

Uso de indicadores hidrológicos para classificação de trechos
de estradas florestais quanto ao escoamento superficialUsing hydrological indicators for runoff
assessment on forest road segmentsSilvio Frosini de Barros Ferraz¹, Júlio César Marson²,
Carolina Rodrigues Fontana³ e Walter de Paula Lima⁴

Resumo

Estradas florestais têm sido apontadas como fontes de problemas ambientais relacionados à alteração da dinâmica da água e sedimentos. Neste estudo foram avaliados indicadores hidrológicos de escoamento superficial em trechos de estradas florestais para fins de identificação de pontos críticos de erosão e acúmulo de água no solo. Para tal, a malha viária de uma fazenda de produção de madeira foi dividida em 252 trechos de estradas, para os quais foram calculados quatro indicadores hidrológicos: declividade média do terreno, declividade da rampa, Fator LS e índice topográfico. A análise dos indicadores baseou-se na estatística descritiva para identificação de outliers, análise de componentes principais para análise da variabilidade entre variáveis e entre observações e, de agrupamento para identificação de grupos de trechos com características semelhantes. Os resultados permitiram a classificação dos trechos de estradas em cinco tipos principais: de topo de morro, de fundo de vale, planas, com declividade e posicionadas na direção da vertente principal. Dentre os tipos citados, os indicadores são capazes de destacar trechos mais críticos que diferem dos demais e que são potenciais fontes de problemas de erosão e de alagamento em estradas florestais. A análise de componentes principais mostrou duas fontes de variação, relacionadas à característica topográfica do terreno e ao desenho da construção de estrada, e os indicadores representam bem estas características. O método mostrou-se apropriado para identificação de trechos críticos de estradas que precisam ser reavaliados e também no planejamento da malha viária de novos projetos florestais.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica, Erosão, Sistema de informação geográfica

Abstract

Forest roads are frequently pointed as source of environmental problems related to erosion and they also influence harvest cost due to maintenance operations. Roads not well designed are sources of hydrological problems on catchments and the current attention to sustainability of forest exploration projects point out to the need of diagnostics tools for guiding the redesign of the road system. At this study, runoff hydrological indicators for forest road segments were assessed in order to identify critical points of erosion and water concentration on soils. A road network of a forest production area was divided into 252 road segments that were used as observations of four variables: mean terrain slope, main segment slope, LS factor and topographic index. The data analysis was based on descriptive statistics for outliers' identification, principal component analysis and for variability study between variables and between observations, and cluster analysis for similar segments groups' identification. The results allowed classifying roads segments into five main road types: road on the ridge, on the valley, on the slopes, on the slopes but in a contour line and on the steepest slope. The indicators were able to highlight the most critical segments that differ of others and are potential sources of erosion and water accumulation problems on forest roads. The principal component analysis showed two main variability sources related to terrain topographic characteristics and also road design, showing that indicators represent well those elements. The methodology seems to be appropriated for identification of critical road segments that need to be redesigned and also for road network planning at new forest exploration projects.

Keywords: Hydrological modeling, Erosion, Geographic information system

¹Professor Doutor do Departamento de Ecologia do Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista – Avenida 24A, 1515 – Rio Claro, SP – 13506-900 – E-mail: ferraz@rc.unesp.br

²Graduando em Engenharia Florestal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo – Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP – 13400-970 – E-mail: jcmarson@esalq.usp.br

³Mestre em Recursos Florestais pela Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo – Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP – 13400-970 – E-mail: cbrodrig@esalq.usp.br

⁴Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo – Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP – 13400-970 – E-mail: wplima@esalq.usp.br

INTRODUÇÃO

Estradas florestais aceleram a erosão devido ao aumento dos gradientes de inclinação e interrupção dos padrões de drenagem natural (GRACE III, 2000). A severidade dos impactos das estradas está intimamente relacionada com a extensão da superfície exposta, a densidade de drenagem, a declividade, fatores geológicos e o clima (FAO, 1989).

O efeito hidrológico das estradas depende de muitos fatores, incluindo a locação das estradas na vertente, o desenho das estruturas de drenagem que afetam a rota da água através da microbacia e a proporção ocupada pelas estradas na microbacia (GUCINSKI *et al.*, 2001). Atualmente, a maioria dos projetos de plantios florestais existentes no Brasil utiliza ainda o padrão ortogonal de desenho de estradas, que desconsidera a microbacia e apresenta diversos problemas relativos ao escoamento superficial.

As estradas possuem três efeitos primários sobre a água: elas interceptam as gotas de chuva diretamente sobre sua superfície e nos taludes e interceptam o movimento da água sub-superficial morro abaixo; elas concentram o fluxo, ou na superfície ou em uma vala adjacente ou canal; e desviam ou mudam o percurso da água com relação aos fluxos padrão que estavam presentes antes de sua construção (GUCINSKI *et al.*, 2001). Deste modo, os efeitos locais hidrológicos e erosivos ao longo das estradas são dispersos além da paisagem, considerando que os maiores impactos estão concentrados na rede de drenagem dos rios e vales distantes (FORMAN e ALEXANDER, 1998).

O escoamento superficial hortoniano ocorre quando a intensidade de precipitação é maior do que a capacidade de infiltração do solo (HORTON, 1940). O escoamento superficial natural, na maioria das florestas, é restrito aos canais e áreas próximas a estes. A construção de estradas florestais altera substancialmente a hidrologia de vertentes, pois causa fluxos superficiais em áreas distantes dos canais. Além disso, as superfícies das estradas são altamente compactadas, possuem alta densidade de massa e pequeno ou nenhum espaço poroso (LUCE, 1997). Dessa forma, a superfície das estradas pode também produzir escoamento superficial na maior parte dos eventos de chuva (ZIEGLER e GIAMBELLUCA, 1997).

Apesar das estradas ocuparem uma pequena porcentagem da área na maioria das microba-

cias, elas podem ser responsáveis pela maior parte do escoamento superficial hortoniano em áreas florestais. As microbacias com densa rede de estradas comumente experimentam um aumento nos fluxos de sedimento e picos de vazão (LUCE, 1997).

Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1990) a quantidade de material em suspensão carregado pela água depende da velocidade com que ela se desloca. A velocidade é o resultado do comprimento e do grau de declividade do terreno.

