

ARTIGO ORIGINAL

Priorização de operações de manutenção de estradas florestais por meio de indicadores hidrológicos

Prioritization of forest roads maintenance operations in plantation forests through hydrological indexes

Emily Tsiemi Shinzato¹, Gabriela Gonçalves Moreira², Karina Ferreira³,
Silvio Frosini de Barros Ferraz⁴ , Rodrigo Hakamada^{5,6,7} 

¹Treevia Forest Technologies, São José dos Campos, SP, Brasil

²Bracell Limited, Lençóis Paulistas, SP, Brasil

³Sylvamo, Mogi Guaçu, SP, Brasil

⁴Laboratório de Hidrologia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil

⁵Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife, PE, Brasil

⁶Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, Piracicaba, SP, Brasil

⁷Universidad de Guadalajara – UDG, Guadalajara, Jalisco, México

Como citar: Shinzato, E. T., Moreira, G. G., Ferreira, K., Ferraz, S. F. B., & Hakamada, R. (2023). Priorização de operações de manutenção de estradas florestais por meio de indicadores hidrológicos. *Scientia Forestalis*, 51, e3921. <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.08>

Resumo

As estradas florestais são constituídas por um emaranhado de vias que permitem o acesso às áreas produtivas e o transporte da matéria-prima. Quando não são bem locadas e estruturadas são fontes potenciais de impactos ambientais, principalmente os relacionados à dinâmica de água e sedimentos. Neste contexto, as aplicações de indicadores hidrológicos (IH) permitem identificar estradas florestais com base em sua declividade, seu potencial de acúmulo de água e erodibilidade. O objetivo deste trabalho foi aplicar indicadores hidrológicos para avaliar a criticidade ambiental e a priorização da manutenção de trechos de estradas florestais. Fez-se um estudo de caso em três áreas localizadas no estado de São Paulo. Os IH utilizados foram: declividade do terreno (DECTERR), declividade da rampa (DECRAMP), índice topográfico (INDTOP) e fator topográfico (LS). Os trechos foram classificados conforme sua posição no terreno, e identificados conforme sua criticidade em relação ao potencial de manutenção, por meio da classificação aqui proposta em “normal”, “crítico” e “muito crítico”. Analisaram-se 693 trechos de estradas florestais, ou 223,8 km de estradas no total. Mediante a estatística descritiva e análise multivariada de componentes principais, identificou-se a existência de dois eixos principais representando 76% da variação total, e classificou-se cada trecho em função de cada IH. Este trabalho possibilitou a identificação eficaz de estradas com potencial alto de manutenção, representando 12,6% dos trechos analisados, todos próximos às APPs e RLs, evidenciando a necessidade de uso de IH no manejo de estradas florestais.

Palavras-chave: Índice topográfico; Fator topográfico; Criticidade; Erosão do solo.

Abstract

Forest roads consist of a tangle of roads in a network, which access productive areas and help in transportation of the raw material. When these roads are not well planned, they can be a potential source of environmental impacts, especially regarding the dynamics of water and sediments. Hydrological indexes (HI) allow the identification of critical segments of forest roads based on slope, potential flood and erodibility. This study aimed to apply the concepts of HI, identifying roads segments with high

Fonte de financiamento: Nenhuma.

Conflito de interesse: Nada a declarar.

Autor correspondente: rodrigo_hakamada@yahoo.com.br

Recebido: 1 junho 2022.

Aceito: 5 janeiro 2023.

Editor: Mauro Valdir Schumacher.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o artigo científico seja corretamente citado.

potential of maintenance. The study was carried in three forest stands located in Sao Paulo state. The HI used were land slope (DECTERR), road slope (DECRAMP) topographic index (INDTOP) and topographic factor (LS). According to each stand location, we classified the roads and identified them, accordingly to the critical status, as "normal," "critical" and "very critical". We analyzed 693 segments of forest roads, totaling 223.8 km of roads. Through a descriptive statistic and the principal component analysis, we identified the existence of two main axes representing 76% of total variation and rate each piece on each HI function. This study enabled the effective identification of roads with high potential of maintenance based on HI, and representing 12,6% of the forest road analyzed was close to APPs and RLs, reinforcing the need of proper management of forest roads.

Keywords: Topographic index; Topographic factor; Criticality; Soil erosion.

INTRODUÇÃO

As estradas florestais podem ser caracterizadas por um grande número de trechos que permitem o acesso às áreas de produção florestal, para a realização das atividades silviculturais e escoamento da produção. Segundo Gonçalves & Stape (2002), a rede viária é constituída por estradas interligadas que possibilitam o acesso às áreas florestais de efetivo plantio e preservação permanente, podendo classificá-las em três categorias: estradas primárias, estradas secundárias e os aceiros.

A construção e manutenção dessas estradas representam uma porção significativa no orçamento de investimentos florestais, além de ser fonte potencial de impactos ambientais relacionados à dinâmica de água e sedimento. Diversos estudos evidenciam que a densidade de estradas no ambiente de produção florestal é elevada, tanto em povoamentos florestais de eucalipto (Carmo et al., 2013) e *Pinus* (Souza et al., 2018) ou em manejo de florestas nativas (Braz, 1997; Barbosa et al., 2017), resultado da construção de estradas baseada apenas na experiência dos planejadores e menos em técnicas e métodos adequados. Como consequência da elevada densidade, o planejamento da alocação de novas estradas bem como a manutenção daquelas já existentes torna-se imprescindível.

As práticas operacionais de manutenção das estradas florestais são realizadas em sua maioria antes da realização das operações de colheita e transporte da madeira, ou ainda quando da implantação dos povoamentos (Machado, 2013). Dentre as práticas, as mais comuns são o nivelamento do leito carroçável e preenchimentos de trechos já erodidos pela ação do tempo e do tráfego de máquinas e veículos, que além de aumentarem o risco à erosão da estrada devido à intensa movimentação do solo, possuem elevados custos (Zagonel et al., 2008).

