



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

TERESA RAQUEL LIMA FARIAS

**ESTRADAS RURAIS NÃO PAVIMENTADAS COMO FONTE DE SEDIMENTOS
EM BACIA HIDROGRÁFICA DO SEMIÁRIDO**

FORTALEZA-CE

2016

TERESA RAQUEL LIMA FARIAS

ESTRADAS RURAIS NÃO PAVIMENTADAS COMO FONTE DE SEDIMENTOS EM
BACIA HIDROGRÁFICA DO SEMIÁRIDO

Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas do Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros

Co-orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo

FORTALEZA-CE

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- F238e Farias, Teresa Raquel Lima.
 Estradas rurais não pavimentadas como fonte de sedimentos em bacia hidrográfica do
 semiárido / Teresa Raquel Lima Farias. – 2016.
 108 f. : il., color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias,
 Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
 Fortaleza, 2016.
 Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas do Semiárido.
 Orientação: Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros.
 Coorientação: Prof. Dr. José Carlos de Araújo.
1. Estradas - Manutenção e reparos. 2. Caatinga. 3. Ecossistemas. I. Título.

CDD 630

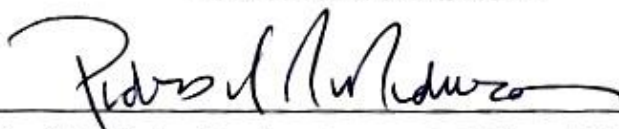
TERESA RAQUEL LIMA FARIAS

ESTRADAS RURAIS NÃO PAVIMENTADAS COMO FONTE DE SEDIMENTOS EM
BACIA HIDROGRÁFICA DO SEMIÁRIDO

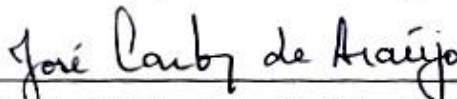
Tese apresentada ao Curso de Doutorado em Engenharia
Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola, da
Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos
para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Aprovada em 18 de março de 2016

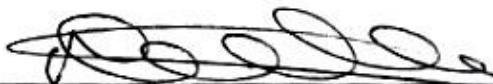
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



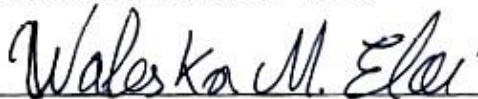
Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Co-orientador)
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa (Conselheiro)
Universidade Federal do Ceará - UFC



Prof. Dr. Joaquín Navarro Hevia (Conselheiro)
Universidade de Valladolid - UVa



Prof.ª Dra. Waleska Martins Eloi (Conselheira)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Prof. Dr. Francisco Mauricio de Sá Barreto (Conselheiro)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida, saúde, oportunidades e por me mostrar caminhos.

As meus orientadores, Pedro Henrique Augusto Medeiros e José Carlos de Araújo, pela orientação dispensada na pesquisa, profissionalismo, confiança, pelo exemplo de conduta e por estimularem minha autonomia profissional.

Ao Professor Joaquín Navarro Hevia, pela orientação no doutorado sanduíche, pela atenção e hospitalidade durante minha estadia na Universidade da Valladolid, em Palência, e pelas discussões e conhecimentos transmitidos, que muito contribuíram para o desenvolvimento desta tese.

Aos professores Carlos Alexandre Gomes Costa, Waleska Martins Eloi e Francisco Maurício de Sá Barreto, por aceitarem o convite para a Banca Examinadora e pelas contribuições e sugestões.

Aos nossos colaboradores na realização do monitoramento em Aiuaba, moradores da comunidade Gameleira, Cícero, Hozana, Sr. Tico, Dona Socorro e suas famílias, pela ajuda indispensável na coleta de dados, hospitalidade e amizade.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa Hidrossedimentológica do Semiárido (HIDROSED), em especial aos que foram mais presentes e que compartilharam as dificuldades do campo: Cicero, Vidal, Everton, Eveline e Wellington.

Aos amigos do Departamento de Construção Civil do IFCE pelo convívio e troca de experiências, em especial: ao Marcelo Macedo e ao Mariano Franca, pela disponibilidade em ir a campo realizar levantamento topográfico das parcelas e na identificação de espécies vegetais (Marcelo Macedo) do segmento de talude; ao Maurício Barreto por disponibilizar o Laboratório de Saneamento Ambiental para a realização das análises de concentração de sedimentos.

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola por possibilitarem minha formação.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará pelo apoio na realização da tese e liberação para o estágio na Universidade de Valladolid.

À professora Suelly Helena de Araújo Barroso, do Departamento de Transportes da UFC, pelo apoio e estímulo na concepção do projeto de doutorado.

Aos alunos e bolsistas que passaram pelo Laboratório de Mecânica dos Solos do IFCE durante o tempo de realização desta pesquisa e que muito contribuíram com as atividades de campo e/ou laboratório: Suelen, Luma, Luciana, Yago, Leonardo, Lucas, Jhon, Tito e Demetrius.

Aos amigos do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC, em especial ao Carlos Germano pela solicitude sempre que precisei de apoio em campo.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) do Departamento de Geologia da UFC pela realização das análises mineralógicas.

Ao apoio financeiro da CAPES através da concessão da bolsa de doutorado sanduíche (processo 2117/2013-4) e ao CNPq pelo financiamento de campanhas a Aiuaba (processo 473061/2012-0).

À minha família por compreender os momentos de ausência e isolamento. Em especial à tia Liduína, pelo apoio incondicional e por suas orientações que muito contribuíram para minhas escolhas profissionais.

RESUMO

Farias, Teresa Raquel Lima. Universidade Federal do Ceará. Março de 2016. **ESTRADAS RURAIS NÃO PAVIMENTADAS COMO FONTE DE SEDIMENTOS EM BACIA HIDROGRÁFICA DO SEMIÁRIDO**. Orientador: Pedro Henrique Augusto Medeiros, Co-orientador: José Carlos de Araújo. Examinadores: Carlos Alexandre Gomes Costa, Joaquín Navarro Hevia, Waleska Martins Eloi e Francisco Maurício de Sá Barreto.

Aproximadamente 80% da malha viária no Brasil não possui pavimentação. Estudos têm registrado elevadas taxas de erosão e escoamento superficial produzidas pela infraestrutura viária em várias partes do mundo e reportam que estradas não pavimentadas são fontes significativas de sedimentos em bacias hidrográficas. Durante dois anos (2013-2014) foi conduzido monitoramento em campo sob condições de chuva natural para caracterizar escoamento e produção de sedimentos de segmentos de superfície de estradas rurais não pavimentadas e talude viário, em área semiárida do bioma Caatinga do nordeste do Brasil, vulnerável à desertificação. Também avaliou-se a aplicação de modelagem na predição da produção de sedimentos de superfície de estradas. Os valores de produção de sedimentos medidos nos anos de 2013-2014, variaram de $0,30 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ a $0,92 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, superiores aos registrados na área em condição preservada, porém em geral inferiores aos reportados na literatura para estradas não pavimentadas. Entretanto, trata-se de uma área semiárida com baixa pluviometria e caracterizada por baixos valores de coeficiente de escoamento superficial, o que limita a produção de sedimentos e a conectividade hidrológica da área, além de os dois anos de monitoramento terem coincidido com período de seca na região. Nos segmentos de talude rodoviário monitorados, a produção de sedimentos do talude sem vegetação foi cerca de dez vezes superior à do segmento com vegetação. Na superfície de estradas, a produção de sedimentos anual (normalizada pela declividade) em um segmento com trânsito foi três vezes mais elevada que da estrada sem trânsito, além disso, eventos que ocorreram após atividades de manutenção das vias geraram picos de concentração de sedimentos superiores a 5.000 mg.L^{-1} nessas superfícies. Na escala de segmento de estrada, entre os modelos avaliados para predição da produção de sedimentos, a USLE associada a equação de Maner, mostrou-se uma abordagem adequada, em que os melhores resultados foram obtidos para a estrada sem trânsito, devido a não interferência neste segmento, de fatores externos como trânsito e atividades de manutenção, não explicados pelo modelo. Já na escala da Bacia do Bengué (933 km^2), onde as estradas ocupam apenas 0,7% da superfície, a aplicação de modelagem mostrou que estas contribuíram com aproximadamente 7% do total de perdas de solo na área. Os resultados deste estudo sugerem que a produção de sedimentos em estradas e taludes com superfície desnuda é pelo menos uma ordem de magnitude superior àquelas registrada nas áreas preservadas da bacia. Atividades de manutenção nas estradas e o trânsito de veículos contribuem para o aumento da disponibilidade de sedimentos com impacto nos valores de concentração de sedimentos, mas impactando menos as cargas de sedimentos que dependem do escoamento superficial e da ocorrência de eventos após manutenção das vias. Constatou-se que a vegetação natural do semiárido tem potencial na captura de sedimentos em taludes rodoviários, com papel importante na quebra de conectividade entre fluxos de sedimentos provenientes de estradas não pavimentadas e o sistema de drenagem natural da bacia.