As estradas alteram ainda o padrão do escoamento superficial da água de chuva e de nascentes, modificando o caminho ou a extensão dos canais na paisagem. Por isso, muitos dos problemas com as estradas resultam de desenhos e estruturas impróprias ou inadequadas. Redesenhar as estradas poderia minimizar substancialmente os processos erosivos.

Além da interferência no escoamento superficial e, conseqüentemente, nos processos erosivos, a água também pode afetar a capacidade de uso do sistema viário, caso não seja adequadamente conduzida em toda a extensão das estradas.

Quando a água permanece na superfície de rolamento, sob a ação do tráfego, podem surgir depressões e canais e, se não for conduzida para fora do leito, pode causar também erosão e rompimento dos bordos da estrada.

Em um projeto que vise o melhoramento das estradas, a adequação do sistema de drenagem constitui-se em um aspecto tão ou mais importante do que o próprio revestimento da pista de rolamento, pois uma estrada revestida e sem apropriados dispositivos de drenagem estará com sua plataforma seriamente comprometida na primeira chuva que ocorrer. A drenagem inadequada é caracterizada pelo acúmulo de água na plataforma, ocasionado pelo mau funcionamento dos dispositivos de drenagem superficial, inexistência de elementos de drenagem profunda, como também pela falta de manutenção das obras hidráulicas (BAESSO e GONÇALVES, 2003).

Assim como no caso da drenagem, a redução da quantidade de sedimentos entregue pelas estradas nos caminhos da água pode ser alcançada através da identificação da origem da erosão, por meio de cuidadoso planejamento, desenho, locação, construção e manutenção das estradas florestais (GRACE III, 2000).

Nos empreendimentos florestais, o setor de estradas tem adquirido grande importância, de-

vido aos custos do binômio estrada-transporte incidirem, significativamente, sobre o valor final da madeira (LOPES *et al.*, 2002). Dessa forma, identificar os trechos das estradas que possuem potencial erosivo e de acúmulo de água pode tornar-se essencial quando o objetivo é reduzir custos a médio e longo prazo, uma vez que, nesse caso, a manutenção torna-se específica em solucionar o problema.

Alguns modelos para quantificação dos processos de erosão do solo têm sido desenvolvidos nas últimas décadas, porém, somente alguns deles são apropriados para paisagens florestais (ANTONANGELO, 2004), principalmente no que diz respeito às estradas florestais.

Utilizando equação universal de perda de solo - USLE (MEYER e MANNERING, 1967), ANTONANGELO (2004) desenvolveu um critério para identificar especificamente os riscos de erosão em estradas florestais baseado no fator topográfico LS.

Anderson e MacDonald (1998) desenvolveram o modelo ROADMOD que permite estimar e mapear a produção média anual de sedimentos de uma determinada rede de estradas, por meio da combinação da relação empírica entre um gradiente de estradas e a área de contribuição de drenagem com uma série de algoritmos para analisar dados acumulados em um SIG vetorial.

Com relação ao escoamento superficial, os trabalhos de modelagem começaram pela identificação da zona ripária, também conhecida por Área Variável de Afluência (AVA), que pode ser entendida como a zona saturada que margeia os cursos d'água e suas cabeceiras e pode se expandir durante chuvas prolongadas. Ao longo da AVA, que se encontra normalmente em condições de saturação, ocorre o chamado escoamento superficial de áreas saturadas (ZAKIA *et al.*, 2006).

O'Loughlin (1986) iniciou os métodos de modelagem e mapeamento das zonas ripárias a partir de fatores topográficos e de condutividade do solo. A partir de então, outros modelos foram desenvolvidos para simular a resposta da microbacia a uma dada chuva e para delimitar as zonas ripárias com base em modelos digitais (ZAKIA, 1998; SIMÕES, 2001).

A zona ripária também pode ser delimitada através do método proposto por Quinn *et al.* (1991). Este método baseia-se no cálculo do Índice Topográfico (IT), o qual reproduz o comportamento hidrológico de microbacias, em

especial a dinâmica das áreas de contribuição. O índice topográfico representa o balanço entre a água recebida por uma posição do terreno e a água escoada para os seus vizinhos. Desse modo, com uma superfície contínua é possível a identificação da zona ripária, ou Área Variável de Afluência (AVA).

Mais recentemente, Agnew *et al.* (2006) desenvolveram um método para identificar os locais que geram o escoamento superficial em uma microbacia, chamando-as de áreas hidrológicamente sensíveis, ou seja, áreas propensas a gerar o escoamento superficial. Para tanto, utilizaram também o índice topográfico como indicador dessas áreas.

Considerando-se as técnicas já existentes para avaliação de erosão e problemas de acúmulo de água em estradas rurais, e a necessidade de alteração do traçado de estradas florestais para reduzir problemas de escoamento superficial e reduzir custos de manutenção, nota-se que faltam métodos de integração das técnicas já existentes para diagnóstico e apoio ao redesenho de estradas florestais.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem por objetivo aplicar indicadores hidrológicos na classificação de trechos de estradas florestais quanto à ocorrência de problemas de escoamento superficial, para uma área de reflorestamento localizada no município de Capão Bonito, SP.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado na fazenda de produção de madeira "Campo de Pouso" (Figura 1), cuja área aproximada é de 1124 ha, de propriedade da Votorantin Celulose e Papel S.A. (VCP) e localizada no município de Capão Bonito, estado de São Paulo. Na área de estudo, nota-se o padrão ortogonal de construção de estradas, bastante utilizado nos projetos florestais existentes no país.

A vegetação predominante compreende plantios florestais de eucalipto para abastecimento da indústria de papel e celulose, além de áreas de vegetação secundária, localizadas em Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reserva Legal. Com relação aos tipos de solo, na área de estudo predominam, segundo Prado (2005), os Latossolos Vermelhos (LV) com manchas de Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) e Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA).

