

## Eficiência de diferentes dispositivos em sistemas de drenagem para reduzir a erosão hídrica em estradas florestais revestidas com cascalho

Efficiency of different devices in drainage systems to reduce water erosion in gravelled forestry roads

Helen Michels Dacoregio<sup>1\*</sup>, Jean Alberto Sampietro<sup>1</sup>, Ildegardis Bertol<sup>2</sup>,  
Camila Urio<sup>1</sup>, Franciny Lieny Souza<sup>1</sup>, Leticia Sequinato<sup>2</sup>**Resumo**

Objetivou-se avaliar a eficiência de sistemas de drenagem superficial, compostos por diferentes combinações de dispositivos de drenagem, no controle das perdas de água (PA) e de solo (PS) por erosão hídrica, em estrada florestal revestida com cascalho. O estudo foi conduzido em uma área de povoamentos comerciais de *Pinus taeda* L., em Bocaina do Sul, SC. Avaliou-se três tratamentos referentes a diferentes sistemas de drenagem por meio da construção de trechos experimentais de estrada com, aproximadamente, 70,0 m de comprimento no sentido de declive e 3,5 m de largura, sem repetições. A combinação de dispositivos de drenagem instalada ao longo do comprimento de cada trecho experimental de cada tratamento foi a seguinte: G-I – duas saídas d'água, aos 5 m e 65 m, com mais um camalhão associado à bigode instalado aos 35 m; G-II – duas saídas d'água, aos 25 m e 45 m, com mais dois bigodes instalados aos 5 m e 65 m; G-III – sistema de drenagem sem instalação de saídas d'água, camalhão ou bigode para captação e armazenamento do escoamento superficial. Os trechos experimentais foram construídos com uma camada de 0,10 m de cascalho sedimentar compactado sobre o leito natural com abaulamento do leito de 4% e valetas laterais. Para avaliação da PA e da PS, um sistema de coleta composto por três recipientes interligados sequencialmente, com capacidade de armazenamento de 500 litros cada recipiente, foi instalado na extremidade inferior (cota mais baixa) de cada trecho. O primeiro e o segundo recipiente foram providos de um vertedor com 13 janelas para reduzir o volume de água para o recipiente seguinte. O experimento foi avaliado durante 12 meses (junho/2016 a junho/2017). A precipitação pluvial acumulada foi de 1.892 mm. O sistema mais eficiente no controle das PA foi o G-II seguido do G-I, com eficiência de 98,5% (10,5 mm/ano) e 98% (13,9 mm/ano), respectivamente. O sistema que proporcionou as maiores PA foi o sistema sem obras de drenagem (G-III), com acumulado de 687 mm/ano. O sistema G-III proporcionou as maiores PS (17.424,84 kg/km/ano). Os sistemas G-I e G-II controlaram as PS em 98,7% (225 kg/km/ano) e 99,7% (57 kg/km/ano), enquanto o no G-III a PS foi de 17.424,84 kg/km/ano. O uso de obras de captação em sistemas de drenagem, como no G-I e G-II, foi eficiente no controle da erosão hídrica em estradas florestais cascalhadas.

**Palavras-chave:** rede viária florestal; conservação de solos florestais; perda de água; perda de solo.

**Abstract**

The objective of this study was to evaluate the efficiency of surface drainage systems, composed of different combinations of drainage devices, in the control of water losses (PA) and soil (PS) due to water erosion in gravelled forest roads. The study was conducted in area located in commercial *Pinus taeda* L. forest stands, in Bocaina do Sul, SC. Were evaluated three treatments related to different drainage systems through the construction of experimental field road test sites with length of, approximately, 70.0 m in towards the slope and 3.0 m wide, without repetition. The combination of drainage devices installed along the length of each experimental field road test site of each treatment was as follows: G-I – two lead-off ditches, at 5 m and 65 m, with more one water bar associated with sediment catchment ditch installed at 35 m; G-II – two lead-off ditches, at 25 m and 45 m, with more two sediment catchment ditch installed at 5 m and 65 m; G-III – drainage system without installation of lead-off ditches, water bar or sediment catchment ditch to capture and store the surface runoff. Experimental field road test sites were constructed with 10 cm compacted layer of sedimentary gravel over the natural bed with crowned surface (4%) and side ditches. For the evaluation of PA and PS, a collection system composed of three tanks with 500 liters capacity each was implanted at the lower and end of each plot, the first and second being provided with a spillway with 13 windows. The experiment was evaluated during the period of 12 months, with accumulated rainfall during this period of 1,892 mm. The most efficient system for PA control was G-II followed by G-I, with efficiency of 98.5% (10.5 mm/year)

1. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Lages / SC, Brasil.  
\* Autor Correspondente: helenmdacoregio@gmail.com

2. Departamento de Solos, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Lages / SC, Brasil.

and 98% (13.9 mm/year), respectively. The system that provided the highest PA was the system without drainage works (G-III) as expected, accumulating 687 mm / year. The G-III system provided the largest PS (17,424.84 kg/km/year). The G-I and G-II systems controlled PS in 98.7% (225 kg/km/year) and 99.7% (57 kg/km/year), whereas the G-III the PS was 17,424.84 kg/km/year. The use of drainage works in drainage systems, as in G-I and G-II, was efficient in the control of water erosion on gravelled forest roads.

**Keywords:** forest road network; soil forest conservation; water loss; soil loss.

---

## INTRODUÇÃO

As estradas são essenciais no manejo dos povoamentos em áreas de produção florestal. A qualidade dessas estradas é fundamental para a eficiência de atividades no momento de implantação da floresta, nas operações de colheita e transporte de madeira, no gerenciamento de incêndios, nas atividades de proteção e manutenção da floresta e nas atividades de conservação do solo e da água (LIU et al., 2014; BROWN et al., 2015).