Palavras-chave: Produção de sedimentos. Manutenção de estradas. Vegetação de Caatinga. Conectividade sedimentológica.

ABSTRACT

Farias, Teresa Raquel Lima. Universidade Federal do Ceará. Março de 2016. **UNPAVED RURAL ROADS AS SEDIMENT SOURCE IN SEMI-ARID BASIN**. Advisor: Pedro Henrique Augusto Medeiros, Examiners: José Carlos de Araújo, Carlos Alexandre Gomes Costa, Joaquín Navarro Hevia, Waleska Martins Eloi and Francisco Maurício de Sá Barreto.

Approximately 80% of the road network in Brazil is unpaved. Studies have reported high erosion rates and runoff produced by the road infrastructure in various parts of the world and report that unpaved roads are significant sources of sediment in river basins. For two years (2013-2014), monitoring in the field under natural rainfall conditions was conducted to characterize runoff and sediment yield of unpaved rural road segments and the respective slopes in semiarid area of the Caatinga biome of northeastern Brazil, vulnerable to desertification. It was assessed the application of modelling in the yield of sediments from road surface. The sediment yield values measured in the years 2013-2014 ranged from 0.30 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ to 0.92 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$, higher than those recorded in the preserved area, but generally lower than those reported in the literature for unpaved roads. However, it is a semiarid area with low rainfall and characterized by low runoff coefficients, which limits the sediment yield and the hydrological connectivity in the area, additionally the two monitoring years coincided with drought in the region. In the monitored road slope segments, sediment yield from the non-vegetated slope was about ten times that of the slope with vegetation. On the road surfaces, the annual sediment yield (normalized by the slope) in a segment with traffic was three times higher than that without traffic, in addition, events occurring after maintenance activities generated sediment concentration peaks as high as 5,000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in these areas. In the road segment scale, among the models tested for the predicting of sediment yield, the USLE associated with the Maner equation, proved to be a suitable approach, the best results being obtained for the road without traffic due to no interference from external factors, such as traffic and maintenance activities, which are not explained by the model. In the scale of the Benguê catchment (933 km^2), where the roads occupy only 0.7% of the surface, the modelling indicated that these areas contributed with approximately 7% of the total soil loss. The results of this study suggest that the sediment yield from roads and slopes with bare surface is at least one order of magnitude higher than those recorded in the preserved areas of the basin. Maintenance activities on roads and traffic of vehicles contribute to the increased availability of sediments and impacting the sediment concentrations, but produce lower impact on the sediment loads, which depend on runoff and the its occurrence after reprofiling of roads. It was also found that the natural vegetation of the semiarid region has potential in capturing sediments in road slopes, with an important role in breaking down connectivity between sediment flows from unpaved roads and the natural drainage system of the catchment.

Keywords: Sediment yield. Road maintenance. Caatinga vegetation. Sedimentological connectivity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos estudos que apresentaram contribuição de estradas para fontes hídricas em bacias hidrográficas.....	22
Tabela 2 – Parâmetros utilizados para as estradas com e sem trânsito na modelagem utilizando a abordagem USLE associada à equação de Maner	43
Tabela 3 – Valores de erosividade calculados para os anos de 2013-2014 dos postos pluviométricos utilizados no estudo	49
Tabela 4 – Valores de erodibilidade (fator K) atribuídos para cada mancha de solo da bacia.	50
Tabela 5 - Fator C para cada classe de vegetação e uso do solo na Bacia do Benguê	51
Tabela 6 – Valores de precipitação (P), duração, intensidade média (I), intensidade máxima para diversos intervalos em minutos (I_{5max} - I_{30max}) e erosividade (R) dos eventos com escoamento superficial nos segmentos de estradas analisados (2013-2014).....	53
Tabela 7 – Percentuais das frações granulométricas do sedimento coletado nos eventos chuva-deflúvio nos segmentos monitorados na estrada com e sem trânsito e do solo da camada superficial (0-10 cm) das estradas com e sem trânsito e do talude viário	57
Tabela 8 – Características dos eventos: precipitação, coeficiente de escoamento superficial (CR), concentração de sedimentos e produção de sedimentos das estradas com e sem trânsito	61
Tabela 9 – Características dos eventos, precipitação, coeficiente de escoamento superficial, concentração e produção de sedimentos das parcelas com e sem vegetação dos taludes	74
Tabela 10 – Erosão bruta (E), produção de sedimentos calculada ($E.SDR_{Maner}$), observada e SDR dos eventos (razão entre a produção de sedimentos observada e erosão bruta) dos eventos para os segmentos de estradas com e sem trânsito	78
Tabela 11 – Perda de solo ($kg.m^{-2}$) medida e modelada com STJEROS, razão modelada/medida.....	82
Tabela 12 – Comparativo de erro entre os três modelos	82
Tabela 13 - Valores médios para as estradas com e sem trânsito, dos anos de 2013 e 2014 de produção de sedimentos, Razão de aporte de sedimentos, e erosão bruta total	83
Tabela 14 - Valores de erosão em função de classes e erosão total média do período (2013 a 2014).....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo.....	33
Figura 2 – Típica estrada não pavimentada na Bacia Hidrográfica do Benguê. Via que interliga as comunidades rurais Barra e Cedro (Município de Aiuaba)	35
Figura 3 – Estrada não pavimentada na Bacia Hidrográfica do Benguê, via que interliga as comunidades rurais Barra e Cedro no município de Aiuaba, durante evento pluviométrico de grande magnitude (Janeiro/2016)	36
Figura 4 – Manutenção de superfície de estrada não pavimentada na Bacia do Benguê, via que interliga as comunidades rurais Gameleira e Aroeira.....	36
Figura 5 – Segmento monitorado da estrada abandonada (a) e vista de jusante para montante (b) dos reservatórios para acumulação do volume escoado durante eventos de precipitação ..	38
Figura 6 – Talude viário e parcela com e sem vegetação (a) durante instalação das armadilhas para captura de sedimentos em setembro de 2012; (b) final do período de chuvas de 2013 em que se observa recomposição da vegetação na parcela sem vegetação	39
Figura 7 – Estação Pluviométrica Automática (EP1) utilizada no estudo.....	40
Figura 8 – Imagem da superfície da amostra (a) obtida na Microscopia Eletrônica de Varredura e respectivo espectro (b) gerado na Espectroscopia de Energia Dispersiva da amostra de solo EC2 coletada na estrada da Confiança	47
Figura 9 – Valores de condutividade hidráulica e massa específica aparente do solo das estradas com e sem trânsito, talude viário e área com vegetação natural. A escala logarítima no eixo x indica que a condutividade hidráulica para as diferentes paisagens varia duas ordens de magnitude	55
Figura 10 – Porcentagem média das frações granulométricas da camada de solo superficial e do sedimento coletado nos segmentos de estrada monitorados.....	58
Figura 11 – Valores de erodibilidade (Fator K da USLE) para o solo das estradas com e sem trânsito e para o talude marginal viário. O valor central da coluna indica a mediana dos valores, e as extremidades indicam a variação de valores, máximos, mínimos e quartis	59
Figura 12 – Valores de coeficientes de escoamento superficial das estradas com e sem trânsito. O valor central da coluna indica a mediana dos valores, e as extremidades indicam a variação de valores máximos, mínimos e quartis	62