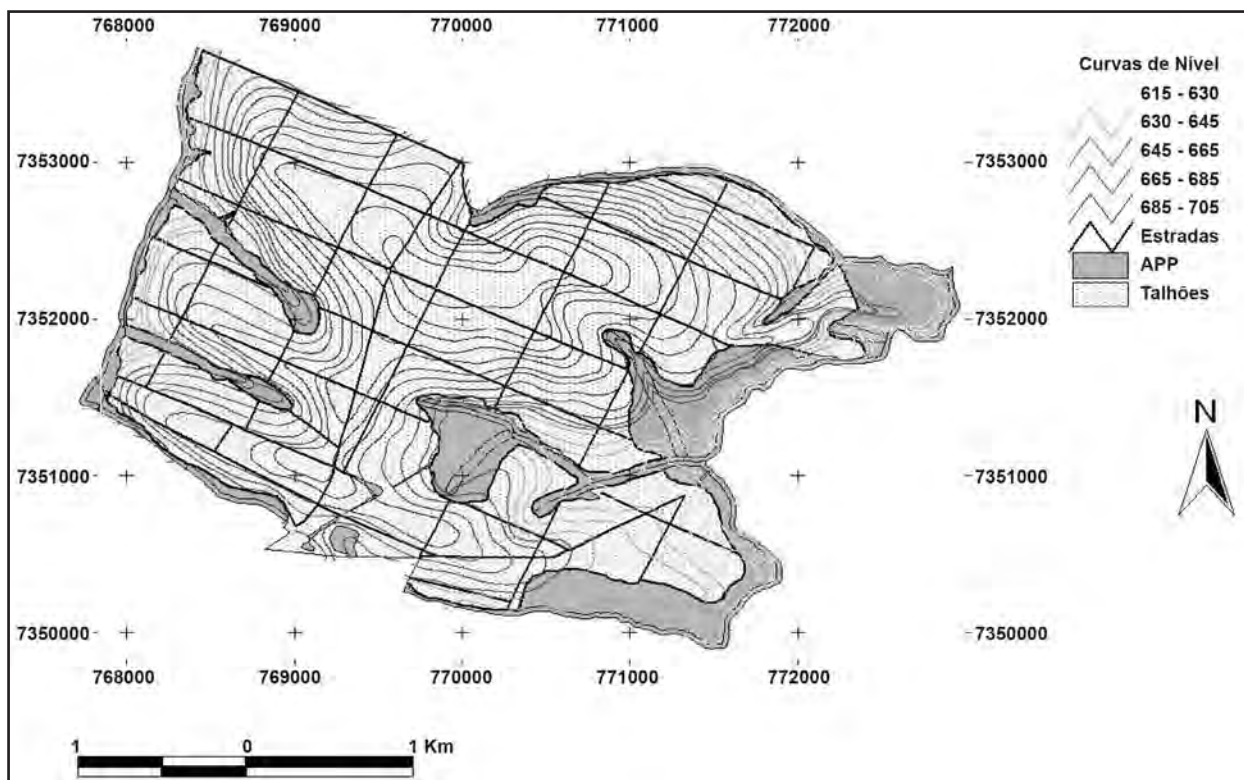


Figura 1. Planta planialtimétrica da fazenda “Campo de Pouso”, Capão Bonito, SP.
Figure 1. Topographic map of “Campo de Pouso” farm, Capão Bonito, SP.

O clima da região é do tipo Cfb na classificação de Köppen, caracterizado por ser um clima subtropical ou temperado, sempre úmido e com verões brandos. A temperatura média anual é de 18,5°C e a precipitação anual média total é de 1200mm (BRASSIOLO, 1988), não havendo estação seca definida, apesar da redução na precipitação mensal no período de março a agosto e um pequeno déficit hídrico, que ocorre nos meses de abril e agosto.

Preparação da base de dados

Utilizando o software ArcView 3.3, foi organizada uma base cartográfica da área de estudo, contendo os seguintes planos de informação: Altimetria - mapa das curvas de nível dos projetos, com equidistância vertical de 5m; Hidrografia - rede hidrográfica (rios, córregos e nascentes) do terreno; e Estradas - mapa da rede de estradas e aceiros dos projetos.

Com base no mapa de curvas de nível, foi gerado o modelo digital do terreno (MDT), sendo que o método de interpolação utilizado foi a malha triangular irregular (TIN). O MDT obtido foi então convertido para o formato grid (raster), com resolução espacial de 5 m.

Separação dos trechos de estradas

As estradas que compõem a malha viária do projeto foram divididas em segmentos (trechos),

classificados como rampas, sendo que uma rampa foi definida como um segmento de estrada delimitado por topos de morro, fundos de vale e os cruzamentos de estradas já existentes.

Cálculo dos indicadores hidrológicos

Para cada trecho dividido anteriormente, foram calculados quatro indicadores, descritos a seguir:

a) Declividade do terreno (DECTERR): representa em cada píxel o valor de declividade da maior vertente, considerando o modelo de oito direções. O mapa de declividade foi obtido pela derivação do Modelo Digital do Terreno, realizada por meio do Arcview 3.3. Em seguida, utilizando uma função de estatística de zona, calculou-se o valor médio da declividade do terreno para cada trecho de estrada.

b) Índice topográfico (INDTOP): este índice (GESSLER *et al.*, 1995) considera a influência da topografia do terreno na geração do escoamento superficial (VARELLA e CAMPANA, 2000) e relaciona o fluxo acumulado com a declividade do terreno em um determinado píxel. O índice topográfico foi obtido a partir dos mapas de Fluxo Acumulado e declividade do terreno, utilizando a seguinte fórmula:

$$TI = \ln \left(\frac{As}{\tan \beta_i} \right)$$

sendo,

TI = índice topográfico;

As = fluxo acumulado na célula (em número de células a montante);
 β_i = declividade na célula i (graus).

Da mesma forma anterior, utilizou-se uma função de estatística de zona para cálculo do valor médio do índice topográfico para cada trecho de estrada.

Declividade da rampa (DECRAMP)

A declividade da rampa difere da declividade média por estar orientada no sentido do segmento da estrada. O cálculo da declividade considera somente as variações de altitude existentes em cada trecho de estrada. Desse modo, a declividade da rampa foi determinada pela fórmula:

$$S = \left(\frac{\Delta i}{l * 100} \right)$$

sendo:

S = declividade da rampa no trecho;

Δi = variação de altitude no trecho;

l = comprimento em metros do trecho.