Entretanto, as estradas são altamente suscetíveis a processos de erosão hídrica devido à remoção da cobertura de vegetação protetora do solo durante a sua construção e manutenção das vias de acesso florestal (JIMENEZ et al., 2013). Além disso, a compactação do leito das estradas florestais e de camadas subjacentes que ficam expostas ao impacto das gotas de chuva proporcionam redução da infiltração de água no solo, o que aumenta o escoamento superficial e a erosão hídrica, mesmo em eventos de precipitação pluvial de baixa intensidade (PEREIRA et al., 2015).

A falta ou uso inadequado de técnicas de construção e manutenção de estradas (KELLER; SHERAR, 2010), a ineficiência ou ausência de sistemas de drenagem (OLIVEIRA et al., 2015) e o tráfego de veículos pesados, principalmente, nas atividades de colheita e transporte (CORRÊA; DEDECEK, 2009), potencializam os processos erosivos, tornando as estradas as principais responsáveis pela produção de sedimentos em áreas florestais (OLIVEIRA et al., 2010), ou um dos principais usos produtores de sedimentos em bacias hidrográficas florestais (RODRIGUES et al., 2018).

As principais técnicas para reduzir os efeitos negativos do escoamento das águas pluviais e da erosão consistem no abaulamento do leito entre 2 e 6%, de forma a permitir o escoamento pluvial para fora do leito até o sistema de drenagem; construção de camadas de pavimento com superfície rugosa, revestidas de cascalho na maior extensão possível e mínima quantidade de sedimentos soltos e disponíveis para o transporte pelo escoamento superficial; e zoneamento para proteção dos cursos d'água adjacentes ao fluxo do escoamento das valetas laterais e saídas de água das estradas (KELLER; SHERAR, 2010; MDEP, 2016).

O uso de material rochoso para o revestimento de estradas florestais primárias e, quando for o caso, secundárias, é indicado como medida tanto para aumentar a capacidade de suporte e trafegabilidade das estradas, como também para redução da erosão hídrica (MDEP, 2016). Camadas de pavimento constituídas por partículas mais grossas, normalmente, permitem uma maior infiltração de água no leito da estrada e dificultam o desprendimento e transporte de partículas pela ação do impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial, respectivamente.

Um detalhado planejamento das estradas e de seu conjunto de dispositivos do sistema de drenagem superficial é necessário devido aos efeitos negativos que as estradas podem proporcionar aos ambientes de produção florestal. Um sistema de drenagem superficial construído diante diretrizes técnicas, garante menor erosão do solo e perda de água, proporcionando assim, menores impactos ambientais aos recursos hídricos (BROWN; AUST; MCGUIRE, 2013).

No Brasil, informações referentes ao efeito de sistemas de drenagem superficial em estradas florestais sobre a erosão hídrica são escassas e, na maioria das vezes, esses sistemas são construídos de forma empírica, o que pode proporcionar aumento nos custos de construção e altos impactos ambientais.

A escolha dos conjuntos de dispositivos que deve compor um sistema de drenagem também deve considerar o tipo de revestimento empregado, a declividade da estrada e, ainda, aspectos operacionais (KELLER; SHERAR, 2010; MACHADO, 2013).

A hipótese deste estudo é de que sistemas de drenagem compostos por maior número de obras de captação do escoamento superficial, tendem a ser mais eficientes no controle das perdas de água e de solo, reduzindo os impactos ambientais ocasionados pela erosão hídrica em estradas florestais. Objetivou-se avaliar a eficiência de três sistemas de drenagem superficial em estrada florestal com revestimento do leito quanto às perdas de solo e água por erosão hídrica.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

O estudo foi realizado em uma área com povoamentos florestais comerciais de *Pinus taeda* L., em Bocaina do Sul, Planalto Sul do estado de Santa Catarina. O solo do local de estudo foi classificado como CAMBISSOLO HÚMICO (SANTOS et al., 2013), com textura franco argilosa e tolerância de perda de solo de 10 t/ha/ano ou 0,74 mm/ano (BERTOL; ALMEIDA, 2000). O relevo da área caracteriza-se como ondulado e forte ondulado, com declividade média de 20% considerando uma rampa de 250 metros de comprimento.

O clima da região é do tipo Cfb, com verão temperado, inverno seco e temperatura média anual entre 14 e 16 °C. A precipitação pluvial média anual varia entre 1.600 mm e 1.900 mm, sendo bem distribuída ao longo do ano, sem período de estiagem (ALVARES et al., 2014).

### Instalação e descrição dos trechos experimentais

Uma estrada de uso secundário da área de estudo, com tráfego de veículos somente no momento da colheita da madeira, foi selecionada para a construção dos trechos experimentais na área de estudo, o que permitiu o fechamento dessa durante o período de avaliação.

Os trechos experimentais (parcelas padrão), foram utilizados para avaliar os efeitos da erosão hídrica de estradas com diferentes sistemas de drenagem. A quantificação das perdas de água e de solo pelo método da “parcela-padrão” sem repetições foi considerado devido ao tamanho dos trechos empregados e à necessidade de menor variabilidade possível em relação à declividade e tipo de solo (CAVICHIOLO, 2005). Assim, os trechos experimentais foram construídos na mesma estrada secundária, com aproximadamente 15 m de distância entre o início de um trecho e término de outro trecho, para obter a menor variabilidade possível entre trechos experimentais.

Os trechos experimentais foram readequados conforme o padrão adotado nas estradas primárias da área de estudo, empregando-se como revestimento uma camada de 0,10 m de cascalho sedimentar compactado sobre o leito natural. A área total de avaliação de cada trecho experimental foi considerada como o comprimento do trecho ( $\pm 70$  m) e a metade da largura do leito da estrada ( $\pm 3,5$  m) (Figura 1), conforme proposto por Forsyth, Bubb e Cox (2006), a fim de diminuir a área total de contribuição do escoamento e permitir uma avaliação mais detalhada. Cada trecho experimental possui declividade média variável conforme sua posição na paisagem.

