7181 (1984) permitindo a classificação textural do solo. As amostras foram coletadas de forma que estivessem distribuídas nos diferentes tipos de uso atual nas áreas adjacentes às voçorocas ou onde foram observadas mudanças texturais, conforme o mapa da Figura 2.

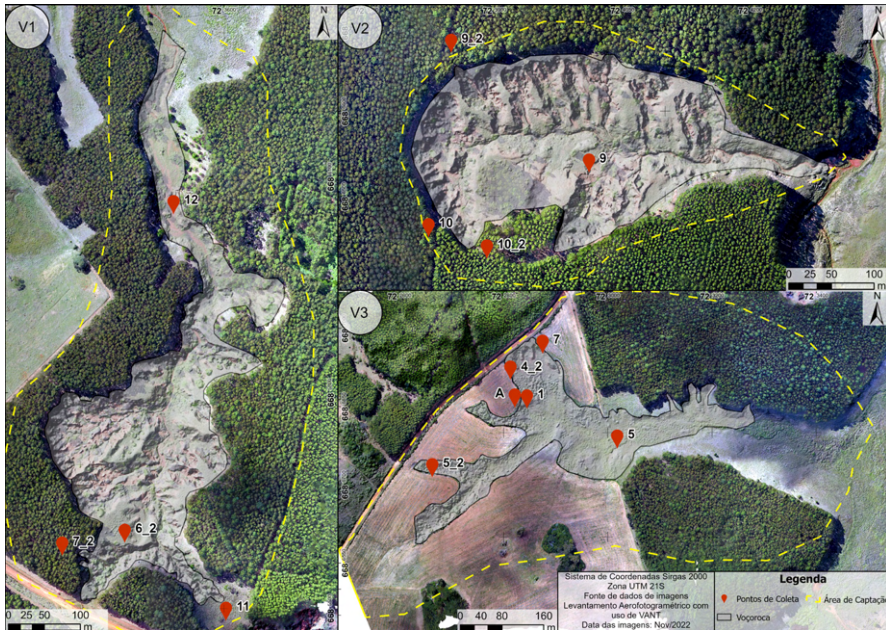


Figura 2 – Localização dos pontos de coleta de amostra de solo.

Para a estimativa direta dos dados de escoamento superficial foi utilizado o modelo empírico desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) dos Estados Unidos chamado de SCS *Curve Number*. Este modelo utiliza dados de uso da terra, tipo e características do solo, em função da precipitação e umidade antecedente do solo. Desta forma, o modelo é expresso pela função:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)}$$

onde Q_{surf} é o escoamento acumulado ou excesso de precipitação (mm), R_{day} corresponde ao evento de precipitação diário (mm), I_a é a abstração inicial que inclui o armazenamento em superfície, interceptação e infiltração antes do escoamento (mm) e S é o parâmetro de retenção (mm). De acordo com o USDA (1986), o parâmetro de retenção varia espacialmente de acordo com o tipo de solo, uso da terra, manejo e declividade e temporalmente de acordo com o conteúdo de água no solo. Então, o parâmetro de retenção é definido pela equação:

$$S = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

onde o CN é o *curve number* do dia. O índice de abstração, de acordo com o USDA é de aproximadamente 0,2S porém diversos estudos afirmam que o melhor valor é de 0,05S (BALTAS, DERVOS, MIMIKOU, 2007; SHI *et al.*, 2009; WOODWARD *et al.*, 2012), sendo este utilizado nesta pesquisa, desta forma a equação simplificada passa a ser:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0,05S)^2}{(R_{day} + 0,95S)}$$

Desta forma, o escoamento superficial só ocorre quando a precipitação for maior do que a abstração inicial. Ainda, os valores de CN e grupo hidrológico foram obtidos da tabela original proposta pelo USDA (1986) resultando nos valores para condição normal de umidade (CN2) apresentados na Tabela 1, onde os solos variam de A a D de acordo com a textura, sendo que os solos arenosos são de classe A e os mais argilosos – classe D.

Tabela 1 – Características do uso da terra e granulometria do solo nas amostras coletadas em 2022

Ponto	Textura	Grupo Hidrológico do Solo	Tipo de Uso	CN2
1	Argilo-Arenoso	D	Campo Nativo	83
5	Franco-argiloso-arenoso	C	Campo Nativo	77
7	Franco-argiloso-arenoso	C	Campo Nativo	65
9	Franco-argiloso-arenoso	C	Campo Nativo	65
10	Areia franca	A	Silvicultura	30
11	Franco arenoso	A	Campo com pastagem	39
12	Franco arenoso	A	Campo Nativo	35
10_2	Areia Franca	A	Silvicultura	30
4_2	Franco arenoso	A	Lavoura orientada c/ curvas de nível e pousio	64
5_2	Franco arenoso	A	Lavoura orientada c/ curvas de nível e pousio	64
6_2	Areia Franca	A	Campo com pastagem	39
7_2	Franco-argiloso-arenoso	C	Silvicultura	70
9_2	Areia Franca	A	Silvicultura	30
A	Franco arenoso	A	Lavoura orientada c/ curvas de nível e pousio	64

O modelo SCS também permite a estimativa do escoamento superficial em diferentes condições de umidade do solo, sendo ele seco (CN1), normal (CN2) e úmido (CN3). As equações para os cálculos do *curve number* nas condições seca e úmida são:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \cdot (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.0636 \cdot (100 - CN_2)])}$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0.00673 \cdot (100 - CN_2)]$$

Para avaliar o consumo de água dos diferentes tipos de uso da terra foram avaliados os valores de Evapotranspiração Diária atual (ETa) obtidos através do portal EEFlux (*Earth Engine Evapotranspiration Flux*) desenvolvido pelas universidades do Nebraska-Lincoln e Idaho e o *Desert Research Institute* dos Estados Unidos. EEFlux utiliza a banda termal do satélite Landsat para conduzir o cálculo do balanço de energia da superfície e bandas de ondas curtas para estimar a quantidade de vegetação, albedo e rugosidade da superfície, ainda utiliza a base de dados do Climate Forecast System (CFSv2) para os dados climáticos, permitindo assim calcular a ETa dos pixels de cada imagem disponibilizada pelo conjunto de satélites Landsat.

Foram analisados os dados de ETa do verão dos anos de 1999, 2003, 2012 e 2022 nas áreas de captação das voçorocas. Os dados para o inverno não são apresentados pois não há evapotranspiração significativa, sendo o período de verão suficiente para avaliar as diferenças entre os cultivos. Para a estimativa da ETa nos diferentes usos da terra, foi obtido o valor médio do pixel pertencente ao polígono de cada classe do uso no ano de 2022. É importante ressaltar que os dados de ETa são diários e podem variar de acordo com a condição climática no dia da imagem, não sendo confiável a comparação temporal, mas sim a comparação entre as áreas na mesma imagem.

Resultados

Uso da Terra

O oeste do Rio Grande do Sul passou por diversas transformações da paisagem nas últimas décadas que passa pela mudança do uso da terra, de acordo com as dinâmicas econômicas da época (SUERTEGARAY, MORELLI, 2010). A vegetação nesta porção do estado gaúcho é composta predominantemente por gramíneas e outras plantas herbáceas (ALVES, 2008), sendo uma área muito utilizada para a pecuária.

No mapa de uso do ano de 1975 na área de estudo é possível observar o predomínio de campos nativos nas bacias de captação das voçorocas 1 e 2 principalmente, representando 98% e 100% da área respectivamente (Figura 3). Já na V3 é observado um uso misto, com maior interferência antrópica, tendo 36% da sua área ocupada por lavouras de cultivo temporário, 62% de campos nativos e apenas 2% da área com a presença de mata.