Figura 13 – Produção de sedimentos dos eventos nos segmentos de estradas monitorados versus precipitação (a) , intensidade de precipitação (b), erosividade da chuva (c), e coeficiente de escoamento superficial (d)	65
Figura 14 – Valores de concentração de sedimentos das estradas sem trânsito e com trânsito, precipitação e intensidade média de precipitação de cada evento em ordem de ocorrência, (a) por número de evento e (b) por data de evento	69
Figura 15 – Valores de produção de sedimentos das estradas sem e com trânsito, precipitação e intensidade de precipitação de cada evento em ordem de ocorrência	70
Figura 16 – Superfície da estrada antes da reparação (a) e após reparação (b).....	72
Figura 17 – Concentração de sedimentos dos segmentos de talude rodoviário com e sem a presença de vegetação	75
Figura 18 – Produção de sedimentos dos segmentos de talude rodoviário com e sem a presença de vegetação	76
Figura 19 – Vegetação do talude monitorado neste estudo, com invasão do acostamento da via na margem direita (08/12/15)	77
Figura 20 - Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada (USLE + SDR por Maner) dos eventos monitorados	79
Figura 21 – Comparação da produção de sedimentos acumulada observada e calculada (USLE + SDR por Maner) dos eventos monitorados (a) na estrada sem trânsito e (b) na estrada com trânsito, em função dos eventos em ordem de ocorrência	80
Figura 22 – Erosão na Bacia do Benguê (2013-2014), espacializada por classes de erosão....	84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	4
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. Estradas não pavimentadas e o problema da erosão hídrica	5
2.2. Primeiros estudos sobre erosão em estradas.....	9
2.3. Estudos que quantificaram escoamento superficial e produção de sedimentos em estradas sob condição de precipitação natural	12
2.4. Estudos que observaram processos, quantificaram escoamento superficial e produção de sedimentos a partir de simulações de precipitação	16
2.5. Estudos que quantificam a contribuição das estradas com sedimentos para as fontes hídricas	18
2.6. Modelos de erosão a suas aplicações a estradas.....	22
2.6.1. <i>USLE e MUSLE</i>	<i>23</i>
2.6.2. <i>Modelos WEPP e KINEROS2.....</i>	<i>24</i>
2.6.3. <i>Modelos WARSEM e SEDMODEL.....</i>	<i>25</i>
2.6.4. <i>Modelos STJEROS e ROADMOD</i>	<i>28</i>
2.6.5. <i>Outros estudos envolvendo modelagem de erosão em estradas não pavimentadas</i>	<i>29</i>
2.7. Tecnologias para controle de erosão em estradas e taludes marginais	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1. Área de Estudo.....	33
3.2. Monitoramento	36
3.3. Modelagem preditiva de erosão nos segmentos de estradas	41
3.3.1. <i>Aplicação da USLE associada à equação de Maner</i>	<i>41</i>
3.3.2. <i>Aplicação dos modelos empíricos STJEROS e ROADMOD</i>	<i>43</i>
3.4. Aproximação fingerprinting de identificação de fontes de sedimentos	44
3.5. Comparação de taxas de erosão bruta na bacia do Benguê	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1. Precipitação e Erosividade.....	52
4.2. Caracterização do material das estradas e dos sedimentos	54
4.2.1. <i>Condutividade Hidráulica e Massa Específica Aparente do Solo</i>	<i>54</i>
4.2.2. <i>Granulometria</i>	<i>56</i>
4.2.3. <i>Erodibilidade.....</i>	<i>59</i>
4.3. Produção de sedimentos das estradas com trânsito e sem trânsito.....	60
4.3.1. <i>Influência do Trânsito de Veículos e Atividades de Manutenção</i>	<i>67</i>

4.4. Produção de sedimentos nas parcelas do talude com vegetação e sem vegetação .	73
4.5. Comparação entre produção de sedimentos da superfície de estradas medida e modelada.....	77
4.5.1. <i>Abordagem USLE associada à Equação de Maner</i>	77
4.5.2. <i>Modelos STJEROS e ROADMOD</i>	81
4.6. Taxas de erosão total na superfície de estradas e na bacia do Benguê (2013-2014)	83
5. CONCLUSÕES.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1. INTRODUÇÃO

Estradas rurais de terra, ou estradas não pavimentadas, são aquelas que geralmente, possuem a camada superficial constituída de solo local e são desprovidas de revestimento. Segundo dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes do Brasil (DNIT, 2015), a malha rodoviária federal, estadual e municipal é composta de 1,7 milhão de km de rodovias, sendo que aproximadamente 80% destas não são pavimentadas. Em um país continental e em desenvolvimento como o Brasil, estas têm grande importância no âmbito social, econômico e ambiental, pois por essas vias se dá o acesso das populações rurais aos serviços básicos de educação e saúde, bem como o escoamento da produção agropecuária, muitas vezes como único caminho.

Quanto ao aspecto ambiental, destaca-se que as perdas de solo existentes devido a processos erosivos nessas estradas, implicam em degradação da própria estrada, gerando desconforto aos usuários e contribuindo para o aumento da conectividade hidrológica e transporte de sedimentos para a rede de drenagem, podendo impactar as fontes hídricas por meio de assoreamento de cursos de água e reservatórios. Um estudo sobre identificação de fontes de sedimentos em bacias agrícolas no sul do Brasil utilizando a técnica de *fingerprinting* (MINELLA, MERTEN e CLARKE, 2009; MINELLA et al., 2009) sugere que a contribuição relativa das estradas com cargas de sedimentos em suspensão para as fontes hídricas corresponde a 36 %, no entanto, as estradas e caminhos não pavimentados correspondem a apenas 3% da área. Thomaz , Vestena e Ramos-Scharrón (2014) destacam a necessidade de se explorar melhor o papel das estradas não pavimentadas como agente de degradação da qualidade da água em zonas rurais agrícolas. Os autores avaliaram os efeitos quantitativos de estradas não pavimentadas na concentração de sedimentos em suspensão de recursos hídricos em bacia hidrográfica rural também no sul do Brasil, tendo verificado que os valores de concentração de sedimentos a jusante do cruzamento de estradas com a rede de drenagem era 3,5 a 10 vezes superior aos valores a montante.

Navarro-Hevia et al. (2006) destacam que a construção e operação de estradas ocasionam alterações sobre o ambiente hidrológico e causam impacto nos ecossistemas em dois aspectos: quantidade e qualidade das águas. Em estudo na região de Astúrias (Espanha), os autores observaram os efeitos da construção de estradas em rios: erosão de 120 a 500 Mg. ha⁻¹.ano⁻¹; concentrações de sedimentos 24 vezes superior aos sólidos em suspensão naturais e impactos sobre o habitat e as espécies que dependem dele. Também, Ramos-Scharrón (2012)

verificou que nas Ilhas Virgens Americanas, as estradas não pavimentadas são responsáveis por aumentar as taxas de transporte difuso de sedimentos em águas costeiras em até nove vezes, em comparação com bacias hidrográficas em condições não perturbadas.

Diversos estudos mostram que estradas não pavimentadas são significativas fontes de escoamento superficial e produção de sedimentos. Além disso, as taxas de erosão produzidas pela infraestrutura viária, em superfícies e taludes de corte e aterro são muito mais elevadas que as taxas de erosão naturais e de campos agrícolas (REID e DUNE, 1984; LUCE e BLACK, 1999; ZIEGLER, SUTHERLAND e GIAMBELLUCA, 2000; MEGAHAN, WILSON e MONSEN, 2001; NAVARRO HEVIA, 2002; MOTHA et al., 2004; RAMOS-SCHARRÓN e MACDONALD, 2005; SIDLE et al., 2006; NAVARRO HEVIA et al., 2006; CERDÁ, 2007; RIJSDIJK, BRUIJNZEEL e SUTOTO, 2007; ZIEGLER et al., 2007; NEGISHI et al., 2008, FOLTZ, COPELAND e ELLIOT, 2009; JORDÁN-LÓPEZ e MARTÍNEZ-ZAVALA, 2008; RAMOS-SCHARRÓN, 2010; RAMOS-SCHARRÓN, 2012; SAJJAN et al., 2013; NAVARRO-HEVIA et al., 2015; CAO et al., 2015).