Fator topográfico LS (LSCALC)

O Fator LS constitui um dos componentes da Equação Universal de Perda de Solo - USLE (WISCHMEIER e SMITH, 1978) e relaciona a declividade com o comprimento de rampa. O cálculo do fator LS foi realizado de maneira informatizada (SILVA, 2003), utilizando a seguinte fórmula:

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

sendo,

l = comprimento de rampa (m);

s = declividade (%).

m = expoente do comprimento da rampa, determinado pela seguinte fórmula (BARRIOS, 1995):

$$m = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

sendo:

$$\beta = \left\{ \left(\frac{\text{sen } \theta}{0,0896} \right) / [3(\text{sen } \theta)^{0,8} + 0,56] \right\} * r$$

m = expoente variando segundo β ;

β = relação entre erosão em sulco e erosão entre sulco;

θ = ângulo de inclinação do terreno;

r = coeficiente igual a 0,5 para terras florestais, 1,0 em áreas agrícolas e 2,0 em áreas urbanas.

Análise estatística

A análise dos indicadores foi feita por estatística descritiva, com o objetivo de identificar trechos com valores extremos em que poderiam estar ocorrendo problemas hidrológicos. Com o objetivo de verificar a existência de correlação entre os indicadores de estradas, foi realizada análise de correlações de Pearson e análise multivariada utilizando Componentes Principais (PCA) e gráfico Biplot (GABRIEL, 1971), para avaliar a resposta dos trechos de estradas em relação às variáveis indicadoras. Também se analisou a distribuição dos trechos por meio de gráficos de pares de variáveis indicadoras consideradas complementares: DECTERR x DECRAMP e INDTOP x LSCALC.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a preparação dos mapas, 252 trechos de estradas foram isolados, considerando a topografia local e o desenho das estradas florestais existentes. O comprimento médio dos trechos foi de 250 metros.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos valores obtidos de cada indicador para os trechos de estrada. De modo geral, a declividade do terreno (DECTERR) apresenta grande variação, com trechos entre 0% (planos) até 15% de declividade e, uma vez que o coeficiente de variação foi alto, pode-se dizer que a área apresenta grande variabilidade de declividade do terreno.

O Índice topográfico (INDTOP) apresentou valor médio de 9,10 e baixo coeficiente de variação (0,12), mostrando que os trechos apresentam uma homogeneidade quanto ao índice topográfico, com somente alguns trechos apresentando valores extremos. A declividade da rampa (DE-

Tabela 1. Estatística descritiva dos indicadores utilizados para os trechos de estradas (n= 252): declividade do terreno (DECLTERR), índice topográfico (INDTOP), declividade da rampa (DECRAMP) e fator topográfico LS (LSCALC).

Table 1. Descriptive statistics of road segments indicators (n=252): terrain slope (DECLTERR), topographic index (INDTOP), ramp slope (DECRAMP) and LS topographic factor (LSCALC).

	DECTERR (%)	INDTOP	DECRAMP (%)	LSCALC
Média	4,49	9,10	3,18	0,33
Desvio-padrão	2,62	1,10	2,84	0,84
CV	0,52	0,12	0,74	1,30
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00
Máximo	14,98	15,23	16,22	5,19

CRAMP) seguiu o mesmo padrão observado na declividade do terreno, com grande variabilidade dos trechos apontada pelo coeficiente de variação (0,74). O fator LS apresentou valor médio de 0,33 e a maior variabilidade nos trechos com coeficiente de variação igual a 1,30.

A análise de correlação dos indicadores mostrou que as variáveis DECTERR e DECRAMP são relacionadas, como já era esperado, pois os trechos com maior declividade do terreno devem apresentar maior declividade de rampa. O gráfico Biplot (Figura 2), obtido pelos componentes principais de variação, mostra a existência de dois eixos principais representando 85,6% da variação total. De acordo com o observado no gráfico e nas correlações entre as variáveis e os dois primeiros componentes de variação (Tabela 2), o primeiro componente (eixo x), com 61,5% da variação, relaciona-se à característica de construção da estrada. Esta pode ser representada pela declividade da rampa (DECRAMP) e fator LS (LSCALC), ambos indicadores bastante relacionados já que o cálculo do fator LS é dado em função da declividade da rampa. O segundo componente (eixo y) respondendo por 24,1% da variação, relaciona-se à capacidade de escoamento da água em função do relevo, tendo em um extremo o índice topográfico (INDTOP) como indicador de baixo escoamento e, no outro, a declividade do terreno (DECTERR), como indicador de bom escoamento. Nota-se, portanto, que a principal fonte de variação nos

trechos de estradas decorre da característica de sua construção. Desse modo, a distribuição dos trechos em função das variáveis mostra que a maioria dos trechos se situa na porção central do gráfico. No entanto, nota-se a presença de alguns trechos com valores extremos em relação às duas variáveis. Os trechos críticos com potencial erosivo são aqueles que apresentam resposta em relação à declividade do terreno e também em relação à declividade da rampa, ou seja, estão situados entre estas duas retas. Os trechos críticos com potencial de alagamento são aqueles que estão posicionados na direção da variável índice topográfico (INDTOP).

Tabela 2. Correlações entre as variáveis originais (declividade do terreno - DECLTERR, índice topográfico - INDTOP, declividade da rampa - DECRAMP e fator topográfico LS - LSCALC) e os dois primeiros componentes principais e, suas respectivas variações explicadas.

Table 2. Correlation between original variables (terrain slope - DECLTERR, topographic index - INDTOP, ramp slope - DECRAMP and LS topographic factor - LSCALC) and two first principal components and, their respective explained variances.

Variável	Componente 1	Componente 2
DECTERR	-0,453	0,438
DECRAMP	-0,584	-0,357
LSCALC	-0,562	-0,441
INDTOP	0,370	-0,697
Variância explicada (%)	0,615	0,241
Variância acumulada (%)	0,615	0,856