Os chamados indicadores hidrológicos são um conjunto de metodologias utilizadas no âmbito do manejo de estradas florestais, para identificar áreas suscetíveis à erosão do solo. Diversos aspectos do manejo de povoamentos florestais podem ser impactados com a erosão do solo, como a qualidade e quantidade de água nos cursos d'água (Issaka & Ashraf, 2017), a perda de fertilidade do solo (Thomas et al., 1999) e a perda de biodiversidade (Orgiazzi & Panagos, 2018). Segundo Ferraz et al. (2007), a aplicação de indicadores hidrológicos (IH) é interessante, pois permite classificar estradas florestais com base no escoamento superficial, identificando os pontos críticos em termos de erosão e acúmulo de água no solo. Em trabalho desenvolvido para uma área de reflorestamento localizada no município de Capão Bonito (SP), foram aplicados quatro IH para 252 trechos de estradas florestais, sendo estes: declividade do terreno, índice topográfico, declividade da rampa e fator de topográfico (LS). Os IH's representaram bem as características do terreno e da construção de estradas e permitiram identificar trechos de estrada que influenciam os processos erosivos e de acúmulo de água no solo. Considerando o contexto atual de valorização de práticas sustentáveis e que causem o mínimo impacto possível à paisagem em que se inserem os povoamentos florestais, o uso destes indicadores pode contribuir na identificação e rápida correção de problemas em estradas florestais, seja através do replanejamento da localização das estradas (Kazama et al., 2021) ou no estabelecimento de alguma técnica de minimização de fluxos de água na estrada como as saídas d'água e terraços (Yoshida et al., 2019).

Técnicas que utilizam ferramentas de sistemas de informação geográfica aplicadas à temática de estradas florestais se consolidaram nos últimos anos, devido à maior

disponibilidade de informações espaciais, tanto em quantidade como na sua resolução (Grigolatto et al., 2017; Yoshida et al., 2019; Kazama et al., 2021). Dada à importância de temas que tangem o manejo sustentável, torna-se interessante a aplicação de conceitos de indicadores hidrológicos em estradas, visando à conservação dos recursos hídricos e edáficos. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi aplicar indicadores hidrológicos para avaliar a criticidade ambiental e a priorização da manutenção de trechos de estradas florestais. Sob o ponto de vista prático, serão sugeridas ações ligadas ao manejo de estradas florestais que visem a aumentar a conservação do solo e da água em povoamentos florestais.

MATERIAL E MÉTODOS

Área em estudo

O estudo foi conduzido em três áreas com povoamentos florestais, sendo a primeira (A) localizada no município de Mogi Guaçu (47°4'25,96"O e 22°8'10,83"S), a segunda (B) no município de Santa Rita do Passa Quatro (47° 32' 50,38" O e 21° 34' 18,82" S) e a terceira (C) no município de Espírito Santo do Pinhal (46°52'26,8"O e 22°5'51" S) (Figura 1). A área de estudo contempla, respectivamente, 2.338 ha, 855,76 ha e 1.605,62 ha. As informações sobre área plantada e densidade de estradas estão na Tabela 1.

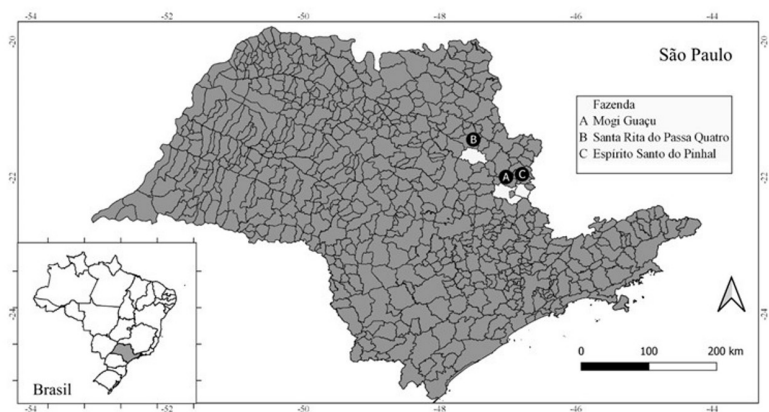


Figura 1 - Localização das áreas utilizadas no estudo na região nordeste do Estado de São Paulo.

Tabela 1 – Informações sobre área total, área plantada, % de área plantada e densidade de estradas para as 3 áreas localizadas no nordeste do Estado de São Paulo.

	Área total (ha)	Área plantada (ha)	% área plantada	Estradas (km)	Densidade de estradas por área total (m ha ⁻¹)	Densidade de estradas por área plantada (m ha ⁻¹)
A	2.338	1.985,9	85	73,6	3,1	3,7
B	855,8	635,7	74	50,3	5,9	7,9
C	1.605,6	989,2	62	99,9	6,2	10,1

Estas áreas foram escolhidas devido à diversidade de relevo. A área A apresenta um gradiente de 120 metros de altitude, distribuídos entre as cotas de 605 a 725 metros. A inclinação média do terreno é classificada como plano à levemente ondulado (Figura 2A). O relevo da área B apresenta gradiente de 180 metros, distribuídos entre as cotas de 600 a 780 metros, sendo a inclinação média do terreno classificada como levemente ondulada à medianamente ondulada (Figura 2B). Já o relevo da área C apresenta gradiente de 115 metros, distribuídos entre as cotas de 660 a 775 e a inclinação média do terreno é classificada como ondulado, apresentando regiões de classificação montanhosa (Figura 2C).