Cada trecho experimental representou um sistema de drenagem superficial, sendo estes compostos por diferentes combinações de dispositivos de drenagem. Os dispositivos de drenagem utilizados nos sistemas de drenagem avaliados foram as saídas d'água, o camanhão, e os bigodes. As saídas d'água foram instaladas nos sistemas de drenagem com dimensões médias de 0,60 x 0,92 x 3,4 m e capacidade de armazenamento de 2 m<sup>3</sup> de água e sedimento; bigodes com dimensões de 0,65 x 1,10 x 6,0 m e capacidade de armazenamento de 4,2 m<sup>3</sup>; camalhões de base larga com 10 m de comprimento por 0,5 m de altura; e abaulamento do leito com inclinação média de 4% e valetas laterais.

As combinações dos dispositivos de drenagem que compuseram os sistemas testados foram dimensionadas conforme Keller e Sherar (2010), sendo estas:

- **G-I:** drenagem superficial com saídas d'água aos 5 m e 65 m (a partir início do trecho) e camalhão associado à bigode aos 35 m do trecho (Figura 1a). Esse trecho experimental teve declividade média de 22% e área total de 245 m<sup>2</sup>;
- **G-II:** drenagem superficial com saídas d'água aos 25 m e 45 m (a partir início do trecho) associadas à bigodes aos 5 m e 65 m do trecho (Figura 1b). O trecho experimental teve declividade média de 29% e área total de 242 m<sup>2</sup>;
- **G-III:** drenagem superficial apenas com abaulamento do leito e valetas laterais (Figura 1c). A declividade média foi de 11% e área total de 226 m<sup>2</sup>.

Os trechos experimentais foram delimitados em seu limite superior (cota mais alta) e inferior (cota mais baixa) com chapas galvanizadas de 0,6 m, sendo 0,3 m enterrados e 0,3 m acima do nível da estrada, para quantificar e qualificar o escoamento. A delimitação no limite superior foi realizada

para bloquear a entrada de escoamento oriundo da parte superior ao trecho. No limite inferior, as chapas foram instaladas para conduzir o escoamento superficial por meio de um tubo de PVC para o sistema de recipientes coletores.

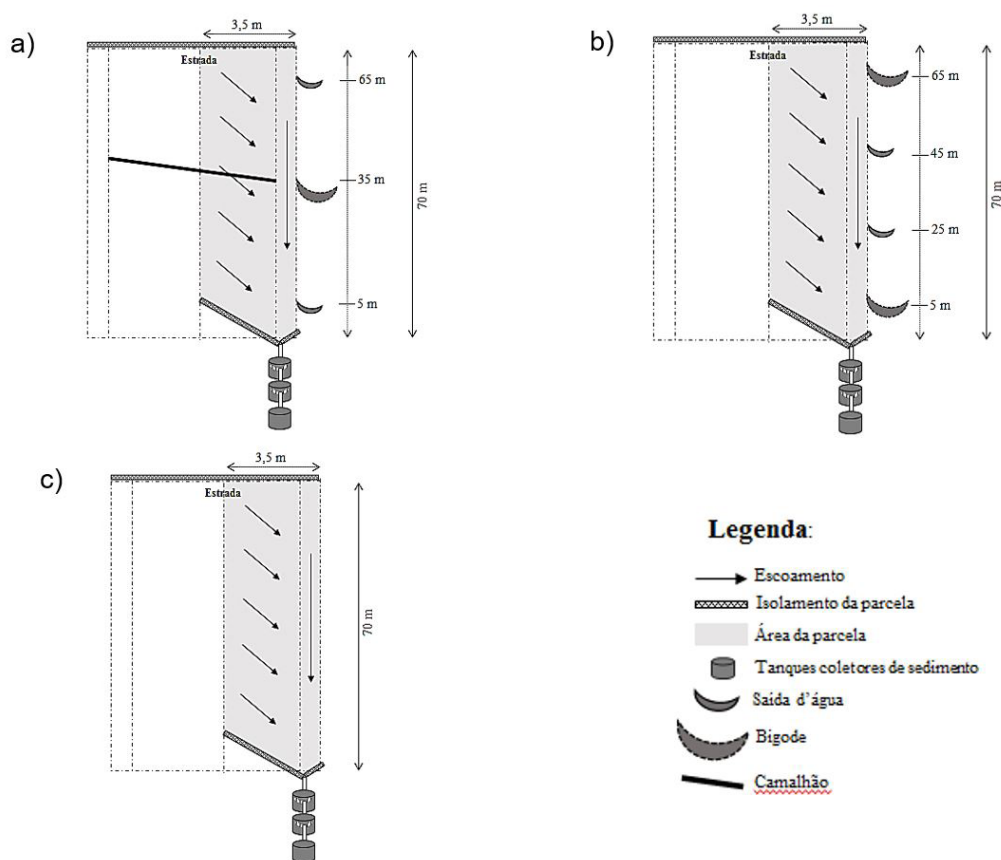
O escoamento após eventos de chuva foi coletado por meio de três recipientes interligados sequencialmente, com capacidade de armazenamento de 500 litros cada recipiente. Para evitar perdas em eventos de alta magnitude, quando o escoamento fosse maior do que a capacidade de armazenamento dos recipientes, o primeiro e o segundo recipiente foram providos de um vertedor com 13 janelas interligados por meio de um tubo galvanizado para conduzir a água até recipiente seguinte recipiente seguinte. Assim, após o enchimento do primeiro recipiente de coleta, uma alíquota de  $\frac{1}{13}$  de água passava para o segundo recipiente e o restante ( $\frac{12}{13}$ ) voltava para o ambiente. O mesmo processo ocorria após enchimento do segundo recipiente.