Fu, Newham e Ramos-Scharrón (2010) destacam que as superfícies de estradas não pavimentadas são muitas vezes constituídas de materiais de origem local e podem conter uma alta proporção de partículas finas que são facilmente erodíveis. Além disso, têm taxa de infiltração baixa comparando-se com outras superfícies em bacias hidrográficas (ZIEGLER e GIAMBELLUCA, 1997; ZIEGLER et al., 2007; SAJJAN et al., 2013), elevados coeficientes de escoamento superficial (RIJSDIJK, BRUIJNZEEL e SUTOTO, 2007; JORDÁN-LÓPEZ e MARTÍNEZ-ZAVALA, 2008; CAO et al., 2015) e, conseqüentemente, geram altas cargas de sedimento (MOTHA et al., 2004; RAMOS-SCHARRÓN, 2012; THOMAZ, VESTENA e RAMOS-SCHARRÓN, 2014). O papel hidrológico das estradas, enquanto alteração antrópica, é uma importante questão em áreas tropicais e semiáridas, embora o foco da ação preventiva de processos erosivos esteja geralmente no desmatamento e nas práticas agrícolas.

A construção de estradas pode contribuir para modificar a resposta hidrológica superficial e acelerar processos de erosão em bacias hidrográficas (SIDLE et al., 2006; FOSTER et al., 2012). Além disso, Medeiros et al. (2014), que estudaram a produção de sedimentos em bacias da Caatinga, no semiárido brasileiro, em diferentes escalas espaciais, verificaram que a produção de sedimentos é limitada pelas condições de transporte e não pela disponibilidade de material erodido, demonstrando que elevado fluxo superficial de água implica em alta capacidade de transporte, gerando altas taxas de produção de sedimentos.

Griebeler, Pruski e Silva (2009) destacam que as práticas para controle de erosão hídrica em bacias hidrográficas rurais geralmente não incluem o fator estrada como integrante

do ambiente. Na modelagem hidrossedimentológica de bacias isso não é diferente. A contribuição das estradas nos processos sedimentológicos têm sido desconsiderada, mesmo em modelos desenvolvidos com foco em regiões semiáridas, como o WASA-SED (Model of Water Availability in Semi-Arid Environments with Sediment Dynamics Component: ver GÜNTNER e BRONSTERT, 2004; GÜNTNER et al., 2004; MAMEDE, 2008; FRANCKE et al., 2008; MÜLLER et al., 2010). Destaca-se a importância de que medidas para o controle de sedimentos provenientes de estradas sejam integradas aos planos de manejo de bacias hidrográficas, uma vez que estas são parte integrante da paisagem.

Segundo Rijdsdijk, Bruijnzeel e Sutoto (2007), a importância potencial das estradas para a geração de escoamento superficial e produção de sedimentos em áreas tropicais é cada vez mais reconhecida, mas raramente monitorada. Em regiões tropicais semiáridas, caracterizadas pela elevada vulnerabilidade à desertificação (ALMEIDA et al., 2012; ÁVILA e MEDEIROS, 2014), verifica-se uma escassez de estudos sobre os impactos de mudanças no uso do solo (FOSTER et al., 2012) e mais especificamente que avaliem o impacto da infraestrutura viária sobre a dinâmica de sedimentos. Spinelli e Marchi (1998), em uma revisão de literatura sobre os impactos ambientais da construção de estradas tendo como base 175 artigos, destacam que menos de 3% de estudos são oriundos da América Latina e África, enquanto que a América do Norte responde por quase 60% dos títulos e que Europa, Ásia e Oceania, fornecem cerca de 12% cada. Os autores relatam que este é mais um exemplo de desenvolvimento desequilibrado do mundo, uma vez que o estado da arte só diz respeito a zonas temperadas e poucos estudos lidam com os problemas específicos de construção de estradas em países em desenvolvimento.

Dentro deste contexto se insere o desenvolvimento deste estudo, que visa quantificar a produção de sedimentos proveniente de estradas rurais não pavimentadas localizadas no bioma Caatinga, em região semiárida do Nordeste do Brasil, sob condições naturais em um período de dois anos. Os resultados deste estudo são importantes para melhor compreensão de como ocorrem em áreas semiáridas os processos hidrológicos e sedimentológicos, e qual o impacto de estradas não pavimentadas em bacias rurais, nesses processos, enquanto atividade antropogênica. Como forma de responder a duas questões científicas (1) Quanto sedimento é mobilizado da superfície e taludes marginais das estradas não pavimentadas no semiárido cearense? (2) Qual a importância das estradas não pavimentadas enquanto fontes de sedimentos em uma bacia hidrográfica no semiárido? A hipótese do estudo é que as estradas não pavimentadas representam uma fonte significativa de sedimentos e apresentam elevadas taxas de erosão em bacias semiáridas.

Para responder essas questões científicas, foram estabelecidas parcelas experimentais em talude viário e leito de estradas que dão acesso à Bacia Experimental de Aiuaba, no sertão dos Inhamuns. Em particular, buscou-se investigar três questões (i) a influência do trânsito de veículos na produção de sedimentos através da comparação de uma estrada com trânsito e outra sem trânsito, (ii) a influência da manutenção de estradas para o aumento da produção de sedimentos e (iii) a eficiência da vegetação natural do semiárido existente em taludes marginais na retenção de sedimentos, através da comparação da produção de sedimentos de segmentos de talude viário com e sem vegetação.

1.1. Objetivos

Objetivo Geral

O objetivo central é estimar a produção de sedimentos proveniente de estradas rurais não pavimentadas no semiárido a partir de estudo comparativo das perdas de solo em estradas não pavimentadas com outras fontes de sedimentos, de forma a avaliar o impacto da infraestrutura viária sobre o balanço de sedimentos na escala de bacia hidrográfica.

Objetivos Específicos

São objetivos específicos do trabalho:

- Avaliar em parcelas experimentais localizadas em plataformas de estradas rurais não pavimentadas e taludes, a perda de solo sob condição de precipitação natural;
- Avaliar o potencial de vegetação nativa de Caatinga existente em taludes marginais da estrada na retenção de sedimentos;
- Aplicar modelagem preditiva de perdas de solo para as estradas;
- Realizar comparativo de taxas de erosão nas estradas rurais não pavimentadas e na Bacia do reservatório Benguê, de forma a avaliar a contribuição percentual das estradas para a erosão total na bacia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Estradas não pavimentadas e o problema da erosão hídrica

Oda (1995) afirma que as estradas de terra, em geral, são resultantes da evolução de trilhas e caminhos precários, originalmente situados nos traçados naturais do terreno, respeitando a sinuosidade e os obstáculos naturais presentes no local. Na medida da crescente solicitação de tráfego é que estas passam a receber melhoramentos.

No Estado do Ceará, de acordo com Rabelo (2006), a maior parte das estradas não pavimentadas, está sob a jurisdição municipal e foi aberta sem nenhuma técnica rodoviária, possuem traçados bastante sinuosos que acompanham o terreno natural, e na maioria das vezes, não apresentam dispositivos de drenagem. Dentro desse contexto, observa-se ausência de definição de critérios específicos para a construção de estradas rurais. Além disso, as características geométricas das estradas de terra são fortemente condicionadas pelo aproveitamento dos traçados existentes, de forma que seus custos de construção sejam compatíveis com seu tráfego e função.

