

Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

O efeito do nivelamento de estradas florestais  
na produção de sedimentos

Carolina Rodrigues Fontana

**Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Recursos Florestais, com opção em  
Conservação de Ecossistemas Florestais**

**Piracicaba  
2007**

Carolina Rodrigues Fontana  
Engenheiro Florestal

**O efeito do nivelamento de estradas florestais  
na produção de sedimentos**

Orientador:  
Prof. Dr. **WALTER DE PAULA LIMA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre  
em Recursos Florestais, com opção em Conservação de  
Ecossistemas Florestais

**Piracicaba  
2007**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Fontana, Carolina Rodrigues

O efeito do nivelamento de estradas florestais na produção de sedimentos / Carolina Rodrigues Fontana. - - Piracicaba, 2007.  
80 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.  
Bibliografia.

1. Erosão 2. Estradas florestais 3. Niveladoras 4. Nivelamento do solo I. Título

CDD 634.986

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

## Dedicatória

Dedico este trabalho:

A Deus, por ter me concedido a vida, a minha maravilhosa família, os meus queridos amigos, saúde e muita paz para caminhar;

Aos meus pais, Albino e Anilse, por todo amor e carinho com que me envolveram em todos esses anos. Pelo exemplo de vida, de luta, de coragem;

Ao Guigo, por estar ao meu lado e por tudo que já passamos juntos e vamos passar.

## AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas e instituições foram essenciais para que esse trabalho fosse concretizado! Agradeço de forma especial:

Ao Prof. Walter de Paula Lima pela orientação, pelo apoio e incentivo, pelo exemplo.

À Zezé (Maria José Brito Zakia) que em tão pouco de tempo de convivência me ensinou muita coisa, me propôs desafios (como este trabalho!) e me proporcionou tantas oportunidades!

Aos Professores Fernando Seixas, João Batista, Roland Vencowiski e Antônio Lemma por sempre estarem dispostos a me ajudar (com muita paciência!).

Ao Professor Sílvio Ferraz que me ouviu (e muito!) e me atendeu todas as incontáveis vezes que fui procurá-lo!

À Capes pela bolsa concedida (Importantíssimo! Muuuuuuuito obrigada, mesmo!)

À Votorantim Celulose e Papel por todo apoio logístico, estrutural e pessoal, essenciais para o andamento deste trabalho! Ao José Márcio (pelo início de tudo), à toda equipe de Meio Ambiente e Pesquisa de Capão Bonito pelo apoio e por sempre estarem dispostos a me ajudar: Márcio Irias, Fátima, Osmar, Marquinhos, Walmir e, especialmente, ao incansável Eduardo (Duda) que me ajudou a instalar o experimento (que trabalho!) e me acompanhou diversas vezes ao campo (valeu!).

Ao Prof. Sergius Gandolfi por ter orientado meus primeiros passos na graduação e na pós-graduação com muita tranquilidade e paciência!

Aos queridos amigos do laboratório de Hidrologia Florestal, por terem tornado os dias mais agradáveis e por sempre se mostrarem prestativos: Carla (obrigada por ter lido esse trabalho umas oitocentas vezes!), Paula (porque tudo funciona melhor quando você está!), Marco Aurélio (por compartilhar suas experiências florestais!), Fernando (por todo apoio), Cláudia-Tetê (você tem grande parcela de culpa nisso tudo! Obrigada!) e a Maureen (por seu grande coração, pelas risadas, pela ajuda e por compartilhar momentos tão especiais durante essa jornada! Valeu muito!).

Aos meus queridos amigos e companheiros desde a graduação: Carolina (Lombra), porque você é mais do que especial!; Júlio César (Sem Rumo) pela amizade, por ter estado presente em momentos importante e por ter dividido muita coisa comigo (inclusive o aluguel!) e Teluíra (Telu) por ter compartilhado comigo sua casa, sua família e até sua mãe (Meire, obrigada!), pelas incontáveis horas de alegrias e não vamos esquecer o Fusca bege!!! Sen-sa-ci-o-nal!

Ao meu pai (Albino) e a minha mãe (Anilse) pois se cheguei até aqui foi porque vocês batalharam muito, me incentivaram muito e acreditaram em mim! Amo vocês!!!

À toda a minha família! À minha querida prima Camila.

À toda família Fontana por me acolherem e por todo carinho.

Ao meu marido Rodrigo (Guigo) por ser exatamente como você é! O futuro que nos aguarde!

Não posso esquecer do Hito, do Chico (que se foi no meio dessa jornada... saudades) e da Stela (Chicória).

A Deus por ter colocado todas essas pessoas na minha vida!!!

## SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT .....	9
1 INTRODUÇÃO .....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Erosão do solo .....	12
2.2 As florestas plantadas e a erosão .....	12
2.3 As estradas florestais e suas influências no processo erosivo.....	14
2.4 Manutenção de estradas florestais: o nivelamento .....	19
2.5 As Estradas Florestais e os Recursos Hídricos: influências geomórficas e hidrológicas .....	21
2.6 Medição da produção de sedimentos em estradas florestais.....	25
2.7 As estradas florestais e o manejo florestal sustentável.....	31
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	34
3.1 Área de estudo .....	34
3.2 Coleta de dados .....	39
3.2.1 Deslocamento de sedimentos pela motoniveladora .....	41
3.2.2 Influência da motoniveladora na produção de sedimentos.....	42
3.3 Cálculo da perda de sedimentos .....	42
3.4 Análise de solo .....	44
3.5 Análise dos dados .....	45
3.5.1 Análise do sedimento removido pela motoniveladora .....	45
3.5.2 Estratégia de análise para o estudo dos dados obtidos pelas estradas motoniveladas e não motoniveladas .....	45

3.5.3 Análise das estradas individualmente .....	48
3.5.4 Análise das estradas em conjunto.....	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.1 Características de solo e de declividade .....	51
4.2 Sedimentos deslocados pela motoniveladora .....	52
4.3 Produção de sedimentos por estradas motoniveladas e não motoniveladas .....	56
4.3.1 Resultados obtidos individualmente em cada estrada .....	56
4.3.2 Resultados obtidos para as estradas em conjunto.....	60
5 CONCLUSÃO.....	67
REFERÊNCIAS.....	68
ANEXOS .....	75



## RESUMO

### O efeito do nivelamento de estradas florestais na produção de sedimentos

A manutenção das estradas florestais pode afetar diretamente os processos erosivos. Assim, o presente trabalho teve por objetivo conhecer a influência da atividade de nivelamento, utilizando a motoniveladora, na produção de sedimentos pelas estradas florestais. Para tanto, três estradas (1, 2 e 3) foram submetidas ao nivelamento e outras três estradas (4, 5 e 6) permaneceram sem tratamento. As estradas foram divididas em trechos de 30 m os quais foram demarcados com pares de estacas, devidamente nivelados. Para se determinar o perfil da superfície da estrada formado entre os pares de estaca, um fio de nylon, demarcado de 10 em 10 cm, foi preso na parte superior das estacas e, utilizando-se uma régua graduada, foram medidas as distâncias entre o fio de nylon e a superfície da estrada. Esse procedimento foi realizado entre todos os pares de estaca que compunham as estradas. Determinado o perfil inicial, as estradas 1, 2 e 3 foram submetidas à passagem da motoniveladora e nova medição foi realizada. A remoção média de sedimentos foi de 2,13 cm. Considerando a densidade média do solo de  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ , a remoção média de sedimentos foi de  $341 \text{ t ha}^{-1}$  de estrada. Após esta primeira etapa, foram realizadas mais 6 medições ao longo de um ano em todas as estradas. A análise conjunta das estradas verificou que o tratamento (nivelamento), a porcentagem de argila na camada de 0 a 5 cm e a declividade foram fatores considerados altamente significativos ( $p < 0,0001$ ) na produção de sedimentos. A precipitação também foi significativa ( $p = 0,0028$ ). A maior perda média de solo (0,53 cm) foi registrada para as estradas que foram motoniveladas, enquanto que as estradas não motoniveladas apresentaram perda média de 0,24 cm. Considerando-se os valores médios de perda de sedimentos (cm) e a densidade média do solo de  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ , a perda de sedimentos nas estradas motoniveladas e não motoniveladas foi, respectivamente,  $84,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de estrada e  $38,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de estrada. A remoção média de sedimentos pelo nivelamento ( $341 \text{ t ha}^{-1}$ ) foi quatro vezes maior do que o valor perdido pelas estradas motoniveladas ( $84,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e oito vezes maior do que o valor obtido nas estradas não motoniveladas ( $38,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) durante um ano de medições. Frente aos resultados, a adoção no plano de manejo de técnicas adequadas de construção e de manutenção, além da redução da densidade das estradas poderia contribuir na redução da quantidade de sedimentos produzida, uma vez que essas ações influenciam diretamente na extensão que as estradas vão ocupar na paisagem e também na durabilidade dessas estradas.

Palavras-chave: Estradas florestais; Sedimento; Motoniveladora; Nivelamento; Erosão

## ABSTRACT

### The effect of the regrading of forest roads in the production of sediments

The maintenance of the forest roads can affect the erosive processes directly. Thus, the present work had the objective of determining the influence of the regrading operation, using the motor grader, in the production of sediments in forest roads. Three roads (1, 2 e 3) were submitted to regrading operation and others three roads (4, 5 e 6) remained without treatment. The roads were divided in 30 m long segments marked with leveled stakes. A nylon thread, demarcated of 10 in 10 cm, was then stretched across the leveled stakes and the distance from the nylon thread to the road surface was measured using a ruler. This procedure was carried in all pairs of stakes that composed the roads. Once the initial profile had been determined, roads 1, 2 and 3 were submitted to regrading operation and new measurement was carried out. The average removal of sediments was of 2,13 cm. Considering the mean density of soil  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ , the average removal of sediments was of  $341 \text{ t ha}^{-1}$  of road. After this first stage, 6 measurements throughout one year were carried out in all roads. The analysis of the roads permitted to observe that the regrading operation, the percentage clay (0 a 5cm) and the slope were the factors considered highly significant ( $p < 0,0001$ ) in the production of sediments. The precipitation also was significant ( $p = 0,0028$ ). The roads that were regraded had lost an average of 0,53 cm, while the untreated roads lost an average of 0,24 cm. Considering the average values of loss of sediments and the mean density of the soil, the losses of sediments in the regrading roads and ungraded roads were, respectively, 84,8 and  $38,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  of road. The average removal of sediments ( $341 \text{ t ha}^{-1}$ ) was four times greater than the losses of sediment in regraded roads ( $84,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) and eight times greater than the losses of sediment of ungraded roads ( $38,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) during one year. The adoption in the management plan of adequate techniques of road construction and maintenance, as well as the reduction of the density of the roads, could contribute in the reduction of the amount of sediments produced.

Keywords: Forest roads; Sediment; Motor grader; Regrading; Erosion

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade da água dos rios que drenam microbacias florestais é determinada em parte pela locação das estradas e pela maneira como estas são construídas e mantidas (PACKER; HAUPT, 1965). De acordo com Lugo e Gucinski (2000) as atividades de manutenção das estradas podem se aproximar das atividades de construção na quantidade e extensão dos distúrbios e podem prolongar os efeitos ambientais para ecossistemas adjacentes. Os mesmo autores ainda reconhecem que a manutenção das estradas não é somente uma atividade técnica, mas também uma ação ecológica que requer planejamento e análise como qualquer outra atividade como colheita, manejo de fauna, e assim por diante. De posse dessas informações fica evidente a necessidade de conhecer como a manutenção das estradas afeta a produção de sedimentos.

No ano de 1989 iniciou-se um programa de monitoramento ambiental em microbacias, localizadas em diferentes estados, por meio de um convênio entre o Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais e empresas do setor florestal brasileiro. Atualmente, 18 microbacias são monitoradas. Este programa tem como objetivos principais identificar e quantificar os impactos do manejo florestal na ciclagem de nutrientes, na quantidade e na qualidade da água (CÂMARA, 2004) e gerar subsídios para o melhoramento contínuo das práticas de manejo florestal (LIMA, 1993).

Um dos indicadores hidrológicos utilizados no monitoramento é a concentração de sedimentos em suspensão presente na água. As amostras coletadas demonstravam, eventualmente, variações na concentração desse indicador, principalmente em função da precipitação. Contudo, em algumas microbacias, verificou-se que o aumento na concentração dos sedimentos ocorria após as práticas de manutenção das estradas e este aumento se destacava de todos os valores até então obtidos. Essas alterações estavam em sintonia com Grace III (2000), que alertava que apesar de a erosão do solo e o escoamento serem influenciados por muitos fatores, como a precipitação local e as características do solo, o manejo adotado também

constitui fator de grande contribuição ao processo erosivo e que a chave para reduzir a quantidade de sedimentos entregue aos rios é identificar a origem dessa erosão.

Considerando que no Brasil a motoniveladora ou patrol é o equipamento mais importante para a execução de serviços de manutenção considerados básicos em estradas rurais e florestais (BAESSO; GONÇALVES, 2003) e que muitas das informações sobre sedimentação em florestas vêm de observações subjetivas de rios turvos durante e seguidamente à construção de estradas e que, somente em poucos casos, as pesquisas têm providenciado dados quantitativos da produção de sedimento por estradas florestais (PACKER; HAUPT, 1965), o objetivo geral desse trabalho foi conhecer a influência da atividade de nivelamento, utilizando a motoniveladora, na produção de sedimentos por estradas florestais.

Para tanto, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar o montante de sedimentos deslocado pela motoniveladora;
- b) Comparar a produção de sedimentos em estradas florestais motoniveladas e não motoniveladas;
- c) Verificar a influência da precipitação e da declividade na produção de sedimentos durante o período de estudo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Erosão do solo**

A erosão é um processo caracterizado pelo desprendimento, transporte e deposição de partículas de solo em um local abaixo de sua origem. Este processo e sua intensidade dependem, principalmente, das condições climáticas, da topografia do terreno, do tipo de vegetação, da cobertura de resíduos vegetais sobre o solo e de algumas características e propriedades do solo (GONÇALVES, 2002).

Carling et al. (2001) também ressaltam a ação do vento, da água e da gravidade sobre o solo como agentes do processo erosivo. Contudo, os autores destacam que a vulnerabilidade dos solos à erosão depende não somente de fatores como clima, topografia e características do solo, mas também do tipo e intensidade do uso da terra. Dessa forma, se o manejo adotado for inapropriado, a estrutura do solo pode ser prejudicada, reduzindo seu valor como um recurso e o solo poderia ser erodido em uma razão maior do que aquela em que está sendo formado naturalmente.

Para Silva, Schulz e Camargo (2004), nenhum método de estudo sobre erosão pode ser utilizado exclusivamente e fornecer resultados sólidos e amplos, pois alguns desses métodos quantificam apenas parte do processo erosivo que é complexo e formado por fatores climáticos, pedológicos, antrópicos e de outras naturezas. O ideal, ainda segundo os autores, seria a combinação de métodos que se complementassem e que juntos permitissem uma compreensão mais próxima da realidade local e natural.

### **2.2 As florestas plantadas e a erosão**

No Brasil, alguns autores vêm estudando a perda de sedimentos pelas florestas plantadas, principalmente àquelas com espécies de rápido crescimento, como os eucaliptos, em diferentes tipos de solo e diferentes tipos de manejo.

Lima (1988) avaliou as perdas de sedimento em área com solo arenoso, no município de São Simão – SP, florestadas com *Eucalyptus grandis*, por meio de parcelas padrão. No primeiro ano foram realizados o preparo de solo e o plantio nas parcelas. As perdas médias de solo nesse período variaram de 1,0 a 10,4 t ha<sup>-1</sup>, porém, com o crescimento do eucalipto esses valores foram diminuindo, apresentando no 4º ano taxas de perda de solo de 0,01 a 0,1 t ha<sup>-1</sup>. Na parcela testemunha, a qual não foi reflorestada, as perdas de solo no 2º, 3º e 4º anos foram 3,2, 11,3 e 9,2 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Pires (2004) também avaliou as perdas de solo, água, nutrientes e matéria orgânica causadas pela erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo de eucalipto, pastagem, mata nativa e solo descoberto, no município de Belo Oriente – MG, em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, por meio de parcelas padrão. Para o ano de 2003, a perda de solo na mata nativa foi 0,109 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, na pastagem 0,1 t t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, no sistema de manejo com eucalipto plantado em nível 0,041 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, no sistema convencional 0,201 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, no sistema convencional com queimada 0,587 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e em solo descoberto 4,895 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

A influência de diferentes sistemas de manejo de uso do solo sobre as perdas de solo, água e alguns atributos físicos do solo também foram estudados por Brito (2004), no município de Guanhães – MG, em um Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura muito argilosa. A floresta nativa, pastagem nativa degradada, solo descoberto após colheita do eucalipto, solo sob plantio de eucalipto no sentido do declive com queima dos resíduos florestais, solo sob plantio de eucalipto no sentido do declive sem queima dos resíduos e solo sob plantio de eucalipto em nível produziram, respectivamente, 0,011 t ha<sup>-1</sup>, 0,412 t ha<sup>-1</sup>, 1,770 t ha<sup>-1</sup>, 0,063 t ha<sup>-1</sup>, 0,098 t ha<sup>-1</sup> e 0,116 t ha<sup>-1</sup>.

Martins (2005) comparou a perda de solo por meio de parcelas padrão em plantio com clones de *Eucalyptus grandis* e mata nativa, sob Argissolo Amarelo textura média/argilosa, Plintossolo Háptico e Argissolo Amarelo moderadamente rochoso, na

região dos Tabuleiros Costeiros, Espírito Santo. As perdas de solo obtidas de 1997 a 2004, para o povoamento com eucalipto, variaram de  $1,77 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (em 1997) a  $0,068 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (em 2004) e, para a Mata nativa, variaram de  $0,08 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (em 1999) a  $0,0099 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (em 2003).

Wichert (2005) utilizou a mesma metodologia de parcelas padrão em áreas declivosas, no município de Igaratá – SP, para avaliar a perda de solo em áreas de Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico com textura média argilosa, sob diferentes manejos. O preparo de solo com coveamento manual gerou uma perda de  $2,4 \text{ t ha}^{-1}$ ; a subsolagem a favor do declive gerou  $12,96 \text{ t ha}^{-1}$  e a área sem preparo  $10,88 \text{ t ha}^{-1}$ .

Como apresentado nos trabalhos acima, os valores de perda de solo em florestas plantadas variam de local para local, de acordo com o tipo de manejo adotado e o tipo de solo, porém, todos estavam abaixo dos valores tolerados pela FAO (1967) que admite perdas de  $12,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , para solos profundos, permeáveis e bem drenados; de  $2 \text{ a } 4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , para solos rasos ou impermeáveis e de  $4 \text{ a } 12,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para os demais tipos de solo.

De um modo geral, pode-se verificar que a pesquisa florestal no Brasil vem procurando desenvolver conhecimentos e tecnologias para a condução de florestas plantadas, em diferentes condições ambientais, que resultem no menor impacto possível em termos ambientais. Assim, para que a melhoria se torne constante, faz-se necessário conhecer, dentro da cadeia produtiva florestal, àquelas atividades ainda potencialmente geradoras de impacto.