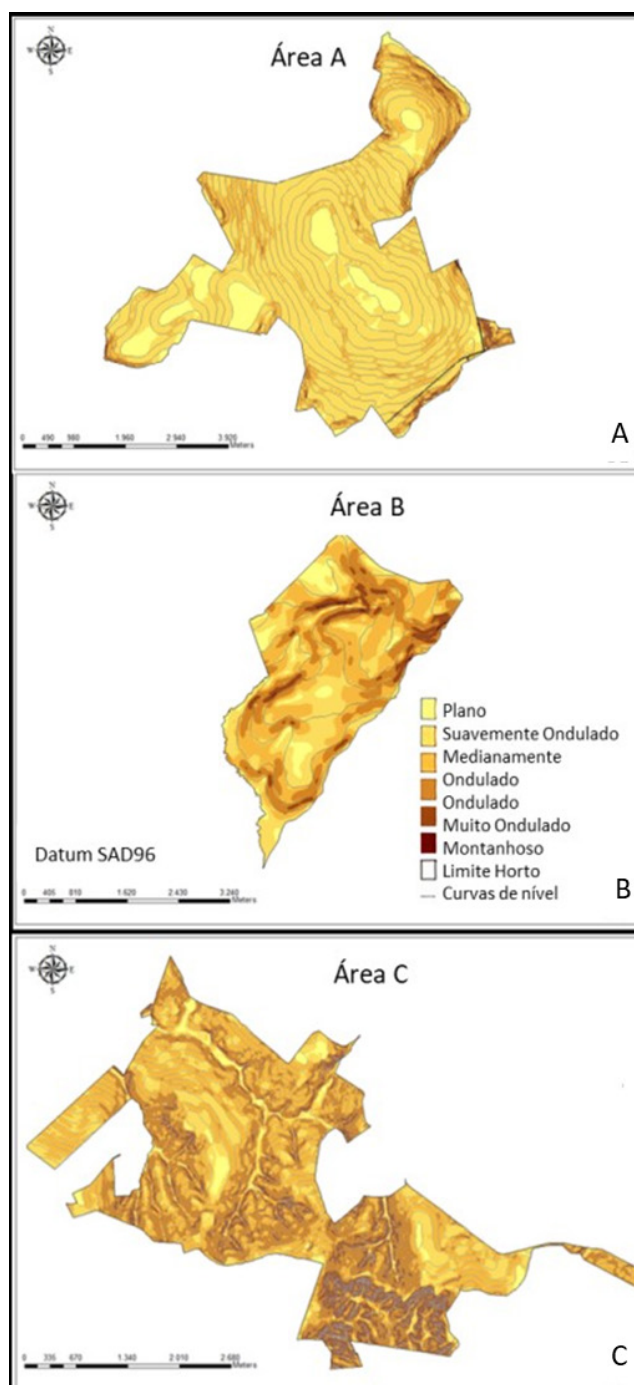


Figura 2 - Caracterização do relevo para as três áreas.

Os tipos de solo predominantes nas áreas A e B são o Latossolo vermelho (LV) e Latossolo vermelho escuro (LE), já na área C são o Argissolos (PA, PV e PVA) e Cambissolos (CX) (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999). O clima da região segundo a classificação de Köppen é Cwa, com precipitação média anual de 1.278 mm e temperatura média anual de 21,4° C. O uso do solo corresponde ao plantio comercial de eucalipto para produção de celulose e floresta nativa pertencentes às áreas de reserva legal (RL) e de preservação permanente (APP).

Indicadores Hidrológicos (IH)

Os indicadores hidrológicos tiveram suas fórmulas automatizadas no ambiente do Sistema de Informação Geográfica ArcGIS10, possibilitando a caracterização de cada trecho de estrada. Para tanto, foram utilizados os seguintes planos de informação: curvas de nível com 5 metros

de equidistância e pontos cotados, digitalizados a partir de folhas topográficas do IGC e malha viária levantada com GPS topográfico com precisão de 1,5 metros. Todos os planos de informação utilizados neste estudo foram trabalhados em projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e o sistema referencial geodésico correspondeu ao South America 23S Datum SAD 69. Gerou-se o modelo digital do terreno (MDT) a partir dos mapas de curvas de nível, e posteriormente foi realizada a interpolação através da malha triangular irregular (TIN). O MDT foi convertido para o formato *grid* (raster), com resolução espacial de 5 m.

Os trechos de estradas foram separados em locais onde havia cruzamentos de estrada, topos de morro e fundo de vale e, posteriormente, enumeradas para realização da classificação quanto à sua localização e necessidade de manutenção. Todo o processamento foi automatizado em *software* R.

Empregaram-se quatro indicadores hidrológicos para cada trecho: declividade do terreno (DECTERR), declividade da rampa (DECRAMP), índice topográfico (INDTOP) e fator topográfico LS (LS). A declividade da rampa é expressa pela Equação 1.

$$\text{DECRAMP} = \left(\frac{\Delta S}{l} * 100 \right) \quad (1)$$

Onde: DECRAMP = Declividade da rampa (%); ΔS = Declividade da rampa na estrada; l = comprimento da estrada.

O cálculo do Índice Topográfico (Gessler et al., 1995) é expresso pela Equação 2.

$$\text{INDTOP} = \ln \left(\frac{As}{\beta_i l} \right) \quad (2)$$

Onde: INDTOP = índice topográfico; As = fluxo acumulado na célula; β_i = declividade na célula (em graus).

Já o fator topográfico é expresso nas Equações 3-5 (Silva, 2007; Ferraz et al., 2007).

$$LS = \left(\frac{l}{22,1} \right)^m * \frac{s}{9} * \sqrt{\frac{s}{9}} \quad (3)$$

Onde: l = comprimento de rampa (m); s = declividade (%); m = expoente do comprimento da rampa determinado por (Barrios, 1995), conforme Equação 4:

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (4)$$

Sendo:

$$\beta = \left(\frac{\left(\frac{\sin \theta}{0,0896} \right)}{3 * (\sin \theta)^{0,8} + 0,56} \right) * 0,5 \quad (5)$$

Onde: β = relação entre erosão em sulco e erosão entre sulco; $\sin \theta$ = ângulo de inclinação do terreno.