Do ponto de vista rodoviário, Oda (1995) destaca que uma boa estrada não pavimentada deve contar com características, tais como: ter largura de faixa de rolamento suficiente para acomodar o tráfego; apresentar resistência suficiente para acomodar o tráfego da região; apresentar resistência suficiente para acomodar as cargas de rodas sem que ocorram deformações excessivas; ter boa capacidade de suporte, a qual depende das características do material de superfície e da resistência do solo, a medida que o teor de umidade varia; apresentar um bom sistema de drenagem de forma a minimizar a ação erosiva da água danificando o subleito e a superfície de rolamento;

De acordo com Nunes (2003) a importância socioeconômica das estradas de terra e o desinteresse do qual vem sendo alvo, ao longo dos anos, imprimem essencial relevância à busca de novas alternativas, que sejam razoavelmente simples e de baixo custo que contribuam para o melhoramento e conservação dessas vias. Ainda, Rabelo (2006) destaca que o melhoramento e/ou a pavimentação de rodovias de terra, normalmente, são restringidos pelas dificuldades de aprovação dos estudos de viabilidade econômica, dado o baixo volume de tráfego nelas registrado. Esta restrição constitui um desafio para os projetistas e construtores rodoviários na busca de soluções de pavimento que tornem economicamente viáveis aqueles investimentos.

Rabelo (2006) afirma que os recursos para manutenção e reabilitação de estradas de terra, assim como das pavimentadas, quase sempre são inferiores às necessidades. Além disso, algumas tentativas de redução de custos das obras de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego (tráfego inferior a 200 veículos por dia, segundo Parente, 2000) dizem respeito somente à racionalização do uso dos materiais locais, bem como a redução das espessuras das camadas de base e revestimento. Dessa forma, é fato comum a indicação de soluções de revestimento com reduzidas espessuras e com pouca ou nenhuma função estrutural, o que leva as camadas de base, a absorverem, quase que integralmente, todos os esforços oriundos do tráfego.

Quanto ao aspecto de escolha de materiais, de acordo com Barroso (2002), no Estado do Ceará, a identificação de jazidas de materiais para serem utilizados em obras viárias vem sendo realizada através dos critérios ditos convencionais (granulometria, limites de liquidez e plasticidade e capacidade de suporte dos materiais). Para que um solo seja utilizado em pavimentação no Estado do Ceará, o DERT/CE (1994) estabelece os seguintes parâmetros geotécnicos do solo: limite de liquidez, no máximo, 25%; índice de plasticidade, no máximo, 6%; limita a capacidade de suporte do solo após compactado, a no mínimo, 20% para sub-base e 60% para base; expansão, no máximo, de 1% para sub-base e 0,5% para base. Na engenharia rodoviária entre os critérios de escolha de material, não são consideradas características do solo relacionadas a sua susceptibilidade à erosão, devido, entre outros motivos, ao escasso conhecimento e enfoque ambiental a ser levado em consideração na tomada de decisão durante a execução dessas obras.

Por outro lado, Villibor, Nogami e Fabbri (1968) destacam que um dos fatores mais importantes para a escolha do projeto mais apropriado, que possa controlar a erosão ao longo de rodovias, refere-se aos tipos de solos, que constituem as suas diversas partes. Dessa maneira, os autores sugerem um critério para proteção contra erosão em bordas de pavimentos, baseado no conhecimento dos grupos de solos destas bordas do pavimento. Recomendam a utilização da sistemática MCT (corpos de prova em Miniatura, Compactados segundo procedimento especial, destinado especificamente para o estudo de solos Tropicais, ver NOGAMI e VILLIBOR, 1995) para fixação das diretrizes de projeto, uma vez que se conhecendo os tipos de solo que a compõe e seu comportamento frente à erosão, que é inferido através desta sistemática, podem-se prever as necessidades quanto à proteção de suas bordas contra a erosão.

Em outros países, o emprego de métodos para controle de sedimentos em obras com impacto fluvial é obrigatório. Navarro-Hevia (2011) reporta como exemplo os EUA, em que

obras com uma superfície igual ou superior a 4.000 m² são consideradas como fontes de emissão de águas contaminantes. Dessa forma, o construtor é obrigado a instalar e manter durante a execução uma série de boas práticas de atuação, que passam por medidas estruturais e não estruturais para controle de sedimentos, como barragens de sedimentação, armadilhas de sedimentos, emprego de vegetação e outras alternativas para interceptação do escoamento, exemplificadas de forma detalhada pelo autor.

A erosão hídrica consiste no destacamento do solo em consequência do impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial diretamente derivado delas (CARVALHO, 1994). Além disso, a erosão hídrica depende de fatores como a declividade, características de clima e pluviométricas, cobertura vegetal, tipo de solo, e a susceptibilidade à erosão que é um fator intrínseco de cada solo.

De acordo com Nogami e Villibor (1995), a erosão hídrica é um fenômeno que afeta diretamente as obras viárias e sua atuação é mais intensa nos pavimentos de tipos mais econômicos, em que a disponibilidade de recursos para o seu controle é relativamente pequena. Griebeler, Pruski e Silva (2009) destacam que como as águas pluviais constituem a principal causa de erosão nas estradas, uma vez que, mesmo nas estradas não pavimentadas, parcela significativa da água precipitada é escoada devido a baixa capacidade de infiltração de água no seu leito, o sistema de drenagem deve ser eficiente, de modo a evitar o acúmulo de água sobre o leito da estrada.

Villibor, Nogami e Fabbri (1968) avaliam que quanto maior a variação do teor de umidade na superfície exposta, mais intensa se torna a erosão, pois o teor de umidade elevado enfraquece o solo e diminui sua capacidade de infiltração. Dessa forma, o regime pluviométrico, é um fator importante, pois influenciará diretamente na variação do teor de umidade no solo durante o ano. Griebeler, Pruski e Silva (2009) também descrevem que há uma interferência mútua da estrada com as áreas marginais no processo de ocorrência de erosão hídrica, podendo a estrada ser prejudicada pela erosão e pelo aporte de sedimentos advindos das áreas marginais, ou ser a responsável pela erosão nessas áreas.

Nogami e Villibor (1995), reportam que as consequências da erosão hídrica acelerada em obras viárias têm sido grave em muitas circunstâncias, e que existem exemplos de necessidade de mudança de traçado imposta por voçorocas, porém, o que mais tem afetado as obras viárias são as erosões que ocorrem nas bordas dos pavimentos e nos taludes de cortes e de aterros. Além da importância para o projeto apropriado de uma estrada, o conhecimento das inter-relações de características hidrológicas, geológicas, e ecológicas é necessário à gerência de estradas, incluindo técnicas da remediação.

Villibor, Nogami e Fabbri (1968) destacam que, nas rodovias vicinais, a plataforma da estrada geralmente é estreita, sem acostamento ou acostamentos de pequena largura. Devido a esta característica peculiar e também à falta de preocupação em se proteger a borda do pavimento contra a ação da água, verifica-se que em decorrência da má compactação das bordas, baixas densidades que acarretam em diminuição da resistência da camada, que em tempo de chuva leva o pavimento a absorver maior quantidade de água, levando à instabilidade. Ainda, devido à pequena largura da plataforma, a borda do pavimento coincide com o rodeiro externo, o que também acentua o efeito de falta de compactação das bordas.

Os autores avaliam que o projeto de drenagem superficial deve ser adequado ao tipo de solo da região em que se desenvolve a estrada e às condições impostas pelo projeto geométrico, para que o resultado seja tecnicamente satisfatório e economicamente viável para a sua execução em rodovias vicinais. Nogami e Villibor (1995) também destacam que a erosão em bordas de pavimentos geralmente é mais grave nas rodovias de baixo volume de tráfego e de baixo custo inicial, devido ao alto custo relativo das providências convencionais de condução das águas pluviais capazes de controlar a erosão.

No caso de estradas rurais não pavimentadas, uma alternativa para a destinação de águas coletadas que vem sendo utilizada em algumas regiões do Brasil é a sua condução a bacias de acumulação (ver CASARIN, 2008; CASARIN e OLIVEIRA, 2009). Esta técnica consiste na escavação de bacias nas áreas marginais às estradas para permitir a captação e o armazenamento da água escoada nessas e possibilitar a posterior infiltração. A bacia deve ser dimensionada para receber o volume escoado e possuir solo permeável, para permitir que a água acumulada possa infiltrar. Entretanto, no caso das estradas não pavimentadas no semiárido do Ceará, essa alternativa teria sua aplicação dificultada pelas características dos solos da região, que no geral são rasos e apresentam baixa permeabilidade, originados de embasamento cristalino.