### **2.3 As estradas florestais e suas influências no processo erosivo**

Fredriksen (1970) e Versfeld (1981) verificaram que o aumento do escoamento superficial e da erosão não resulta diretamente das atividades florestais em si, como, por exemplo, o corte e o desbaste, mas sim são processos de ocorrência localizada, sendo originados principalmente nas estradas, nos carregadores e em áreas

compactadas. Assim, o planejamento adequado destas atividades torna-se necessário para alcançar um controle mais efetivo da erosão.

As principais fases do desenvolvimento de uma estrada são: construção, operação, manutenção e abandono. A construção de estradas resulta em mudanças na paisagem que elas atravessam e freqüentemente é o maior trauma ambiental para os ecossistemas adjacentes devido ao movimento de terra e outras atividades que podem causar distúrbios em toda microbacia (FAO, 1989; LUGO; GUCINSKI, 2000).

A construção inapropriada e a manutenção inadequada das estradas são a principal origem de erosão e sedimentos provocados pelo homem e representam um grande impacto aos recursos naturais, podendo causar sérias perdas econômicas (FAO, 1989).

A estrutura e funcionamento de uma estrada variam de acordo com seu desenho, uso, tipo de superfície e localização (LUGO; GUCINSKI, 2000). Ainda não existe um consenso com relação à classificação dos diferentes tipos de estradas florestais, porém, Gonçalves (2002) as classifica em três categorias:

a) estradas primárias (ou principais): sua função principal é dar acesso às áreas de produção florestal e às estradas externas à propriedade. Geralmente é mais larga e com tráfego mais intenso e pesado;

b) estradas secundárias (carreadores ou estradas vicinais): são permanentes e normalmente dividem a área florestal em talhões, separam propriedades e conectam os locais de produção florestal e a estrada principal. Podem ainda ser classificadas em estradas secundárias em nível e estradas secundárias pendentes (em desnível).

c) estradas de acesso: são estradas temporárias, com a função de reduzir a distância entre o local da colheita e a estrada secundária.



De uma maneira geral, independentemente de sua classificação, as estradas freqüentemente interferem nos padrões naturais de drenagem e fluxo da água, e tendem a promover a concentração das águas de vários modos, pois sua superfície compactada dificulta a infiltração, levando a um aumento nas taxas do escoamento superficial (BAESSO; GONÇALVES, 2003).

Segundo Grace III (2000), as estradas podem também acelerar a erosão devido ao aumento dos gradientes de inclinação e a interrupção dos padrões de drenagem natural. Dessa forma, a erosão produzida pela rede de estradas florestais eventualmente alcança e degrada a qualidade dos sistemas hídricos.

A chave para reduzir a quantidade de sedimentos entregue aos rios é identificar a origem da erosão. A erosão do solo e o escoamento são influenciados por muitos fatores, contudo a precipitação local, as características do solo e o manejo são os maiores contribuintes. A melhor prática de mitigação da erosão pode ser alcançada através de um planejamento cuidadoso, da locação, do desenho, da construção e da manutenção das estradas florestais (GRACE III, 2000). Um planejamento florestal cuidadoso também analisa tanto os aspectos econômicos quanto os aspectos ecológicos, para evitar e/ou mitigar os efeitos negativos da rede viária florestal (DIETZ, 1983a).

A erosão se relaciona com fatores físicos como o tipo de solo, a geologia e o clima. Contudo, a densidade de estradas na microbacia, a locação das estradas em relação à declividade, aos rios e a solos sensíveis e o padrão da estrada e da construção também contribuem com o processo erosivo (FAO, 1989).

Para Gonçalves (2002), a má locação da rede viária pode ocasionar problemas graves relacionados à captação, à condução e ao deságüe concentrado da enxurrada em determinados pontos do terreno, fatores esses que contribuem com o processo erosivo podendo influenciar na queda de produtividade, no assoreamento de cursos d'água e na perda dos valores estéticos e paisagísticos.

Segundo Baesso e Gonçalves (2003), a correta localização das estradas na paisagem é o que as define como aceitáveis do ponto de vista ambiental, pois estradas adequadamente traçadas permitem que os impactos ambientais sejam menores. Como princípios básicos, o traçado deve ser localizado o mais próximo possível aos divisores de água, principalmente quando as estradas forem principais, e deve-se evitar a construção de estradas em áreas úmidas, instáveis, com fortes rampas e perto das áreas de preservação permanente (GONÇALVES, 2002; BAESSO; GONÇALVES, 2003).

Para Gucinski et al. (2001), o desenho e o manejo impróprio ou inadequado resultam na maioria dos problemas relacionados com as estradas durante o período chuvoso. Dessa forma, segundo os autores, o redesenho das estradas, que antecipa e acomoda o movimento da água e dos sedimentos em fortes precipitações, poderia reduzir as falhas e minimizar as conseqüências da erosão. Além disso, para Gonçalves (2002), a relocação de estradas antigas, às vezes, é mais viável e econômico do que a convivência com problemas crônicos de erosão.

O comprimento de rampa e a declividade também são fatores importantes que influenciam diretamente a intensidade dos processos erosivos. Garcia et al. (2003), realizaram um experimento para determinar o volume de enxurrada e a perda de solo em estradas florestais em condições naturais de chuva. Concluíram que o volume de enxurrada era mais afetado pelo comprimento do segmento enquanto que a produção de sedimentos era mais influenciada pela declividade da rampa.

Com relação à declividade, na Tabela 1 são apresentadas algumas recomendações com relação ao grau aceitável de inclinação para cada tipo de estrada, segundo Gonçalves (2002).

Tabela 1 – Inclinação máxima recomendável de acordo com os tipos de estradas

<b>Tipo de Estrada</b>	<b>Inclinação máxima recomendável</b>
Principal	8 % em sentido favorável ou adverso, aceitando-se até 10 % numa distância máxima de 150 m.
Secundária	12 % em sentido favorável ou adverso, aceitando-se até 15% no sentido favorável numa distância máxima de 150 m.
Acesso	18 % em sentido favorável e 12 % em sentido adverso

Fonte: Gonçalves (2002)

A quantidade de erosão também está diretamente relacionada com o comprimento total das estradas em uma microbacia (FAO 1989). Assim, as práticas de um manejo florestal cuidadoso deveriam incluir, com relação às estradas florestais, o consumo de um mínimo de área possível, utilizando princípios de engenharia e princípios ecológicos sensatos (LIKENS, 1985)

Segundo Machado e Malinovski (1987), no Brasil a falta de planejamento proporcionou uma rede de estradas com uma densidade média de aproximadamente 90 m ha<sup>-1</sup> de floresta plantada, considerada muito alta com relação aos padrões internacionais. Amimoto (1978) apud FAO (1989), salienta que uma rede de estradas de aproximadamente 30 a 40 m ha<sup>-1</sup> seria considerada ótima para a maioria dos objetivos do manejo. Por outro lado, Becker (1994) ainda divide a densidade de estradas de acordo com sua função, ou seja, para o autor a densidade deveria variar entre 10 e 20 m ha<sup>-1</sup> para as principais e entre 10 e 30 m ha<sup>-1</sup> para as secundárias.

Para Pereira Neto (1995), a otimização da densidade de estradas possibilita uma diminuição na quantidade de estradas, o que representa grandes benefícios econômicos para as empresas. Ainda segundo o autor, além dos benefícios econômicos, a diminuição da quantidade de estradas pode contribuir para a redução dos impactos ambientais nos plantios de eucalipto.

Dessa forma, a densidade de estradas pode ser um indicador importante da adequação (distribuição, custos de transporte, de baldeio e de manutenção) da rede

viária e de potenciais riscos de erosão (GONÇALVES, 2002). Assim, em um plano de manejo que vise a proteção do solo e da água, o desenho, a densidade, a utilização do sistema viário e a identificação das áreas de alto risco de erosão tornam-se parâmetros chaves (LIMA; ZAKIA; CÂMARA, 2002).

#### **2.4 Manutenção de estradas florestais: o nivelamento**

As estradas de terra (rurais e florestais), não pavimentadas, devem apresentar duas características técnicas essenciais: boa capacidade de suporte e boas condições de rolamento e aderência (SANTOS et al., 1985; BAESSO; GONÇALVES, 2003). Ainda de acordo com os autores, as estradas rurais consideradas adequadas são aquelas que possuem um desenho adequado da plataforma (composta pela pista de rolamento, pela faixa lateral/acostamento e pela sarjeta), infra-estrutura de drenagem corrente (bueiros) e superficial, e revestimento primário em toda extensão com material de qualidade e com espessura suficiente para suportar o tráfego existente.

Quando as estradas possuem as características técnicas acima descritas, a atividade de manutenção pode limitar-se a reconformação (nivelamento) da pista de rolamento, utilizando-se a motoniveladora, além de serviços básicos como limpeza das obras de arte e drenagem superficial, roçada das faixas laterais e reposição, se necessário, do revestimento primário (BAESSO; GONÇALVES, 2003).

A motoniveladora ou patrol é considerada o equipamento mais importante para a execução de serviços de construção e manutenção considerados básicos em estradas rurais e florestais. De uma maneira simplificada, são equipamentos constituídos basicamente por uma lâmina montada sob um círculo para uma movimentação localizada entre a cabine do operador e o eixo dianteiro, podendo ser rígidas ou articuladas, sendo que as primeiras apresentam melhores resultados para os serviços de regularização ou de patrolagem, enquanto que as articuladas são dotadas de maior poder de mobilidade (INSTITUTO FORESTAL, 1971; BAESSO; GONÇALVES, 2003).

Dietz (1983b) afirma, que o padrão de construção das estradas florestais no Brasil é muito simples, o que as tornam sensíveis às influências climáticas e requerem assim, um manejo cuidadoso e conservação permanente. Baesso e Gonçalves (2003) descrevem essas estradas como “estradas em leito natural”, pois a superfície de rolamento em toda a sua extensão não possui nenhum tipo de revestimento primário. Esses autores também confirmam que esta é uma situação freqüente no Brasil e que os custos de manutenção são mais altos, pois a freqüência de utilização da motoniveladora, para manter a pista de rolamento trafegável, depende fundamentalmente das condições climáticas, ou seja, sempre após o período chuvoso torna-se necessário a utilização deste equipamento.

Uma vez que as estradas são construídas fora dos padrões técnicos adequados, muitas vezes as atividades de manutenção tendem a ser realizadas também sem critério e técnicas adequadas. A motoniveladora, por exemplo, quando empregada de forma sistemática e tecnicamente inadequada, pode contribuir para a deterioração da pista de rolamento, principalmente quando provoca um afundamento (encaixe) gradual da pista em relação ao perfil longitudinal, expondo perfis de solo que podem apresentar problemas de estabilidade e por conduzir a movimentação das águas superficiais de forma a potencializar os efeitos erosivos das águas nas áreas marginais (SANTOS et al., 1985; GONÇALVES, 2002; BAESSO; GONÇALVES, 2003). Além disso, o corte da camada superficial da estrada para regularizar imperfeições gera um material, o qual é comumente depositado de forma contínua nas laterais, em toda a extensão da estrada, sem receber nenhum tipo de tratamento, o que os torna fontes potenciais de sedimentos

Esse fato pode justificar a afirmação de Lugo e Gucinski (2000) de que as atividades de manutenção das estradas podem se aproximar das atividades de construção na quantidade e extensão dos distúrbios e podem prolongar os efeitos ambientais para ecossistemas adjacentes.

Para Dietz (1983b), existe uma interessante relação entre os custos de construção e de conservação das estradas, pois quando o padrão de construção se eleva, os custos de construção acompanham este aumento, porém os custos de conservação permanente baixam.

Segundo a FAO (1989), a manutenção é freqüentemente negligenciada ou é realizada imprópriamente, resultando em rápida deterioração da estrada. Reconhece-se que a manutenção das estradas é essencial para preservar sua condição original de construção, proteger recursos adjacentes e preservá-los e proporcionar eficiência durante todo o percurso, por isso é necessário um comprometimento em adotar as técnicas adequadas de construção já conhecidas e, por conseguinte, as técnicas de manutenção.

## **2.5 As Estradas Florestais e os Recursos Hídricos: influências geomórficas e hidrológicas**

As estradas florestais causam perturbações na topografia, ocasionando mudanças complexas e pronunciadas nos padrões espaciais de processos geomórficos e hidrológicos devido às mudanças no movimento da água e do sedimento na paisagem (LUCE; WEMPLE, 2001; WEMPLE; SWANSON; JONES, 2001).

Para Lugo e Gucinski (2000), é difícil separar os efeitos hidrológicos dos efeitos geomórficos das estradas porque a água é geralmente o agente para o transporte de sedimentos nas microbacias e as estradas influenciam ambos os processos simultaneamente. Ainda segundo os autores, a intensidade de transporte, o tipo de superfície da estrada, a vegetação de cobertura, o clima, o substrato geológico, a manutenção das estradas e a conectividade estrada-riacho são fatores primários na regulação da produção de sedimentos nos sistemas de estradas.

As estradas possuem três efeitos primários sobre a água: elas interceptam as gotas de chuvas diretamente na superfície da estrada e nos taludes e interceptam o

movimento da água subsuperficial morro abaixo; elas concentram o fluxo, ou na superfície ou em uma vala adjacente ou canal; e elas desviam ou mudam o percurso da água com relação aos fluxos padrão que estavam presentes antes de sua construção (GUCINSKI et al., 2001).

Em particular, as estradas podem alterar processos hidrológicos que influenciam o transporte e a deposição de sedimentos, além da perda de massa (COE, 2004). 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 degradação do ecossistema aquático da rede de drenagem dos rios e vales distantes (FORMAN; ALEXANDER, 1998).

O escoamento superficial hortoniano (HOF) ocorre quando a intensidade de chuva excede a capacidade de infiltração do solo (HORTON, 1940). As superfícies das estradas são altamente compactadas, possuindo alta densidade de massa e pouco ou nenhum espaço poroso (LUCE, 1997). Embora as estradas ocupem uma pequena porcentagem da maioria das microbacias, elas podem ser responsáveis pela maioria do HOF em microbacias florestadas (COE, 2004).

Localmente, o segmento da estrada pode interagir com as perdas de sedimentos e com processos fluviais de muitas formas como, por exemplo, iniciando, transformando ou interceptando um dado processo e o material associado. Ainda, na escala de vertentes, a rede de influências das estradas depende de como os processos afetados por segmentos individuais interagem com o material transportado para regiões mais baixas e para a rede de drenagem (WEMPLE; SWANSON; JONES, 2001). Na escala da bacia o efeito das estradas depende da conectividade com a rede de drenagem (JONES et al., 2000) e da extensão com que as estradas aumentam ou impedem o transporte de sedimentos para regiões mais baixas (NAKAMURA; SWANSON; WONDZELL, 2000).

A maioria da sedimentação em microbacias florestadas é causada principalmente pelas estradas e, conseqüentemente, pela erosão de superfície e pela erosão de massa (ELLIOT; HALL; GRAVES, 1999). A magnitude da proporção de sedimento distribuído em uma bacia em particular será influenciada por uma amplitude de fatores geomorfológicos e ambientais incluindo a natureza, a extensão e a localização da fonte de sedimentos, as características de relevo e da declividade, os padrões de drenagem e as condições dos canais, a cobertura florestal, o uso da paisagem e a textura do solo (WALLING, 1983).

Tradicionalmente o manejo de microbacias tem focado a qualidade da água e as atividades humanas que a afeta. Das várias atividades de manejo florestal, o manejo das estradas apresenta-se como o maior risco de distúrbios como demonstrado pela degradação da qualidade da água (SWIFT; BURNS, 1999).

A maior parte da água dos rios origina-se de paisagens florestadas. A qualidade dessa água é determinada em parte pela localização das estradas florestais nas microbacias e a maneira como elas são construídas e mantidas. Muitas das informações sobre sedimentação de florestas vêm de observações subjetivas de rios turvos durante e seguidamente a construção de estradas para a colheita. Em poucos casos contudo as pesquisas têm providenciado dados quantitativos da produção de sedimento por estradas florestais (PACKER; HAUPT, 1965).

A natureza linear das estradas e sua tendência em seguir através dos gradientes topográficos produzem uma influência nos processos hidrológicos na escala da microbacia que é muito maior do que se poderia esperar de uma pequena fração de terra por elas ocupada. Os efeitos hidrológicos são parcialmente responsáveis pelas mudanças nos processos geomórficos e pela produção de sedimentos em bacias com rede de estradas (LUCY; WEMPLE, 2001).

As estradas e os carregadores podem afetar o funcionamento hidrológico e a saúde da microbacia muitas vezes por incorporarem as cabeceiras de drenagem como



área útil de plantio. Essas áreas caracterizam-se como zonas ripárias e as estradas de contorno (aceiros) comumente são locadas sobre áreas com essas características (LIMA; ZAKIA; CÂMARA, 2002). Nas microbacias, o ecossistema ripário - formado pela zona ripária e o conjunto das interações ripárias - é responsável pelos serviços ambientais de manutenção do ecossistema aquático e dos recursos hídricos, em termos de vazão e qualidade da água (LIMA; ZAKIA, 2006). O desenho do sistema viário, por exemplo, deveria levar em conta uma visão sistêmica das zonas ripárias, no sentido de evitar danos a áreas importantes para a manutenção da integridade do sistema ripário (ILHARDT; VERRY; PALIK, 2000; BLINN; KILGORE, 2001).

A interface entre os sistemas aquáticos e terrestres (identificados como zonas úmidas ou zonas ripárias) caracteriza-se por ser muito produtiva e ativa na troca de materiais e organismos. As estradas podem aumentar a conectividade dessas interfaces normalmente em detrimento do sistema aquático que é vulnerável à sedimentação excessiva e às mudanças na qualidade da água (LUGO; GUCINSKI, 2000).

Como visto, as estradas afetam direta e indiretamente todos os componentes da microbacia e os ecossistemas que a suportam. Algumas dessas influências são grandemente entendidas, enquanto outras estão somente começando a ser reconhecidas. Influências físicas têm sido mais cuidadosamente estudadas, mas vem aumentando os esforços dirigidos ao entendimento dos impactos das estradas nos sistemas biológicos e para identificar os tipos de influência exercidos por diferentes tipos de estradas (REID; ZIEMER; FURNISS, 1994).

O efeito hidrológico das estradas depende de muitos fatores, incluindo a locação das estradas nas encostas, características do perfil do solo, o fluxo de água subsuperficial e a interceptação da água pelo lençol freático, desenho das estruturas de drenagem que afetam a rota do fluxo de água através da microbacia e a porção ocupada pelas estradas na área da microbacia (GUCINSKI et al., 2001).

Para Robinson (1977) existe um volume considerável de sedimento em trânsito, que contempla o período entre o desprendimento do material da sua fonte de origem e sua chegada ao local de deposição final.