Nas décadas seguintes houve uma intensificação da agricultura nestas áreas, sobretudo na área da V1 que passou a apresentar, no ano de 2003, 55% da sua área ocupada por lavouras (Figura 4). Este aumento está relacionado principalmente à implementação de uma residência rural próxima à voçoroca, ocupando 0,41% da área de captação, restando 43,8% da área com campos nativos e cerca de 0,72% de mata, também associada à residência rural.

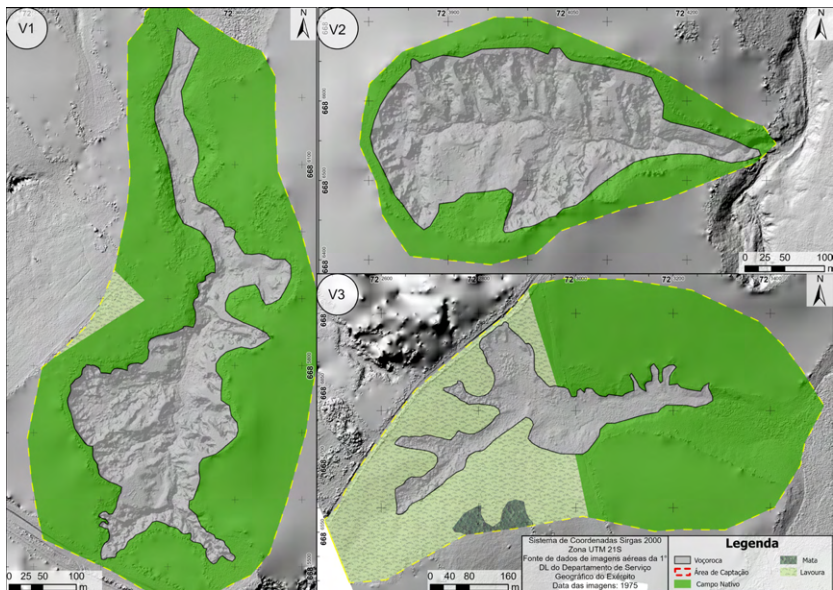


Figura 3 – Mapa de uso e ocupação do solo nas áreas de captação das voçorocas no ano de 1975.

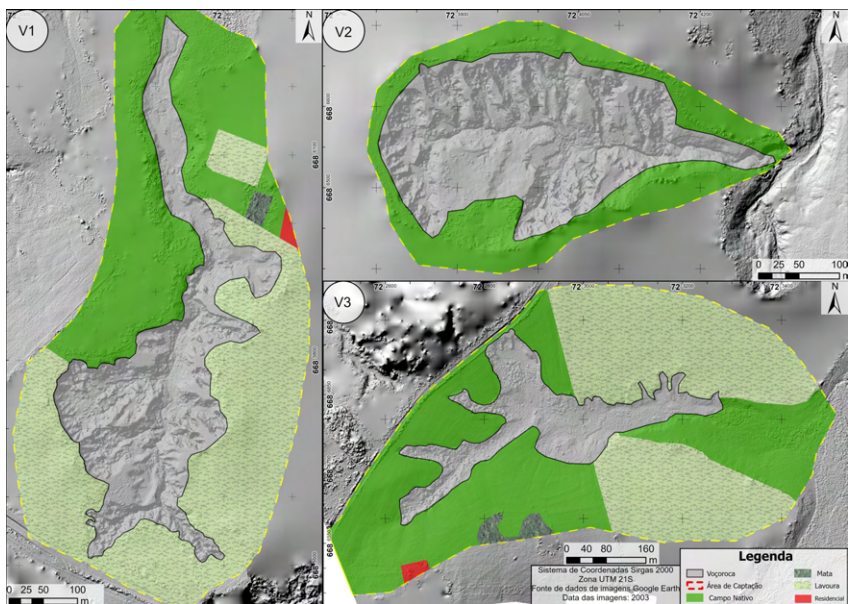


Figura 4 – Mapa de uso e ocupação do solo nas áreas de captação das voçorocas no ano de 2003.

Na área de captação da V3, assim como na V1, houve uma intensificação do uso da terra aumentando a área de lavouras em mais de 10%, passando a ocupar 46,3% da área. Nesta área também houve uma implementação de uma residência rural, ocupando 0,5% da área total e associada a uma diminuição da área de mata, e campo com pastagens para a criação de gado, que passaram a ocupar 1,5% e 51,7% da área, respectivamente. Mesmo que ocupem pequenos espaços próximos às voçorocas, as áreas residenciais estão ligadas a intensificação do uso de lavouras. Já na voçoroca V2, por se tratar de uma bacia quase que completamente ocupada pelo processo erosivo, possui menor dinâmica no uso da terra e se manteve com o uso de campo utilizado para a pecuária.

No oeste do Rio Grande do Sul houve a implementação de grandes áreas de silvicultura após o início dos anos 2000, mesmo nas áreas de ocorrência de intensos processos erosivos (SILVA, 2012), devido ao fato de serem áreas agrícolas menos produtivas e consequentemente mais baratas (SUERTEGARAY, MORELLI, 2010). Na área de estudo, de acordo com Rademann *et al.*, (2023), foi implementado o sistema de silvicultura no ano de 2010, refletindo na distribuição do uso da terra do ano de 2022, onde grandes áreas são ocupadas pela silvicultura. No caso da V2, toda a sua área de captação é ocupada por floresta de eucaliptos, como é possível observar no mapa da Figura 5.

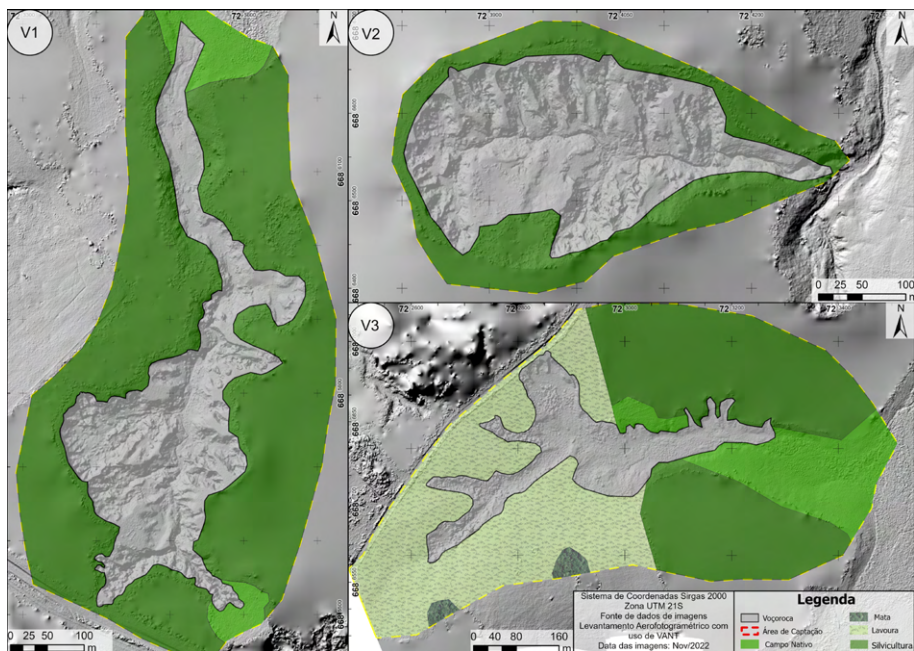


Figura 5 – Mapa de uso e ocupação do solo nas áreas de captação das voçorocas no ano de 2022.