### Monitoramento e quantificação da chuva e das perdas de água e de solo

O monitoramento da chuva e das perdas de água e de solo foi realizado de junho/2016 a junho/2017. A chuva acumulada nos sistemas de drenagem foi obtida por meio de três pluviômetros, instalados um em cada trecho. A partir da média do volume acumulado nos pluviômetros, obteve-se a chuva acumulada ocorrida na área de estudo.

A quantificação das perdas de água (PA) por escoamento superficial foi realizada pela mensuração da água armazenada nos tanques coletores com auxílio de uma haste graduada e calibrada. A partir da leitura da lâmina de água de cada tanque obteve-se o volume de água escoado. Quando havia presença de água armazenada no 2º e 3º recipiente do sistema coletor, o volume coletado em cada recipiente foi multiplicado por 13.

As perdas de solo (PS) provenientes do revestimento dos trechos foram quantificadas utilizando-se amostras de escoamento, conforme descrito por Cogo (1978). O volume de escoamento contido nos recipientes, após sua quantificação, foi homogeneizado e, em seguida, duas amostras dessa suspensão



**Figura 1.** Croqui dos trechos experimentais referentes aos sistemas de drenagem G-I (a), G-II (b) e G-III (c) avaliados em estrada florestal revestimento.

**Figure 1.** Experimental design of field road test sites for the G-I (a), G-II (b) and G-III (c) drainage systems evaluated on the gravelled forest road.

foram coletadas em recipientes de 220 mL. A quantificação do solo perdido foi realizada em laboratório onde as amostras coletadas foram pesadas e, após a adição de três gotas de HCl 2,5 N, deixadas em repouso por 48 horas para decantação do solo.

Após a decantação do solo, as amostras foram mantidas em estufa a 60 °C até atingirem peso constante. Posteriormente, as amostras foram pesadas obtendo-se a massa seca de solo, com a qual calculou-se a concentração deste por volume de escoamento coletado nos recipientes. Os valores de massa de solo seco e de água contidos nos recipientes foram somados aos de massa de solo seco e de água contidos nas amostras, para obtenção das PS e PA totais ocorridas no período. A PS anual foi calculada pela soma das PS em cada coleta, sendo expressa em kg/km/ano. O solo perdido por erosão hídrica foi caracterizado por meio de análise granulométrica (GEE; BAUDER, 1986).

Um fator de correção ( $F_c$ ) foi determinado para fins de comparação, em função da diferença de declividade média entre os trechos experimentais. Para tanto, o fator declividade do terreno ( $S$  médio) para cada trecho e o fator  $S$  da declividade padrão da Equação Universal de Perda de Solo - USLE, de  $0,09 \text{ m m}^{-1}$  foram calculados utilizando-se a Equação 1, conforme proposto por Wischmeier e Smith (1978):

$$S = 0,065 + 4,56 \text{ sen } \theta + 65,41 (\text{sen } \theta)^2 \quad (1)$$

Onde:  $S$  = fator grau do declive; e  $\theta$  = ângulo do declive.

O  $F_c$  para as perdas de solo e de água dos trechos foram calculados com base nos fatores  $S$  obtidos por meio da Equação 1, utilizando-se a Equação 2:

$$F_c = \frac{S \text{ } 0,09 \text{ mm}^{-1}}{S \text{ médio do trecho}} \quad (2)$$

Onde:  $S \text{ } 0,09 \text{ mm}^{-1}$  = fator declividade padrão (9%);  $S$  médio do trecho (parcela) fator declividade média do trecho.

### Capacidade de armazenamento de solo nos dispositivos de drenagem

A capacidade de armazenamento de solo nas saídas d'água e bigodes de cada trecho foi determinado por meio da medição, com auxílio de trena, das dimensões de comprimento, largura e profundidade dos referidos dispositivos no momento de instalação do experimento (Junho/2016) e após um ano de avaliação (Junho/2017).

As medidas foram realizadas em três pontos (nas duas extremidades e no centro) em cada dispositivo. Dessa forma, a capacidade de armazenamento (em  $\text{m}^3$ ) de escoamento superficial e de solo foi calculada por meio do produto das médias das medidas obtidas. Com isso, também, pode-se determinar a perda da capacidade de armazenamento e a massa de solo armazenada durante o período de avaliação, por meio da comparação entre a capacidade dos dispositivos no início e no final do período de avaliação.

### Análise de dados

Os eventos de chuva acumulados foram considerados como repetições, da mesma forma que nos estudos de Cavichiolo (2005) e de Oliveira et al. (2015), pois os eventos de chuva tiveram a mesma intensidade, duração e quantidade para cada sistema de drenagem no período de avaliação.

Assim, a análise de covariância (ANCOVA) foi empregada para verificar se houve diferença estatística ao nível mínimo de 5% de significância ( $p \leq 0,05$ ) entre os parâmetros de ajuste de nível e inclinação de equações de regressão linear para estimativa da PA e da PS em função da chuva acumulada para cada sistema de drenagem, conforme Snedecor e Cochran (1989). Adotou-se modelo linear simples na ANCOVA com intuito de evitar a diminuição dos graus de liberdade do resíduo de uma unidade e a perda do poder de ajuste do modelo.

Havendo diferença entre os parâmetros de ajuste das equações de regressão linear de cada variável de interesse (PA e PS) entre os sistemas de drenagem, ajustou-se, dessa forma, individualmente equações por Modelos Lineares Generalizados (MLGs) testando-se as distribuições Normal, Poisson e Gama, e as funções de ligação identidade e logarítmica.