Segundo Brujinzeel (1997) é importante reconhecer que nem todo material erodido é carregado diretamente para a rede de drenagem, uma vez que as partículas permanecem freqüentemente presas (ou permanentemente) em depressões no terreno ou são depositadas nas planícies de deposição e nas planícies aluviais. Ainda segundo o autor, esse processo é mais facilmente verificado quando ocorre o desprendimento das partículas do solo e a erosão laminar e explica por que não é possível prever a produção de sedimentos de uma microbacia a partir de observações de erosão somente realizadas em pequenas parcelas de escoamento superficial. Assim, o autor conclui que a chegada de sedimentos na rede de drenagem ou na rede de drenagem adjacente não significa que aparecerá imediatamente rio abaixo e que um excepcional pico de vazão pode ser necessário para arrastar o sedimento previamente depositado para seu local final de permanência.

De acordo com Grace III (2000), a melhor prática de mitigação da erosão pode ser alcançada através de um planejamento cuidadoso, da locação, do desenho, da construção e da manutenção das estradas florestais. Dietz (1983a) afirma ainda que um planejamento florestal cuidadoso analisa tanto os aspectos econômicos quanto os aspectos ecológicos, para evitar e/ou mitigar os efeitos negativos da rede viária florestal.

## **2.6 Medição da produção de sedimentos em estradas florestais**

A erosão do solo em florestas geralmente segue um distúrbio como a construção de estradas, operação de colheita ou fogo. O aumento nas taxas de erosão em áreas florestais é uma preocupação em particular, pois as taxas de erosão em áreas naturais tendem a ser muito baixas e, quando ocorrem, estão freqüentemente associadas a eventos notáveis como ciclos de fogo, deslizamentos e incisões

geológicas (ELLIOT; DUMROESE; ROBICHAUD, 1996; RAMOS-SCHARRÓN; MacDONALD, 2005).

Os impactos ambientais da colheita florestal e das atividades florestais associadas têm sido tradicionalmente abordados em estudos laboratoriais em pequenas escalas, em parcelas de produção, em parcelas de escoamento superficial e na escala das microbacias (NEARY; HORNBECK, 1994).

Fredriksen (1970) analisou a relação entre diferentes manejos florestais e a produção de sedimentos. Para tanto, foram monitoradas 3 microbacias experimentais. Na primeira, foram construídas estradas, que ocuparam 6 % da área total, e a colheita de 25 % de sua área foi realizada em mosaicos; na segunda, não houve construção de estradas e a colheita foi realizada em área total por meio de cabos suspensos e, na terceira, não houve tratamento (testemunha). Na primeira microbacia, a produção total de sedimento, de 1960 a 1968 (período experimental), foi 109 vezes maior do que o valor medido na microbacia testemunha. Vale ressaltar que 99 % desse sedimento foi perdido durante os dois anos seguidos aos deslizamentos - que ocorreram principalmente onde as estradas interceptavam os riachos - e 82 % foi depositado no leito do rio. A perda de solo na segunda microbacia (sem estradas) foi 3,3 vezes maior do que na microbacia controle e 2/3 dessa perda foram encontrados na forma de sedimentos em suspensão. A média anual de perda de sedimentos pela primeira microbacia (com estradas) foi de, aproximadamente,  $30,8 \text{ t ha}^{-1}$ , a segunda microbacia (sem estradas)  $1,18 \text{ t ha}^{-1}$  e a microbacia testemunha  $0,36 \text{ t ha}^{-1}$ .

Beschta (1978) continuou os estudos apresentados por Fredriksen (1970), apresentando em seu trabalho o resultado de 15 anos de monitoramento da produção anual de sedimentos em suspensão. A microbacia que sofreu corte raso em 82 % de sua área, além da construção de estradas, apresentou, no período pré tratamento (1959-1965), produção média de sedimentos em suspensão de  $0,53 \text{ t ha}^{-1}$ . No período pós tratamento (1966-1973), esse valor alcançou  $1,46 \text{ t ha}^{-1}$ . O autor atribui esse

aumento na produção de sedimentos em suspensão principalmente à quantidade de solo erodido das estradas.

Megahan e Nowlin (1976) apud Heede (1987), demonstraram que apenas 10% do valor do sedimento produzido numa microbacia foi medido na estação fluviométrica, de um riacho efêmero, durante 2 anos. Devido a esse fato, Heede (1987) acreditava que para uma melhor compreensão dos processos, da magnitude e das taxas de produção de erosão e de escoamento superficial, era necessário não só as medições na estação fluviométrica, mas também ao longo dos canais que compunham a microbacia. Dessa forma, em seu estudo, para minimizar os efeitos da variabilidade topográfica, da cobertura florestal e dos tipos solos, os dados foram coletados em parcelas (que abrangiam áreas chamadas pelo autor de subdrenagens) distribuídas em uma microbacia e submetidas a diferentes operações florestais. Assim, o valor da produção média de sedimentos, nos locais sem intervenção florestal, foi  $0,008 \text{ t ha}^{-1}$ ; com corte raso,  $0,011 \text{ t ha}^{-1}$ ; com corte e arraste,  $0,056 \text{ t ha}^{-1}$  e com corte e estradas florestais,  $0,089 \text{ t ha}^{-1}$ .

Neary e Hornbeck (1994) compararam as taxas de erosão produzidas pela colheita florestal e pela construção de estradas em florestas não perturbadas em terrenos inclinados. A colheita florestal isoladamente, segundo os autores, poderia aumentar em 4 vezes as taxas naturais de erosão produzidas por deslizamentos; por sua vez, as estradas poderiam aumentar em até 120 vezes essas taxas.

Ainda na escala das microbacias, Cornish (2001) mediu os níveis de turbidez da água em 8 microbacias com eucalipto. Como resultado, constatou que a construção e o uso de estradas permanentes promovem um aumento dos níveis de turbidez, porém esses aumentos persistiram somente nas microbacias que continham estradas que cruzavam os cursos d'água.

MacDonald, Sampson e Anderson (2001) estudaram a perda de sedimentos em parcelas instaladas em encostas vegetadas, em estradas e em taludes. Além disso,

mediram a produção de sedimentos em segmentos de estradas com área variando de 90 a 700 m<sup>2</sup>. O escoamento superficial ocorreu geralmente nas parcelas instaladas nas estradas quando a precipitação excedeu 6 mm. A produção de sedimento dessas parcelas variou de 9 a 150 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e a concentração de sedimento foi de 20 a 80 Kg m<sup>-3</sup>. Na escala do segmento da estrada a estimativa da produção de sedimento foi de 1 a 74 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>.

Madej (2001) realizou um trabalho na Califórnia (USA), com a meta de reduzir a quantidade de sedimento nos rios relacionada com as estradas e restaurar os padrões hidrológicos naturais da paisagem, por meio de tratamentos de controle de erosão em estradas. Embora os tratamentos aplicados para a remoção das estradas não eliminassem completamente a erosão associada com as estradas florestais, eles reduziram substancialmente a produção de sedimentos em estradas florestais abandonadas.

Wemple, Swanson e Jones (2001) verificaram que a rede de estradas interage com processos geomórficos na paisagem, produzindo complexos padrões de erosão e deposição relacionados com as estradas. No experimento conduzido pelos autores, algumas estradas funcionaram como iniciadoras e depositoras de movimentos de massa e processos fluviais. Além disso, constataram que as estradas aumentaram a quantidade da produção de sedimentos na bacia estudada.

Além de estudos em microbacias, parcelas e trechos, as estradas também são estudadas por meio de modelos que possam prever o potencial da produção de sedimentos. Segundo Elliot, Hall e Graves (1999), o modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project), por exemplo, foi desenvolvido para estimar a produção de sedimento de um segmento e quanto desse sedimento será entregue em um rio. De acordo com os autores, o WEPP é um modelo físico baseado na erosão do solo que pode estimar a erosão do solo e a produção de sedimento considerando o solo, o clima, a cobertura vegetal e as condições topográficas do local, simulando além disso, as

condições diárias que afetam a erosão e calculando para cada dia de precipitação a infiltração e o escoamento.

Machado et al. (2003) realizaram um trabalho objetivando testar o modelo WEPP, por meio de comparações entre o volume de enxurrada e a perda de solo observados experimentalmente em segmentos de estradas florestais - submetidas à chuva natural, com inclinações de 1 e 7% e comprimentos de rampa de 20 e 40 m - e os valores preditos pelo modelo, visando o desenvolvimento de um modelo brasileiro de predição de erosão em estradas florestais. Na validação do modelo WEPP, os valores preditos de volume de enxurrada foram em média 166,58% superiores aos dados observados. O modelo subestimou as perdas de solo em segmentos de menor declividade, chegando a variações de 1125,09% no segmento de 20m de comprimento e 724,41% no segmento com 40m, ambos com 1% de declividade. Na declividade de 7%, a variação entre o peso estimado pelo modelo e o observado foi de 6,73% no segmento de estrada com 20 m de comprimento e 120,25% no segmento com 40 m. Dessa forma, os autores concluíram que o modelo brasileiro de predição de erosão pela água, denominado WEPP – Brasil, não se encontra ainda devidamente calibrado para as condições observadas no Brasil.

De um modo geral, não existem muitos estudos desenvolvidos no Brasil visando avaliar o impacto das estradas florestais na paisagem, bem como a estimativa da produção de sedimentos por essas estradas. A seguir, serão apresentados alguns trabalhos realizados recentemente, em diferentes localidades do Brasil, que enfocaram, direta ou indiretamente, a questão do processo erosivo em estradas florestais.

Antonangelo (2004) estudou a utilização do fator topográfico LS, presente na “Equação Universal de Perda de Solo” (USLE) proposta por Wischmeier; Smith (1978), como um critério para identificar os riscos de erosão em estradas florestais, uma vez que este fator é obtido por meio de uma relação (eq. 1) entre o comprimento de rampa e a declividade, características estas que interferem no processo erosivo. Nas condições do experimento conduzido por Antonangelo (2004), a rampa com maior

perda de sedimentos atingiu o valor de 130 t ha<sup>-1</sup> de estrada e o autor pode concluir que quanto maior o valor do LS, maior a perda de sedimentos.

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

Onde:

LS = fator topográfico;

l = comprimento da rampa (m);

s = declividade (%);

m = expoente do comprimento da rampa, que varia de acordo com a declividade e varia de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Expoente do comprimento de rampa (m) para diferentes classes de declividade

Declividade (%)	Expoente (m)
<=0,5	0,15
0,6 – 1,0	0,20
1,1 – 3,4	0,30
3,5 – 4,9	0,40
>=5	0,50

Fonte: Nill et al. (1996)

Corrêa (2005) avaliou a perda de solos por estradas florestais nos municípios de Itaiópolis e Três Barras, ambos localizados no estado de Santa Catarina. Foram realizadas coletas quinzenais de sedimentos por meio de calhas Coshocton. As perdas anuais obtidas foram de 10,71 t km<sup>-1</sup> em Itaiópolis e 3,98 t km<sup>-1</sup> em Três Barras.

Oliveira (2006) estimou a perda de solo proveniente de erosão laminar e erosão em sulcos em estradas florestais no Vale do Rio Doce, região Centro-Leste do estado de Minas Gerais. Os resultados apresentaram valores médios de perda de solo em sessões de comprimento igual a 20m, variando de 8,65 Mg seção<sup>-1</sup> (432 t km<sup>-1</sup>), para declives entre 0 e 4%, e 21,17 Mg seção<sup>-1</sup> (1058 t km<sup>-1</sup>) para declives superiores a 12%.

Trabalhos que tenham medido a influência das operações de manutenção de estradas florestais no processo erosivo são praticamente inexistentes. Segundo Ramos-Scharrón e MacDonald (2005), somente poucos estudos tem medido diretamente o comportamento da produção de sedimentos após a motonivelamento. No experimento conduzido pelos autores, a produção de sedimento foi relacionada com o total de precipitação e a declividade dos segmentos de estradas. As taxas de produção anual de sedimentos para estradas tipicamente niveladas e não niveladas com 10% de declividade e uma precipitação anual de 115 cm ano<sup>-1</sup> foram de 110 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e 64 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente. A média da produção de sedimentos por segmentos de estradas abandonadas por 15 anos foi somente 10% da média dos valores para estradas não niveladas. Ainda de acordo com o autor, a média da produção de sedimento por unidade de precipitação para segmentos individuais variou com a declividade do segmento para estradas niveladas e não niveladas. Esta variação indica que a taxa de produção de sedimento para estradas niveladas aumenta exponencialmente com o aumento da declividade do segmento. Em contraste, as taxas de produção de sedimento para estradas não niveladas são menores e exibem um aumento linear nas taxas de produção de sedimentos com o aumento da declividade.

## **2.7 As estradas florestais e o manejo florestal sustentável**

Há mais de 40 séculos, as estradas fazem parte da paisagem modificada pelo homem (LUCE; WEMPLE, 2001). Segundo Machado e Santos (1993), no Brasil, a malha viária atinge 1,7 milhão de quilômetros, sendo que 90% desse valor, é ocupado por estradas não pavimentadas e com baixo volume de tráfego. Os autores destacam ainda que, nos povoamentos florestais existentes no Brasil, a malha viária abrangia em 1993 mais de 600 mil quilômetros e, até o final de 1999, a previsão era de que esse valor chegasse a 1 milhão de quilômetros.

Na fase inicial do desenvolvimento da silvicultura intensiva de florestas plantadas no Brasil, os projetos florestais concebiam as estradas e os carreadores na fase de elaboração do plano de manejo sob bases cartográficas que não levavam em



consideração aspectos ecológicos, como a hidrografia e hidrologia da região. Como reflexo desse fato, o setor florestal e, em particular, a rede viária florestal ainda recebe críticas do ponto de vista ecológico devido aos efeitos negativos decorrentes dessas ações como, por exemplo, questões relativas aos problemas de destruição de ecossistemas, diminuição da biodiversidade, degradação de microbacias, diminuição do capital de nutrientes do solo, desfiguração da paisagem, erosão e produção de sedimentos (LIMA; ZAKIA; CÂMARA, 2002; LIMA; ZAKIA, 1998; DIETZ, 1983a).

Diante dessa realidade, é possível notar que a obtenção de madeira como matéria-prima industrial, a partir do reflorestamento homogêneo com espécies de rápido crescimento, pode causar impactos ambientais. A adoção, porém, de práticas de manejo florestal que possibilitem minimizar esses impactos constitui um dos objetivos do manejo florestal sustentável (LIMA, 1993).

Os efeitos ecológicos negativos dos plantios homogêneos sentidos no passado podem hoje ser minimizados através da adoção de práticas ambientalmente sadias de manejo florestal, conforme os preceitos do manejo florestal sustentável (LIMA; ZAKIA, 1998). Segundo Lima (1998), no contexto atual, as atividades de manejo florestal, ou de qualquer outro tipo de uso da terra, devem contemplar as demandas contemporâneas de sustentabilidade, que refletem as expectativas da sociedade para com os inúmeros bens e serviços proporcionados pelas florestas, tais como, a produção de água de boa qualidade pelas microbacias, a moderação climática, a proteção do solo e da ciclagem de nutrientes, a biodiversidade, os valores estéticos e da paisagem e os valores culturais e espirituais.

As certificações florestais surgiram para identificar empresas que buscassem um comprometimento de produzir porém, respeitando um mínimo de aspectos ambientais, sociais e econômicos. O FSC (Forest Stewardship Council), por exemplo, é representado no Brasil pelo Conselho Brasileiro de Manejo Florestal e possui como objetivo principal promover o manejo e a certificação florestal. Dentre os critérios exigidos para a certificação, consta que a construção e a manutenção das estradas não

deve ocasionar degradação do solo a longo prazo, impactos na quantidade e na qualidade da água e alterações significativas nos cursos de drenagem dos cursos d'água (FSC, 2003).

Vale ressaltar, que o plano de manejo começa com a construção de estradas florestais. Assim, o manejo florestal sustentável exige uma rede viária a longo prazo e atividades florestais que garantam a manutenção dos bens e serviços proporcionados pelas florestas (LIMA, 1996; DIETZ, 1983a).

O conceito de manejo sustentável dos recursos naturais nunca poderá ser implementado por meio de fórmulas universais, porém se torna necessário desenvolver modelos alternativos de manejo, que visem frear o processo de degradação ambiental (LIMA; ZAKIA; 2006). Dessa forma, nos últimos anos vem ocorrendo uma crescente preocupação em obter uma melhor definição dos critérios para a construção de novas estradas e recuperação das estradas já implantadas, à medida que as áreas florestais estão sendo reformadas (SEFFRIN et al., 1991).

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Área de estudo**

O experimento foi conduzido em uma área de reflorestamento com *Eucalyptus* sp, com idade de 3 anos, pertencente à Votorantim Celulose e Papel e localizada no município de Capão Bonito, Estado de São Paulo, no período de novembro de 2005 a novembro de 2006.

O município de Capão Bonito faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Alto Paranapanema (UGRHI 14). O clima da região, segundo a classificação de Koeppen, é do tipo Cfb, subtropical de região serrana, úmido e sem estiagem. Apresenta precipitação média anual de 1200 mm e temperatura média anual de 18,5°C (BRASSIOLO, 1988).

A área experimental foi escolhida levando-se em consideração a necessidade desta área não apresentar tráfego regular de veículos. O tráfego poderia ser uma variável importante no resultado final do experimento, porém haveriam dificuldades em sua medição devido ao fato da empresa operar nos períodos diurno e noturno. Dessa forma, a fazenda “Campo de Pouso” foi escolhida para a instalação do experimento devido à idade do plantio não requerer intervenções silviculturais contínuas e a fazenda não fazer parte de nenhuma rota constante de tráfego.

A partir de mapas planialtimétricos (1:10000), do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC), fornecidos pela empresa, foi possível localizar as Áreas de Preservação Permanente (APP), as áreas de efetivo plantio, as estradas florestais, bem como o limite dos talhões e os limites da fazenda, a qual possui área total de aproximadamente 1122 ha, sendo 890 ha de efetivo plantio e 232 ha com áreas de preservação.

A microbacia foi adotada como unidade experimental. Assim, primeiramente a propriedade florestal foi dividida manualmente em microbacias observando o desenho

das curvas de nível com o auxílio do software ArcView. Por meio desta divisão foram identificadas todas as microbacias que se encontravam totalmente inseridas dentro da propriedade, denominadas de microbacias “A”, “B”, “C” e “D” (Figura 1).