Na área de captação da voçoroca V1 também houve uma intensa ocupação de silvicultura, cobrindo 92% da área, mantendo apenas 8% de campos com pastagem de

gado. Nesta data já não é mais possível observar a residência próxima à voçoroca, que possivelmente foi desocupada no momento da implantação da silvicultura.

Na voçoroca V3 a implantação da silvicultura foi menor, ocupando no ano de 2022 aproximadamente 45% da área de captação. Na montante da área de captação houve a implantação de lavouras temporárias, correspondendo a 39% da área total. Restaram ainda 15% dos campos nativos na porção mais baixa e 1% da área de matas localizada na porção superior.

De modo geral podemos afirmar que a área de captação da V2 foi a que apresentou menor intervenção antrópica, tendo apenas após o ano de 2010 a implantação da silvicultura. Já a V3 é mais afetada pela dinâmica do uso, tendo desde o início da série histórica uma porção da área ocupada por lavoura e tendo nos dias atuais um mosaico de usos mais variado que as demais voçorocas estudadas. A V1 teve ocupação mais intensa registrada no ano de 2003, associada à implementação de lavouras em consequência do estabelecimento de uma residência próxima à voçoroca, posteriormente, houve um predomínio de silvicultura. Assim fica evidente o dinamismo do uso da terra nestas áreas, com cultivos e manejos distintos que podem influenciar nestes processos erosivos, sendo necessário avaliar e quantificar esta influência nas voçorocas.

Escoamento Superficial

Ao analisar o escoamento superficial obtido através do uso da equação SCS-CN nos pontos de coleta de solo, podemos verificar que o resultado do modelo avalia um escoamento superficial significativamente maior nos solos com horizontes superficiais mais argilosos (1, 5, 7_2, 7 e 9). Estes pontos apresentam diferentes usos da terra, mas pertencem a grupos hidrológicos semelhantes, de classe C e D, indicando que a característica física do solo possui maior influência no escoamento superficial do que a cobertura vegetal. No gráfico da Figura 6 podemos observar que nos eventos de precipitação inferiores a 40mm há maior diferença do Q_{surf} de uma amostra de solo para a outra e na medida que cresce o valor de precipitação a diferença relativa tende a diminuir. Desta forma, podemos afirmar que, de acordo com o modelo, o tipo de solo e cobertura não só influenciam no quanto do volume precipitado será escoado, mas também qual o valor crítico para o início do escoamento superficial.

Mesmo que as características do solo tenham um peso maior no escoamento superficial, é observado um valor mais elevado de escoamento nos solos com mesma característica hidrológica presentes em áreas de lavouras (Figura 7A) do que os presentes nos demais usos. Após as lavouras, os campos com pastagem (Figura 7B) possuem maior propensão ao escoamento superficial, seguido dos campos nativos (Figura 7C) nos quais não há a compactação do solo pelo gado e há uma maior quantidade de arbustos, aumentando a infiltração da água (PETSCH *et al.*, 2022). A classe de uso que mostrou possuir menor disposição ao escoamento superficial é a silvicultura (Figura 7D), onde há a formação arbórea e a formação de serrapilheira sob a camada superficial do solo, protegendo do escoamento superficial (TU *et al.*, 2023).

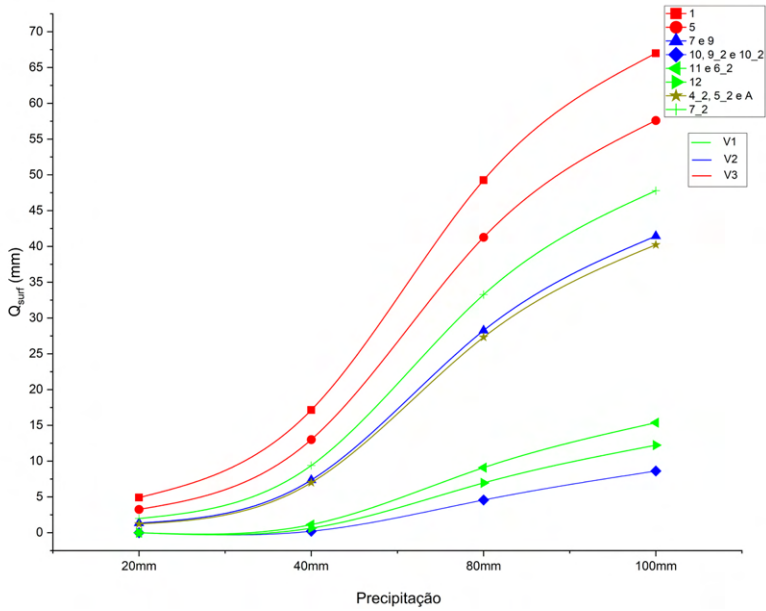


Figura 6 – Estimativa do escoamento superficial do solo para as amostras coletadas considerando a saturação do solo normal.



Figura 7 – Diferentes classes de uso da terra encontrados na área de estudo. A – Lavouras; B – Área de campos com pastagem; C – Campos nativos; D – Silvicultura.

Quando observados os solos de condição hidrológica A na classe de lavoura (ponto A) e em silvicultura (9_2) é observado o início do escoamento superficial com menor volume de chuva no ponto A (20mm) que só será observado no ponto 9_2 a partir de 40mm de precipitação. Outro aspecto desta diferença é que com uma precipitação de 40mm o ponto de lavoura apresenta 33x mais escoamento que o ponto da silvicultura, mas esta diferença diminui de acordo com o aumento do evento de precipitação, passando de 80mm e 100mm a 6x e 4,6x, respectivamente.

Ao analisar a estimativa do escoamento superficial considerando diferentes condições de umidade antecedente é possível constatar que em condições de solo seco é necessário um evento pluviométrico mais volumoso para dar início ao escoamento superficial. Ao comparar os perfis de solos do mesmo grupo hidrológico, mas com classes de uso distintas é observado que na condição de solo seco o escoamento calculado pelo modelo é muito baixo nos casos dos campos nativos e de pastagem bem como na silvicultura (Figura 8) e apresentando valores significativamente abaixo do normal, em média 2 a 3x menor, nas áreas de lavouras.

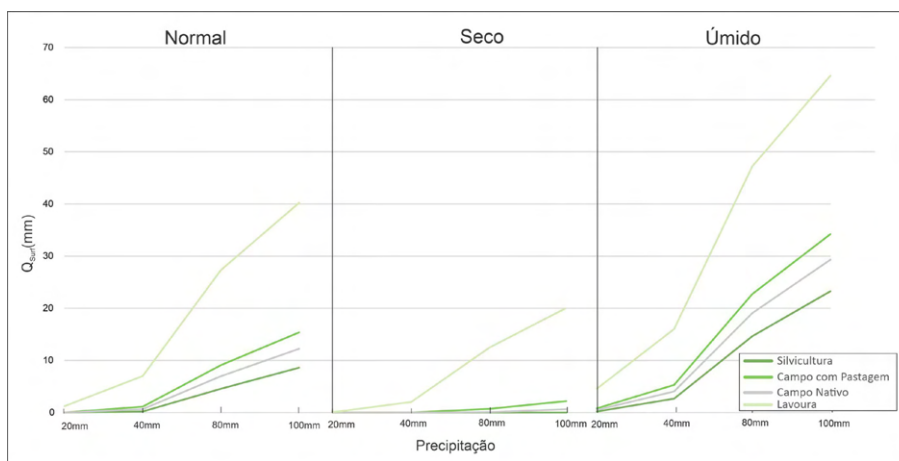


Figura 8 – Estimativa do escoamento superficial de amostras de solo do mesmo grupo hidrológico em diferentes classes de uso e em condições de solo normal, seca e úmida.