Outras tecnologias, que vêm sendo aplicadas para a proteção de taludes em estradas como a revegetação, aplicação de serrapilheira, utilização de mantas de fibras vegetais, técnicas de hidrossemeadura, ou ainda o envelopamento de solo, são exemplificadas nos trabalhos de Navarro-Hevia (2002) e Silva (2009) e avaliadas por esses autores quanto à eficiência no controle de erosão e retenção de sedimentos, apresentados no item 2.7.

2.2. Primeiros estudos sobre erosão em estradas

Os primeiros estudos sobre erosão, se centravam em investigar áreas agrícolas como fontes de degradação dos solos e de produção de sedimentos, devido à preocupação com a segurança alimentar. Entretanto, a partir da década de 50, com a importância de se realizar um planejamento do uso do solo urbano e rural, surgem estudos envolvendo erosão e quantificação da produção de sedimentos em outras áreas fontes que não as agrícolas, e especificamente, os estudos sobre sedimentos oriundos da infraestrutura viária. Desde então, como forma de avaliar os efeitos adversos causados pela infraestrutura viária, processos de escoamento superficial e erosão tem sido investigados e modelados, geralmente em superfícies não pavimentadas e em taludes de corte e aterro. A seguir, são enumerados alguns dos primeiros estudos:

Diseker e Richardson (1961, 1962) determinaram taxas de escoamento superficial, erosão e produção de sedimentos em seis parcelas sem vegetação em cortes de estradas durante três anos, na Bacia do Rio Coosa, no Estado de Georgia, EUA. O estudo foi realizado, devido a preocupações com a expansão da malha viária e o potencial desta como fonte de sedimentos que impactassem barragens e gerassem inundações, de forma que, processos erosivos em taludes rodoviários e técnicas de estabilização foram estudados. O objetivo do estudo foi medir perdas de solo e água em taludes de cortes de estradas e determinar o melhor tipo de cobertura vegetal que apresentasse rápido estabelecimento e efetiva proteção dos taludes. Registraram taxas de erosão de 180, 202, 520 e 539 $\text{Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ em taludes com diferentes inclinações e orientações, sendo que as maiores taxas de erosão foram observadas em maiores inclinações e com orientação norte.

Meyer, Schoeneberger e Huddleston (1975) estimaram taxas de erosão de taludes marginais de estradas sem vegetação, em uma bacia experimental, localizada na bacia do rio Kewaunee, estado de Wisconsin (EUA), a partir da determinação da geometria de 104 taludes de corte e aplicação da Equação Universal de Perdas do Solo. A taxa média de erosão estimada pela USLE foi de 795 $\text{Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Validaram a estimativa através de medidas de produção de sedimentos em seis parcelas monitoradas (3 m^2), para as quais compararam produção de sedimentos medida durante seis semanas, de segmentos com e sem vegetação, com taxas de 0,45 Mg.ha^{-1} e 46,5 Mg.ha^{-1} , respectivamente, em que os valores monitorados corresponderam a 11,5% do valor anual. Os autores avaliaram que as diferenças entre as taxas de erosão medidas e previstas se devem a variações associadas a erodibilidade do solo,

precipitação e tempo de amostragem. Os resultados do estudo sugerem o efeito positivo da vegetação na estabilização de taludes marginais de estradas e na retenção de sedimentos.

Megahan (1977) apresentou dados de erosão coletados durante três anos e meio (1969-1972) de trinta lotes em taludes de corte de estradas florestais, em Idaho (EUA). Taxas de erosão variando de 0,1 a 247,6 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ (média de 40,4 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹) foram registrados em taludes de corte de estradas florestais. O estudo demonstrou que o tempo de construção é um importante fator determinante no processo de erosão em estradas e que o processo de erosão depende fortemente do potencial erosivo da precipitação.

Reid e Dune (1984) monitoraram taxas de escoamento superficial e produção de sedimentos em dez segmentos de estradas florestais, submetidas a diferentes níveis de tráfego, durante um período de um ano, em uma bacia hidrográfica de 375 km² no estado de Washington (EUA). Determinaram curvas-chave e hidrogramas unitários para diferentes tipos de superfície e níveis de uso, que combinadas a dados de precipitação foram utilizados para estimar a produção de sedimentos média anual para cada uso. Observaram que um segmento de estrada com tráfego pesado (> 4 caminhões carregados de madeira por dia) produziu 130 vezes mais sedimentos que uma estrada abandonada. E que uma estrada com pavimentação, onde somente os taludes de cortes e pontos de descarga são fontes de sedimentos, apresentou produção de sedimentos igual a 1% do que é produzido em uma estrada com superfície em solo exposto. Observaram perdas de solo de 0,0085 kg.m⁻² para estradas florestais com tráfego leve e bem conservadas, em área com precipitações anuais elevadas (3400-3600 mm).

Haigh (1985) quantificou perdas de solo em taludes de corte de estradas, no período de 1976 a 1983, em área florestal no estado de Oklahoma (EUA), com 130.000 km de estradas, caracterizada por precipitação anual de cerca de 800 mm e solo predominante do tipo arenoso fino. Estimou a erosão de taludes de corte (com elevada inclinação de 48° a 70°) através de monitoramento com pinos de erosão e avaliou a evolução geomorfológica destes através de análise de perfis representativos. O autor verificou taxas de rebaixamento médias de 30 mm.ano⁻¹, taxas de erosão de cerca de 400 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ e que os taludes apresentam permeabilidade mais baixa que os terrenos naturais da área, conduzindo a um aumento do escoamento superficial.

Foltz e Burroughs (1990) simularam precipitação com duração de 30 minutos e intensidade de 50 mm.h⁻¹ em parcelas de estradas com e sem trilha de roda em Idaho e Colorado, EUA. Os eventos foram simulados com o solo na condição seca (umidade natural) e depois de 24 horas da primeira simulação, com o solo na condição úmida. As parcelas com trilha de roda apresentaram maiores valores de coeficiente de escoamento superficial, com

variação de 87% a 99%, em comparação com as parcelas sem trilha de roda, com variação de 55% a 90%, também depleção da produção de sedimentos com o escoamento superficial acumulado mais significativa nas parcelas com trilha de roda. Os valores de produção de sedimentos nos lugares com trilha de roda foram de 2 a 5 vezes superiores aos valores obtidos nas parcelas sem trilha de roda. Observaram também maiores valores de produção de sedimentos em solo contendo elevado teor de partículas silte, materiais estes que são facilmente carregados. Segundo os autores os resultados do estudo sugerem a importância de práticas de manejo para as estradas inseridas em uma bacia hidrográfica e também a importância das características do solo, enquanto material que compõe uma estrada.

Luce e Black (1999) apresentaram dados de monitoramento de um ano de setenta e quatro parcelas experimentais instaladas em estradas florestais em bacia hidrográfica localizada na costa do Estado de Oregon (EUA). O estudo objetivou verificar relações entre produção de sedimentos e atributos das estradas como distância entre bueiros, declividade da estrada, textura do solo e altura de taludes de corte. Investigaram três questões em relação a produção de sedimentos: o efeito da remoção da vegetação dos taludes e da drenagem; a influência do comprimento de rampa e da declividade eo efeito da altura do talude de corte em diferentes solos.

Entre os resultados do estudo, os autores: não observaram correlação entre a produção de sedimentos e altura do talude de corte; verificaram um aumento significativo da produção de sedimentos em segmentos onde a vegetação foi removida dos taludes e da drenagem; observaram proporcionalidade entre a produção de sedimentos e o produto do comprimento de rampa pelo quadrado da declividade; verificaram produção de sedimentos de estradas com superfície em solo fino silteoso superior à daquelas com superfície em cascalho (cerca de nove vezes). Observaram elevada variabilidade de valores de produção de sedimentos entre segmentos de estrada, sendo os maiores valores associados a estradas construídas recentemente ou que passaram por algum tipo de interferência por manutenção.

Os autores destacam que a maioria dos segmentos produziram pouco sedimento, enquanto alguns produziram elevados valores e que estes resultados sugerem que a gestão de poucos segmentos de maior risco seria o mais eficiente para o controle de estradas florestais enquanto fontes de sedimentos.