Classificação das estradas quanto sua localização

Após a caracterização de cada trecho segundo os indicadores hidrológicos, as estradas foram classificadas conforme metodologia de Ferraz et al. (2007) em: Tipo I – Trechos com declividade da rampa e do terreno indicando estradas sem problemas de localização; Tipo II – Trechos com declividade da rampa e do terreno acentuados; Tipo III – Trechos com baixa

declividade do terreno e baixa declividade da rampa, sendo (a) em fundo de vale e (b) em topo de morro; Tipo IV – Trechos com baixa declividade da rampa e alta declividade do terreno, mostrando estradas locadas em nível.

Análise dos indicadores hidrológicos

Foram calculados os valores médios para cada IH do total de trechos de estrada, bem como seus respectivos valores de desvio padrão da média, coeficiente de variação, valores mínimos e máximos. No entanto, apesar de se utilizar estes quatro IH para classificação de estradas, torna-se interessante verificar se eles expressam respostas diferentes, ou sobrepostas. Para isso, utilizou-se da análise de componentes principais (ACP), com o intuito de reduzir um conjunto de dados e explicar a estrutura de variância e covariância por combinações lineares de variáveis originais (Keflens, 2009).

Classificação de estradas quanto à prioridade de manutenção

Com intuito de facilitar a identificação pontual dos trechos mais críticos em relação à prioridade de manutenção, utilizou-se os resultados obtidos por Ferraz et al. (2007), que sugerem que um valor igual ou menor que duas vezes o desvio padrão da média para cada indicador hidrológico separado por propriedade poderia ser o limite onde haveria acúmulo de água e início de processos erosivos. Desta forma, as estradas foram classificadas de acordo com o potencial de manutenção conforme a média e desvio padrão para cada indicador hidrológico em cada propriedade da seguinte forma:

- Normal (< 2 desvios-padrão): Situação que não demanda monitoramento constante e não necessita que sejam realizadas práticas de conservação intensivas;
- Crítico ($2 < x < 2,5$ desvios-padrão): necessita de monitoramento mensal durante a época das chuvas e demanda a construção de mini terraços e camalhões;
- Muito crítico ($> 2,5$ desvios-padrão): necessita de monitoramento mensal durante o ano inteiro, demanda a construção de mini terraços e camalhões e ainda pode ocorrer acúmulo de sedimentos advindos de áreas adjacentes.

Após classificados os trechos de estradas, estes foram importados para ambiente SIG, onde foram gerados os mapas temáticos de classificação quanto ao tipo de estrada e de necessidade de manutenção de estradas. O fluxograma do processo para classificação quanto sua locação e quanto ao potencial de manutenção está descrito na Figura 3.

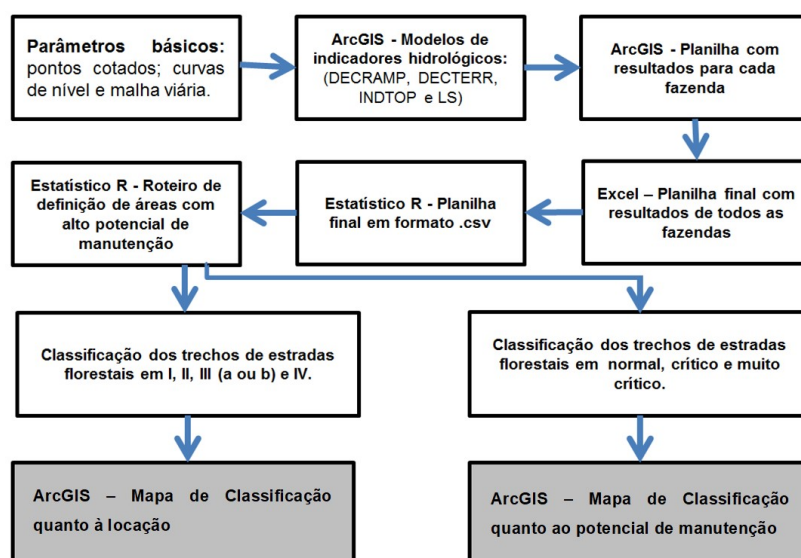


Figura 3 – Fluxograma para classificação de estradas e identificação do potencial para manutenção baseados em indicadores hidrológicos.

Os resultados gerados pelos mapas foram confrontados criticamente por meio de observação visual em campo nas áreas de estudo em dias de chuva, que consistiu em observação de 5 trechos de cada nível quanto ao potencial de manutenção. Esta avaliação foi realizada na área C pelo fato de ter a presença de estradas com características heterogêneas quanto à declividade e comprimento, que poderiam resultar em diferentes classificações. A observação realizada foi binária com respostas positiva ou negativa para acúmulo e escoamento de água (Figura 4a-4c).



Figura 4 – Exemplo de trecho classificado como normal (a), crítico (b) e muito crítico (c) na Área C.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram avaliados 693 trechos de estradas florestais, onde o comprimento médio equivaliu a 0,322 km de um total de 223,3 km. A Tabela 2 apresenta os valores médios dos IH gerados, assim como seus respectivos valores de desvio padrão da média, coeficiente de variação, valores mínimos e máximos.

Tabela 2 – Valores estatísticos obtidos para os IH dos trechos de estradas florestais declividade do terreno (DECTERR), declividade da rampa (DECRAMP), índice topográfico (INDTOP) e fator topográfico (LS), para as áreas (A, B e C): média (M); desvio padrão da média (DP); coeficiente de variação (CV); mínimo (MÍN) e máximo (MÁX).