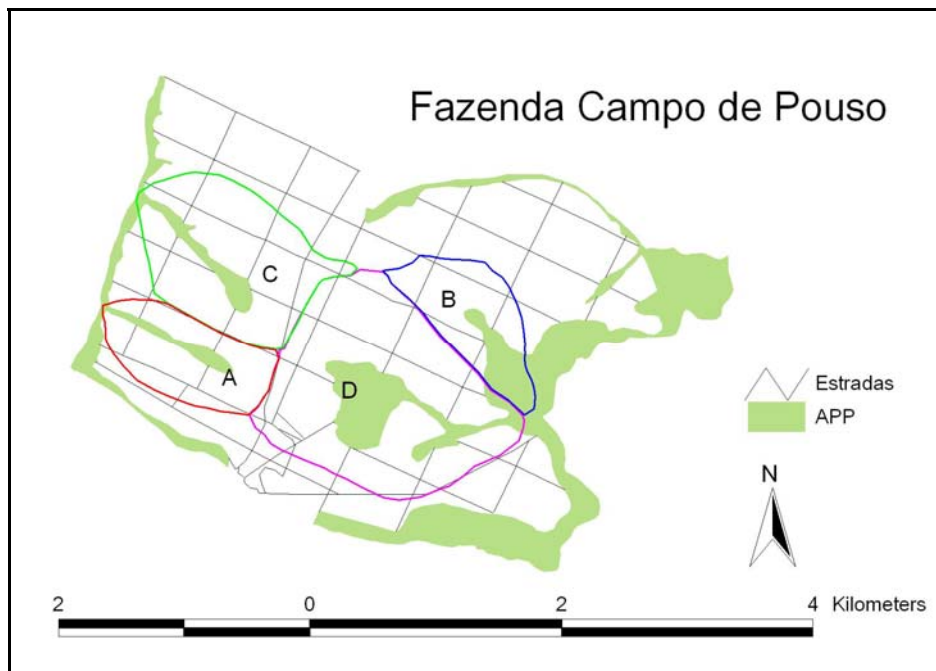


Figura 1 – Disposição das microbacias (A, B, C e D) totalmente inseridas na Fazenda “Campo de Pouso”

Dentre as microbacias identificadas, a microbacia “A” foi escolhida de forma aleatória para a implantação do experimento. A microbacia em estudo possui área de aproximadamente 79 ha, sendo 72 ha de efetivo plantio e 7 ha ocupados com áreas de preservação permanente (APP) (Figura 2). Os aceiros no entorno da APP (Área de Preservação Permanente) e as estradas ocupam, aproximadamente, 2,3 Km e 2,8 Km, respectivamente.

Apesar de os aceiros não serem frequentemente considerados como estradas e, por isso, não serem contabilizados quando realizado o cálculo da densidade de estradas, neste trabalho eles foram estudados como estradas por terem formato de estrada, por receberem tratamento de estrada e por serem muitas vezes utilizados tanto pela colheita quanto pelas operações silviculturais.

Para este estudo foram selecionadas as 4 (quatro) estradas secundárias não cascalhadas presentes na microbacia e 2 (duas) estradas com função de aceiro, totalizando 6 (seis) estradas (Figura 2). Na tabela 3, são apresentadas as características gerais de cada estrada e seu número de identificação a ser adotado durante o decorrer deste trabalho. O fator topográfico LS foi calculado de acordo com a equação 1 e tabela 2.

Tabela 3 – Características gerais das estradas selecionadas

Estrada	Tipo	Largura média (m)	Comprimento (m)	Declividade (%)	LS
1	Estrada secundária	4,5	234	7,9	2,7
2	Aceiro	2,8	232	4,0	0,8
3	Estrada secundária	4,4	150	11,9	4,0
4	Aceiro	2,5	44	5,4	0,7
5	Estrada secundária	2,4	173	7,4	2,1
6	Estrada secundária	3,0	136	7,5	1,9

Segundo levantamento pedológico semi-detalhado realizado por Rizzo (2001), a área experimental encontra-se sobre dois tipos de solo (Figura 2): um Latossolo Vermelho (LV) Distrófico, típico, Álico, com horizonte A moderado, e textura muito argilosa, e um Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) Distrófico, típico, Álico, A moderado e textura média argilosa. Ainda segundo Rizzo (2001), o fato do solo LVA ocorrer ao longo da rede de drenagem de primeira ordem, sugere que há um efeito da circulação hídrica de sub-superfície na eliminação e/ou hidratação de ferro, o que explicaria a menor quantidade de argila no corpo do solo.

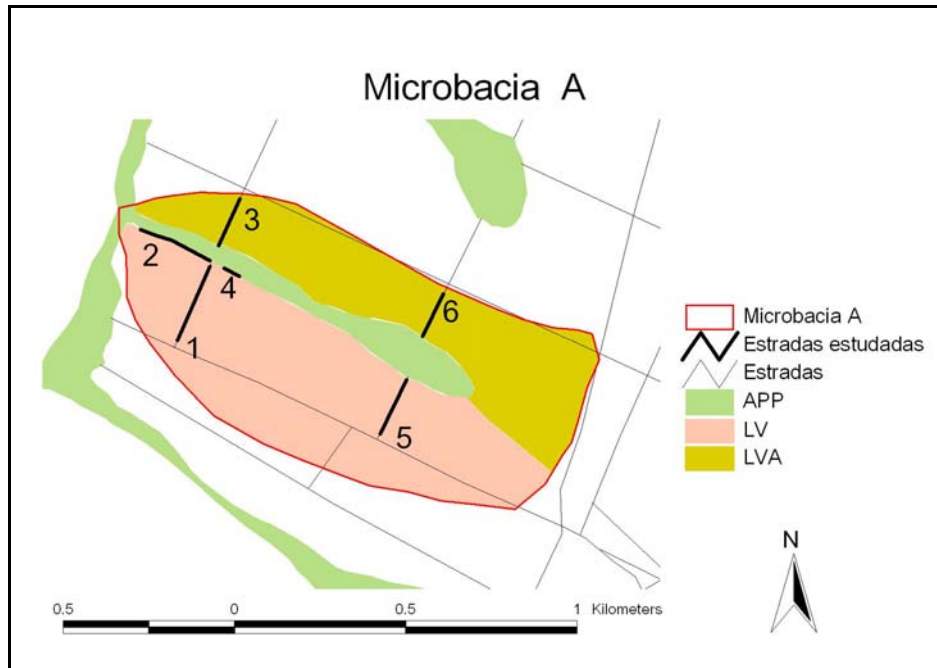


Figura 2 – Tipos de solos encontrados na microbacia em estudo e localização das estradas selecionadas (em negrito)

Os dados climáticos do município de Capão Bonito foram medidos entre 1978 e 1990 pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). A partir desses dados, Sentelhas et al. (1999) determinaram que a precipitação média anual para esta região foi 1210 mm. Contudo, para o período experimental, de dezembro de 2005 a dezembro de 2006, a precipitação foi de aproximadamente 982 mm. Na Figura 3, observa-se a média mensal da precipitação para o município de Capão Bonito, também obtida entre os anos de 1978 e 1990, e a precipitação mensal obtida durante o período experimental. Pode-se notar que nos meses de janeiro, fevereiro, março, julho e setembro de 2006 choveu mais do que o esperado pela média mensal. Por outro lado, nos demais meses a precipitação foi abaixo do esperado, destacando-se os meses de dezembro de 2005 e maio de 2006.

Na Figura 4, observa-se a precipitação diária e as datas em que as coletas foram realizadas e, na Tabela 4, os valores da precipitação acumulada (mm) em cada período, bem como o valor da máxima precipitação (mm) e a precipitação média diária (mm).

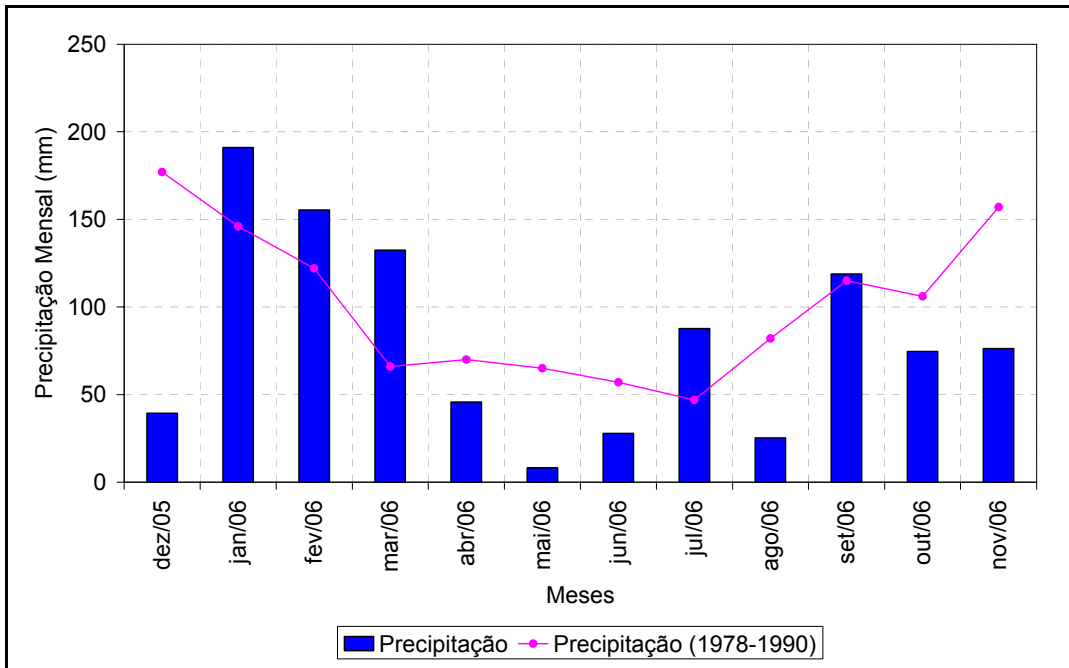


Figura 3 – Média mensal de precipitação (P), em mm, para o município de Capão Bonito e precipitação mensal, em mm, durante o período experimental

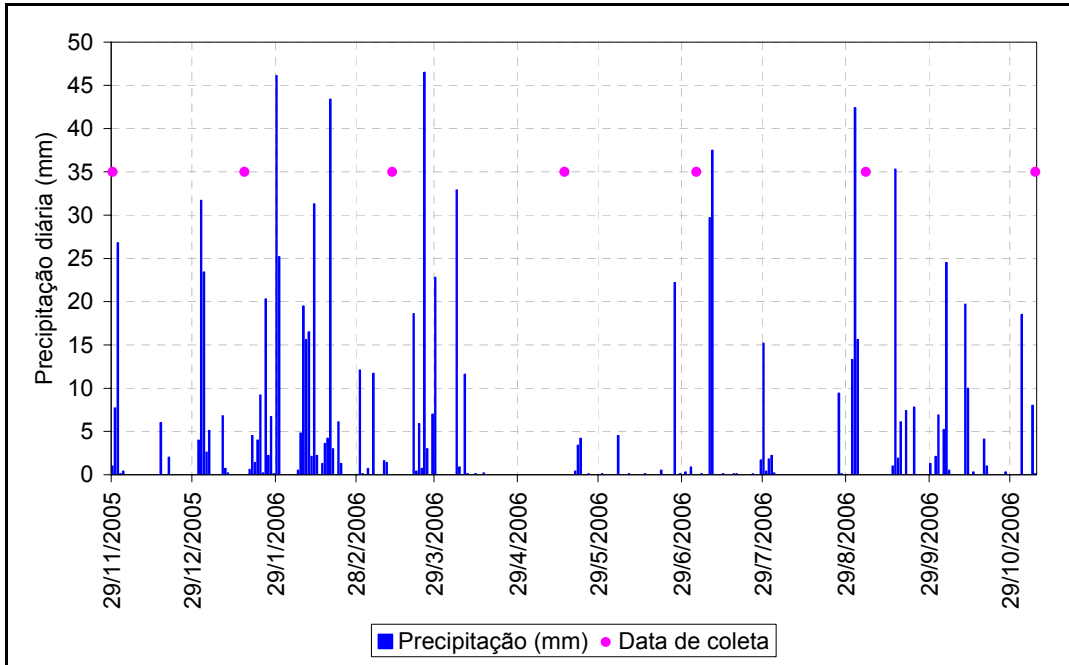


Figura 4 – Precipitação diária (P), em mm, durante o período experimental, e as datas das coletas de dados

Tabela 4 – Precipitação acumulada, precipitação máxima e precipitação média, em mm, entre as datas de cada coleta

Coleta	Data	-----Precipitação (mm)-----		
		Acumulada	Máxima	Média
1	29/11/05	..	..	..
2	17/01/05	119	31,7	2,4
3	13/03/06	304	46,1	5,5
4	16/05/06	151	46,5	2,4
5	04/07/06	37	22,2	0,8
6	05/09/06	170	42,4	2,7
7	07/11/06	162	35,5	2,6

Nota: Sinal convencional utilizado: .. Não se aplica dado numérico (não existe valor)

### 3.2 Coleta de dados

O método adotado para a coleta dos dados foi uma adaptação daquele utilizado por Antonangelo (2004). Assim, nos dias 20 e 21 de outubro, por meio de uma trena, cada uma das 6 estradas foi subdividida em trechos (T) de 30 m (distância inclinada), os quais foram demarcados com 2 estacas de madeira, devidamente identificadas com o número correspondente ao perfil (P) e colocadas uma em cada lado da estrada. Na Figura 5, por exemplo, pode-se notar a disposição dos perfis e dos trechos para a estrada 1, de acordo com o método adotado. Verifica-se que o trecho 1 (T 1) foi formado entre o perfil 1 (P 1) e o perfil 2 (P 2), o trecho 2 (T 2) foi formada entre o perfil 2 (P 2) e o perfil 3 (P 3) e assim, sucessivamente. Na Tabela 5 pode-se observar a quantidade de perfis e de trechos que compõem cada estrada.



Figura 5 – Exemplo do método adotado para a subdivisão das estradas em perfis (P) e trechos (T)



Tabela 5 – Divisão de cada uma das estradas em perfis e trechos

<b>Estrada</b>	<b>Nº de perfis</b>	<b>Nº de trechos</b>
1	9	8
2	9	8
3	6	5
4	3	2
5	7	6
6	6	5
<b>Total</b>	<b>40</b>	<b>34</b>

As estacas utilizadas para a demarcação dos perfis mediam aproximadamente 1 m de comprimento e, para garantir que ficassem bem fixadas, foram enterrados no mínimo 30 cm de sua base no solo (Figura 6A). Os pares de estacas foram nivelados (Figura 6B) utilizando-se um nível de precisão (Alkon AT-20D) e mantiveram esta posição durante todo o período de condução do experimento. Este nível também foi utilizado para a determinação da declividade de cada um dos trechos.

A primeira medição somente foi realizada no dia 28 de novembro de 2005, 38 dias após a fixação das estacas. Esse período era necessário para que houvesse uma estabilização do solo ao redor da estaca devido ao impacto gerado por sua fixação.

Para a medição do formato inicial de cada perfil utilizou-se um fio de nylon, o qual foi preso a uma pequena peça plástica fixada na parte superior da estaca posicionada do lado esquerdo do perfil. O fio de nylon era então esticado entre o par de estacas e foi preso do lado direito também em uma peça plástica (Figura 6C).

O fio de nylon foi demarcado de 10 em 10 cm com uma fita adesiva colorida (Figura 6D) Assim, em cada uma dessas marcas foi medida a distância entre o fio de nylon e o solo com o auxílio de uma régua de alumínio milimetrada (Figura 6E). Ao final de cada medição, a extremidade do fio que ficava presa na estaca do lado direito era solta e todo o fio era enrolado ao redor da estaca esquerda (Figura 6F). Na medição seguinte, o fio era desenrolado da estaca e sua extremidade era novamente presa do lado direito.



Figura 6 – (A) Identificação das estacas; (B) Nivelamento dos pares de estaca; (C) Peça plástica para prender o fio de nylon; (D) Fio demarcado com fita adesiva colorida; (E) Régua milimetrada e (F) Fio enrolado na estaca

O fio de nylon possuía espessura de 3 mm, característica essa que permitia ao fio ser tracionado entre as estacas e evitar a formação de uma curva (catenária) entre as extremidades fixas. Para garantir que as medidas fossem realizadas sempre no mesmo local, o fio também possuía uma identificação na extremidade direita, a qual demarcava o ponto em que o fio deveria ser sempre amarrado na peça plástica fixada na estaca.

### 3.2.1 Deslocamento de sedimentos pela motoniveladora

As estradas 1, 2 e 3 foram utilizadas para estimar a quantidade de sedimentos deslocada pela atividade de motonivelamento. Dessa forma, primeiramente, foram realizadas no dia 28 de novembro, as medições para a determinação do formato inicial de cada perfil, anteriormente à passagem da motoniveladora, seguindo a metodologia

descrita no item anterior. De posse desses dados, no dia 29 de novembro de 2005 a operação de patrolagem foi realizada nas estradas utilizando-se uma motoniveladora/patrol Caterpillar modelo 120H. Logo após a passagem da máquina, o formato de cada perfil foi novamente medido para a determinação do sedimento acumulado ou retirado em cada perfil.

### **3.2.2 Influência da motoniveladora na produção de sedimentos**

As estradas 1, 2 e 3 representaram o grupo das estradas motoniveladas e as estradas 4, 5 e 6 o grupo das estradas não motoniveladas.

Para a determinação da influência da motoniveladora na produção de sedimentos, as seis estradas foram acompanhadas durante o período de 12 meses. Dessa maneira, no ano de 2006, foram realizadas medições do formato dos perfis nos dias 17 de janeiro, 13 de março, 16 de maio, 4 de julho, 5 de setembro e 7 de novembro.

### **3.3 Cálculo da perda de sedimentos**

Para o cálculo do deslocamento de sedimentos pela motoniveladora e para o cálculo da produção de sedimentos pelas estradas motoniveladas e não motoniveladas foi utilizado o mesmo método matemático: o “Método dos Trapézios” (eq. 2). Por meio desse método foi possível calcular a área existente entre o fio de nylon e o solo. Assim, utilizando-se o perfil inicial ( $P_i$ ), a área inicial era calculada e, em seguida, era realizado o cálculo da área final, utilizando-se o perfil final ( $P_f$ ). A diferença entre as duas áreas constituiu a área do perfil de solo ( $A_s$ ) removida pela operação de patrolagem ou pela ação do tempo (Figura 6).

$$S = \left( \frac{b_E}{2} + b_i \right) \cdot h \quad (2)$$

Onde:

$S$  = área formada entre o fio de nylon e o leito da estrada (cm<sup>2</sup>);

$b_E$  = soma das bases externas ( $b_1 + b_n$ ) (cm);

$b_i$  = soma das bases internas ( $b_2 + b_3 + \dots + b_{n-1}$ ) (cm);

$h$  = distância entre as medições (10 cm).