2.3. Estudos que quantificaram escoamento superficial e produção de sedimentos em estradas sob condição de precipitação natural

Poucos estudos recentes tem se concentrado em estimar taxas de erosão devidas a condição de precipitação natural em superfícies de estradas e taludes viários e geralmente apresentam de 1 a 4 anos de dados. Entretanto, medidas reais são importantes para se estimar a magnitude real do problema, que taxas são produzidas pela infraestrutura viária, como afetam o próprio estado dessas infraestruturas e, como alteram os processos de escoamento e produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica e conseqüentemente, como contribuem para impactar as fontes hídricas. Nesta seção são apresentados alguns estudos realizados a partir do ano de 2000, que quantificaram taxas de escoamento superficial e produção de sedimentos em superfícies de estradas não pavimentadas:

MacDonald, Sampson e Anderson (2001) em estudo nas Ilhas Virgens (US), área com precipitação entre 900 e 1400 mm.ano⁻¹, observaram que as estradas não pavimentadas produziam geralmente escoamento superficial quando a precipitação excedia 6 mm e produção de sedimentos anual de 9 a 15 kg. m⁻².ano⁻¹ em parcelas experimentais de cerca de 50 m² e declividades entre 7 e 18%. Já na escala da estrada a produção de sedimento estimada foi de 0,1 a 7 kg. m⁻².ano⁻¹.

Ziegler et al. (2004) compararam taxas de sedimentos de estradas não pavimentadas e de terras agrícolas, em uma Bacia Experimental (93,7 ha) localizada em área montanhosa do nordeste da Tailândia, que apresenta precipitação superior a 1200 mm.ano⁻¹, através de monitoramento em campo de variáveis hidrossedimentológicas. Verificaram que na superfície das estradas as taxas de erosão registradas (cerca de 120 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹), eram uma ordem de magnitude maiores que aquelas registradas em campos agrícolas (9 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹) e que estes usos do solo ocupavam respectivamente, cerca de 0,5% e 12% da área total da bacia.

Além disso, os autores avaliaram e descreveram processos físicos que ocorrem na área e que explicam a contribuição das estradas para o escoamento e geração de sedimentos na bacia: escoamento superficial Hortoniano é gerado nas superfícies compactadas de estradas mesmo em pequenos eventos de precipitação; os processos de preparação de superfície que incluem atividades de manutenção e desprendimento de sedimentos pelo trânsito de veículos renovam o suprimento de sedimentos na superfície facilmente transportável; a erosão na superfície da estrada é potencializada em locais de elevada declividade e em que as distâncias percorridas pelo fluxo superficial são longas; há pontos de conexão em que o escoamento

superficial gerado na superfície de estradas chegam diretamente a corrente de drenagem natural da bacia.

Ramos-Scharrón e MacDonald (2005) realizaram medidas de produção de sedimentos em 21 segmentos de estradas não pavimentadas na ilha de St John, em área tropical no Caribe. As medidas foram realizadas durante dois anos e os segmentos foram selecionados para representar uma grande variedade de áreas de superfície e declividades. Os resultados das observações foram utilizados para a elaboração de um modelo empírico de predição de erosão para a área. Os autores relataram que os efeitos do aumento da erosão na área são preocupantes, porque as elevadas taxas de erosão causam perturbações nas comunidades de recifes de corais, impactando a economia local que depende do turismo e que uma melhor compreensão sobre a produção de sedimentos das estradas é necessária para orientar o desenvolvimento futuro e os esforços de controle da erosão.

A produção de sedimento para os 21 segmentos de estrada foi de aproximadamente $7,4 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, ou $0,064 \text{ kg.m}^{-2}$ por centímetro de precipitação, com variação de 0,018 a $0,39 \text{ kg.m}^{-2}.\text{cm}^{-1}$. As maiores taxas de produção de sedimentos por unidade de precipitação foram associados a estradas íngremes que haviam sido regularizadas pelo menos uma vez nos dois últimos anos. A produção de sedimentos das estradas de tráfego pesado foi 58 % maior do que naqueles segmentos da categoria de uso leve.

Rijsdijk, Bruijnzeel e Sutoto (2007) compararam valores de escoamento superficial e produção de sedimentos obtidos em parcelas em uma estrada pavimentada com paralelepípedos e outra não pavimentada, em uma bacia hidrográfica, na Ilha de Java, Indonésia. A estrada não pavimentada apresentou coeficiente médio de escoamento superficial de aproximadamente 65% e produziu cerca de $7 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ de sedimentos enquanto que os valores para a estrada de paralelepípedos foram mais baixos, sendo 38% de escoamento superficial e $1,9 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ de produção de sedimentos.

Ramos-Scharrón e MacDonald (2007b) em estudo em área tropical no Caribe, verificaram que as estradas não pavimentadas que foram regularizadas pelo menos a cada dois anos apresentaram taxas de produção de sedimentos que vão de $5,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ a $580 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, com inclinações que variavam de 2% a 21%, enquanto que a taxa de produção de sedimentos em estradas íngremes abandonadas foi de $12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Verificaram, ainda que a média de produção de sedimentos em bacias preservadas de zero e primeira ordem foram, respectivamente, 0,01 e $0,08 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. As taxas de produção de sedimentos nos taludes de corte de estradas apresentaram variação de 20 a $170 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, entretanto,

devido a pequena superfície que estes representavam na escala de bacia, sua contribuição foi relativamente pequena.

Negishi et al. (2008) monitoraram, em uma bacia de recarga subterrânea em área tropical na Malásia, fluxos de água e sedimento por um período de 1 ano em um segmento de estrada não pavimentada (51,5 m x 3,6m e inclinação de 11,4%) e em duas microbacias (áreas de 14,4 ha e 32,8 ha) de zero ordem (que contribuem lateralmente para o segmento de estrada) anteriormente degradadas, mas que estavam em pousio no período de monitoramento. As taxas de emissão de sedimentos estimadas para a superfície da estrada foram de $170 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e para as microbacias foram de $4 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, consideradas elevadas apesar de estas estarem há 3 anos em recuperação. Os autores destacam que, devido a estrada ter sido escavada próximo a rocha, criou-se uma fundação pobre para a recuperação da vegetação, gerando também interceptação do fluxo subsuperficial que contribui para as taxas de sedimentos geradas na estrada.

Xu et al. (2009) investigaram os efeitos da precipitação e comprimento de rampa no processo de erosão hídrica em encostas marginais de uma rodovia no Tibet, em uma área com precipitação média anual de 272 mm. Avaliaram escoamento superficial, concentração de sedimentos e perdas de solo durante dois anos sob condição de precipitação natural (total de 28 eventos observados), em quatro parcelas com diferentes comprimentos de rampa (1, 2, 3 e 4 metros) e gradiente de inclinação de 30°. Os resultados do estudo mostraram que escoamento superficial, concentração de sedimentos e perdas de solo foram menores para maiores comprimentos de rampa, contrastando com estudos anteriores que correlacionaram positivamente perdas de solo e comprimento de rampa. Os autores destacam que o processo de erosão nos segmentos estudados foi dominado pela precipitação, uma vez que a capacidade de infiltração do solo é alta combinada a baixas intensidades de precipitação.

Ramos-Scharrón (2010) quantificou taxas de erosão de nove segmentos de estradas abandonadas (área e comprimento de rampa médios de 180 m^2 e 40 m, respectivamente) não pavimentadas durante cerca de dois anos, em uma área de clima subtropical seco de Porto Rico (Caribe), que apresenta precipitação média de 760 mm.ano^{-1} . O autor avaliou o efeito da precipitação, erosividade da chuva, inclinação, comprimento de parcela, e cobertura vegetal sobre as taxas registradas. A produção de sedimentos média das estradas foi de $0,84 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, e o intervalo de valores observados foi 15-50 vezes maior do que as taxas de erosão naturais localmente medidas. Apenas em quatro parcelas foram observadas correlações de produção de sedimentos com a precipitação. Taxas de erosão foram também inversamente relacionadas com a cobertura vegetal com baixa correlação, e apresentaram

elevada correlação com a declividade e com o produto comprimento x declividade. Observou que houve um declínio de taxas de produção de sedimentos em todos os segmentos, atribuída a mais intensa precipitação durante o 1º período e a cobertura vegetal mais desenvolvida durante o 2º período do estudo. O autor destaca que o aumento das taxas de sedimentos relacionadas a alterações antrópicas se configura como o fator mais importantes que vem afetando ecossistemas de recifes de coral.