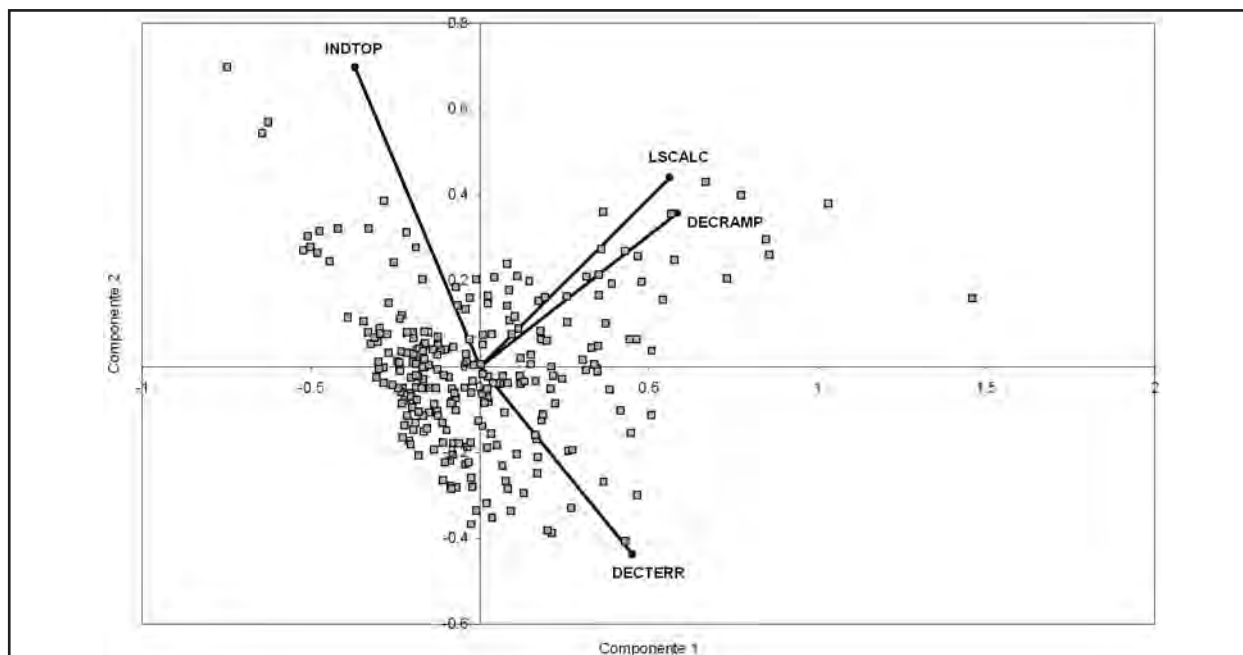


Figura 2. Gráfico biplot das respostas das variáveis indicadoras e dos trechos de estradas amostrados, em relação aos dois primeiros componentes de variação: eixo X (componente 1) relacionado à DECRAMP e LSCALC e eixo Y (componente 2) relacionado à INDTOP e DECTERR. (DECTERR = declividade do terreno, INDTOP = índice topográfico, DECRAMP = declividade da rampa e LSCALC = fator topográfico LS).

Figure 2. Biplot graph of indicators variables and road segments loadings, in relation to first two components: X axis (component #1) related to DECRAMP and LSCALC, and Y axis (component #2) related to INDTOP and DECTERR. (DECTERR = terrain slope, INDTOP = topographic index, DECRAMP = road steepness and LSCALC = LS topographic factor).

Apesar da existência de correlação entre as variáveis DECRAMP e DECTERR, pela análise da distribuição dos valores destas duas variáveis na Figura 3, pode-se identificar problemas de locação de estradas, como, por exemplo, a presença de estradas no sentido principal da vertente. Dividindo-se o gráfico em quatro quadrantes, com base nos valores da média de cada indicador, pode-se organizar os trechos de estradas da seguinte forma:

Tipo I – trechos com média declividade da rampa e média declividade do terreno, indicando estradas sem problemas de locação e que a declividade decorre da própria declividade do terreno, que nestes trechos apresenta valores moderados;

Tipo II – trechos com alta declividade do terreno e alta declividade da rampa, indicando estradas com problemas. Neste caso, as estradas estão provavelmente mal locadas, com alta declividade de rampa e, em casos extremos, posicionadas no mesmo sentido da vertente. As subdivisões originadas pelo número de valores de desvio padrão acima da média (linhas pontilhadas) podem indicar o potencial erosivo dos trechos, analisando-se primeiramente a declividade da rampa como fator mais importante e em seguida a declividade do terreno. Neste caso, os três trechos localizados na posição superior direita da figura podem representar estradas de alta declividade, locadas no sentido da vertente;

Tipo III – trechos com baixa declividade do terreno e baixa declividade da rampa, não sendo, portanto,

importante na questão da erosão, mas em contrapartida, podem ser focos de problemas de acúmulo de água, como será mostrado em seguida;

Tipo IV – trechos com baixa declividade da rampa e alta declividade do terreno, mostrando estradas locadas em nível.

A Figura 4 ilustra o posicionamento dos tipos de trechos de estradas em um gradiente topográfico, com trechos do tipo I em posições de declividade moderada do terreno e da rampa; trechos do tipo II em posições de declividade do terreno e da rampa acentuadas; trechos do tipo III em regiões planas de fundos de vale (a) e topos de morro (b) e trechos do tipo IV em regiões declivosas, mas dispostas em nível.

As estradas do tipo III, que apresentam baixa declividade da rampa e do terreno, podem ser analisadas sob o aspecto de acúmulo de água no solo e, para tal, o gráfico de distribuição dos trechos (Figura 5) em relação ao índice topográfico (INDTOP) e fator LS (LSCALC) pode ser uma ferramenta interessante. Valores altos de índice topográfico indicam que o terreno em uma determinada localidade apresenta potencial natural de acúmulo de água, devido à sua área de contribuição e baixa declividade. Considerando-se o aspecto natural do terreno dado pelo INDTOP e o aspecto de construção da estrada dado pelo fator LS (LSCALC), é possível identificar trechos críticos de estradas em relação ao acúmulo de água no solo.