A distribuição de melhor ajuste foi a Gama na função de ligação logarítmica, tanto para estimativa da PA e da PS. A precisão de ajuste das equações foi avaliada pelo coeficiente de determinação

(R<sup>2</sup>) e erro padrão da estimativa, considerando-se, também, os critérios de Akaike (AKAIKE, 1974) e Bayesiano (SCHWARZ, 1978), em que quanto menores os valores destes parâmetros, maior é a precisão de ajuste da equação.

A partir das equações, os valores de PA e de PS foram estimados em função da chuva acumulada para cada sistema de drenagem plotando-se os resultados em gráficos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Chuva e perdas de água

O volume de chuva total na área de estudo foi de 1.892 mm no período de junho/2016 a junho/2017. O sistema de drenagem G-III proporcionou PA equivalentes a 35,8% da chuva (687,4 mm/ano), sendo o sistema de drenagem que teve as maiores perdas em todas as coletas realizadas (Tabela 1). O G-I e o G-II proporcionaram perdas de apenas 0,7% (13,9 mm/ano) e 0,5% (10,5 mm/ano) da chuva, respectivamente.

A redução de perdas de água na ordem de 98,0% e 98,5% em relação ao total de chuva proporcionada pelos sistemas G-I e G-II, respectivamente, foi proporcionada pela maior capacidade desses sistemas em captar e armazenar o escoamento superficial, em comparação ao G-III, que foi construído sem presença de saídas de água e/ou bigodes como dispositivos de drenagem. Os dispositivos de drenagem têm como função a retirada de água da superfície da estrada e o armazenamento e/ou direcionamento do escoamento para área adjacente à estrada (MDEP, 2016).

Como as saídas de água e os bigodes dividem a estrada em segmentos, esses dispositivos proporcionam interceptação do escoamento superficial e, por consequência, a redução do volume e da velocidade da enxurrada (OLIVEIRA et al., 2010), que é captada e armazenada, o que pode proporcionar menor erosão hídrica da estrada.

Em todos os sistemas de drenagem, a PA teve tendência de aumento com o aumento da chuva acumulada (Figura 2a, b, c).

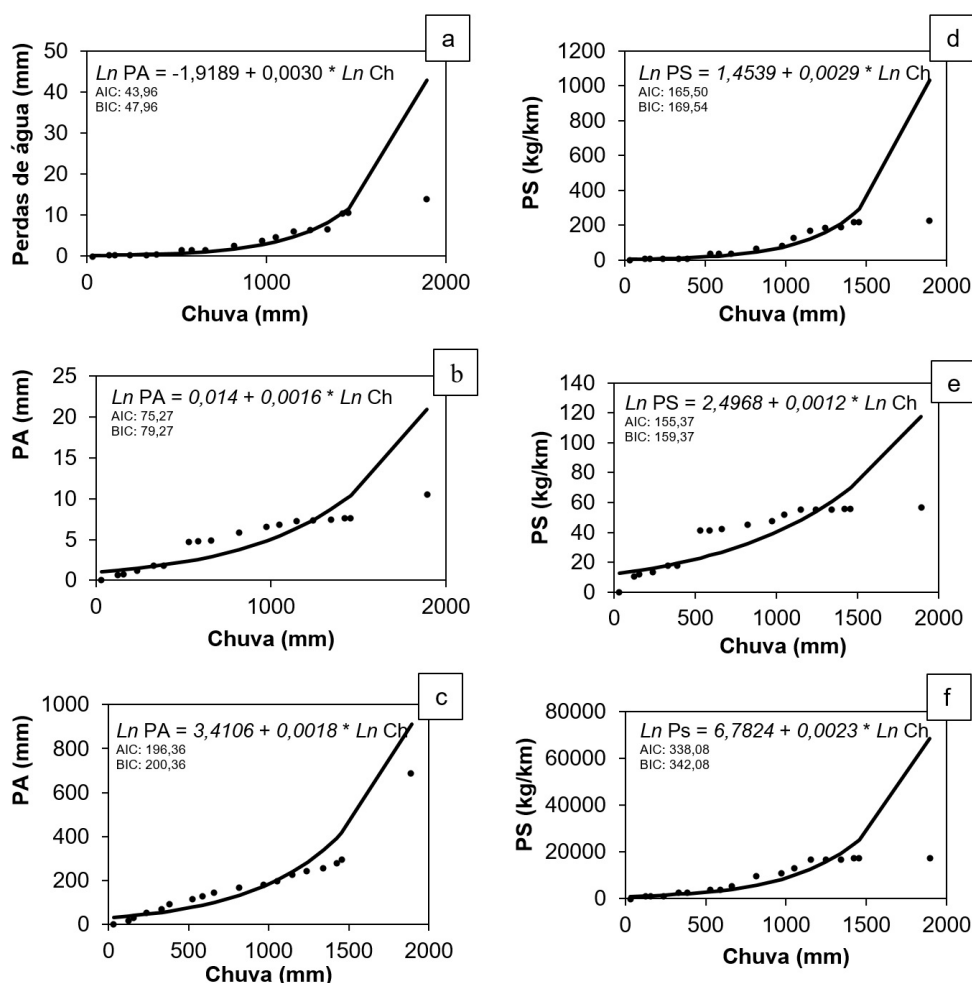
**Tabela 1.** Chuvas (mm) ocorridas nos trechos experimentais e perda de água (mm) nos sistemas de drenagem G-I, G-II e G-III de estrada com revestimento.

**Table 1.** Rainfall (mm) occurred in the experimental sections and water loss (mm) in the drainage systems G-I, G-II and G-III of gravelled forest road.