Já na condição de solo úmido é constatado, como esperado, um ponto de início do escoamento superficial com uma precipitação menor. Os valores de escoamento superficial são maiores quando a condição de umidade antecedente do solo é maior, mas a diferença relativa entre os tipos de uso é inferior do que na condição seca. Desta forma é possível afirmar que as condições extremas de umidade do solo atenuam as diferenças no uso da terra em relação à erosão, tendo em vista que o tipo de solo tem um papel mais importante nestas condições.

Considerando o escoamento superficial ao longo do período de estudo é observada a variação das taxas de escoamento nos pontos de coleta onde houve uma mudança no uso e manejo da terra (Figura 9). O ponto 7_2 apresenta maiores valores de escoamento

mesmo possuindo três tipos de uso da terra no período, mostrando que a característica do solo possui grande peso na taxa de escoamento.

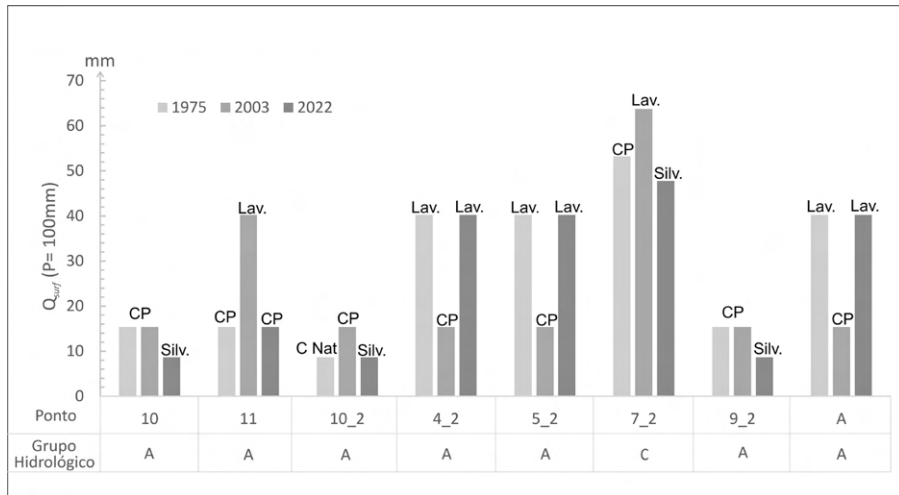


Figura 9 – Variação do escoamento superficial nos pontos de coleta ao longo da série histórica de 1975 a 2022 considerando uma precipitação de 100mm e uma umidade antecedente normal. Onde: CP = campo com pastagem; Lav. = lavouras; C Nat = campo nativo; e Silv. = silvicultura.

Nos demais pontos de amostra que compreendem o mesmo grupo hidrológico é notório que a classe de uso de lavoura apresenta os maiores valores de Q_{surf} e que a implementação da silvicultura resultou em uma diminuição do escoamento superficial na área, sendo o uso com as menores taxas de escoamento. Apesar disso, como observado no ponto 10_2, os campos nativos sem a utilização para a pastagem do gado apresentam valores similares aos da silvicultura.

Sob uma perspectiva geral são observados valores mais altos de escoamento ao longo do tempo nos pontos 4_2, 5_2, 7_2 e A, todos eles localizados na bacia de captação da V3. Esta área foi a que apresentou ao longo da série histórica maior intervenção antrópica e também apresenta os maiores índices de escoamento superficial.

A bacia de captação da V3 é a que apresenta o maior valor médio de escoamento superficial quando comparada com as demais, conforme demonstra o gráfico da Figura 10, apesar de apresentar uma pequena queda no ano de 2003 que se deve ao fato das amostras estarem localizadas na porção superior da bacia onde houve a implantação de campos de pastagem na época, não refletindo o uso geral da bacia como mostra o mapa da Figura 4.

As áreas de captação das voçorocas V1 e V2 apresentaram valores médios de escoamento superficial semelhantes, sendo ligeiramente inferiores na V2. Estas áreas possuem solos mais arenosos e, portanto, maior capacidade de infiltração da água no solo. É possível notar que na V1 o ano de 2003 possui valores mais elevados de Q_{surf} estando

relacionado à implantação de lavouras na maior parte da porção superior da bacia de captação. Também é possível afirmar que em ambas as áreas, após a implantação da silvicultura, houve uma diminuição da taxa de escoamento superficial.

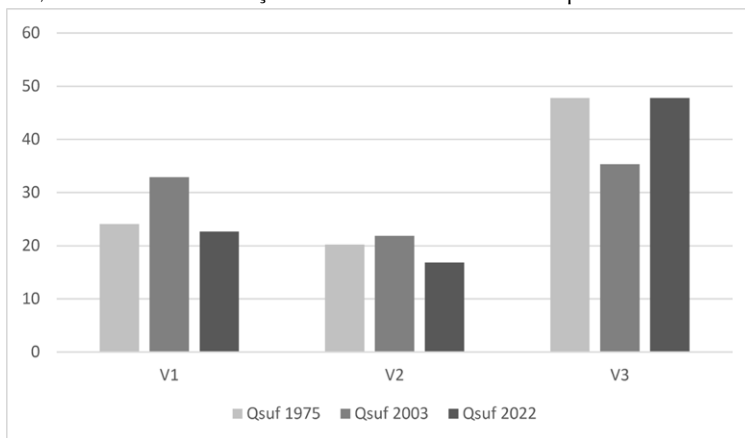


Figura 10 – Série histórica do escoamento das bacias de captação de acordo com CN médio dos pontos coletados considerando um evento de precipitação de 100mm.

A influência da dinâmica do uso da terra nas bacias de captação da área alvo pode ser observada no gráfico da Figura 11, onde foi considerado o mesmo tipo de solo (grupo hidrológico A) para toda a bacia de captação para isolar o fator uso da terra na equação do CN. É possível verificar que a V3 possui valor de CN mais elevados que as demais voçorocas, sendo a área onde o tipo de uso da terra mais favorece o escoamento superficial ao longo dos anos estudados.

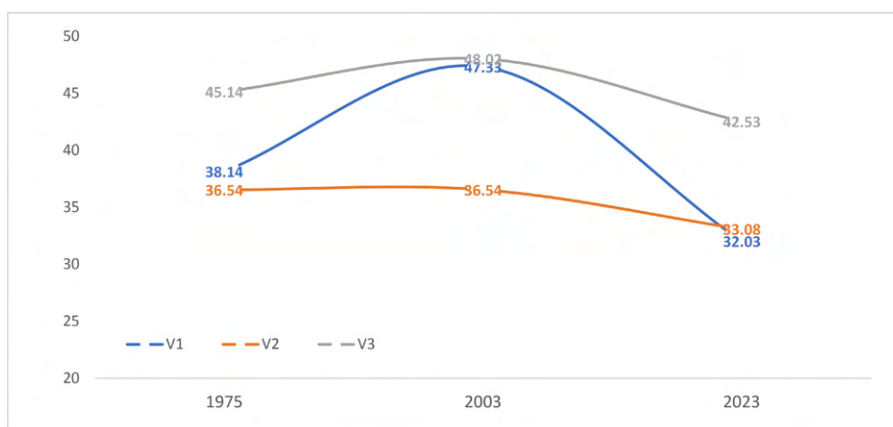


Figura 11 – CN médio de cada bacia de captação ao longo da série histórica sem considerar o tipo de solo.