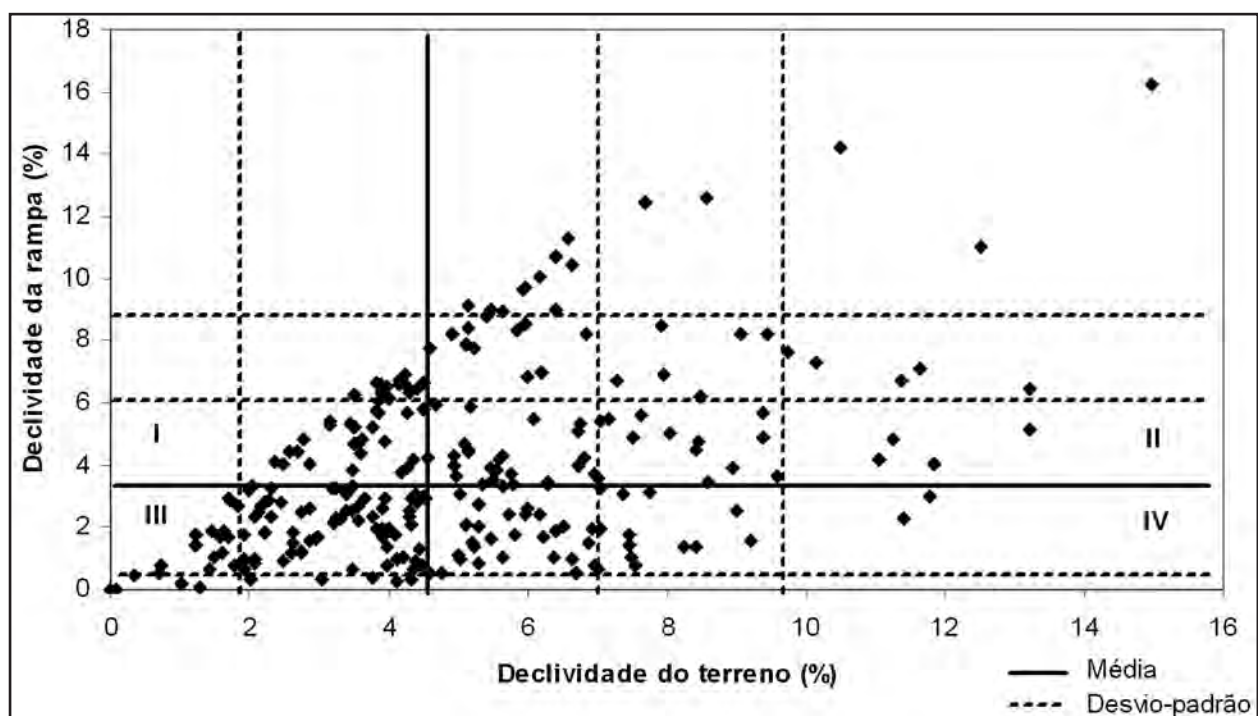


Figura 3. Distribuição dos trechos de estradas florestais em função das declividades do terreno (DECTERR) e da declividade da rampa (DECRAMP), na fazenda Campo de Pouso, Capão Bonito, SP.

Figure 3. Scatter graph of road segments distribution in relation to terrain slope (DECTERR) and ramp slope (DECRAMP), in "Campo de Pouso" Farm, Capão Bonito, SP.

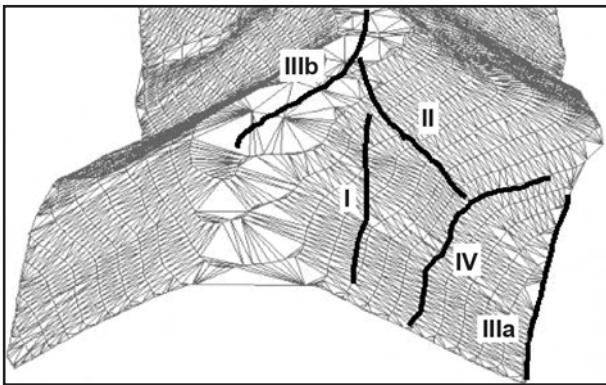


Figura 4. Representação do posicionamento dos tipos de estradas em relação ao gradiente topográfico.
Figure 4. Road types position in relation to topographic

Da mesma forma realizada anteriormente, o gráfico foi dividido em quadrantes, considerando-se os valores médios obtidos nos trechos analisados. Assim, trechos no quadrante IIIa apresentam alto INDTOP e baixo LSCALC, indicando a presença de trechos com potencial de alagamento, pois recebem muita água e não têm capacidade de drenagem. Neste quadrante, ainda, as linhas pontilhadas podem representar maior potencial de alagamento, ou seja, trechos no sub-quadrante superior poderiam ser considerados os mais críticos. Os pontos do quadrante II apresentam alto INDTOP e alto LSCALC, representando trechos de potencial erosivo, pois recebem e drenam muita água. No quadrante IIIb estão os pontos com alto LSCALC e baixo INDTOP, representando trechos com capacidade de drenagem, mas que não recebem muita água. No quadrante I estão os pontos com baixo

INDTOP e baixo LSCALC, representando trechos de baixa drenagem que recebem pouca água.

A classificação dos trechos neste estudo levou em conta somente a própria distribuição dos dados calculados para cada variável. A definição de valores de referência para classificação dos trechos exigirá ainda a realização de experimentos de campo para comprovação dos intervalos críticos. Os valores de referência ainda deverão considerar características locais de relevo, não sendo possível, portanto, a obtenção de uma tabela universal de valores de referência.

A Figura 6 mostra a classificação dos trechos de estradas da área de estudo em relação às categorias (tipos) mencionadas anteriormente. Nota-se que os principais problemas aparecem em trechos do tipo II, ou seja, estradas locadas “morro abaixo”, que resultam em problemas de erosão. Os trechos do tipo IIIa também aparecem em áreas próximas às Áreas de Preservação Permanente (APP), já que se caracterizam por áreas de acúmulo de água e estão posicionados na Área Variável de Afluência (ZAKIA, 1998).

Com a identificação dos trechos críticos, pode-se eliminar ou redesenhar estes trechos para que os problemas detectados em campo sejam minimizados. Outra possibilidade é a utilização dos indicadores para o planejamento de estradas, calculando os valores para os trechos projetados e adequando o desenho de acordo com os valores obtidos dos indicadores em relação a uma tabela de referência.