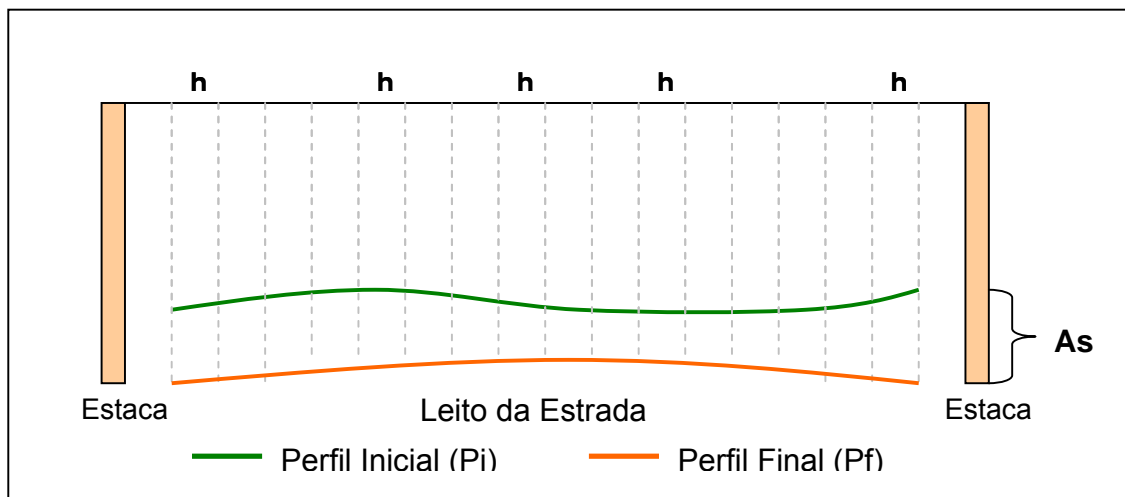


Figura 6 – Desenho esquemático da definição da área de perda de solo ( $A_s$ )

Uma vez calculada a área do perfil do solo ( $A_s$ ) removida, foi possível determinar o volume de solo removido entre cada trecho. Para tanto, foi utilizada a equação do “Tronco de Pirâmide” (eq. 3), que permitiu o cálculo do volume removido entre os trechos por meio de uma relação entre a área removida de um trecho, a área removida do trecho subsequente e a distância entre eles.

$$V = \frac{H}{3} \left( S_n + S_{n+1} + \sqrt{S_n + S_{n+1}} \right) \quad (3)$$

Onde:

V = volume de solo removido ( $\text{cm}^3$ );

H = distância entre perfis (cm);

$S_n$  = área de solo removida no perfil ( $\text{cm}^2$ );

$S_{n+1}$  = área de solo removida no perfil subsequente ( $\text{cm}^2$ ).

Após a determinação da densidade média do solo nas estradas realizou-se as transformações de volume removido em cada trecho para quantidade de sedimento removido em kg. A área de cada trecho foi determinada e obteve-se o valor da perda de sedimentos em cada trecho em  $\text{kg m}^{-2}$  e  $\text{t ha}^{-1}$ .

### 3.4 Análise de solo

O solo é formado por partículas de diferentes tamanhos - areia (2 mm a 0,05 mm de diâmetro), silte (0,05 a 0,002 mm diâmetro) e argila (menores do que 0,002 mm) – capazes de afetar a areação, a drenagem, a capacidade de retenção de água e o espaço poroso habitável no solo (SILVA, 2000). Assim, para a determinação das características granulométricas foram coletadas amostras de 0 a 5 cm, de 5 a 10 cm e de 10 a 20 cm, no primeiro trecho, no trecho central e no último trecho de cada estrada, com auxílio de um trado de caneca. Para análise granulométrica foi utilizada uma amostra composta formada por três amostras correspondentes a cada classe de profundidade.

Para cada estrada foi determinada também a densidade média do solo. Para tanto, foram coletadas três amostras por estrada: uma no primeiro trecho, uma no trecho central e a terceira no último trecho, por meio de um coletor de amostras com anel volumétrico. A densidade do solo foi obtida por meio da razão entre a massa de solo seco e a unidade de volume total do solo (SILVA, 2000).

### **3.5 Análise dos dados**

Para análise dos dados foi adotado nível de significância  $\alpha = 0,05$ . Assim, foram considerados significativos os parâmetros ou funções lineares de seus níveis para os quais resultaram p-valores tais que  $p \leq 0,05$ . Por coerência, as estimativas por intervalo foram obtidas ao nível de confiança 0,95.

#### **3.5.1 Análise do sedimento removido pela motoniveladora**

Para análise dos dados obtidos sobre a quantidade de sedimentos removida pela motoniveladora, foi utilizado o teste não paramétrico de análise de variâncias de Kruskal-Wallis, o qual primeiramente converte os dados em postos. O teste de Dunn foi realizado para comparações múltiplas entre as estradas (2 a 2).

#### **3.5.2 Estratégia de análise para o estudo dos dados obtidos pelas estradas motoniveladas e não motoniveladas**

Os procedimentos para a inferência paramétrica que, neste estudo, limitaram-se às estimativas por intervalo e aos testes de hipóteses, foram precedidos pelos testes de verificação das pressuposições do modelo: teste de Dixon-Grubbs-Neuman (DGN), para dados discrepantes ou *outliers*; teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), para normalidade e teste de Cochran (C), para homogeneidade de variâncias (Anexo A).

Na instalação do experimento a preocupação foi nivelar as estacas para que, apesar das irregularidades do terreno, o desenho formado pelas medições fosse fiel ao desenho real do perfil da estrada no tocante ao formato e a declividade transversal existente dentro do perfil. A declividade transversal pode ser uma característica resultante da técnica de construção e ou manutenção adotada ou, até mesmo, da ausência de qualquer tipo de técnica. Assim, essa declividade pode variar de estrada para estrada e, inclusive, dentro da própria estrada.

Levando-se em consideração a necessidade de nivelar os pares de estacas que compunham cada perfil (como explicado acima), a altura de cada estaca variou de acordo com as características do terreno, o que resultou em alturas iniciais diferentes para cada perfil. Dessa forma, para que a escala de todos os perfis passasse a ser a mesma, ou seja, ter como ponto inicial o zero, a primeira medição, realizada no dia 29 de novembro de 2005, foi tomada como ponto zero para todas as medidas realizadas em cada perfil. Sendo assim, para se obter os valores estudados, ou seja, as alturas de perdas de solo em cada ponto, as medições seguintes (17 de janeiro, 13 de março, 16 de maio, 4 de julho, 5 de setembro e 7 de novembro de 2006) foram subtraídas da primeira.

Um fato a ser ressaltado é que na análise exploratória inicial dos dados não foram detectadas diferenças significativas visíveis por meio de análises gráficas. Para demonstrar, na Figura 7 são apresentados os intervalos de confiança (ao nível de confiança  $1 - \alpha = 0,95$ ) e as médias (ao nível de significância  $\alpha = 0,05$ ) para todas as estradas. Considerando-se que quando os intervalos de confiança não se sobrepõem indicam médias diferentes, as estradas 2 e 3, por exemplo, apresentaram perdas médias diferentes de todas as outras e, além disso, diferiram entre si. A estrada 5 também se destaca ao demonstrar uma perda média diferente das estradas 2 e 6. Essas constatações motivaram o estudo mais detalhado das respostas iniciais, revelando assim que as declividades transversais, ou seja, a declividade dentro dos perfis, mascarava os resultados obtidos. Como alternativa para minimizar tal problema, optou-se em dividir cada perfil em três partes (Figura 8) com o mesmo número de observações, tomando-se para a análise a altura média de solo perdido, em cm, em cada terço. Dessa forma, o conjunto total de 9.674 respostas obtidas experimentalmente resultou em 720 médias (3 terços x 6 datas x 40 perfis).

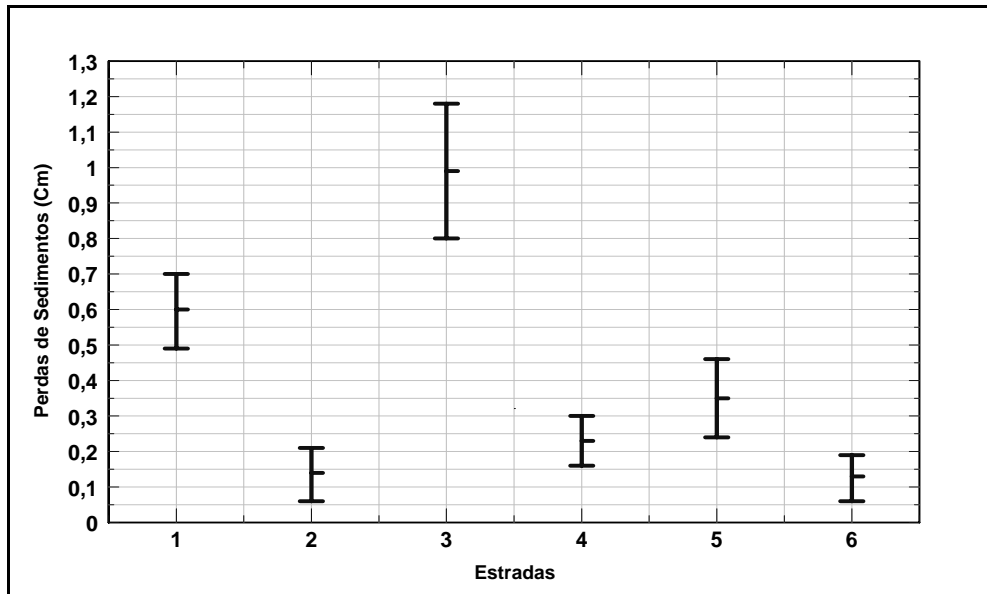


Figura 7 – Intervalo de confiança e média, ao nível de confiança de 95%, para a perda de sedimento, em cm, em cada estrada estudada

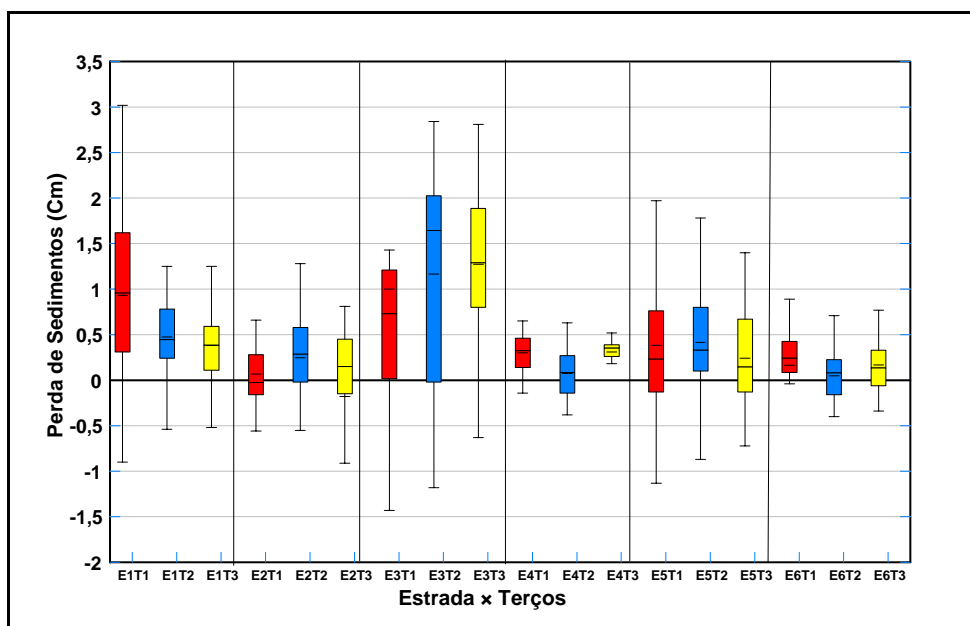


Figura 8 – Divisão das estradas em terços e a distribuição dos valores encontrados em cada terço



Com relação aos valores de precipitação utilizados para a análise, num primeiro momento foi cogitada a possibilidade de se utilizar o valor máximo diário obtido entre os períodos de coleta. Contudo, por meio de uma análise mais apurada da Tabela 4, os valores de precipitação média diária (mm) foram considerados mais apropriados. O terceiro período, por exemplo, possui o maior valor de precipitação máxima diária (46,5 mm) e uma média diária de 2,4 mm. Já o segundo período, possui o segundo maior valor de precipitação máxima diária (46,1 mm) e o maior valor de precipitação média (5,5 mm). Isso acontece porque a precipitação total no segundo período (304 mm) foi mais do que o dobro da precipitação total do terceiro período (151 mm). Assim, dentre os diferentes valores de precipitação (acumulado, máximo e médio) obtidos para cada período, optou-se em se utilizar o valor médio diário de precipitação por melhor caracterizar o comportamento da precipitação nos períodos.

A análise dos dados assim obtidos foi realizada contemplando dois aspectos: o estudo de cada estrada, individualmente, e o estudo das seis estradas como um todo.

### 3.5.3 Análise das estradas individualmente

Para analisar cada estrada individualmente, adotou-se o modelo linear com esquema fatorial (eq. 3). É importante notar que a declividade utilizada no modelo linear não é a declividade transversal do perfil e sim a declividade entre perfis, ou seja, a declividade do trecho formado por 2 perfis.

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_k + \beta\delta_{jk} + e_{ijk} \quad (3)$$

Onde:

$y_{ijk}$  = resposta observada no terço  $i$ , da declividade  $j$  e da precipitação  $k$ ;

$\mu$  = constante do modelo;

$\alpha_i$  = efeito do terço  $i$ ;

$\beta_j$  = efeito da declividade  $j$ ;

$\delta_k$  = efeito da precipitação k;

$\beta\delta_{jk}$  = efeito da interação entre a declividade j e a precipitação k;

$e_{ijk}$  = erro aleatório inerente à resposta  $y_{ijk}$ , atendendo às pressuposições de normalidade e de homogeneidade de variâncias.

A decomposição dos graus de liberdade, em cada estrada, está descrita na Tabela 6.

Tabela 6 – Decomposição dos graus de liberdade em cada estrada

<b>Variações consideradas</b>	<b>Graus de Liberdade</b>
Terços	2
Declividade (D)	d – 1
Precipitação (P)	5
D x P	5(d – 1)
Resíduo	12d – 2
<b>Total</b>	<b>18d – 1</b>

Sempre que a interação declividade versus precipitação não foi significativa, utilizou-se o teste de Dunett para comparar os níveis de declividades e de precipitação com seus respectivos níveis iniciais.

### 3.5.4 Análise das estradas em conjunto

Para o estudo das seis estradas em conjunto, dado que os perfis verificados em cada estrada são diferentes entre si, adotou-se o modelo linear com esquema hierárquico (eq. 4).

$$y_{ijklm} = \mu + \alpha_i + \delta_k + \tau_i + \beta(\gamma)_{jm} + e_{ijklm} \quad (4)$$

Onde:

$y_{ijklm}$  = resposta observada no terço i, da precipitação k, do tratamento l, da declividade j, dentro da estrada m;

$\mu$  = constante do modelo;

$\alpha_i$  = efeito do terço i;

$\delta_k$  = efeito da precipitação k;

$\tau_l$  = efeito do tratamento l;

$\beta(\gamma)_{jm}$  = efeito hierarquizado da declividade j dentro da estrada m;

$e_{ijklm}$  = erro aleatório inerente à resposta  $y_{ijklm}$  atendendo às pressuposições de normalidade e de homogeneidade de variâncias.

Para as comparações múltiplas adotou-se o teste de Dunnett, que utiliza contrastes não ortogonais e compara as médias obtidas sempre com a média de menor valor. No caso da declividade, foi tomada como referência a declividade de 0,0% dentro de cada estrada. Essa declividade seria aquela atribuída ao perfil 1, uma vez que, como a estrada inicia-se neste perfil, parte-se do princípio que não há trechos anteriores para fornecer influência. Assim, todo perfil 1 das 6 estradas teve como influência uma declividade de 0,0%. Para o perfil seguinte, foi adotada a declividade do trecho anterior ou seja, para o perfil 2, em cada estrada, a declividade foi aquela existente entre o perfil 1 e o perfil 2; para o perfil 3, foi a declividade existente entre o perfil 2 e o perfil 3 e assim sucessivamente.

Com relação aos valores de precipitação utilizados para o teste de Dunnett, estes foram obtidos por meio da média diária da precipitação (mm) medida entre uma coleta e outra.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Características de solo e de declividade

As estradas 1, 2, 4 e 5 estão locadas sob Latossolo Vermelho e as estradas 3 e 6 sob Latossolo Vermelho Amarelo (Figura 2). Uma das principais diferenças entre esses dois tipos de solo deveria ser a maior concentração de argila esperada para o Latossolo Vermelho. Na análise realizada, apenas as estradas 1 e 5, na profundidade de 0 a 5, possuem maior teor argila do que as estradas 5 e 6 (Figura 9A). Nas profundidades de 5 a 10 cm (Figura 9B) e de 10 a 20 cm (Figura 9C), as estradas 1, 4 e 5 apresentaram esta característica se comparadas às estradas 5 e 6. Este resultado pode estar relacionado com as modificações que a superfície do solo das estradas sofreu ao longo do tempo, principalmente devido à remoção das camadas superficiais, que conferiu às estradas um perfil encaixado.

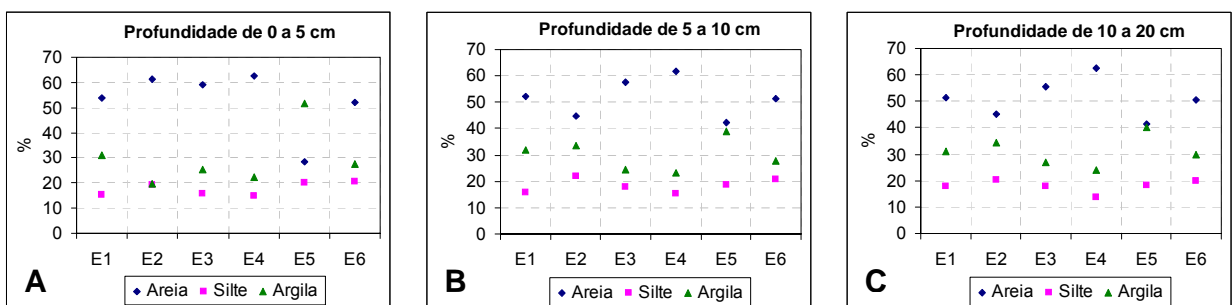


Figura 9 – Proporção entre areia, silte e argila nas classes de profundidade de 0 a 5 cm (A), de 5 a 10 cm (B) e 10 a 20 cm (C) nas estradas

Assim, a análise granulométrica foi realizada nas estradas para identificar as diferentes proporções entre areia, silte e argila, pois estes materiais possuem características que podem influenciar diferentemente as condições físicas das estradas. A argila, por exemplo, possui característica ligante, o que a torna um material fundamental para estradas de terra, enquanto que o silte possui características técnicas pouco satisfatórias que podem ocasionar problemas como baixa capacidade de suporte, formação de atoleiros, excesso de pó, entre outros (SANTOS et al. 1985).

Com relação à declividade (Tabela 3) é possível verificar que todas as estradas estão dentro dos padrões recomendados para estradas secundárias (Tabela 1), ou seja, todas as estradas em estudo possuem declividade menor do que 12%. Na Tabela 7, encontram-se os valores das declividades calculadas para todos os trechos que compõem cada estrada. Individualmente, nota-se que existem trechos com declividades igual ou acima de 12%, como os dois últimos trechos da estrada 1 e da estrada 3.