Indicadores hidrológicos	M	DP	CV	MÍN	MÁX
Área A (n = 142)					
DECRAMP (%)	2,05	1,66	0,81	0,00	9,75
DECTERR (%)	3,44	1,37	0,40	0,50	9,00
INDTOP	6,89	1,52	0,22	0,00	9,00
LS	1,77	0,44	0,25	0,00	2,69
Área B (n = 99)					
DECRAMP (%)	3,53	3,94	7,19	0,36	3,53
DECTERR (%)	2,90	1,66	0,82	0,39	2,90
INDTOP	0,82	0,42	0,11	1,07	0,82
LS	0,00	1,00	4,62	0,00	0,00
Área C (n = 452)					
DECRAMP (%)	6,68	4,39	0,66	0,00	31,89
DECTERR (%)	3,23	2,08	0,64	1,00	9,00
INDTOP	5,98	0,84	0,14	4,17	9,00
LS	0,74	0,56	0,75	0,01	2,48
GERAL (n = 693)					
DECRAMP (%)	5,51	4,11	0,75	0,00	31,89
DECTERR (%)	3,87	2,63	0,68	0,50	20,00
INDTOP	6,34	1,13	0,18	0,00	9,00
LS	1,04	1,57	1,50	0,00	16,93

A declividade da rampa (DECRAMP) e a do terreno (DECTERR) apresentaram as maiores variações, sendo DECRAMP de 0 a 31,9% e a DECTERR de 0,5 a 20,0%, com coeficientes de variação de 75 e 68%, respectivamente. O índice topográfico (INDTOP) apresentou média de 6,339, coeficiente de variação de 18% e amplitude de 0 a 9, sendo os maiores valores deste indicador localizados próximo às áreas de baixada, onde existe maior probabilidade de acúmulo de água. Já o fator topográfico (LS) apresentou média de 1,044 e coeficiente de variação de 150%, sendo a variabilidade de 0 a 16,932, este fator representa o potencial erosivo do solo.

A análise gráfica ACP (Biplot) mostra uma representação dos valores de IH para os primeiros dois componentes principais (Figura 5), os quais explicam 76% da variação nos dados, sendo o primeiro componente de 48% e o segundo componente com 28%. O primeiro componente pode ser explicado pela declividade do terreno (DECTERR) e fator LS (LS), refletindo as características de construção das estradas e influência na perda de solo. O segundo componente pode ser explicado pelo índice topográfico (INDTOP) e declividade na estrada (DECRAMP) que compete ao escoamento da água.

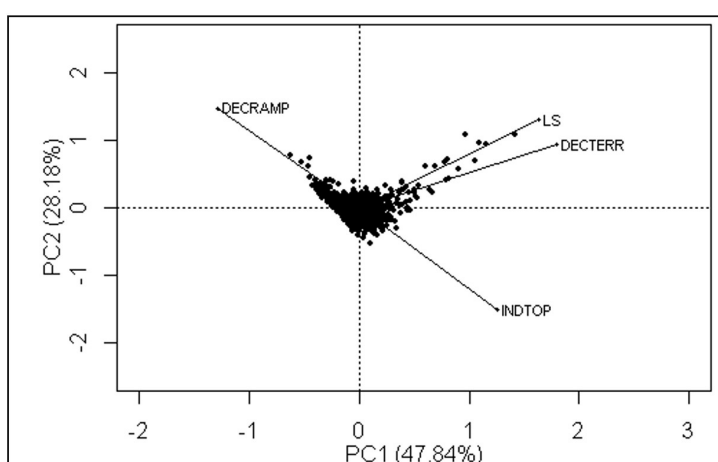


Figura 5 - Gráfico ACP e Comparação dos indicadores hidrológicos (declividade do terreno (DECTERR), declividade da rampa (DECRAMP), índice topográfico (INDTOP) e fator topográfico (LS)) com os componentes principais 1 (APC1) e 2 (APC2).

O fator topográfico (LS) foi composto pela maior quantidade de trechos de estradas com valores extremos, demonstrando que a criticidade da maioria das estradas refere-se à potencial perda de solo pelo processo erosivo, diferentemente do INDTOP, que foi composto por uma minoria de trechos de estradas, que representa a capacidade de escoamento e potencial de alagamento. O fator topográfico é um dos seis fatores que compõe a equação universal de perda de solo revisada (RUSLE) que estima uma potencial perda de solo devido às condições ambientais e ao manejo, que pode ser aplicada em estradas florestais (Renard et al., 1996). A cobertura do solo é um dos principais fatores que modificam o potencial de perda de solo por erosão, como em trabalho de Cunha et al. (2017), que mostra que a modificação da cobertura de matas nativas foi o maior modificador de resultados da RUSLE, e a perda de solo média de uma microbacia ($47,81 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) foi 16 vezes superior à perda natural de solo por erosão ($806,91 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Como as estradas florestais permanecem em tempo integral sem cobertura vegetal, o fator topográfico torna-se de alta relevância para a classificação de estradas.

No que diz respeito à caracterização das estradas quanto sua locação, a Área A teve maior representatividade de estradas tipo I, sem problemas de locação, correspondendo a cerca de 70%. Em comparação à Área B e à Área C, estas apresentaram maior representatividade de estradas tipo III com baixa DECTERR e DECRAMP, trechos de estradas localizadas em fundo de vale ou topo de morro (83% e 52%, respectivamente) (Figura 6).

De acordo com a análise de componentes principais 1 e 2, verificou-se que os quatro indicadores explicam 76% de toda variação. No entanto, os resultados revelam que os indicadores declividade do terreno (DECTERR) e fator topográfico (LS) estão diretamente

correlacionados, uma vez que estes se encontram muito próximos (Figura 5) e estão de certa forma sobrepondo informações, ou seja, conforme a declividade do terreno aumenta o potencial erosivo também aumenta. Dessa forma, caso se utilize apenas um desses dois indicadores, pode-se atingir resultado muito semelhante a este. A declividade é um dos principais fatores de erosão do solo, principalmente em solos rasos e de baixa drenagem (Gonçalves & Stape, 2002) como evidenciou estudo sobre perdas de solo de acordo com a cobertura do solo, o qual evidenciou que áreas com maior declividade obtiveram níveis de erosão superiores (Martins et al., 2010).