Data da coleta	Chuva (mm)	Perda de água (mm)		
		G-I	G-II	G-III
04/07/2016	31	0,00	0,02	1,27
22/07/2016	91	0,22	0,64	13,56
08/08/2016	32	0,01	0,09	13,45
29/08/2017	84	0,01	0,45	21,84
12/09/2016	94	0,01	0,59	21,25
11/10/2016	54	0,01	0,01	17,83
24/10/2016	144	1,08	2,91	22,67
07/11/2016	54	0,01	0,11	17,39
28/11/2016	75	0,01	0,11	15,91
20/12/2016	160	1,31	0,89	17,85
09/01/2017	155	1,06	0,70	17,46
01/02/2017	76	0,96	0,28	16,89
24/02/2017	100	1,26	0,43	27,45
17/03/2017	93	0,37	0,14	17,37
10/04/2017	98	0,31	0,07	16,88
28/04/2017	80	3,78	0,22	19,49
18/05/2017	35	0,14	0,00	16,47
01/06/2017	436	3,34	2,81	392,40
Total	1.892	13,88	10,47	687,43
	(mm)	(mm/ano)	(mm/ano)	(mm/ano)

Onde: PA: perda de água (mm); Ch: chuva acumulada (mm); PS: perdas de solo; Ln: logaritmo natural; AIC: critério de Akaike; BIC: critério bayesiano; pontos referem-se aos valores de PA observados (a, b, c) e aos valores de PS observados (d, e, f).

A relação positiva e linear entre a PA e a chuva acumulada é recorrente em estradas florestais (FORSYTH; BUBB; COX, 2006; OLIVEIRA et al., 2015). Essa relação pode variar entre eventos de chuva, devido à baixa taxa de infiltração de água no solo de estradas, resultado da alta compactação e, ainda, em função da distribuição das chuvas, em que, quando o solo está úmido em função de



**Figura 2.** Relação entre a PA e a PS com a chuva acumulada para os sistemas de drenagem avaliados G-I (a, d), G-II (b, e) e G-III (c, f).

**Figure 2.** Relationship between PA and PS with accumulated rainfall for evaluated drainage systems (a, d), G-II (b, e) e G-III (c, f).

chuvas antecedentes, as perdas de água tendem a ser maiores mesmo em chuvas não muito volumosas (OLIVEIRA et al., 2015).

A tendência de reduzir as perdas de água foi significativamente diferente ( $p < 0,01$ ) entre os sistemas avaliados (Figura 2), podendo ser explicada 90% da variabilidade da PA em função da chuva acumulada ( $R^2 = 0,90$ ), com 37,52 mm de erro padrão da estimativa.

Embora os sistemas G-I e G-II tenham proporcionado menores PA com a chuva acumulada, esses tiveram tendência distinta ao longo do período de avaliação. O G-II proporcionou perdas superiores ao G-I durante o primeiro semestre de avaliação, e inferiores no segundo semestre. Esse comportamento pode ser proveniente da constante redução da capacidade de armazenamento do escoamento superficial e do solo erodido pelos dispositivos de drenagem conforme a ocorrência dos eventos de chuva. No sistema G-I, essa redução foi de 21% em relação à sua capacidade original, enquanto no G-II, a redução foi de 17%.

No sistema G-I, o camalhão no centro da parcela funcionou como uma barreira física ao escoamento superficial, reduzindo a velocidade da enxurrada e, dessa forma, o potencial do escoamento em desprender e transportar partículas de solo. Além disso, o bigode associado ao camalhão captou e armazenou o escoamento superficial oriundo do trecho a montante do camalhão, com redução

do volume de escoamento que chegou ao limite inferior do trecho experimental. O bigode, ao armazenar o escoamento, favorece a infiltração de água no solo e o abastecimento do lençol freático (OLIVEIRA et al., 2010).

O sistema de drenagem G-II proporcionou eficiência ligeiramente superior (0,05%) ao G-I, provavelmente, pelo maior número de obras e, conseqüente, maior capacidade de armazenamento, que foi de 11,7 m<sup>3</sup> no início do estudo para o GII e de 9 m<sup>3</sup> para o G-I. Como o escoamento superficial é interceptado em distâncias mais curtas no G-II do que no G-I, o volume e a velocidade de enxurrada tendeu a ser menor, mesmo sem haver camalhão no G-II, o que também é reflexo da maior capacidade de armazenar o escoamento superficial desse sistema de drenagem.

### **Perdas de solo**

As perdas de solo no sistema de drenagem G-I foram de 225,14 kg/km/ano. No sistema de drenagem G-II, as perdas foram de apenas 56,91 kg/km/ano. Enquanto no sistema G-III, a PS total foi de 17.424,84 kg/km/ano, sendo o sistema que mais perdeu solo pela ação da erosão hídrica.

Em situação semelhante ao G-III, no nordeste da Austrália, Forsyth, Bubb e Cox (2006) relatam uma PS na ordem de 2.861 kg/km/ano em um trecho de estrada de uso florestal com revestimento do leito com cascalho, comprimento de 34 m, largura de 10 m, declividade média de 1% e sem saídas de água, camalhão e bigode como dispositivos de drenagem. Caso as perdas encontradas pelos autores fossem corrigidas para a declividade padrão (9%) da USLE e para largura de estrada de 7 m, as perdas ficariam na ordem de 16.000 kg/km/ano, estando próximo ao valor encontrado no presente estudo, no sistema de drenagem G-III (17.424 kg/km/ano).

O sistema G-III proporcionou PS superiores aos demais sistemas de drenagem, possivelmente, por não possuir dispositivos de captação e diminuição da velocidade do escoamento, como já mencionado para a PA. A redução da PS devido ao maior dimensionamento de dispositivos em sistemas de drenagem, é concordante com os resultados de Cavichiolo (2005). Em estudo realizado no Norte de Santa Catarina, Cavichiolo (2005) verificou que, em trechos de estrada não revestida com e sem dispositivos de drenagem, houve redução das PS em 24%, com um total acumulado de 2.400 e de 1.440 kg/km/ano para trechos com e sem obras de conservação da estrada, respectivamente, nos trechos que o sistema de drenagem havia sido dimensionado com camalhão associado à vala de retenção como o bigode.