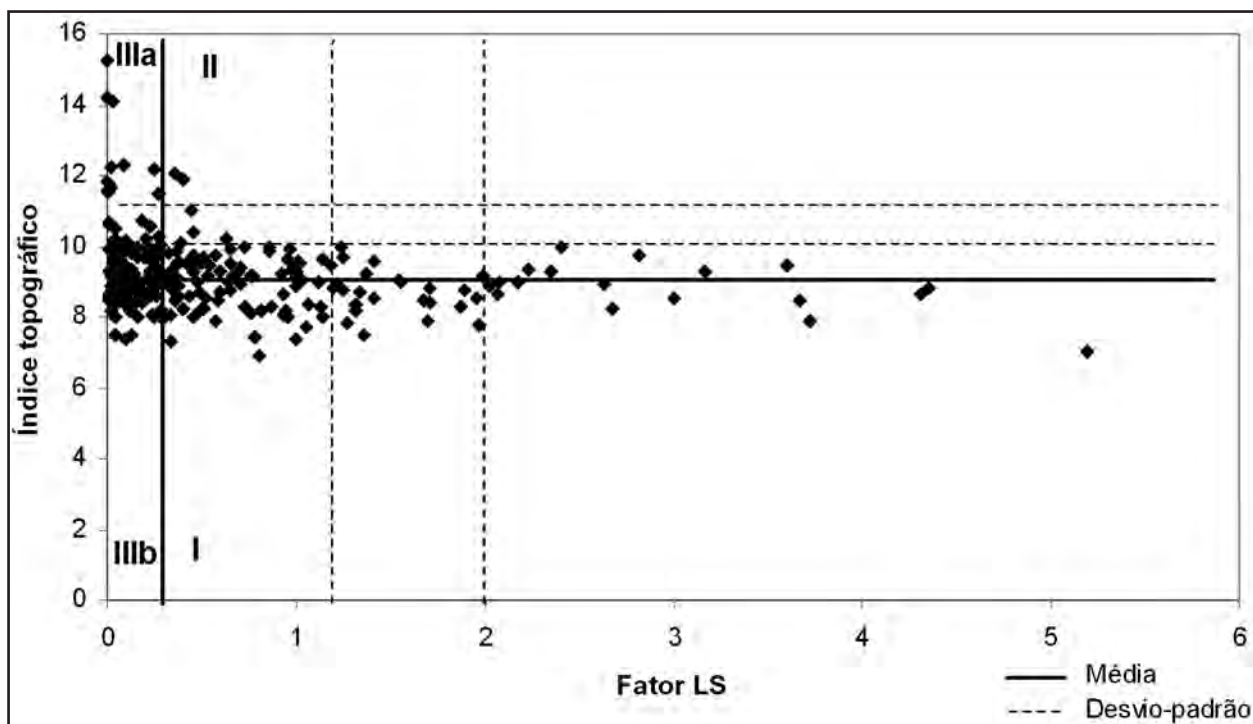


Figura 5. Distribuição dos trechos de estradas em função do índice topográfico (INDTOP) e do fator topográfico LS (LSCALC), na fazenda “Campo de Pousos”, Capão Bonito, SP.

Figure 5. Scatter graph of road segments distribution in relation to topographic index (INDTOP) and LS topographic factor (LSCALC), in “Campo de Pousos” farm, Capão Bonito, SP.

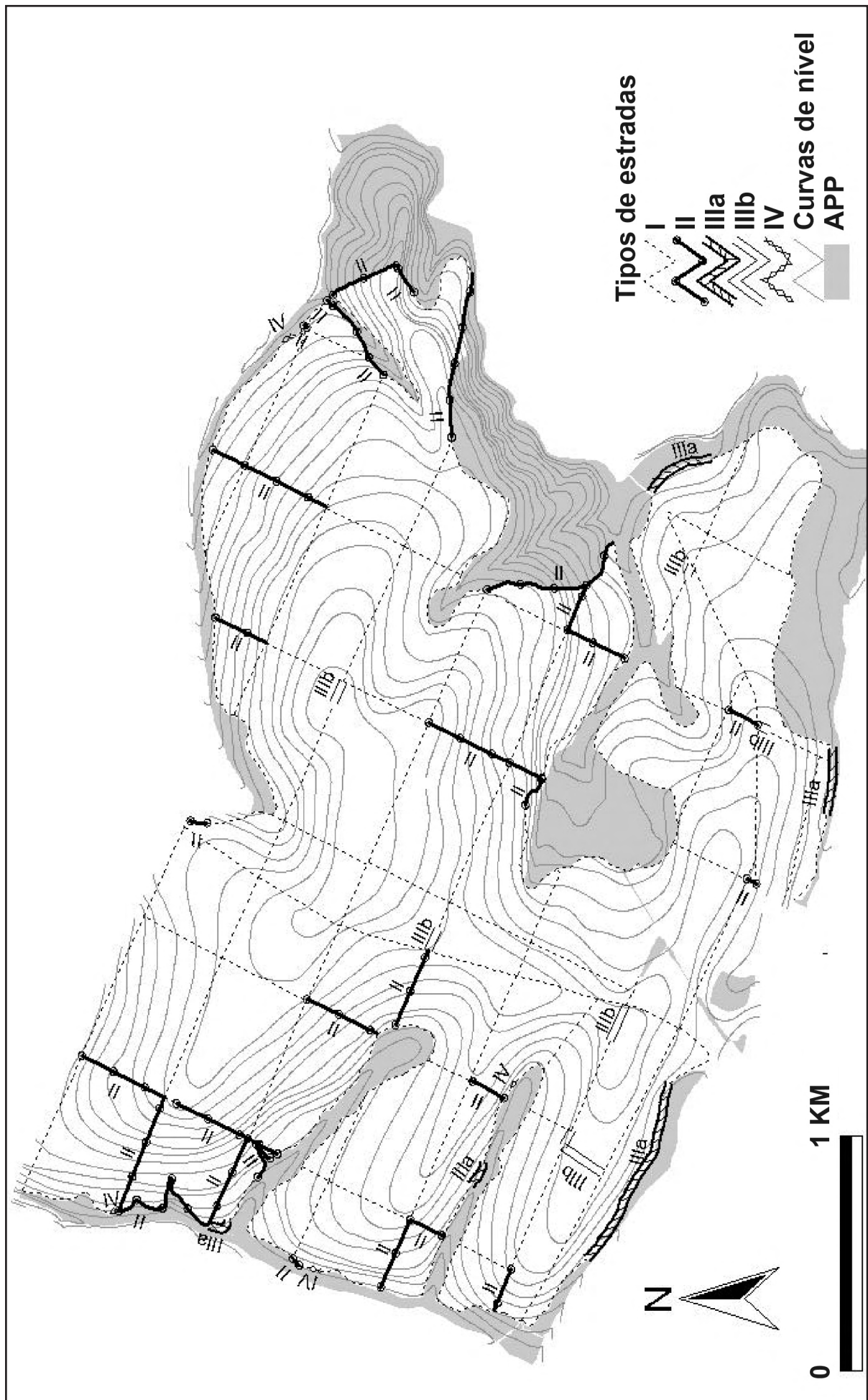


Figura 6. Classificação dos trechos de estradas florestais, segundo os indicadores hidrológicos utilizados, na fazenda Campo de Pouso, Capão Bonito, SP.
Figure 6. Topographic map of study area showing the road segments classification based on the hydrologic indicators, in "Campo de Pouso" farm, Capão Bonito, SP.