Tabela 7 – Declividade dos trechos que compõem cada estrada

Trechos	Estrada 1	Estrada 2	Estrada 3	Estrada 4	Estrada 5	Estrada 6
	Declividade (%)					
1	3,3	2,3	10,5	3,4	5,6	6,9
2	5,2	2,7	8,9	9,4	6,0	7,2
3	5,1	3,5	11,1	..	6,7	6,8
4	6,7	2,1	13,6	..	8,2	8,5
5	7,7	2,8	15,4	..	9,2	8,8
6	8,9	6,5	..	..	9,3	..
7	12,0	6,6	..	..	..	..
8	15,8	6,0	..	..	..	..

Nota: Sinal convencional utilizado: .. Não se aplica dado numérico (não existe valor)

#### 4.2 Sedimentos deslocados pela motoniveladora

As estradas 1, 2 e 3 foram motoniveladas no dia 29 de novembro. Vale ressaltar que não houve qualquer tipo de orientação ao operador da máquina, ou seja, ele realizou a operação da forma como faz rotineiramente. No total foram estudados 24 trechos divididos da seguinte forma: Estrada 1 com 9 perfis (8 trechos), Estrada 2 com 9 perfis (8 trechos) e Estrada 3 com 6 perfis (5 trechos).

Devido ao fato da motoniveladora raspar a superfície do solo, nota-se um leve rebaixamento do leito da estrada. Como exemplo, na Figura 10 é possível verificar uma mudança no formato inicial do perfil 2 da estrada 1. O espaço existente entre as duas linhas representa a área removida de solo neste perfil.

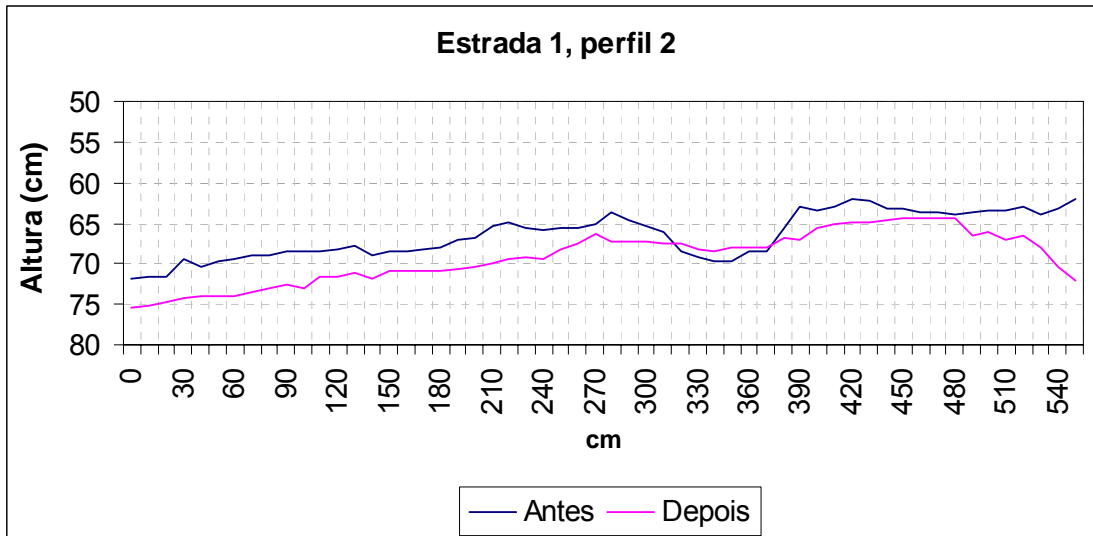


Figura 10 – Alteração do perfil 2 da estrada 1, antes e depois da passagem da motoniveladora

Para o cálculo da quantidade de sedimentos removida pela motoniveladora foram utilizadas as densidades de solo obtidas para cada estrada. As estradas 1 e 4, apresentaram densidade do solo de  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ , as estradas 2 e 5,  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$  e as estradas 3 e 6,  $1,7 \text{ g cm}^{-3}$ . A partir desses valores, a densidade média do solo foi de  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ .

A eq. 2 foi utilizada para calcular a área removida em cada perfil e a eq. 3 para calcular o volume removido entre dois perfis, ou seja, nos trechos. Assim, foi possível chegar à quantidade de sedimento removida pela motoniveladora (em  $\text{t ha}^{-1}$ ) em cada trecho das estradas (Figura 11). O trecho com a menor remoção de sedimentos ( $50,3 \text{ t ha}^{-1}$ ) foi o trecho 5, da estrada 2; o trecho com a maior remoção ( $1129,3 \text{ t ha}^{-1}$ ) foi o trecho 4, da estrada 3.

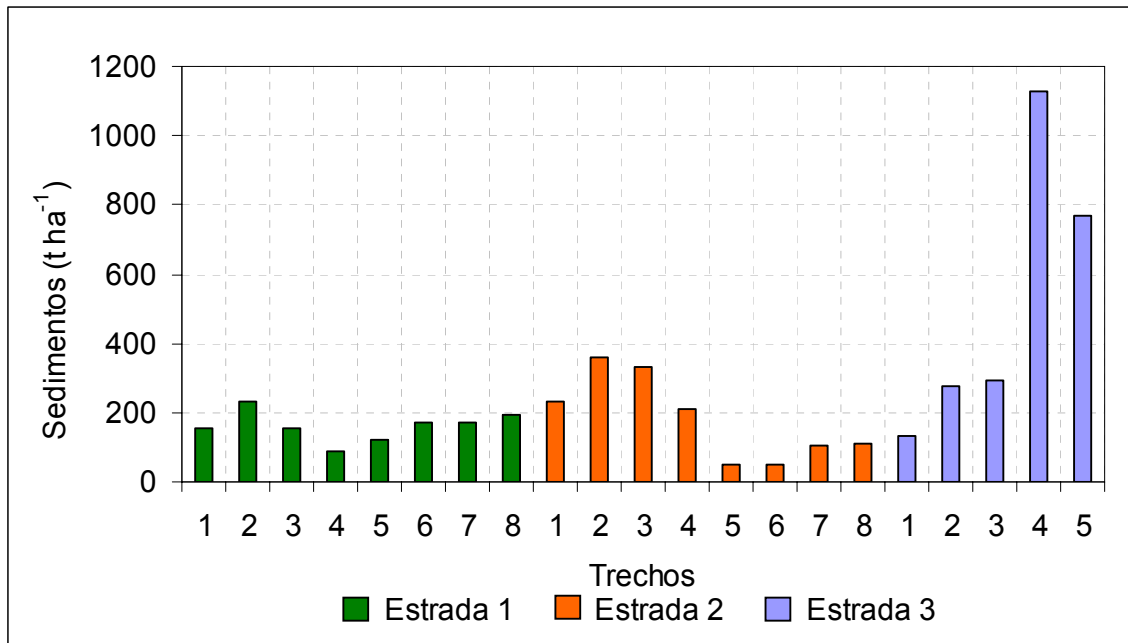


Figura 11 – Remoção de sedimentos ( $t\ ha^{-1}$ ) em cada trecho de cada estrada após a operação de nivelamento com a motoniveladora

Para análise dos resultados, após o teste de Kruskal-Wallis, foi aplicado o teste de Dunn (Tabela 8) para comparações múltiplas, cujos resultados apontaram diferenças significativas com relação à remoção de sedimentos pela motoniveladora (em  $t\ ha^{-1}$ ) entre a estrada 3 e as demais e a não significância entre as estradas 1 e 2.

Tabela 8 – Teste de Kruskal-Wallis, para Análise de variância, e teste de Dunn (para comparações múltiplas) para as Remoções médias de sedimentos ( $t\ ha^{-1}$ ) das estradas motoniveladas (1, 2 e 3)

Estradas	Graus de liberdade	Soma dos postos	Remoções médias de sedimentos ( $t\ ha^{-1}$ ) dos postos*
1	8	74	9,25 a
2	8	76	9,50 a
3	5	81	16,20 b
	21	231	

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si;  $p > 0,05$

A remoção média de sedimentos, levando-se em conta todos os trechos das três estradas, foi de 2,13 cm. Considerando a densidade média do solo de  $1,6\ g\ cm^{-3}$ , a remoção média de sedimentos foi de  $341\ t\ ha^{-1}$ . Vale ressaltar que os valores estão em

t ha<sup>-1</sup> (de estrada) pois esta foi a unidade de medida mais utilizada nos trabalhos encontrados na revisão bibliográfica.

Como exemplo, foi calculada a remoção de sedimentos pela motoniveladora adotando-se como características de uma estrada, a largura de 3,8 m (média das estradas estudadas) e 150 m de comprimento, e utilizando-se a média de remoção de sedimentos acima apresentada. Nessas condições, a motoniveladora removeria 19,4 t de solo. Esse valor é superior aos valores obtidos em trabalhos que estimaram as perdas de solo por hectare em florestas plantadas com diferentes tipos de manejo e também em áreas com cobertura de floresta nativa e pastagem (LIMA, 1988; PIRES, 2004; BRITO, 2004; MARTINS, 2005; WICHERT, 2005). Dessa forma, verifica-se que a perda de solo gerada por 1 ha de floresta plantada foi menor do que aquele gerado pela motoniveladora em uma estrada com essas dimensões (3,8 m de largura e 150 m de comprimento). O valor de sedimento removido pela motoniveladora nessa estrada, com área de 0,057 ha, é superior aos 12,5 t ha<sup>-1</sup> admitido pela FAO (1967) como perda de solo aceitável para 1 ha de floresta plantada.

Como visto, o valor de 341 t ha<sup>-1</sup> parece alto se comparado às taxas de erosão esperadas para os plantios florestais. Da mesma forma, quando comparado aos valores obtidos em trabalhos que buscaram avaliar a influência das estradas florestais na produção de sedimentos, como os desenvolvidos por Antonangelo (2004), Ramos-Scharrón e MacDonald (2005), MacDonald, Sampson e Anderson (2001) e Fredriksen (1970), este valor foi, respectivamente, 2,6, 3,1, 4,6 (considerando o valor máximo encontrado em segmentos de estradas) e 11,1 (considerando o tratamento em microbacias com estradas) vezes maior do que o medido pelos autores. Contudo, ao se comparar aos trabalhos de Beschta (1978) e Heede (1987) este valor foi, respectivamente, 233 e 3831 vezes maior. É notável a existência de uma grande variação de resultados nos trabalhos que estudaram as estradas florestais. Provavelmente essas variações relacionam-se com as diferentes metodologias empregadas, o que demonstra uma necessidade de se estabelecer padrões que sirvam de referência para este tipo de estudo. Por outro lado, mesmo com essa grande



variação, pode-se perceber que a operação de manutenção de estradas utilizando-se a motoniveladora, sem uma estratégia de que técnica deve ser empregada para cada estrada, ou seja, apenas com o conhecimento do operador da máquina, cria um grande potencial de geração de impactos ambientais, devido à quantidade de sedimentos removida.

Apesar da atividade de manutenção de estradas com a motoniveladora alcançar um resultado rápido com relação à modificação dos problemas apresentados pela estrada, esse efeito possui um período curto de duração. Na figura 12, nota-se a estrada antes da passagem da motoniveladora e 343 dias após a atividade. O processo erosivo é visível o que demonstra que a causa do problema não foi solucionada e em breve nova operação será realizada.



Figura 12 – Estrada 2 antes da passagem da motoniveladora (A) e 343 dias após (B)

### **4.3 Produção de sedimentos por estradas motoniveladas e não motoniveladas**

#### **4.3.1 Resultados obtidos individualmente em cada estrada**

A Figura 13 ilustra, por meio do coeficiente de correlação de Pearson, a coerência ( $r = 0,91$ ) entre os valores médios de perda de sedimentos, em cm, obtidos como resposta, e as declividades, em %, das seis estradas consideradas.

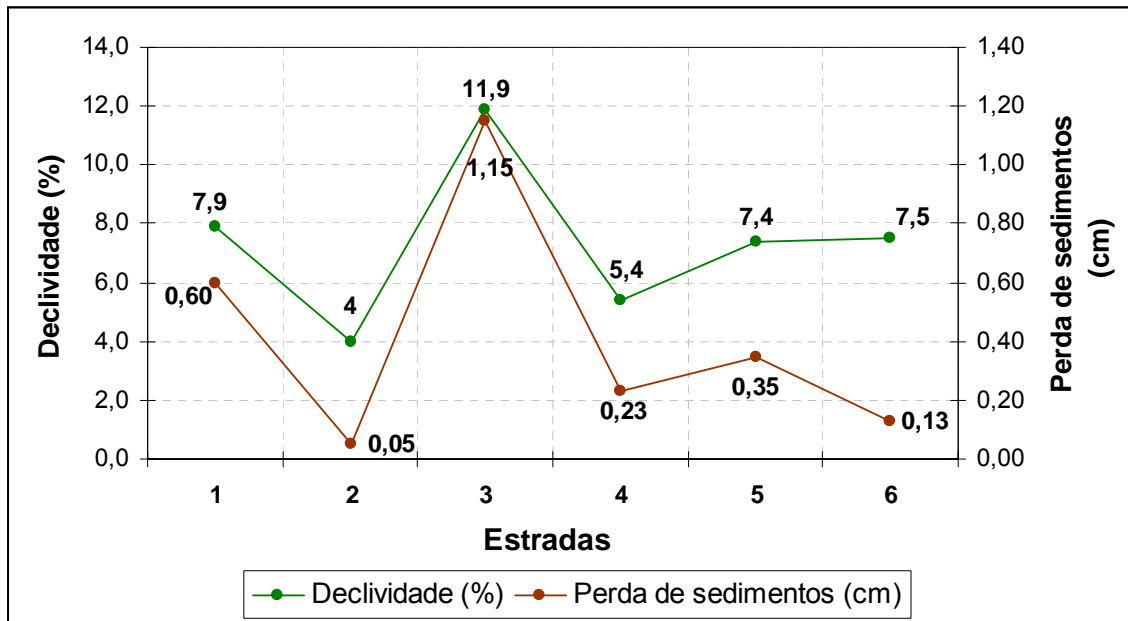


Figura 13 – Declividade (%) e Perda média de sedimentos (cm) em cada uma das seis estradas

Com relação ao fator LS (Tabela 3), a estrada 3 apresentou valor maior que a estrada 1 e esta, maior valor do que a estrada 2. Esta foi a mesma ordem encontrada com relação aos valores médios de perda de sedimentos para cada uma das estradas (Figura 13), ou seja, para as estradas motoniveladas o aumento na perda de sedimentos acompanhou o aumento no valor do fator LS. No caso das estradas não motoniveladas, a estrada 5 apresentou o maior valor de LS e também a maior perda de sedimentos (cm). Contudo, a estrada 6, a qual possui maior valor de LS do que a estrada 4, apresentou a menor perda de sedimentos. Esse resultado somado com o trabalho apresentado por Antonangelo (2004), demonstra que este pode ser um critério importante para a identificação de estradas potencialmente produtoras de sedimentos.

A análise de variância dos dados de cada estrada revelou, conforme observado por meio dos p-valores na Tabela 9, a alta significância dos terços nas estradas 1, 2, 4 e 5, e da declividade nas estradas 1, 2, 3, 4 e 5. Observa-se também que a precipitação foi significativa apenas nas estradas 3 ( $p = 0,0145$ ) e 5 ( $p = <0,0001$ ); e que a interação declividade versus precipitação foi significativa apenas na estrada 5 ( $p = 0,0005$ ) e, na estrada 6, não foram constatados efeitos significativos.

Tabela 9 – Análise de variâncias para cada estrada estudada				
Variações Consideradas	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	F <sub>calculado</sub>	p-valor
<b>Estrada 1</b>				
Terços	2	4,6833	13,86	<0,0001
Declividade	8	1,8571	5,5	<0,0001
Precipitação	5	0,5917	1,75	0,1293
D x P	40	0,1958	0,58	0,9740
Resíduo	106	0,3379		
total	161			
<b>Estrada 2</b>				
Terços	2	2,4628	7,28	0,001
Declividade	8	5,1983	15,37	<0,0001
Precipitação	5	0,3764	1,11	0,3579
D x P	40	0,1764	0,52	0,9893
Resíduo	106	0,3381		
total	161			
<b>Estrada 3</b>				
Terços	2	0,6872	1,77	0,1773
Declividade	5	19,7460	50,96	<0,0001
Precipitação	5	1,1914	3,07	0,0145
D x P	25	0,3066	0,79	0,7392
Resíduo	70	0,3875		
total	107			
<b>Estrada 4</b>				
Terços	2	0,3208	7,25	0,0024
Declividade	2	0,3382	7,64	0,0018
Precipitação	5	0,0253	0,57	0,7214
D x P	10	0,0332	0,75	0,6732
Resíduo	34	0,0443		
total	53			
<b>Estrada 5</b>				
Terços	2	0,3522	4,49	0,0141
Declividade	6	5,4988	70,09	<0,0001
Precipitação	5	0,6081	7,75	<0,0001
D x P	30	0,2001	2,55	0,0005
Resíduo	82	0,0785		
total	125			
<b>Estrada 6</b>				
Terços	2	0,1681	1,35	0,2654
Declividade	5	0,2247	1,81	0,1227
Precipitação	5	0,0796	0,64	0,6700
D x P	25	0,0659	0,53	0,9611
Resíduo	70	0,1243		
total	107			

Nesse contexto, dado que os critérios de comparações múltiplas não devem ser utilizados para comparar níveis de fatores que participem de interação significativa, o teste de Dunnett foi utilizado através do modelo:  $y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \delta_k + \beta\delta_{jk} + e_{ijk}$ , apenas nas estradas 1, 2, 3 e 4. Para a estrada 5, o teste de Dunnett foi utilizado com base em dois modelos sem interação:  $y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ijk}$  e  $y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \delta_k + e_{ijk}$ , de modo a possibilitar o estudo das precipitações dentro de cada declividade e das declividades dentro de cada precipitação, respectivamente. Não foram efetuadas comparações múltiplas na estrada 6.

No ANEXO B são descritos os resultados da análise da relação perda de sedimentos (cm) e declividade (%) para as estradas 1, 2, 3 e 4. Observa-se que foram significativamente diferentes da declividade inicial: na estrada 1, as declividades maiores que 5,1%; nas estradas 2 e 4, todas as declividades e, na estrada 3, todas as declividades, exceto 13,6%. Vale ressaltar que o teste de Dunnett compara os valores médios obtidos de perda de sedimentos em cm para cada perfil, com o perfil que perdeu a menor quantidade média. Dessa forma, no ANEXO B, os valores médios aparecem em ordem crescente. Outro ponto importante é o valor de n igual a 18, obtido da seguinte forma: foram realizadas 6 medições ao longo do ano; a perda de sedimentos foi calculada relacionando sempre a primeira medição com as seguintes, ou seja, a primeira e a segunda, a primeira e a terceira, a primeira e a quarta e assim sucessivamente. Lembrando-se que as estradas foram divididas em 3 terços, logo para cada terço se tem 6 medições, o que explica o n igual a 18.

O ANEXO C apresenta o resultado da análise da relação entre perda média de sedimentos (cm) e as precipitações médias diárias (mm) medidas entre os períodos de coleta de dados para a estrada 3. Verifica-se que essa relação foi altamente significativa para as precipitações de 2,7 e 2,6 mm e, para as demais precipitações, a relação não foi significativa.