A PS teve tendência de aumento com o aumento da chuva acumulada, em todos os sistemas de drenagem (Figura 2d, e, f). Assim como para a PA, houve diferença significativa ( $p < 0,01$ ) entre as tendências de PS em função da chuva acumulada dos sistemas de drenagem. O fator sistema de drenagem no MLG explicou 97% da variação da PS ( $R^2 = 0,97$ ), com erro padrão da estimativa 1.063,14 kg/km.

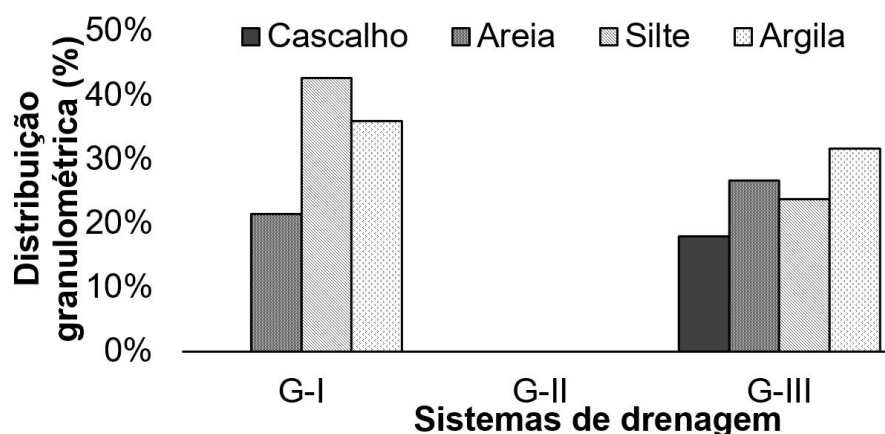
A relação linear e positiva, entre a PS e a chuva acumulada ocorreu devido ao acúmulo de maiores volumes de chuva e, por conseqüência, de escoamento superficial ao longo do tempo, que tende a reduzir a eficiência dos dispositivos de drenagem. Dessa maneira, em novos eventos de chuva, cada vez mais o escoamento superficial proporciona um maior volume e velocidade de enxurrada, adquirindo maiores forças, capazes de desprender e transportar um número maior de partículas de solo com maiores dimensões. Essa relação também foi encontrada nos estudos de Corrêa, Dedecek e Roloff (2010) e de Oliveira et al. (2015), que avaliaram as PS em estradas florestais.

Os sistemas G-I e G-II tiveram tendência distinta entre os dois semestres de avaliação e similar ao comportamento observado para a PA. Nos primeiros seis meses de avaliação, o sistema de drenagem G-II proporcionou maiores perdas de solo e foi menos eficiente, enquanto o G-I foi o mais eficiente no período. No segundo semestre, a eficiência dos sistemas de drenagem teve comportamento inverso em relação ao primeiro semestre para a redução das perdas de solo.

Essa constatação confirma a relação existente entre perdas de água e de solo oriundas do processo de erosão hídrica em estradas florestais, sendo concordante com os estudos de Corrêa; Dedecek (2009) e Oliveira et al. (2015).

A granulometria do solo dos trechos experimentais foi composta, em média, por 75% cascalho, 8% areia, 9% silte e 8% argila. No entanto, o solo perdido nos sistemas de drenagem teve granulometria variável (Figura 3).

As perdas de solo provenientes de processos erosivos no sistema G-I ocorreram predominantemente na fração silte (43%), seguido da fração argila (36%) e areia com 21%. No sistema G-III, a fração



**Figura 3.** Distribuição granulométrica do solo perdido (%) nos sistemas de drenagem G-I, G-II e G-III, no trecho de estrada com revestimento de cascalho.

**Figure 3.** Granulometric distribution of eroded soil (%) in the G-I, G-II and G-III drainage systems, in the gravelled forest road.

predominante foi argila (32%), seguida das frações areia e silte, com 27% e 24%, respectivamente, e com 18% de cascalho. O sistema G-II não proporcionou quantidade suficiente de solo perdido para a análise.

A perda de fração grossa como cascalho, no sistema G-III, pode ser explicada devido às maiores PA e PS, pois, nesse sistema, o volume e a velocidade do escoamento superficial atingiu energia suficiente para transportar partículas de solo maiores densas como as de cascalho e de areia.

No G-I, o camalhão no centro da parcela direcionou o escoamento da parte montante (primeiros 35 m) para o bigode a ele associado. Além disso, o camalhão proporcionou diminuição da velocidade do escoamento, o que reduziu a capacidade de transporte de partículas. O G-II, mesmo não perdendo quantidade suficiente de solo para realização da análise, possivelmente, não perdeu partículas grossas.

A textura do solo perdido por erosão hídrica em estradas cascalhadas na Austrália teve percentual de partículas finas, mesmo em estradas cascalhadas com baixo percentual de partículas finas (<0,02 mm), quando comparado a estradas sem revestimento do leito (FORSYTH; BUBB; COX, 2006). Isto sugere que partículas finas, quando não agregadas, tendem a ser mais facilmente transportadas pelo escoamento superficial em estradas florestais, uma vez que são menores do que partículas mais grossas e demandam menor energia de escoamento para serem transportadas.

### Capacidade de armazenamento de solo nos dispositivos de drenagem

A capacidade de armazenamento dos dispositivos do sistema G-I foi de 9 m<sup>3</sup> no início do estudo, enquanto no G-II a capacidade foi de 11,37 m<sup>3</sup>. Após um ano, o sistema de drenagem G-I teve perda de 21% da sua capacidade e armazenou um total de 3.300 kg de solo.