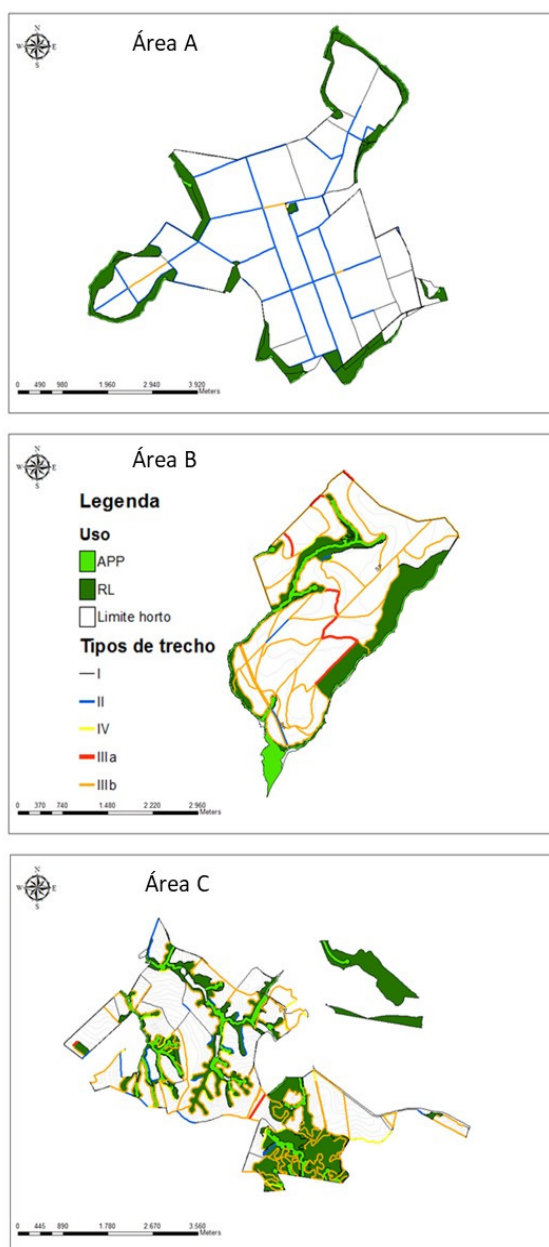


Figura 6 - Classificação de estradas florestais em tipo I, II, IIIa, IIIb e IV, para as três áreas.

As estradas do tipo IIIa possuem alto potencial de alagamento, porque recebem muita água da chuva (alto INDTOP) e possuem pouca capacidade de drenagem (baixo LS), mais presentes nas áreas B e C. Já os trechos de estradas IIIb representam trechos de estradas com boa drenagem (alto LS) e não recebem muita água da chuva (baixo INDTOP). Dessa forma, é importante realizar manutenção com maior frequência em trechos tipo IIIa.

O gradiente de relevo presente nas três áreas permitiu obter diferentes resultados quanto a classificação de criticidade dos trechos baseada nos IH, sendo possível encontrar estradas consideradas críticas e muito críticas dado o acréscimo em seu gradiente. Faz-se exemplo disso a Área C, que apresentou maior comprimento de trechos com alto potencial para manutenção que totalizaram 25,9 km, em comparação com a Área A (0,48km) e a Área B (1,9km), visto que esta área apresenta maior variação topográfica que as outras estudadas e a paisagem é composta por mais fundos de vale, protegidos por áreas de preservação permanente (APPs) em áreas que naturalmente acumulam água.

A área A é considerada mais plana das áreas estudadas, composta grande parte por trechos de estradas normais e apenas dois trechos críticos de estradas. A Área C foi a que apresentou maior comprimento de trechos com alto potencial de manutenção, que totalizam 25,9 km, em comparação às Áreas A (0,48km) e B (1,9km) (Figura 7).

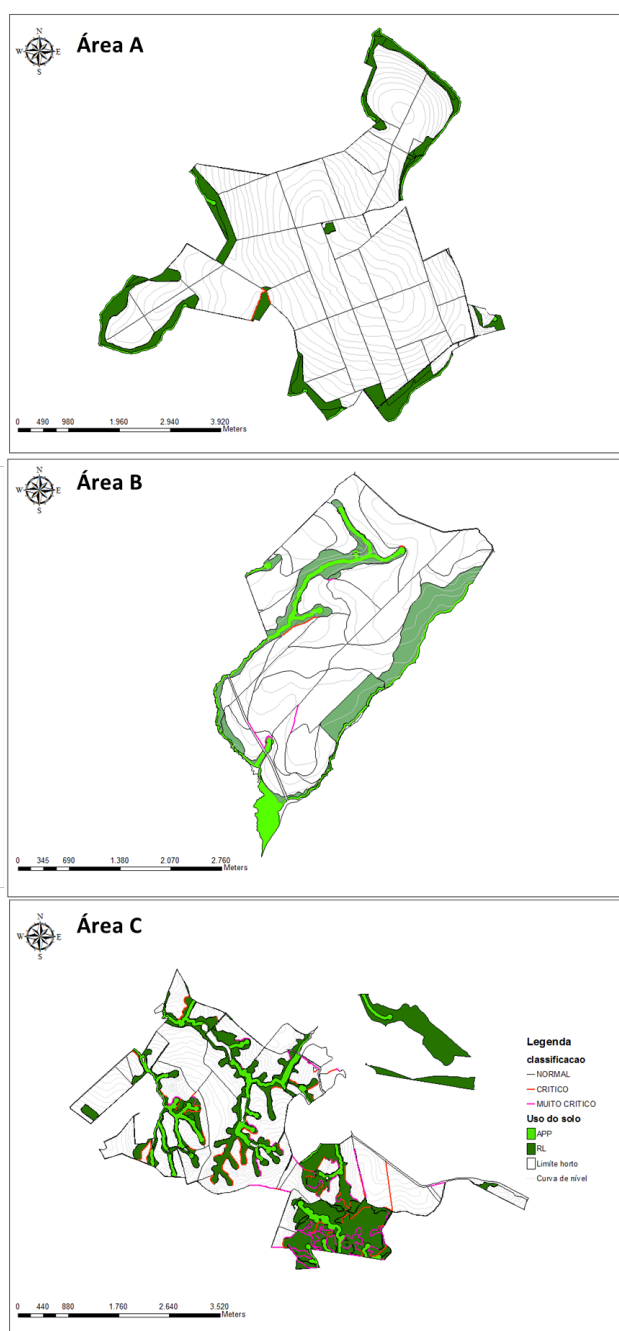


Figura 7 - Classificação das estradas quanto à criticidade para as três áreas.