CONCLUSÕES

O método de classificação de estradas florestais utilizado confirma a existência de trechos críticos em relação ao escoamento superficial, decorrentes do desenho ortogonal de estradas. Novos estudos deverão ser realizados para comparação dos resultados entre áreas com diferentes padrões de desenho e também para relacionar os resultados obtidos com dados de erosão e acúmulo de sedimentos.

O estudo mostrou a viabilidade da utilização dos indicadores hidrológicos baseados nas características topográficas para a classificação dos trechos de estradas segundo o seu tipo de escoamento superficial predominante. Os indicadores utilizados representam bem as características do terreno e da construção de estradas que influenciam os processos erosivos e de acúmulo de água no solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Votorantin Celulose e Papel S.A. pela disponibilização de sua área, mapas e suporte logístico para realização deste projeto, principalmente à Maria José Brito Zákia e Marcos Yamamoto; ao professor Carlos Alberto Vettorazzi do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP pela revisão do texto final.

Este projeto contou com o apoio do Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Engenharia Rural e Laboratório de Hidrologia Florestal do Departamento de Ciências Florestais, ambos da ESALQ/USP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGNEW, L.J.; LYON, S.; GÉRARD-MARCHANT, P.; COLLINS, V.B.; LEMBO, A.J.; STEENHUIS, S.; WALTER, M.T. Identifying hydrologically sensitive areas: bridging the gap between science and application. *Journal of Environmental Management*, New York, v.78, n.1, p.63-76, 2006.

ANDERSON, D.M.; MACDONALD, L.H. Modeling road surface sediment production using a vector geographic information system. *Earth Surface Processes and Landforms*, Chichester, v.23, p.95-107, 1998.

ANTONANGELO, A. A identificação dos riscos de erosão em estradas florestais através de sistemas de informações geográficas. 2004. 97p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

BAESSO, D.P.; GONÇALVES, F.L.R. *Estradas rurais: técnicas adequadas de manutenção*. Florianópolis: DER, 2003. 236p.

BARRIOS, A. *Erosión y producción de sedimentos en cuencas hidrográficas*. 1995. Tese (Doutorado) – Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de los Andes, Mérida, 1995.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do solo*. São Paulo: Editora Ícone, 1990.

BRASSIOLO, M.M. *Avaliação da regeneração natural de Pinus elliottii var. elliottii na floresta nacional de Capão Bonito, SP*. 1988. 127p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

FAO. *Watershed management field manual: road design and construction in sensitive watersheds*. Rome, 1989. 218p.

FORMAN, R.T.T.; ALEXANDER, L.E. Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, Palo Alto, v.29, p.207-231, 1998.

GABRIEL, K.R. The Biplot graphic display of matrices with applications to principal component analysis. *Biometrika*, Cambridge, v.58, n.3, p.453-467, 1971.

GESSLER, P.E.; MOORE, I.D.; MCKENZIE, N.J.; RYAN, P.J. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of Geographical Information Science*, London, v.9, n.4, p.421-432, 1995.

GRACE III, J.M. Forest road side slopes and soil conservation techniques. *Journal of Soil and Water Conservation*, Ankeny, v. 55, p.01-09, 2000.

GUCINSKI, H.; FURNISS, M.J.; ZIEMER, R.R.; BROOKES, M.H. Forest roads: a synthesis of scientific information. *USDA. Forest Service. PNW General Technical Report*, Portland, n.509, p.1-103, 2001.

HORTON, R.E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, Ann Arbor, v.5, p.399-417, 1940.

LOPES, E.S.; MACHADO, C.C.; SOUZA, A.P. Classificação e custos de estradas em florestas plantadas na região sudeste do Brasil. *Revista Árvore*, Viçosa, v.26, n.3, p.329-338, 2002.

- LUCE, C.H. Effectiveness of road ripping in restoring infiltration capacity of forest roads. **Restoration Ecology**, Tucson, v.5, n.3, p.265-270, 1997.
- MEYER, L.D.; MANNERING, J.V. Tillage and land modification for water erosion control. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURE ENGINEERS: TILLAGE FOR GREATER CROP PRODUCTION CONFERENCE, 1967. **Proceedings**. v.11/12, p. 58-62.
- O'LOUGHLIN, E.M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, Washington, v.22, n.5, p.794-804, 1986.
- PRADO, H. **Solos do Brasil: gênese, morfologia, classificação, levantamento, manejo agrícola e geotécnico**. Piracicaba: O Autor, 2005. 281p.
- QUINN, P.F.; BEVEN, P.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, Chichester, v.5, p.59-79, 1991.
- SILVA, V.C. Cálculo automático do fator topográfico (LS) da EUPS, na bacia do rio Paracatu. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.33, n.1, p.29-34, 2003.
- SIMÕES, L.B. **Integração entre um modelo de simulação hidrológica e sistema de informação geográfica na delimitação de zonas também ripárias**. 2001. 171p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.
- VARELLA, R.F.; CAMPANA, N.A. Simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão: estudo do modelo topmodel. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.5, n.4, p.121-139, 2000.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall losses: a guide to conservation planning. **USDA Agricultural Handbook**, Washington, n.537, p.1-58, 1978.
- ZAKIA, M.J.B. **Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de florestas**. 1998. 98p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998
- ZAKIA, M.J.B.; FERRAZ, F.F.B.; RIGHETTO, A.M.; LIMA, W.P.L. Delimitação da zona ripária em uma microbacia. In: LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B. (Eds) **As florestas plantadas e a água: implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento**. São Carlos: Rima Editora, 2006. 226p.
- ZIEGLER, A.D.; GIAMBELLUCA, T.W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of Northern Thailand. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.196, p.204-229, 1997.

Recebido em 06/09/2006

Aceito para publicação em 17/08/2007