No ano de 2003 a área de captação da V1 apresentou uma grande elevação no valor de CN, consequência de um período com maior intervenção antrópica, como ressaltado anteriormente. No âmbito geral a bacia de captação da V2 apresentou os menores valores, pois o uso da terra nesta área foi de campos de pastagem e posteriormente a implantação da silvicultura, tendo o seu menor valor atualmente. Em todos os casos, a silvicultura resultou em uma grande diminuição do valor da CN, evidenciando que a ocupação de áreas de floresta plantada tornou as áreas próximas às voçorocas menos propensas ao escoamento superficial.

Do mesmo modo, ao isolar o fator uso da terra, considerando o mesmo uso para todas as amostras, podemos analisar a influência das características do solo no valor da CN. Através do gráfico da Figura 12 podemos afirmar que, pelas características médias das amostras coletadas, a área de captação da voçoroca V3 possui maior predisposição para a ocorrência do escoamento superficial devido à presença maior de material argiloso nos horizontes superficiais. Já as áreas da V1 e V2 não apresentam grande diferença mesmo que a V2 possua valores inferiores.

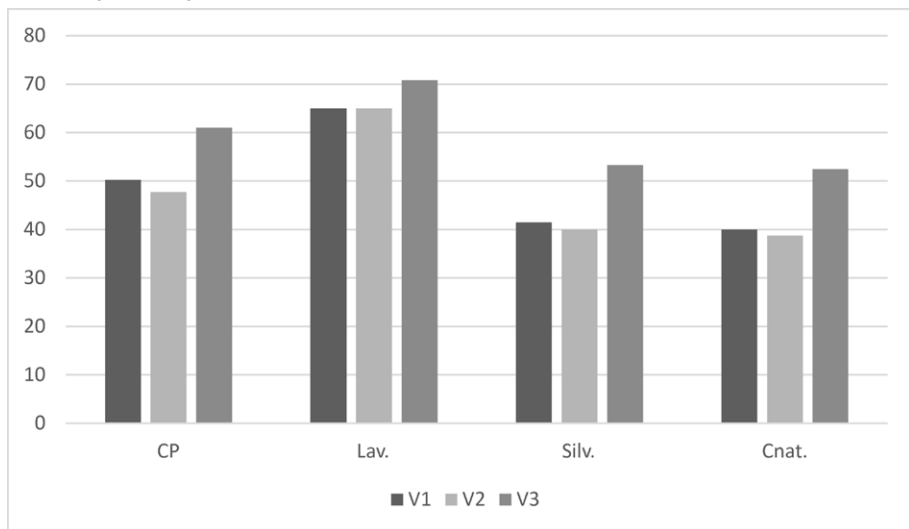


Figura 12 – CN médio dos pontos de cada bacia de captação considerando o grupo hidrológico do solo e o mesmo uso da terra para toda bacia de captação. Onde: CP corresponde a campos com pastagem; Lav. lavouras; Silv. silvicultura e Cnat. campos nativos.

É possível observar um valor maior do CN no uso de lavouras bem como uma diferença menor entre as áreas analisadas nesta classe, onde o valor é cerca de 10% maior na V3 em relação às demais, já nas outras classes de uso esta diferença é de aproximadamente 30%. Esta condição indica que usos da terra que favorecem o escoamento superficial tendem a atenuar a diferença entre os tipos de solo. Como observado anteriormente os usos de silvicultura e campos nativos são os que apresentam menor valor de CN. De modo geral as características físicas do solo das amostras coletadas na V1 e V2 são

similares, sendo o uso do solo o principal fator que diferencia o escoamento superficial nestas áreas. Já na V3 as características de solo favorecem o escoamento, contribuindo para os maiores valores de Q_{surf} encontrados anteriormente (Figura 10).

O tipo de uso da terra, bem como a vegetação que cobre o terreno, interfere de diversas formas na retenção, consumo e escoamento da água que chega ao solo, ou seja, no balanço hídrico. De forma a auxiliar na compreensão do impacto destes diferentes usos da terra foram analisados os dados de evapotranspiração da vegetação na área de estudo (Figura 13). Quando comparados os valores de evapotranspiração diários no período do verão nas áreas de captação observamos uma semelhança entre os valores das V1, V2 e V3, porém é notável que no ano de 2003 houve uma diminuição mais acentuada na V1, possivelmente associado ao maior uso de lavouras neste período. Da mesma forma, houve um aumento maior na mesma bacia após a implementação da silvicultura no ano de 2010 pelo fato da silvicultura representar maior porcentagem da área total na área de captação da V1.

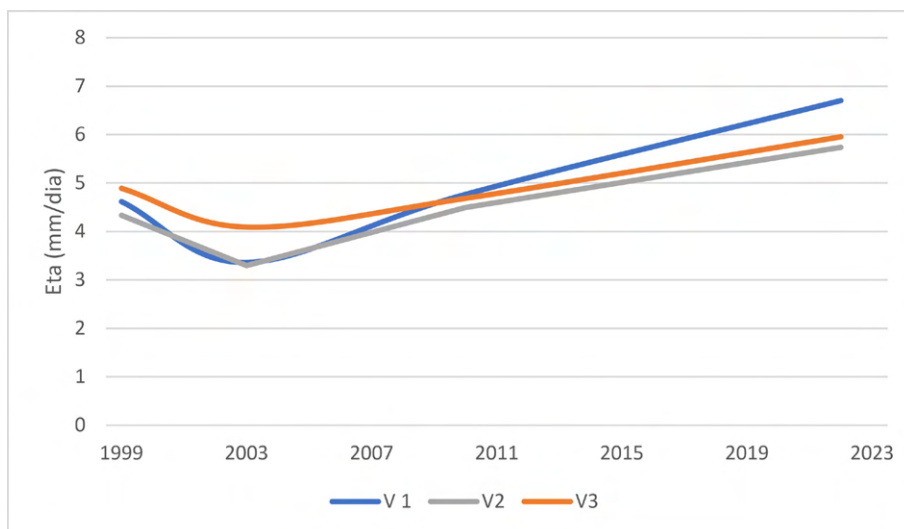


Figura 13 – Valor médio do pixel de evapotranspiração diária em dias de verão nos anos de 1999, 2003, 2012 e 2022 nas áreas de captação das voçorocas.

AV2 é a que apresenta menor valor de evapotranspiração na maior parte do período analisado. Esta bacia possui a menor área entre as três analisadas, sendo que a maior parte é ocupada pela voçoroca, que possui vegetação mais baixa e muitas porções sem a presença de vegetação, com solo ou rocha expostos, resultando em valores inferiores de ETa. Já a V3 é a que possui atualmente menor porcentagem de área ocupada pela silvicultura e por este motivo o aumento da ETa nesta bacia de captação foi menos acentuado.

Quando analisados os valores médios de ETa dos diferentes tipos de uso da terra é possível afirmar que as áreas de silvicultura possuem maior perda de água por evapotranspiração que os demais usos da área de estudo (Figura 14), com valores semelhantes

a outros trabalhos já realizados (NOSETTO, JOBBÁGY, PARUELO, 2005; SCOTT, BRUIJNZEEL, MACKENSEN, 2005). Já as áreas de lavoura são as que possuem menor valor de ET_a , mantendo mais água no solo e, portanto, estas áreas podem atingir a saturação de água mais facilmente.