Os ANEXOS D e E apresentam os resultados das decomposições efetuadas na estrada 5 para as declividades e as precipitações. Pode-se notar que no ANEXO D

cada precipitação média diária (mm) foi relacionada com as perdas médias de sedimentos (cm) em cada declividade “n” (%) e, no ANEXO E, cada declividade (%) foi relacionada com a perda média de sedimentos (cm) em cada precipitação “n” (mm). Destaca-se mais uma vez que o teste de Dunnett compara sempre o menor valor obtido para a perda de sedimentos (cm) em cada ocasião com os demais. De uma maneira geral, como pode ser visualizado nos resultados apresentados nos ANEXOS D e E, somente em alguns casos, os resultados foram significativos.

#### 4.3.2 Resultados obtidos para as estradas em conjunto

A análise conjunta das estradas, descrita na Tabela 10, permitiu a inclusão dos fatores tratamentos e solos (% de argila de 0 a 5 cm), ambos altamente significativos apresentando  $p < 0,0001$ . De modo geral, guardada a dimensão do novo resíduo, as decomposições de declividade e de precipitações, dentro de estradas, confirmaram as significâncias observadas anteriormente. Ressalta-se aqui que dada a estratégia de análise já comentada, as 9.674 respostas obtidas resultaram em 720 médias (3 terços x 6 datas x 40 perfis).

Tabela 10 – Análise de variância para o modelo hierárquico

Variações Consideradas	Graus de Liberdade	Somas de Quadrados	Quadrados Médios	F Calculado	P Valor
Tratamentos	1	20,2731	20,2731	80,69	<0,0001
Solos	4	64,7356	16,1839	64,41	<0,0001
Declividades/Estrada	34	189,9664	5,5872	22,24	<0,0001
D/E1	8	14,8566	1,8571	7,39	<0,0000
D/E2	8	41,5867	5,1983	20,69	<0,0000
D/E3	5	98,7302	19,7460	78,61	<0,0000
D/E4	2	0,6765	0,3383	1,35	0,2609
D/E5	6	32,9929	5,4988	21,89	<0,0000
D/E6	5	1,1235	0,2247	0,89	0,4842
Precipitações/Estrada	30	14,3622	0,4787	1,91	0,0028
P/E1	5	2,9587	0,5917	2,36	0,0391
P/E2	5	1,8819	0,3764	1,50	0,1882
P/E3	5	5,9571	1,1914	4,74	0,0003
P/E4	5	0,1265	0,0253	0,10	0,9920
P/E5	5	3,0403	0,6081	2,42	0,0345
P/E6	5	0,3978	0,0796	0,32	0,9030
Resíduo	650	163,3089	0,2512		
Total	719	464,2308			

A tabela 11 exibe a média geral das respostas, perdas de sedimentos (em cm), e a respectiva estimativa por intervalo ao nível de confiança de 95%. Observa-se que o intervalo de confiança não contém o valor zero. Em outras palavras, rejeita-se, ao nível de significância de 5%, a hipótese de que a perda média durante o período experimental foi igual a zero.

Tabela 11 – Perda média geral (cm), Desvio Padrão, Erro Padrão e Intervalo de Confiança (95%) para os dados obtidos durante todo o período experimental

Amostra	n	Perda média geral (cm)	Desvio Padrão	Erro Padrão	I C (95%)	
					Limite Inferior	Limite Superior
	720	0,41	0,80	0,03	0,35	0,47

Na tabela 12, verifica-se que os tratamentos diferiram significativamente ( $p < 0,0001$ ) entre si, sendo que a maior perda foi registrada para as estradas que receberam o tratamento 1 (0,53 cm), ou seja, que foram motoniveladas. Ainda na Tabela 12, é possível verificar as estimativas por intervalo de confiança e, na Figura 14, pode-se visualizar a tendência central e a variabilidade dos dados provenientes dos dois tratamentos.

Tabela 12 – Perda média de sedimentos (cm), Desvio Padrão, Erro Padrão e Intervalo de Confiança (95%) por tratamento

Tratamentos	n	Perda média (cm)	Desvio Padrão	Erro Padrão	IC (95 %)	
					Limite Inferior	Limite Superior
1	432	0,53	0,94	0,05	0,44	0,62
2	288	0,24	0,48	0,03	0,19	0,30

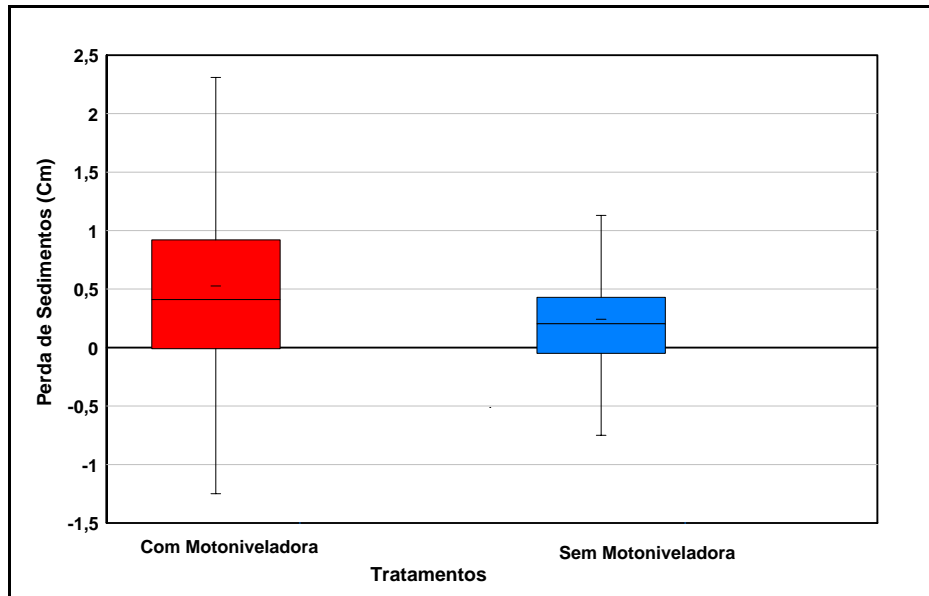


Figura 14 – Tendência central e variabilidade dos tratamentos

Antonangelo (2004) registrou perdas de sedimentos de 0,932 cm, 0,925 cm, 0,623 cm e 0,343 cm, as quais variaram de acordo com o valor da relação entre a declividade e o comprimento de rampa (fator LS), ou seja, quanto maior o valor do LS, maior a perda de sedimentos. Vale ressaltar, que no trabalho conduzido pelo mesmo autor, todas as estradas foram previamente motoniveladas para remover as marcas dos processos erosivos. Assim, as estradas tiveram perdas de sedimentos superiores ao valor de 0,24 cm encontrado para as estradas não motoniveladas (Tabela 12) neste trabalho.

Considerando-se os valores médios de perda de sedimentos (cm) obtidos na Tabela 11 e a densidade média do solo de  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ , a perda de sedimentos nas estradas motoniveladas e não motoniveladas foi, respectivamente,  $84,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e  $38,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Vale lembrar que a remoção média de sedimentos pela motoniveladora foi de  $341 \text{ t ha}^{-1}$  (apresentada no item 4.2) e este valor é quatro vezes maior do que o valor de  $84,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  perdido pelas estradas motoniveladas e oito vezes maior do que o valor de  $8,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  perdido pelas estradas não motoniveladas. Assim, pode-se notar que uma atividade pontual, como o nivelamento,

pode remover de quatro a oito vezes mais sedimentos do que as estradas perdem em quase um ano.

Os valores de  $84,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para estradas motoniveladas e  $38,4 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  para estradas não motoniveladas possuem a mesma ordem de grandeza daqueles obtidos por Ramos-Scharrón e MacDonald (2005), para estradas motoniveladas ( $110 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) e não motoniveladas ( $64 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ), com 10 % de declividade, e também daquele obtido por Antonangelo (2004) que foi de  $130 \text{ t ha}^{-1}$ , lembrando-se que esta unidade de medida refere-se a  $\text{t ha}^{-1}$  de estrada e não  $\text{t ha}^{-1}$  de plantio florestal.

Por outro lado, verificou-se que os trabalhos desenvolvidos por Corrêa (2005) e Oliveira (2006) apresentaram resultados diferentes em termos de grandeza de valores. Corrêa (2005) mensurou perdas de sedimentos na ordem de  $10,71 \text{ t km}^{-1}$  e  $3,98 \text{ t km}^{-1}$ , pois se tratavam de dois lugares diferentes, e Oliveira (2006) mensurou perdas  $1058 \text{ t km}^{-1}$ , em estradas com mais de 12% de declividade, e de  $432 \text{ t km}^{-1}$ , em estradas com declividade entre 0 e 4 %. Os altos valores encontrados por este último autor provavelmente se devem ao fato do método utilizado em seu trabalho contabilizar a perda de sedimento por meio do formato apresentado pela estrada, ou seja, contabilizando o sedimento retirado até aquele momento para que a estrada apresentasse seu formato atual. Dessa forma, pode-se relacionar o valor encontrado com a idade total da estrada e não com a perda de sedimento anual. Já o trabalho de Corrêa (2005) foi conduzido em um período experimental de um ano, podendo o valor encontrado ser considerado como a perda de sedimentos anual.

Assim, pode-se verificar que os diferentes métodos empregados no estudo da produção de sedimentos pelas estradas florestais dificultam a comparação entre os trabalhos, porém conseguem demonstrar que os valores dessas perdas devem ser considerados no cálculo geral da perda de sedimento em florestas plantadas.

Com relação às características do solo, na Tabela 10 os resultados indicaram significância da porcentagem de argila no resultado. Assim foi aplicado o teste de



Dunnett, comparando-se todas as porcentagens de argilas (de 0 a 5 cm) com a menor porcentagem (19% na estrada 2). As porcentagens associadas a resultados significativos foram : 51% na estrada 5 , 31% na estrada 1 e 26% na estrada 3. Tais resultados podem ser observados na Tabela 13, onde se verifica que as médias significativamente diferentes correspondem a intervalos que não se sobrepõem. Além disso, a única estimativa por intervalo que contém o ponto zero é a obtida para a estrada 2, indicando que a perda média para essa estrada não foi significativamente diferente de zero.

Tabela 13 – Perda média de sedimentos (cm), Desvio Padrão, Erro Padrão e Intervalo de Confiança (95%) segundo as porcentagens de argila (de 0 a 5 cm)

Estrada	Argila (%) de 0 a 5 cm	n	Perda Média (cm)	Desvio Padrão	Erro Padrão	I C (95%)	
						Limite Inferior	Limite Superior
2	19	162	0,04	0,75	0,06	-0,07	0,16
4	22	54	0,23	0,25	0,03	0,16	0,30
3	26	108	1,15	1,15	0,11	0,93	1,36
6	28	108	0,13	0,34	0,03	0,06	0,19
1	31	162	0,60	0,66	0,05	0,49	0,70
5	51	126	0,35	0,63	0,06	0,24	0,46

De um modo geral, os resultados obtidos neste trabalho demonstraram que a porcentagem de argila na camada de 0 a 5 cm, a declividade, a precipitação e a operação de nivelamento com a motoniveladora, influenciaram na perda de sedimentos pelas estradas florestais. Os valores mensurados, tanto da remoção de sedimentos pela motoniveladora, quanto da produção de sedimentos por estradas motoniveladas e não motoniveladas reforçam a recomendação de Lugo e Gucinski (2000) de que as atividades em estradas florestais não são apenas atividades técnicas mas sim ações ecológicas que possuem potencial de influenciar a paisagem e, portanto devem ser minuciosamente planejadas.

Quando a questão ecológica, ou melhor, a questão ambiental começou a ser incorporada ao manejo florestal, surgiram demandas por tecnologias que diminuíssem os impactos advindos das operações florestais. Assim, foram sendo desenvolvidas técnicas de preparo de solo e colheita, por exemplo, próprias para diferentes tipos de

solo e relevo, as quais proporcionaram ganhos ambientais à medida que diminuíram principalmente a perda de solo e o grau de compactação (GAVA, 2002; SILVA et al., 2002; STAPE et al., 2002; SEIXAS, 2002). Muitas empresas do setor florestal já assumiram o compromisso de produzir levando em consideração a necessidade de perpetuar os recursos naturais e assim, foram incorporando gradativamente essas novas tecnologias em seu plano de manejo.

Vale ressaltar porém, que com relação às estradas florestais, ainda falta a implementação efetiva das técnicas reconhecidamente adequadas de construção e de manutenção, como por exemplo, aquelas apresentadas no trabalho de Baesso e Gonçalves (2003). O baixo investimento na qualidade da construção das estradas conseqüentemente resulta em manutenções mais freqüentes, gerando assim um maior potencial das estradas em produzir sedimentos.

Outro ponto a ser ressaltado refere-se aos valores de perda de sedimentos apresentados para as florestas plantadas. Normalmente, esses valores são mensurados dentro da floresta, ou seja, na parte interna dos talhões, sem levar em consideração no cálculo da erosão a presença das estradas florestais. Uma vez que obviamente não existem empreendimentos florestais sem estradas, ou seja, estradas são elementos essenciais para viabilizar a existência dos plantios florestais, as perdas de sedimentos relativas às estradas deveriam ser incorporadas quando são apresentados valores de erosão causados pelos plantios florestais. Somente assim, será possível obter uma real estimativa da quantidade de sedimentos produzida pelo manejo florestal como um todo.

Devido a essa ligação de dependência entre as florestas plantadas e as estradas, um fator chave para a redução da produção de sedimentos, além da adoção das técnicas adequadas de construção e de manutenção, seria a diminuição da densidade das estradas florestais. Quanto menor a densidade de estradas, menor é a área vulnerável aos processos erosivos e para operações de manutenção, como o nivelamento; além disso, quanto melhor a técnica de construção, menor é a

necessidade de manutenção. Efetivamente, são duas importantes medidas para se combater as causas do problema da erosão.

Em áreas florestais cujo sistema viário foi concebido na forma ortogonal, não é difícil encontrar estradas, principalmente secundárias em desnível, locadas de forma a potencializar a erosão. O desenvolvimento de critérios para identificação de estradas com maior potencial erosivo poderia facilitar o processo de diminuição da densidade de estradas. Antonangelo (2004) iniciou esse processo estudando a aplicação do fator topográfico LS como critério. Outros trabalhos ainda não publicados caminham nessa mesma direção.

O processo de melhoria do sistema de estradas florestais deverá ser gradativo, porém essencial para que as florestas plantadas consigam atingir os objetivos mínimos do manejo florestal sustentável.

## 5 CONCLUSÃO

As estradas florestais tornam-se a principal fonte geradora de sedimentos em plantios florestais quando a motoniveladora é utilizada na operação de nivelamento sem a adoção de técnicas adequadas. Em um primeiro momento, a remoção da camada superficial do leito da estrada e sua deposição ao longo das laterais das estradas tornam esse material vulnerável à ação da precipitação. Em um segundo momento, a atividade de nivelamento desestrutura a camada superficial do solo, potencializando a produção de sedimentos ao longo do tempo.

O fato da utilização da motoniveladora e da declividade influenciar na produção de sedimentos tanto quanto a precipitação e a porcentagem de argila demonstra que a chave para reduzir a erosão deve estar na adoção no plano de manejo florestal de técnicas adequadas de construção e de manutenção de estradas.

Existem diferentes métodos sendo empregados no estudo da produção de sedimentos por estradas florestais, o que torna mais difícil a comparação entre os trabalhos. Por outro lado, todos os trabalhos demonstram o potencial das estradas em produzir sedimentos, ressaltando assim, a necessidade da utilização desses valores no cálculo da produção de sedimentos por florestas plantadas. Quando se considera apenas o valor de sedimento perdido pela área de efetivo plantio (a floresta em si), pode-se estar subestimando o valor real, devido à grandeza dos valores de perda de sedimentos encontrada para as estradas florestais e devido à área que elas ocupam dentro da área total de manejo.

## REFERÊNCIAS

- ANTONANGELO, A. **Avaliação do sistema de informações geográficas grass para predição dos riscos de erosão em estradas de uso florestal**. 2004. 100 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2004.
- BAESSO, D. P.; GONÇALVES, F. L. R. **Estradas Rurais: técnicas adequadas de manutenção**. Florianópolis – SC, DER (Departamento Estadual de Infra-Estrutura), 2003. 236 p.
- BECKER, G. Optimization of road network and transport systems: a pre-condition for an improved organization and design of labour in forestry. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 8., 1994, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR/FUPEF, 1994, p.111-115.
- BESCHTA, R.L. Long-term patterns of sediment production following road construction and logging in the Oregon Coast Range. **Water Resources Research**, Washington, v.14, n. 06, p. 1011-1016, Dec. 1978.
- BLINN, C. R.; KILGORE, M. A. Riparian Management practices: a summary of state guidelines. **Journal of Forestry**, Washington, v. 99, n. 8, p.11-7, Aug. 2001.
- BRASSIOLO, M. M. **Avaliação da regeneração natural de Pinus elliottii var. elliottii na floresta nacional de Capão Bonito, SP**. 1988. 127p. Tese (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.
- BRITO, L.F. **Erosão hídrica de latossolo vermelho distrófico típico em área de pós-plantio de eucalipto na região de Guanhães (MG)**. 2004. 78p. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.
- BRUJINZEEL, L. A. Hydrology of forest plantations in the tropics. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. (Ed). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Camberra, ACIAR, 1997, chap. 5, p.125-168.
- CÂMARA, C. D. **Critérios e indicadores para o monitoramento hidrológico de florestas plantadas**. 2004. 170p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.
- CARLING, P. A.; IRVINE, B. J.; HILL, A.; WOOD, M. Reducing sediment inputs to Scottish streams: a review of the efficacy of soil conservation practices in upland Forestry. **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 265, p. 209-227, Mar. 2001.

COE, D. **The Hydrologic Impacts of Roads at Varying Spatial and Temporal Scales: A Review of Published Literature as of April 2004.** Washington State Department of natural Resources. Disponível em:

<<http://www.dnr.wa.gov/forestpractices/adaptivemanagement/cmer/finalreport1-4-05.pdf>> Acesso em: 05 jul. 2006.

CORNISH, P. M. The effects of roading, harvesting and forest regeneration on streamwater turbidity levels in a moist eucalypt forest. **Forest ecology and Management**, Amsterdam, v. 152, p. 293-312, Sept. 2001.

CORRÊA, C.M.C. **Perdas de solo e a qualidade da água procedente de estrada de uso florestal no Planalto Catarinense.** 2005. 155p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

DIETZ, P. Parâmetros da rede viária e sua otimização. In: DIETZ, P.; GRAMMEL, R.; MALINOVSKI, J. R. (Ed). In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 4., 1983a, Curitiba. **Resumos...**, Curitiba: UFPR, 1983a, p.22-35.

DIETZ, P. Utilização e conservação de estradas florestais. In: DIETZ, P.; GRAMMEL, R.; MALINOVSKI, J. R. (Ed). In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO SOBRE SISTEMAS DE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 4., 1983a, Curitiba. **Resumos...**, Curitiba: UFPR, 1983b, p. 141-147.