Os trechos com alta priorização para manutenção compuseram 12,6% dos trechos de estradas, sendo que aproximadamente 90% desses trechos considerados críticos e muito críticos e, se encontram em áreas próximas às áreas de preservação permanente (APP) e reserva legal (RL) (Figura 7). Essas áreas podem ser classificadas como variáveis de afluência, as quais são propensas à saturação do solo e geração de escoamento direto (Agnew et al., 2006), sendo as épocas mais chuvosas as de maiores probabilidades para que ocorram problemas ligados às estradas florestais, como o acúmulo de água e a erosão (Lane et al., 1992). Ainda assim, a maior infiltração da água no solo permitiria o aumento de vazão de água nos cursos d'água da microbacia, contribuindo para o manejo sustentável da paisagem (Varela & Campana, 2000).

IMPLICAÇÕES PRÁTICAS PARA O MANEJO

A metodologia avaliada conseguiu capturar a diferença de criticidade dos trechos de estradas em uma escala operacional, podendo servir como ferramenta para a gestão operacional relacionada às estradas florestais. Do ponto de vista prático, na área C, que possuiu a maior quantidade de trechos que devem ser priorizados para a manutenção, as práticas operacionais devem focar na retirada da água das estradas, tais como a construção e manutenção de mini terraços, saídas d'água da estrada e rede de drenagem em geral (Machado, 2013). Ainda assim, deve-se dar prioridade a gastos com a reforma de pavimentos e rede de drenagem na área C como um todo em comparação às áreas A e B, uma vez que há uma tendência maior de acúmulo de água e ganho de energia potencial nos terrenos declivosos, que podem resultar na ocorrência em processos erosivos (Grigolatto et al., 2017).

Dado este conhecimento quanto à definição de estradas com potencial alto de manutenção, torna-se mais fácil a tomada de decisão, reforçando a importância que tange o manejo na escala da microbacia e a conservação dos recursos hídricos (Hewlett & Hibbert, 1967). Se por um lado, incorporar as estradas próximas às APPs e RLs às áreas de conservação minimizariam a probabilidade de danos causados pelo acúmulo de água e posterior erosão (Lane et al., 1992), por outro, a ocorrência de incêndios em povoamentos florestais em muitas vezes inicia-se pelas áreas de matas nativas (Castillo et al., 2003), reduzindo a proteção ao objeto de interesse econômico da área.

De acordo com a validação dos resultados em campo, todos os 15 trechos visitados em dias de chuva coincidiram com a classificação realizada pela metodologia proposta em relação a acúmulo e escoamento de água. Verificou-se que as estradas consideradas críticas devem estar em observação sempre quando houver um aumento na intensidade de chuvas, pois são potenciais focos de problemas, da mesma forma ocorre com as estradas muito críticas (Figura 4). Um dos principais desafios de estradas florestais está na sua localização devido a enorme complexidade de fatores envolvidos na seleção do seu traçado (Waga et al., 2020; Aguiar et al., 2021). Como uma boa parte das estradas florestais construídas em empresas de base florestal e parceiros no Brasil seguiram um padrão de construção ortogonal (Marcelino et al., 2012), que não considerava a microbacia como escala de planejamento (Ferraz et al., 2007), a realocação das estradas torna-se prioridade em relação à conservação do solo e da água. Alguns estudos propõem o uso de tecnologias mais avançadas para a definição do traçado geométrico das estradas como o uso de escaneamento através de *laser* (Waga et al., 2020; Aguiar et al., 2021).

CONCLUSÕES

O uso de indicadores hidrológicos permitiu a classificação efetiva das estradas com base em indicadores hidrológicos. Os trechos definidos como críticos e muito críticos estão próximos às áreas de preservação permanente e reserva legal, destacando a importância da metodologia como ferramenta do manejo adequado de estradas florestais.

A identificação de trechos críticos pode auxiliar em planos de manutenção de estradas, reduzindo o risco de danos ambientais como a produção de sedimentos decorrente de processos erosivos, bem como otimizar os custos de estradas florestais, direcionando os recursos para os trechos mais críticos.

AGRADECIMENTOS

À empresa florestal International Paper do Brasil pelo fornecimento de apoio financeiro, logístico e recursos humanos.