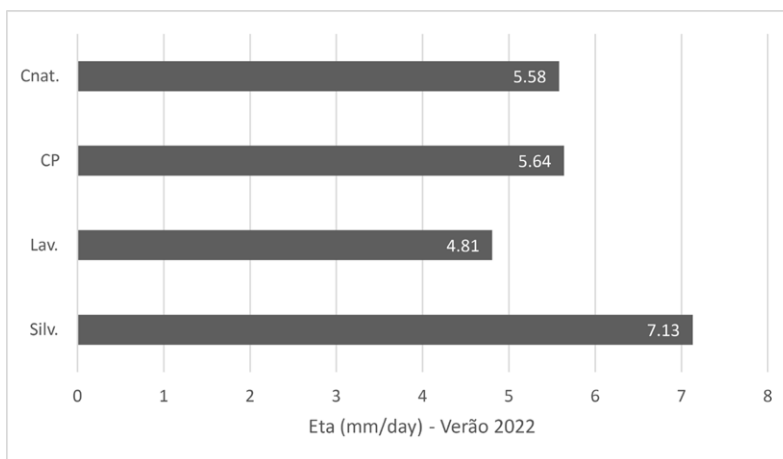


Figura 14 – Evapotranspiração média por tipo de uso da terra no verão de 2022.

As classes de uso de campos nativos e campos com pastagens possuem valores intermediários de evapotranspiração, tendo, na média, valores bastante semelhantes. Desta forma podemos afirmar que a transição de campos e lavouras para a silvicultura na área próxima às voçorocas acarretou em valores médios de ET_a mais elevados, diminuindo a água disponível no solo, cujo o impacto na erosão pode variar dependendo do mecanismo erosivo predominante na área.

Discussões

O impacto do plantio de florestas nos processos erosivos é um tema bastante discutido na comunidade científica, sendo uma das principais medidas sugeridas para a diminuição da erosão por diversos autores (PARKNER *et al.*, 2006; PROSSER, SOUFI, 1998; TU *et al.*, 2023; WEN *et al.*, 2023). A vegetação florestal diminui o escoamento superficial, protege da chuva a camada superficial do solo, aumenta a sua estabilidade através do incremento da matéria orgânica e também a capacidade de infiltração da água (CAO *et al.*, 2023; TU *et al.*, 2023), tendo assim grandes efeitos na diminuição da erosão das camadas superficiais do solo.

Porém as voçorocas possuem mecanismos erosivos que atuam em subsuperfície, não se limitando ao comportamento do escoamento superficial, mas também a água de subsuperfície e o lençol freático com a atuação de *piping* e movimentos de massa (BERNATEK-JAKIEL, WRÓŃSKA-WAŁACH, 2018; MARDEN *et al.*, 2018; RADEMANN, TRENTIN, ROBAINA, 2022; STEFANUTO, LUPINACCI, 2023), sendo muitas vezes o lençol freático o limite para a expansão vertical das voçorocas (ADDIS *et al.*, 2015; POE-

SEN *et al.*, 2003). Desta forma, o impacto do plantio de florestas de eucaliptos pode ser diferente em voçorocas com a atuação de processos erosivos subsuperficiais, podendo apresentar menor eficiência na diminuição do avanço do processo erosivo (MARDEN *et al.*, 2005; NYSSSEN *et al.*, 2006; PEARCE *et al.*, 1987) ou até mesmo reativar o processo erosivo (FACADIO, SATO, COELHO NETTO, 2023).

Devido ao alto consumo de água demonstrado pelos valores de evapotranspiração elevados, a substituição de campos nativos por eucaliptos diminui a quantidade de água em subsuperfície (JAGGER, PENDER, 2003; NOSETTO, JOBBÁGY, PARUELO, 2005; SCOTT, BRUIJNZEEL, MACKENSEN, 2005). Esta diminuição ocorre principalmente em períodos mais secos e nas camadas superficiais do solo, onde as raízes das árvores são mais abundantes (NOSETTO, JOBBÁGY, PARUELO, 2005; PEARCE *et al.*, 1987), podendo afetar a recarga do lençol freático e conseqüentemente diminuir o nível de base e o volume de água do canal de drenagem a jusante (MACFARLANE *et al.*, 2018; SEMA, 2010; ZOLFAGHAR *et al.*, 2017).

Ao analisar a substituição dos campos nativos por silvicultura no Pampa argentino na província de Corrientes, NOSETTO, JOBBÁGY e PARUELO (2005) constataram que a silvicultura utiliza 81% mais água do que os campos nativos e mantém a taxa de evapotranspiração crescente com o aumento da precipitação, ao contrário dos campos nativos, que possuem um máximo de ETa com condições de balanço hídrico mensal de +75mm. Porém, no mesmo estudo, os autores chamam a atenção que as plantações de eucalipto só vão atingir patamares superior de ETa em relação aos campos no terceiro ano do cultivo.

No processo de voçorocamento esta diminuição da água disponível pode ter diferentes conseqüências. Os movimentos de massa são os mecanismos que atuam com maior intensidade na expansão das voçorocas da área de estudo e possuem uma relação direta com a disponibilidade de água subterrânea. PEARCE *et al.* (1987) destacam que o plantio de florestas foi eficiente em diminuir a intensidade e frequência dos movimentos de massa mais superficiais na Nova Zelândia (1m a 1,5m), mas que não tiveram o mesmo efeito nos grandes processos erosivos, MARDEN *et al.* (2005) mais tarde chegaram à mesma conclusão.

As conseqüências da substituição de campos nativos pelo plantio de eucaliptos na área de estudo são de uma provável diminuição do escoamento superficial nas áreas de silvicultura, amenizando a erosão superficial, mas também por vezes diminuindo a velocidade da expansão lateral da voçoroca por meio dos movimentos de massa. A diminuição da água disponível em subsuperfície pode tornar os movimentos de massa menos ativos, mas, em períodos de grande acumulado de chuva, tendem a se reativar. Ainda, o maior consumo de água pela silvicultura pode levar a um rebaixamento do lençol freático, podendo tornar a voçoroca mais profunda e aumentar a erosão na parte interna das voçorocas, onde não há a proteção da vegetação de eucaliptos.

A implantação destas árvores de grande porte próximas aos taludes da voçoroca pode desencadear o efeito de alavancagem. Este efeito ocorre quando a força cisalhante é transferida pelos troncos das árvores ao terreno quando as copas são atingidas por ventos (TABALIPA, FIORI, 2008), podendo ocorrer o desbarrancamento e facilitar a expansão da voçoroca.

De modo geral se fazem necessários estudos mais aprofundados do impacto da mudança do uso nas voçorocas da área de estudo, através do monitoramento do lençol freático e também do monitoramento em nível de detalhe do avanço dos processos erosivos. Como já destacado por Stefanuto e Lupinacci (2023), as voçorocas são processos erosivos complexos e que nem sempre possuem relações lineares entre uso do solo e avanço erosivo. O mesmo foi encontrado na área de estudo, onde a feição erosiva V3 que possui a maior propensão ao escoamento superficial apresenta a erosão menos intensa.

Considerações Finais

Entre os anos de 1975 e 2022 houveram diversas mudanças no uso da terra na área de estudo resultando em uma grande variação da propensão ao escoamento superficial. As bacias de captação das voçorocas V1 e V3 foram as que mais sofreram alterações no tipo de uso, sendo que a ocupação antrópica foi mais intensa no ano de 2003 e conseqüentemente maior escoamento superficial calculado. Apesar disso, a análise dos dados evidenciou que o tipo de solo e a quantidade de argila nos horizontes superficiais desempenham papel mais importante no escoamento superficial do que o uso da terra.