ELLIOT, W. J.; HALL, D. E.; GRAVES, S. R. Predicting sedimentation from forest roads. **Journal of Forestry**, Washington, v. 97, n. 8, p. 23-9, Aug. 1999.

ELLIOT, W. J.; DUMROESE, D. P.; ROBICHAUD, P. R. The effects of forest management on erosion and soil productivity. In: SYMPOSIUM ON SOIL QUALITY AND EROSION INTERACTION, 1996, Keystone. **Proceedings...**, Keystone: Soil and Water Conservation Society, 1999. Disponível em: <<http://forest.moscowfsl.wsu.edu/cgi-bin/engr/library/searchpub.pl?pub=1999c>>. Acesso em: 2 jun. 2006.

FAO. **La erosion del suelo por el agua:** algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. Roma, 1967. 207 p.

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

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.

FREDRIKSEN, R. L. **Erosion and sedimentation following road construction and timber harvest on unstable soils in three small western Oregon watersheds.** Portland, Oregon: USDA, Forest Service. 1970, p. 1-15. (USDA Forest Service Research Paper PNW-104).

FSC. **Os 10 princípios e critérios**. Conselho Brasileiro de Manejo Florestal (FSC – Brasil). Disponível em: <  
<http://www.fsc.org.br/index.cfm?fuseaction=conteudo&IDsecao=172>>. Acesso em: 20 dez. 2006.

GAVA, J. L. Cultivo mínimo de solos com textura arenosa e média em áreas planas e suave-onduladas. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. cap. 5, p. 221-244.

GARCIA, A. R.; MACHADO, C. C.; SILVA, E.; SOUZA, A. P.; PEREIRA, R. S. Volume de enxurrada e perda de solo em estradas florestais em condições de chuva natural. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 1-13, Jul./Ago. 2003.

GONÇALVES, J. L. M. Conservação do solo. In. GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L. (Ed). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. cap. 2, p. 47-129.

GRACE III, J. M. Forest road sideslopes and soil conservation techniques. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 55, p. 1-9, 2000.

GUCINSKI, H.; FURNISS, M. J; ZIEMER, R. R.; BROOKS, M. H. **Forest Roads: A Synthesis of Scientific Information**. Portland, Oregon: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, May 2001. 103 p. (General Technical Report PNW-GTR-509).

HEEDE, B. H. Overland flow and sediment delivery five years after timber harvest in a mixed conifer forest, Arizona, U.S.A. **Journal of Hydrology**, The Netherlands, v. 91, p.205-216, 1987.

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

ILHARDT, B. L.; VERRY, E. S.; PALIK, B. J. Defining riparian áreas. In: VERRY E. S.; HORNBECK, J. W.; DOLLOFF, A. (Ed). **Riparian management in forests of the Continental Eastern United States**. London: Lewis publishers, 2000. p.23-42.

INSTITUTO FORESTAL. **Manual de caminos forestales**. Chile, 1971. 191 p. (Manual, 8).

JONES, J. A.; SWANSON, F. J.; WEMPLE, B. C.; SYNDER, K. U. Effects of Road on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks. **Conservation Biology**, Cambridge, v. 14, p. 76–85, 2000.

LIKENS, G. E. An experimental approach for the study of ecosystems: the fifth Tansley lecture. **The Journal of Ecology**, Oxford, v. 73, n. 2, p. 381-396, jul. 1985.

- LIMA, W. P.; Escoamento superficial, perdas de solo e de nutriente em microparcelas reflorestadas com eucalipto em solos arenosos no município de São Simão, SP. **IPEF**, Piracicaba, n.38, p. 5-16, abr.1988.
- LIMA, W.P. **O impacto ambiental do eucalipto**. São Paulo: EDUSP, 1993. 301p.
- LIMA, W. P. Gerenciamento da qualidade ambiental: o papel do manejo de microbacias. In: SIMPÓSIO IPEF, 6., 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo, Abr. 1996. v.1, p. 31-39.
- LIMA, W. P. A microbacia e o desenvolvimento sustentável. **Ação Ambiental**, Viçosa, v.1, n. 3, p. 20-22, dez.1998.
- LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Indicadores hidrológicos em áreas florestais. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 12, n. 31, p. 53-64, abr.1998.
- LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. saúde ambiental da microbacia. In: \_\_\_\_\_ **As florestas plantadas e a água**: implementando o conceito de microbacia hidrográfica como unidade de planejamento. São Carlos: RiMA, 2006. cap. 5, p. 61-76.
- LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B.; CÂMARA, C. D. Implicações da colheita florestal e do preparo do solo na erosão e assoreamento de bacias hidrográficas. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. cap. 11, p. 373-391.
- 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.
- LUCE, C. H.; WEMPLE, B. C. Introduction to special issue on hydrologic and geomorphic effects of forest roads. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v.26, p. 111-113, 2001.
- LUGO, A. E.; GUCINSKI, H. Function, effects, and management of forest roads. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 133, p. 249-262, 2000.
- MacDONALD, L. H.; SAMPSON, R. W.; ANDERSON, D. M. Runoff and road erosion at the plot and road segment scales, St. John, US Virgin Islands. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 26, p. 251-272, 2001.
- MACHADO, C.C.; MALINOVSKI, J.R. A planificação da rede rodoviária em reflorestamentos. In: SIMPÓSIO SOBRE EXPLORAÇÃO, TRANSPORTE, ERGONOMIA E SEGURANÇA EM REFLORESTAMENTOS, 1987., Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR/IUFRO, 1987. p.1-13.
- MACHADO, C. C.; SANTOS, S. L. M. A rede viária florestal. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba, **Anais...** São Paulo: SBS/SBEF, 1993. v.3, p. 332-336.



MACHADO, C. C.; GARCIA, A. R.; SILVA, E.; FONTES, A. M. Comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo WEPP (water erosion prediction project) modificado em relação a medições experimentais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.3, p. 295-300, 2003.

MADEJ, M. A. Erosion and sediment delivery following removal of forest roads. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 26, p.175–190, 2001.

MARTINS, S. G. **Erosão hídrica em povoamento de eucalipto sobre solos coesos nos Tabuleiros Costeiros, ES**. 2005. 117p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2005.

NAKAMURA, F.; SWANSON, F. J.; WONDZELL, S. M. Disturbance regimes of stream and riparian systems – a disturbance-cascade perspective. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 14, p. 2849-2860, 2000.

NEARY, D. G.; HORNBECK, J. W. Impacts of harvesting and associated practices on off-site environmental quality. In: DYCK, W. J.; COLE, D. W.; COMERFORD, N. B. (Ed.). **Impacts of forest harvesting on long-term site productivity**. London: Chapman & Hall, 1994. p.81-118.

NILL, D.; SCHWERTMANN, U.; SABEL-KOSCHELLA, U.; BERNARD, M.; BREUER, J. **Soil Erosion by Water in Africa: Principles, Prediction and Protection**. Deutsche Gesellschaft fur technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Germany, 1996. 292 p.

OLIVEIRA, F. P. **Erosão hídrica em áreas florestais no Vale do Rio Doce, Região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais**. 2006. 105 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2006.

PACKER, P. E.; HAUPT, H. F. The influence of roads on water quality characteristics. **Society of American Foresters**, Detroit, v.63, n.3, p. 111-114, 1965.

PEREIRA NETO, S. D. **Análise econômica da densidade de estradas nas áreas de produção de Eucalyptus**. 1995. 133 p. Tese (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1995.

PIRES, L.S. **Sistemas de manejo de eucalipto e erosão hídrica em latossolo vermelho amarelo muito argilosa na região de Belo Oriente (MG)**. 2004. 84p. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; MacDONALD, L.H. Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St John, US Virgin Islands. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 30, p. 1283–1304, 2005.

REID, L. M.; ZIEMER, R. R.; FURNISS, M. J. F. 4. **What do we need to know about roads?** Issues in watershed analysis. Discussions at interdisciplinary and interagency workshops held at the Humboldt Interagency Watershed Analysis Center in McKinleyville, California. 1994. Disponível em: <<http://www.fs.fed.us/psw/publications/reid/4Roads.htm>>. Acesso em: 2 jun. 2005.

RIZZO, L.T. B. **Levantamento pedológico semidetalhado no distrito de Capão Bonito e regionais Boa Esperança, Santa Inês, Santa Helena e Santa Fé.** São Paulo: LRM-Projetos e Consultoria Agro Ambiental, 2001, 1v.

ROBINSON, A. R. Relationship between soil erosion and sediment delivery. In: EROSION AND SOLID MATTER TRANSPORT IN INLAND WATER SYMPOSIUM. 1977, Paris. **Proceedings...** Paris: International Association of Hydrological Sciences Publication, Jul. 1997. n. 122, p. 159-167.

SANTOS, A. R.; PASTORE, E. L.; AUGUSTO, F.; CUNHA, M. A. **Estradas vicinais de terra:** manual técnico para conservação e recuperação. São Paulo: IPT, 1985. 140p.

SEFFRIN, I. A.; WADOUSKI, L. H.; BORGES, J. F.; TIBURCIO, V. S. Rede viária na Companhia Florestal Monte Dourado: situação atual e perspectivas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE EXPLORAÇÃO E TRANSPORTE FLORESTAL, 1., 1991, Belo Horizonte. **Anais...**, Viçosa: SIF/UFV, 1991. p. 79-93.

SEIXAS, F. Efeitos físicos da colheita mecanizada de madeira sobre o solo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais.** Piracicaba: IPEF, 2002. cap. 9, p. 313-350.

SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. R.; MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; ALFONSI, R. R.; CARAMORI, P. H.; SWARTS, S. **Balancos hídricos de 500 localidades brasileiras** (1999). Núcleo de Monitoramento agroclimático, Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP: Disponível em <<http://www.lce.esalq.usp.br/nurma.html>>. Acesso em: 10 ago. 2006.

SILVA, A. M.; SCHULZ, H. E.; CAMARGO, P. B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas.** São Carlos: RiMa, 2004. 140 p.

SILVA, A. P. **Parte II:** Física e conservação do solo. Piracicaba: Departamento de solos e nutrição de plantas, 2000. 44p.

SILVA, C. R.; CAMARGO, F. R. A.; JACOB, W. S.; IJIMA, J. Preparo de solo em áreas acidentadas do Vale do Paraíba do Sul – SP. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais.** Piracicaba: IPEF, 2002. cap. 6, p. 245-258.

STAPE, J. L.; ANDRADE, S.; GOMES, A. N.; KREJCI, L. C.; RIBEIRO, J. A. Definição de métodos de preparo de solo para silvicultura em solos coesos do litoral norte da Bahia. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. cap. 7, p. 259-296.

SWIFT, L. W.; BURNS, R. G. The three Rs of roads: redesign, reconstruction, restoration. **Journal of Forestry**, Washington, v. 97, n. 8, p. 40-44, Ago.1999.

VERSFELD, D. B. Overland flow on small plots at the jonkershoek forestry research station. **South African Forestry Journal**, Pretoria, n. 119, p. 35-40, Nov.1981.

WALLING, D. E. The sediment delivery problem. **Journal of Hydrology**, The Netherlands, v. 65, p. 209-237, 1983.

WEMPLE, B. C, SWANSON, J. F.; JONES, J. A. Forest roads and geomorphic process interactions, Cascade Range, Oregon. **Earth Surface Processes and Landforms**, Chichester, v. 26, p.191–204, 2001.

WICHERT, M. C. P. **Erosão hídrica e desenvolvimento inicial do *Eucalyptus grandis* em um argissolo vermelho-amarelo submetido a diferentes métodos de preparo de solo no Vale do Paraíba, SP**. 2005. 83p.Tese (Mestrado em Silvicultura e manejo Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting Rainfall Losses: A Guide to Conservation Planning**. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1978. 58p. (Agricultural Handbook, n. 537.).

**ANEXOS**

ANEXO A – Testes de Dixon-Grubbs-Neuman (DGN), de Kolmogorov-Smirnov (KS) e de Cochran (C) para verificação das pressuposições do modelo

Estradas	p-valor				DGN
	KS	C		DGN	
		Declividade	Precipitação		
1	0,17	0,03	0,09	0,45	
2	0,11	0,07	0,11	0,09	
3	0,09	0,08	0,2	0,55	
4	0,09	0,04	0,09	0,11	
5	0,04	0,14	0,27	0,21	
6	0,06	0,12	0,15	0,07	

A aplicação dos testes de Dixon-Grubbs-Neuman (DGN), de Kolmogorov-Smirnov (KS) e de Cochran (C), conforme esperado para dados dessa natureza, não detectou problemas relevantes com relação às pressuposições do modelo. Pode-se notar a existência de dois p-valores iguais a 0,04, para o teste KS para normalidade na estrada 5 e C para a declividade na estrada 4, e um p-valor igual a 0,03, no teste C para declividade na estrada 1. Contudo, essas três ocorrências foram consideradas irrelevantes, frente ao conjunto total de 9.674 respostas obtidas experimentalmente. Não foram registrados valores *outliers*.

## ANEXO B - Teste de Dunnett para declividade (%) nas estradas 1, 2, 3 e 4

<b>Perfil</b>	<b>Declividade (%)</b>	<b>n</b>	<b>Perda média (cm)</b>	<b>Significância</b>
<b>Estrada 1</b>				
1	0,0	18	0,04	-
2	3,3	18	0,28	ns
3	5,2	18	0,39	ns
4	5,1	18	0,45	ns
5	6,7	18	0,66	*
6	7,7	18	0,83	**
8	12	18	0,87	**
7	8,9	18	0,91	**
9	15,8	18	0,94	**
<b>Estrada 2</b>				
1	0,0	18	-1,23	-
5	2,1	18	-0,13	**
4	3,5	18	-0,12	**
9	6,0	18	-0,02	**
8	6,6	18	0,24	**
3	2,7	18	0,31	**
7	6,5	18	0,32	**
2	2,3	18	0,43	**
6	2,8	18	0,60	**
<b>Estrada 3</b>				
3	8,9	18	-0,14	**
4	11,1	18	0,24	**
1	0,0	18	1,14	-
5	13,6	18	1,17	ns
2	10,5	18	1,67	**
6	15,4	18	2,8	**
<b>Estrada 4</b>				
2	3,4	18	0,1	**
3	9,4	18	0,21	**
1	0,0	18	0,37	-

(\*) Significativo a 5%, (\*\*) Significativo a 1%.

## ANEXO C - Teste de Dunnett para a precipitação (mm) na estrada 3

<b>Precipitação (mm)</b>	<b>n</b>	<b>Perda média (cm)</b>	<b>Significância</b>
2,4	18	0,88	ns
5,5	18	0,98	ns
2,4	18	1,04	ns
0,8	18	1,07	-
2,7	18	1,36	**
2,6	18	1,55	**

(\*) Significativo a 5%, (\*\*) Significativo a 1%.

ANEXO D - Teste de Dunnett para as declividades (%) dentro de cada precipitação (mm) para a estrada 4

Declividade (%)	n	Perdas Médias (cm)	Significância
Precipitação = 0,75 $F_{\text{declividade}} = 19,94$ $P < 0,0001$	9,2	-0,5	ns
	0,0	-0,09	-
	5,6	-0,07	ns
	8,2	-0,06	ns
	6,0	0,07	ns
	9,3	0,98	**
	6,7	1,22	**
Precipitação = 2,35 $F_{\text{declividade}} = 7,63$ $P = 0,0015$	9,2	-0,15	ns
	6,0	0,2	ns
	5,6	0,2	ns
	8,2	0,23	ns
	0,0	0,51	-
	9,3	1,16	ns
	6,7	1,21	ns
Precipitação = 2,37 $F_{\text{declividade}} = 9,5$ $P = 0,0006$	9,2	-0,06	ns
	6,0	-0,02	ns
	0,0	0,24	-
	5,6	0,32	ns
	9,3	0,4	ns
	8,2	0,57	ns
	6,7	1,39	**
Precipitação = 2,57 $F_{\text{declividade}} = 16,36$ $P < 0,0001$	9,2	-0,08	ns
	8,2	0,16	ns
	0,0	0,34	-
	5,6	0,39	ns
	6,0	0,45	ns
	9,3	1,14	**
	6,7	1,53	**
Precipitação = 2,70 $F_{\text{declividade}} = 15,72$ $P < 0,0001$	5,6	-0,55	ns
	8,2	-0,23	ns
	9,2	0,02	ns
	0,0	0,16	-
	6,0	0,29	ns
	9,3	1,05	**
	6,7	1,48	**
Precipitação = 5,52 $F_{\text{declividade}} = 21,54$ $P < 0,0001$	8,2	-0,88	**
	9,2	-0,22	ns
	5,6	-0,17	ns
	0,0	-0,11	-
	6,0	0,23	ns
	9,3	0,74	**
	6,7	1,10	**

(\*) Significativo a 5%, (\*\*) Significativo a 1%.



ANEXO E - Testes de Dunnett para as precipitações (mm) dentro de cada declividade (%) para a estrada 4.

Precipitação Média (mm)	n	Perdas Médias (cm)	Significância
Declividade = 0,00 $F_{\text{Precipitação}} = 6,01$ $p = 0,0080$	5,52	-0,11	ns
	0,75	-0,09	-
	2,70	0,16	ns
	2,37	0,24	ns
	2,57	0,34	**
	2,35	0,51	**
Declividade = 5,60 $F_{\text{Precipitação}} = 12,17$ $p = 0,0005$	2,70	-0,55	**
	5,52	-0,17	ns
	0,75	-0,07	-
	2,35	0,20	ns
	2,37	0,32	ns
	2,57	0,39	**
Declividade = 6,00 $F_{\text{Precipitação}} = 1,36$ $p = 0,3181$	2,37	-0,02	ns
	0,75	0,07	-
	2,35	0,20	ns
	5,52	0,23	ns
	2,70	0,29	ns
	2,57	0,45	ns
Declividade = 6,70 $F_{\text{Precipitação}} = 1,16$ $p < 0,2425$	5,52	1,10	ns
	2,35	1,21	ns
	0,75	1,22	-
	2,37	1,39	ns
	2,70	1,48	ns
	2,57	1,53	ns
Declividade = 8,20 $F_{\text{Precipitação}} = 43,31$ $p < 0,0001$	5,52	-0,88	**
	2,70	-0,23	ns
	0,75	-0,06	-
	2,57	0,16	ns
	2,35	0,23	ns
	2,37	0,57	**
Declividade = 9,2 $F_{\text{Precipitação}} = 2,97$ $p < 0,0671$	0,75	-0,50	-
	5,52	-0,22	ns
	2,35	-0,15	ns
	2,57	-0,08	ns
	2,37	-0,06	ns
	2,70	0,017	**
Declividade = 9,3 $F_{\text{Precipitação}} = 2,07$ $p < 0,1532$	2,37	0,40	ns
	5,52	0,74	ns
	0,75	0,98	-
	2,70	1,05	ns
	2,57	1,14	ns
	2,35	1,16	ns

(\*) Significativo a 5%, (\*\*) Significativo a 1%.