O sistema de drenagem G-II, com duas saídas d'água e dois bigodes, teve sua capacidade reduzida em 17%, passando a ter uma capacidade de 9,40 m<sup>3</sup> com armazenamento de 3.525 kg de solo no final do período de avaliação.

A capacidade total de armazenamento dos dispositivos tende a ser válida somente entre eventos de chuva bem distribuídos e não concentrados, uma vez que, após ao acúmulo de escoamento, a água tendeu a permanecer por três dias ou mais tempo armazenada, até sua completa infiltração no solo ou evaporação. Por isso, pode-se considerar que a capacidade de armazenamento do escoamento nos dispositivos é inferior aos dados apresentados em grande parte dos eventos de chuva.

Em geral, o sistema de drenagem a ser utilizado deve considerar a drenagem natural do terreno, sempre buscando utilizar os pontos naturais de deságue do escoamento superficial (MDEP, 2016), além de ser dimensionado de forma a não reduzir o desempenho dos veículos de transporte.

## CONCLUSÃO

Em função da significativa redução da PS, recomenda-se o emprego tanto sistema G-II, que foi mais eficiente, como do sistema G-I. Contudo, essa recomendação é pertinente apenas para trechos de estradas florestais com características edafoclimáticas semelhantes às do trecho de estudo.

A erosão hídrica em estradas revestidas com cascalho e sem dispositivos de drenagem para captação e armazenamento do escoamento, tende a transportar, além de um elevado volume de solo, partículas mais grossas como cascalho e areia. O transporte de partículas que constituem o revestimento da estrada, além de assorear os cursos d'água, reduz a qualidade do leito da estrada para o tráfego de veículos.

A eficiência dos dispositivos de drenagem reduziu ao longo do período de avaliação e, possivelmente, essa eficiência continuará reduzindo devido ao acúmulo de solo, sendo, então, necessária a manutenção dos dispositivos.

## REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. A. New look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 7160-723, 1974.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2014.

BERTOL, I. ALMEIDA, J. A. Tolerância de perda de solo por erosão para os principais solos do estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 657-668, 2000.

BROWN, K. R.; MCGUIRE, K. J.; AUST, W. M.; HESSION, W. C.; DOLLOE, C. A. The effect of increasing gravel cover on forest roads for reduced sediment delivery to stream crossings. **Hydrological Processes**, v. 29, p. 1129-1140, 2015.

BROWN, K. R.; AUST, W. M.; MCGUIRE, K. J. Sediment delivery from bare and gravelled forest road stream crossing approaches in the Virginia Piedmont. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 836-846, 2013.

COGO, N. P. Uma contribuição à metodologia de estudo das perdas de erosão em condições de chuva natural. I. Sugestões gerais, medição dos volumes, amostragem e qualificação de solo e água da enxurrada (1º aproximação). In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 2., 1978, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: EMBRAPA, 1978. p. 75- 98.

CORRÊA, C. M. C.; DEDECEK, R. A. Erosão real e estimada através da RUSLE em estradas de uso florestais, em condições de relevo plano a suave ondulado. **Floresta**, v. 39, p. 381-391, 2009.

CORRÊA, C. M. C.; DEDECEK, R. A. ROLOFF, G. Sedimentos provenientes de estradas de uso florestal em condição de relevo ondulado a fortemente ondulado. **Floresta**, v. 40, p. 221-234, 2010.

FORSYTH, A. R.; BUBB, K. A.; COX, M. E. Runoff, sediment loss and water quality from forest roads in a southeast Queensland coastal plain Pinus plantation. **Forest Ecology and Management**, v. 221, p. 194-206, 2006.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 383-411.

JIMENEZ, M. D.; RUIZ-CAPILLAS, P.; MOLA, I.; PÉREZ-CORONA, E.; CASADO, M. A.; BALAGUER, L. Soil development at the roadside: a case study of a novel ecosystem. **Land Degradation Development**, v. 24, p. 564-574, 2013.

KELLER, G.; SHERAR, J. **Engenharia de estradas de baixo volume de tráfego: manual de campo para as melhores práticas de gestão em estradas de baixo volume de tráfego**. Washington: Agência de Desenvolvimento Internacional, 2010. 183 p.

LIU, I. J.; WANG, T. W., CAI, C. F., LI, Z. X., CHENG, D. B. Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the three gorges reservoir area, China. **Science Total Environmental**, v. 485, p. 93-102, 2014.

MACHADO, C. C. **Construção e Conservação de Estradas Rurais e Florestais**. Viçosa: UFV. 441 p. 2013.

MDEP - MAINE DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION. **Gravel Road maintenance manual: a guide for landowners on camp and other gravel roads**. Washington: EPA, 2016. 106 p.

OLIVEIRA, L. C.; BERTOL, I.; BARBOSA, F. T.; CAMPOS, M. L.; MECABÓ JÚNIOR, J. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica em uma estrada florestal na Serra Catarinense. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 655-665, 2015.

OLIVEIRA, A. O.; SILVA, M. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. A. CURI, N. Erosão hídrica em estradas florestais: causas e controle. **Revista de Geografia**, v. 27, n. 2, p. 126- 140, 2010.

PEREIRA, P.; A. GIMEÑEZ-MORERA, A.; NOVARA, A.; KEESSTRA, S.; JORDÁN, A.; MASTO, R. E.; BREVIK, E.; AZORIN-MOLINA, C.; CERDÀ, A. The impact of road and railway embankments on runoff and soil erosion in eastern Spain. **Hydrology and Earth System Sciences**. v. 12, p. 12947-12985, 2015.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2013.

SCHWARZ, G. Estimating the dimensional of a model. **Annals os Statistics**, v. 6, . 2, p. 461-464, 1978.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University, 1989, 503 p.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978.

Recebido em: 17/12/2017

Aceito em: 18/09/2018