REFERÊNCIAS

- Agnew, L. J., Lyon, S., Gérard-Marchant, P., Collins, V. B., Lembob, A. J., Steenhuis, T. S., & Walter, M. T. (2006). Identifying hydrologically sensitive areas: bridging the gap between science and application. *Journal of Environmental Management*, 78(1), 63-76. PMID:16169658. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.04.021>.
- Aguiar, M. O., Silva, G. F., Mauri, G. R., Mendonça, A. R., Santana, C. J. O., Marcatti, G. E., Silva, M. L. M., Silva, E. F., Figueiredo, E. O., Silva, J. P. M., Silva, R. F., Santos, J. S., Lavagnoli, G. L., & Leite, C. C. C. (2021). Optimizing forest road planning in a sustainable forest management area in the Brazilian Amazon. *Journal of Environmental Management*, 288, 112332. PMID:33773211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112332>.
- Barbosa, R. P., Rodriguez, L. C. E., & Gorgens, E. B. (2017). Otimização multicritério da extração madeireira na Amazônia com o uso de escaneamento laser aerotransportado. *Scientia Forestalis*, 45(115), 541-550. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n115.11>.
- Barrios, A. (1995). *Erosión y producción de sedimentos en cuencas hidrográficas* (Tese de doutorado). Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de los Andes, Mérida.
- Braz, E. M. (1997). *Otimização da rede de estradas secundárias em projetos de manejo sustentável de floresta tropical*. Rio Branco: Embrapa-CPAF/AC. Circular técnica nº 15.
- Carmo, F. C. A., Fiedler, N. C., Lopes, E. S., Pereira, D. P., Marin, H. B., & Silva, E. N. (2013). Análise da densidade ótima de estradas florestais em propriedades rurais. *Cerne*, 19(3), 451-459. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602013000300012>.
- Castillo, M., Pedernera, P., & Pena, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 9(3), 44-53.
- Cunha, E. R., Bacani, V. M., & Panachuki, E. (2017). Modeling soil erosion using RUSLE and GIS in a watershed occupied by rural settlement in the Brazilian Cerrado. *Natural Hazards*, 85(2), 851-868. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-016-2607-3>.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (1999). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: EMBRAPA.
- Ferraz, S. F. B., Marson, J. C., Fontana, C. R., & Lima, W. P. (2007). Uso de indicadores hidrológicos para classificação de trechos de estradas florestais quanto ao escoamento superficial. *Scientia Forestalis*, 75, 39-49.
- Gessler, P. E., Moore, I. D., McKenzie, N. J., & Ryan, P. J. (1995). Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Systems*, 9(4), 421-432. <http://dx.doi.org/10.1080/02693799508902047>.
- Gonçalves, J. L. M., & Stape, J. L. (2002). *Conservação e cultivo de solos para plantações florestais*. Piracicaba: IPEF.
- Grigolatto, S., Mologni, O., & Cavalli, R. (2017). GIS applications in forest operations and road network planning: an overview over the last two decades. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 38, 175-186.
- Hewlett, J. D., & Hibbert, A. R. (1967). Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *Forest Hydrology*, 1, 275-290.
- Issaka, S., & Ashraf, M. A. (2017). Impact of soil erosion and degradation on water quality: a review. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1(1), 1-11. <http://dx.doi.org/10.1080/24749508.2017.1301053>.
- Kazama, V. S., Corte, A. P. D., Robert, R. C. G., Sanquetta, C. R., Arce, J. E., Oliveira-Nascimento, K. A., & DeArmond, D. (2021). Global review on forest road optimization planning: support for sustainable forest management in Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 492, 119159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119159>.
- Keffens, P. C. O. (2009). *O Biplot na análise fatorial multifatorial* (Dissertação de mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Lane, L. J., Renard, K. G., Foster, G. R., & Laflen, J. M. (1992). Development and application of modern soil erosion prediction technology – the USDA experience. *Australian Journal of Soil Research*, 30(6), 893-912. <http://dx.doi.org/10.1071/SR9920893>.
- Machado, C. C. (2013). *Construção e conservação de estradas rurais e florestais*. Viçosa: Editora UFV.
- Marcelino, F. A., Fenner, P. T., Schack-Kirchner, H., Esperancini, M., & Simões, D. (2012). Relation between erosion risk and ridge distance in forestry roads. *Energia na Agricultura*, 27(3), 61-73. <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2012v27n3p61-73>.

- Martins, S. G., Silva, M. L. N., Avanzi, J. C., Curi, N., & Fonseca, S. (2010). Fator cobertura e manejo do solo e perdas de solo e água em cultivo de eucalipto e em Mata Atlântica nos Tabuleiros Costeiros do estado do Espírito Santo. *Scientia Forestalis*, 38, 517-526.
- Orgiazzi, A., & Panagos, P. (2018). Soil biodiversity and soil erosion: it is time to get married. Adding an earthworm factor to soil erosion modelling. *Global Ecology and Biogeography*, 27(10), 1155-1167. <http://dx.doi.org/10.1111/geb.12782>.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1996). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (Agriculture Handbook, No. 703). Washington: USDA.
- Silva, V. C. (2007). Cálculo automático do fator topográfico (LS) da EUPS, na bacia do Rio Paracatu. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 33(1), 29-34.
- Souza, F. L., Sampietro, J. A., Dacoregio, H. M., Soares, P. R. C., Lopes, E. S., & Quadros, D. S. (2018). Densidade ótima e aceitável de estradas na colheita de pinus no sistema de toras curtas e árvores inteiras. *Scientia Forestalis*, 46(118), 189-198. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v46n118.05>.
- Thomas, A. D., Walsh, R. P., & Shakesby, R. A. (1999). Nutrient losses in eroded sediment after fire in eucalyptus and pine forests in the wet Mediterranean environment of northern Portugal. *Catena*, 36(4), 283-302. [http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00051-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00051-X).
- Varella, R. F., & Campana, N. A. (2000). Simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão: estudo do modelo TOPMODEL. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 5, 121-139.
- Waga, K., Tompalski, P., Coops, N. C., White, J. C., Wulder, M. A., Malinen, J., & Tokola, T. (2020). Forest road status assessment using airborne laser scanning. *Forest Science*, 66(4), 501-508. <http://dx.doi.org/10.1093/forsci/fxz053>.
- Yoshida, M., Sakurai, R., & Sakai, H. (2019). Forest road planning using precision geographic data under climate change. *International Journal of Forest Engineering*, 30(3), 219-227. <http://dx.doi.org/10.1080/14942119.2018.1498687>.
- Zagonel, R., Côrrea, C. M. C., & Malinowski, J. R. (2008). Densidade ótima de estradas de uso florestal em áreas de relevo plano em povoamentos de *Pinus taeda* no planalto catarinense. *Scientia Forestalis*, 36, 33-41.

Contribuição dos Autores: ES: Análise Formal, Metodologia, Investigação, Administração do Projeto, Escrita – Primeira Redação; GGM: Administração do Projeto, Escrita – Revisão e Edição; KF: Administração do Projeto; SFBF: Supervisão, Escrita – Revisão e Edição; RH: Supervisão, Escrita – Revisão e Edição.