De acordo com o modelo SCS-CN, a implantação da silvicultura resultou em uma considerável diminuição do escoamento superficial nas áreas das três voçorocas, tendo menor impacto na V3 que possui solos mais argilosos e menor área coberta pela silvicultura. A V3 possui a maior propensão ao escoamento superficial, porém a menor intensidade do processo erosivo observado, tornando evidente que a erosão superficial não é o principal mecanismo responsável pela intensidade das voçorocas estudadas.

Os valores de evapotranspiração possuem grande diferença entre os cultivos encontrados na área, sendo que a silvicultura é a que utiliza a maior quantidade de água do solo. Este consumo de água, relatado em situações análogas na literatura sob o domínio do bioma Pampa, pode diminuir a velocidade de saturação do solo e desta forma interferir na velocidade dos movimentos de massa adjacentes às voçorocas, diminuindo a água disponível para desencadear o processo. Já nas áreas de lavoura, onde foi constatado um valor menor de evapotranspiração, seria esperado maior atividade erosiva, algo que não foi observado na V3 onde predominam as lavouras, necessitando de mais estudos sobre esta dinâmica hidráulica.

Do mesmo modo, o diferente comportamento dos cultivos no balanço hídrico pode ter conseqüências no nível do lençol freático. O alto valor de evapotranspiração das lavouras de eucalipto pode causar uma diminuição da recarga do lençol freático e conseqüentemente um rebaixamento do nível de base. O nível de base é em muitos casos o limite de desenvolvimento vertical das voçorocas, desta forma o seu rebaixamento pode aumentar a profundidade das voçorocas e a energia dos processos superficiais de retrabalhamento nas feições internas.

Tendo em vista a complexidade do processo de voçorocamento ainda são necessários estudos dos reais impactos do alto consumo de água em subsuperfície pelos eucaliptos no processo erosivo e a relação subseqüente entre evolução do nível do lençol freático e dinâmica da voçoroca.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da pesquisa através do programa CAPES/PrInt.

Referências Bibliográficas

ADDIS, H. K. *et al.* Gully Morphology and Rehabilitation Measures in Different Agroecological Environments of Northwestern Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*, v. 2015, p. 1-8, 2015.

ADMAS, B. F. *et al.* Identification of soil erosion hot-spot areas for prioritization of conservation measures using the SWAT model in Ribb watershed, Ethiopia. *Resources, Environment and Sustainability*, v. 8, p. 100059, jun. 2022.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, F. D. S. *Estudos Fitogeográficos na Bacia Hidrográfica do Arroio Lajeado Grande – Oeste do RS*. 106f. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment, Part 1: Model Development. *JAWRA*. 1998, 34(1), 73-90.

BALTAS, E. A.; DERVOS, N. A.; MIMIKOU, M. A. Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 11, n. 6, p. 1825-1829, 26 nov. 2007.

BERNATEK-JAKIEL, A.; POESEN, J. Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. *Earth-Science Reviews*, v. 185, p. 1107-1128, out. 2018.

_____; WROŃSKA-WAŁACH, D. Impact of piping on gully development in mid-altitude mountains under a temperate climate: A dendrogeomorphological approach. *CATENA*, v. 165, p. 320-332, 1 jun. 2018.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. 8. ed. São Paulo: Ícone, 2012.

CABRAL, I. L. L. *Depressões interfluviais e voçorocas articuladas à rede de drenagem: O exemplo das bacias do Rio Ibicuzinho, Areal do Paredão, Cacequi, Santa Maria e Ibicuí*. 2004. 201f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CAO, X. *et al.* Impact of Land Use/Cover Changes on Soil Erosion by Wind and Water from 2000 to 2018 in the Qaidam Basin. *Land*, v. 12, n. 10, p. 1866, 2023.

CHARLES R. MEYER *et al.* *The Modular Soil Erosion System (MOSES)*. Soil Erosion. *Anais...* In: SOIL EROSION. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2001. Disponível em: <<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=1&AID=3280&CID=se2001&T=1>>. Acesso em: 29 set. 2023

DOS SANTOS, F. M. *et al.* Using the SWAT model to identify erosion prone areas and to estimate soil loss and sediment transport in Mogi Guaçu River basin in Sao Paulo State, Brazil. *CATENA*, v. 222, p. 106872, mar. 2023.

DRAGIČEVIĆ, N.; KARLEUŠA, B.; OŽANIĆ, N. Erosion Potential Method (Gavrilović method) sensitivity analysis. *Soil and Water Research*, v. 12, n. 1, p. 51-59, 31 mar. 2017.

FACADIO, A. C.; SATO, A. M.; COELHO NETTO, A. L. Eucalyptus Planting in Pasture Matrix and Erosive Reactivation of Gullies in the Sesmaria River Basin (SP/RJ): a cycle of instability in headwater valleys. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 00, 28 set. 2023.

GODOI, R. DE F. *et al.* High-resolution soil erodibility map of Brazil. *Science of The Total Environment*, v. 781, p. 146673, 10 ago. 2021.

HERNANI, L. C. *et al.* *A erosão e seu impacto*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.

JAGGER, P.; PENDER, J. The role of trees for sustainable management of less-favored lands: the case of eucalyptus in Ethiopia. *Forest Policy and Economics*, v. 5, n. 1, p. 83-95, jan. 2003.

JAKEMAN, A. J.; HORNBERGER, G. M. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? *Water Resources Research*, v. 29, n. 8, p. 2637-2649, 1993.

KRAJEWSKI, A. *et al.* Variability of the Initial Abstraction Ratio in an Urban and an Agroforested Catchment. *Water*, v. 12, n. 2, p. 415, 4 fev. 2020.

KRISNAYANTI, D. S. *et al.* Curve Number Estimation for Ungauged Watershed in Semi-Arid Region. *Civil Engineering Journal*, v. 7, n. 6, p. 1070-1083, 1 jun. 2021.

KUHN, C. E. S. *et al.* Ravines and gullies, a review about impact valuation. *Natural Hazards*, v. 117, n. 1, p. 597-624, maio 2023.

LAURENT, F.; RUELLAND, D. Assessing impacts of alternative land use and agricultural practices on nitrate pollution at the catchment scale. *Journal of Hydrology*, v. 409, n. 1, p. 440-450, 28 out. 2011.

MACFARLANE, C. *et al.* Overstorey evapotranspiration in a seasonally dry Mediterranean eucalypt forest: Response to groundwater and mining. *Ecohydrology*, v. 11, n. 5, p. e1971, 2018.

MARDEN, M. *et al.* Pre- and post-reforestation gully development in Mangatu Forest, East Coast, North Island, New Zealand. *River Research and Applications*, v. 21, n. 7, p. 757–771, set. 2005.

_____. Badass gullies: Fluvio-mass-movement gully complexes in New Zealand's East Coast region, and potential for remediation. *Geomorphology*, v. 307, p. 12-23, abr. 2018.

MICHELETTI, N.; CHANDLER, J. H.; LANE, S. N. Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *Geomorphological Techniques*, p. 12, 2015.

MLAMBO, R. *et al.* Structure from Motion (SfM) Photogrammetry with Drone Data: A Low Cost Method for Monitoring Greenhouse Gas Emissions from Forests in Developing Countries. *Forests*, v. 8, n. 3, p. 68, 3 mar. 2017.

MORGAN, R. P. C. *Soil erosion and conservation*. 3rd ed. Malden, MA: Blackwell Pub, 2005.

_____; NEARING, M. A. (Eds.). *Handbook of erosion modelling*. Chichester, West Sussex, UK ; Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2011.

NEITSH, S. L. *et al.* *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation*. Texas Water Resources Institute, 2009.

NOSETTO, M. D.; JOBBÁGY, E. G.; PARUELO, J. M. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*, v. 11, n. 7, p. 1101-1117, 2005.

NYSSSEN, J. *et al.* Assessment of gully erosion rates through interviews and measurements: a case study from northern Ethiopia. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 31, n. 2, p. 167-185, 2006.

PARKNER, T. *et al.* Development and controlling factors of gullies and gully complexes, East Coast, New Zealand. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 31, n. 2, p. 187-199, fev. 2006.

PATHAN, H.; JOSHI, G. S. Estimation of Runoff Using SCS-CN Method and Arcgis for Karjan Reservoir Basin. v. 14, n. 12, 2019.

PEARCE, A. *et al.* Reforestation: On-site effects on hydrology and erosion, eastern Raukumara Range, New Zealand. *Forest Hydrology and Watershed Management*, v. 167, 1 jan. 1987.

PETSCH, C. *et al.* Controlling factors and mapping of linear erosive features in Santa Maria river watershed – RS. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 23, n. 4, p. 1876-1892, 1 out. 2022.

POESEN, J. *et al.* Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *CATENA*, v. 50, n. 2-4, p. 91-133, jan. 2003.

POESEN, J. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs: Soil erosion in the Anthropocene. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 43, n. 1, p. 64-84, jan. 2018.

PROSSER, I. P.; SOUFI, M. Controls on gully formation following forest clearing in a humid temperate environment. *Water Resources Research*, v. 34, n. 12, p. 3661-3671, 1998.

RADEMANN, L. K. *et al.* Assessment of sandbank dynamics using high-resolution images in Areal do Limeira River, southern Brazil. *RAEGA – O Espaço Geográfico em Análise*, v. 57, p. 3, 12 set. 2023.

RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R.; DE SOUZA ROBAINA, L. E. Série histórica do uso e ocupação da terra no município de Cacequi – RS de 1986 a 2016. *Revista de Geografia – PPGEO – UFJF*, v. 9, n. 1, p. 34-49, 13 dez. 2019.

_____; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. D. S. Characterization and analysis of gully erosion in southern Brazil with the assistance of unmanned aerial vehicle. *Mercator*, v. 21, n. 1, p. 1-19, 15 jun. 2022.

_____; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. DE S. ANÁLISE DAS FORMAS DE RELEVO DO MUNICÍPIO DE CACEQUI – RS. *Ciência e Natura*, v. 38, n. 1, p. 179-188, 31 jan. 2016.

RAZA, A. *et al.* Modeling Approaches to Assess Soil Erosion by Water at the Field Scale with Special Emphasis on Heterogeneity of Soils and Crops. *Land*, v. 10, n. 4, p. 422, 15 abr. 2021.

RENARD, K.G., FOSTER, G.R., WEESIES, G.A. AND PORTER, J.P. RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 46, 30-33, 1991.

SCOTT, D. F.; BRUIJNZEEL, L. A.; MACKENSEN, J. The hydrological and soil impacts of forestation in the tropics. Em: BRUIJNZEEL, L. A.; BONELL, M. (Eds.). *Forests, Water and People in the Humid Tropics: Past, Present and Future Hydrological Research for Integrated Land and Water Management*. International Hydrology Series. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. p. 622-651.

SEMA. *Zoneamento ambiental da silvicultura*. Secretaria Estadual do Meio Ambiente – Governo do Estado do Rio Grande do Sul, mar. 2010.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Radam – D. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Geologia/Sensoriamento-Remoto-eGeofisica/RADAM-D-628.html>>. Acessado em 25 de outubro de 2017.

SHI, Z.-H. *et al.* Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. *CATENA*, v. 77, n. 1, p. 1-7, abr. 2009.

SILVA, M. D. DA. Os cultivos florestais do pampa, no sul do Rio Grande do Sul: desafios, perdas e perspectivas frente ao avanço de novas fronteiras agrícolas. *FLORESTA*, v. 42, n. 1, p. 215, 28 mar. 2012.

STEFANUTO, E. B.; LUPINACCI, C. M. A complexa relação entre precipitação, uso e cobertura da terra, solos e evolução de taludes erosivos de voçorocas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 3, 7 set. 2023.

SUERTEGARAY, D. M. A.; MORELLI, L. A. *Conflitos da silvicultura em áreas e, processo de arenização, sudoeste do Rio Grande do Sul*. João Pessoa: Editora da Universidade da Paraíba, 2010. v. 1

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. Influência da vegetação na estabilidade de taludes na bacia do Rio Ligeiro (PR). *Geosciences = Geociências*, v. 27, n. 3, p. 387-399, 2008.

TAKKEN, I. *et al.* The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns. *Geomorphology*, v. 37, n. 1, p. 1-14, 1 mar. 2001.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. DE S.; LAURENT, F. Definição das unidades de resposta hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria- RS. *Caminhos de Geografia*, v. 22, n. 84, p. 269-284, 15 dez. 2021.

TU, Z. *et al.* Hydrological Properties of Soil and Litter Layers of Four Forest Types Restored in the Gully Erosion Area of Latosol in South China. *Forests*, v. 14, n. 2, p. 360, fev. 2023.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). Urban Hydrology for small watersheds. *Technical Release 55*, Natural Resources Conservation Service, Washington, D.C., 1986.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. *CATENA*, v. 63, n. 2-3, p. 132-153, out. 2005.

VIGIAK, O. *et al.* Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins. *Science of The Total Environment*, v. 538, p. 855-875, dez. 2015.

WANG, D. *et al.* Application of SCS-CN Model in Runoff Estimation. *International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering*, 2015.

WEN, B. *et al.* Spatiotemporal dynamics and driving factors of soil erosion in the Beiluo River Basin, Loess Plateau, China. *Ecological Indicators*, v. 155, p. 110976, nov. 2023.

WESTOBY, M. J. *et al.* 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, v. 179, p. 300-314, dez. 2012.

WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. *Transactions of the ASAE*, v. 20, n. 6, p. 1100-1104, 1977.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationships to soil loss. *Transactions of the American Geophysical Union*. Washington, DC, v. 39, n. 2, p. 285- 291, 1958.

_____; _____. *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.

WOODWARD, D. E. *et al.* Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. p. 1-10, 26 abr. 2012.

XIAO, B. *et al.* Application of the SCS-CN Model to Runoff Estimation in a Small Watershed with High Spatial Heterogeneity. *Pedosphere*, v. 21, n. 6, p. 738-749, dez. 2011.

ZAKWAN, M. *Estimating Runoff Using SCS Curve Number Method*, v. 8, n. 5, 2018.

ZANTET OYBITET, M.; SAMBETO BIBI, T.; ABDULKERIM ADEM, E. Evaluation of best management practices to reduce sediment yield in the upper Gilo watershed, Baro akobo basin, Ethiopia using SWAT. *Heliyon*, v. 9, n. 10, p. e20326, out. 2023.

ZEGEYE, A. D. *et al.* Bank stability and toe erosion model as a decision tool for gully bank stabilization in sub humid Ethiopian highlands. *Ecohydrology & Hydrobiology*, v. 20, n. 2, p. 301-311, abr. 2020.

ZHUO, L. The effects of forest in controlling gully erosion. *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*, v. 209, p. 429-437, 1992.

ZOLFAGHAR, S. *et al.* Transpiration of Eucalyptus woodlands across a natural gradient of depth-to-groundwater. *Tree Physiology*, v. 37, n. 7, p. 961-975, jul. 2017.

Recebido em: 11/01/2024. Aceito em: 07/05/2024.

Notas

¹ O parâmetro S é o potencial máximo de retenção de água após o início do escoamento superficial, dado em mm, calculado a partir do curve number.