Ramos-Scharrón, Reale-Munroe e Atkinson (2014) quantificaram taxas de erosão em trilhas, consideradas como única fonte antropogênica em uma área natural (ilha de St Croix- Ilhas Virgens Americanas) preservada de clima subtropical seco, com precipitação média de 854 mm.ano⁻¹. Monitoraram com armadilhas de sedimentos doze segmentos de trilha, com declividades variando de 5 a 25%, durante dois anos. As taxas anuais registrados de erosão variaram de 0,6 a 81 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ e eram três ordens de magnitude superiores às registradas em encostas preservadas. Os valores mais baixos foram verificados em trilhas abandonadas com cobertura de vegetação densa, enquanto as maiores taxas foram associadas com trilhas em que houve a remoção da vegetação imediatamente após a construção.

Os autores destacam que trilhas têm características semelhantes a estradas não pavimentadas, e que estas são muitas vezes negligenciadas, pois representam apenas um pequeno fragmento da paisagem, mas que podem ser importantes fontes de sedimentos, particularmente em áreas intocadas. Relacionaram as taxas de erosão com cobertura vegetal, precipitação e declividade e desenvolveram um modelo empírico de predição de taxas erosão para trilhas em função desses três fatores, a ser utilizado como ferramenta para avaliar os efeitos da construção de trilhas e atividades de restauração na geração de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas da área e para outros ambientes com características similares.

Navarro-Hevia et al. (2015) avaliaram o processo erosão-deposição e a evolução morfológica de um talude ferroviário em Palência (precipitação média de 430 mm.ano⁻¹), na Espanha, quantificando a emissão de sedimentos a curto e longo prazo, em um total de 12 anos de estudo (1988-2010) mediante monitoramento com pinos de erosão, em parcelas com 6 m de largura e 8 m de comprimento. O balanço de sedimentos entre as duas zonas de erosão e deposição do talude, avaliadas por meio de regressão polinomial e a partir do cálculo de integrais, resultou em uma emissão de sedimentos de 31 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ (14% da erosão bruta), que variou de 109 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ a 24 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ ao longo dos 12 anos do estudo.

Os autores verificaram que a emissão do primeiro ano foi 4,5 vezes maior que a emissão registrada nos anos subsequentes, como resultado de uma maior disponibilidade de material solto na superfície, devido a um processo de regularização ocorrido um ano antes do

início do monitoramento. Além disso, os resultados sugerem uma tendência de decréscimo das taxas de erosão bruta ao longo do tempo e uma estabilização da taxa de emissão.

2.4. Estudos que observaram processos, quantificaram escoamento superficial e produção de sedimentos a partir de simulações de precipitação

A erosão de solo em áreas naturais e agrícolas envolve mecanismos complexos. Quando se tratam de superfícies de estradas, outras variáveis ainda são inseridas no processo, como manutenção e trânsito de veículos. Como forma de investigar processos hidrossedimentológicos e coletar dados mais rapidamente, uma vez que monitorar perdas de solo sob condição de chuva natural é demorado e dispendioso, alguns autores realizaram experimentos de chuva simulada em superfícies de estradas não pavimentadas e taludes rodoviários, entre estes estudos, destaca-se:

Ziegler, Giambelluca e Sutherland (2001a) investigaram em superfícies de estradas não pavimentadas, em uma bacia em área montanhosa na Tailândia, perdas de solo associadas à prática de manutenção e ao desprendimento de sedimentos pelo tráfego de motocicletas e caminhões. Realizaram três tipos de experimento com simulação de evento de precipitação em parcelas com área de aproximadamente 5 m² e inclinação mediana de 0,18 m.m⁻¹: o primeiro em superfície de estrada preenchida com materiais retirados diretamente da margem da estrada e aplicados de forma manual, o que representa a típica manutenção de estradas na área; o segundo em superfície de estradas após a passagem de motocicletas e o terceiro após a passagem de caminhões.

Os autores compararam os resultados com aqueles obtidos a partir de simulações em estrada sem interferência de trânsito e de manutenções. Verificaram que a concentração de sedimentos máxima na estrada reparada foi quase duas vezes mais elevada que da estrada sem interferências (320 versus 170 g L⁻¹) e que embora a estrada reparada apresentasse maior infiltrabilidade, o armazenamento de água foi limitado, e a taxa de infiltração a longo prazo foi regulada pela camada subjacente da superfície da estrada, compactada. Já as parcelas com simulações de precipitação após a passagem de motocicletas e caminhões foram as que apresentaram maiores valores de coeficiente de escoamento superficial como resultado da criação de canais de fluxo bem definidos pelos pneus dos veículos. Observaram um aumento instantâneo na concentração de sedimentos de três a quatro vezes, após a passagem de motocicletas e de sete vezes, após a passagem de caminhões.

Cerda (2007) avaliou perdas de solo e escoamento superficial a partir de experimentos de precipitação simulada, com intensidade de 45mm.h^{-1} e duração de uma hora, em um total de 50 simulações, conduzidas durante inverno e verão, como forma de avaliar o efeito de variações na umidade do solo, em cinco taludes rodoviários (parcelas de aproximadamente $0,40\text{m}^2$), localizados na província de Valência (Espanha), região de clima Mediterrâneo, com precipitação entre 500 e 700mm.ano^{-1} . Verificou que os taludes com superfície em solo exposto, ainda em período de construção contribuem com 30 vezes mais sedimentos do que os com vegetação. Os resultados do estudo mostram que taludes rodoviários são importantes fontes de sedimentos principalmente durante obras. O autor sugere que a restauração da vegetação deve ser realizada logo após construção da estrada como forma de minimizar o carreamento de sedimentos e funcionar como uma proteção da estrada.

Jordán e Martínez-Zavala (2008) simularam precipitação e avaliaram escoamento superficial e produção de sedimentos em estradas florestais não-pavimentadas em um parque natural no sul da Espanha. Trinta simulações, com intensidade de 72mm.h^{-1} e duração de 30 minutos foram realizadas em parcelas de $0,0625\text{m}^2$, sendo 10 em taludes de corte com baixa cobertura vegetal, 10 em taludes de aterro (inclinações entre 11 e 13%), 10 no leito estrada (inclinações entre 1 e 5%). Os coeficientes de escoamento foram respectivamente, 58%, 27% e 51%. A taxa de perda de solo mais elevada foi encontrada nos taludes de corte (106g.m^{-2}), devida aos declives, a existência de colúvios soltos, e a baixa cobertura vegetal.

Os autores verificaram que a perda de solo dos taludes de corte foi 5 e 6 vezes maior do que as do leito da estrada e o no talude de aterro, respectivamente. A concentração de sedimentos aumentou durante os primeiros 6-8 minutos desde o início das simulações e, em seguida, diminuiu de forma constante devido à perda de partículas finas da superfície do solo e mudanças de porosidade. Os autores sugerem para que haja uma redução aceitável das taxas de sedimentos nos taludes de corte, se mantenha uma cobertura vegetal em aproximadamente 35-40% da superfície e se reduza os ângulos de inclinação em cerca de 40%.

Foltz, Copeland e Elliot (2009) simularam eventos de precipitação em estradas florestais abandonadas e reabertas em Idaho (EUA) com o objetivo de determinar impactos de erosão na reabertura de uma estrada florestal abandonada e obter estimativas de K_s (Condutividade hidráulica saturada) e K_i (coeficiente de erodibilidade entressulcos). Foram aplicadas intensidades de 100mm.h^{-1} com duração de 30 minutos, em uma sequência de três eventos com o solo em condições de baixa umidade, úmido e saturado. Verificaram que eventos de alta intensidade em um solo seco produzia menos escoamento que um evento de mesma intensidade em um solo mais úmido para ambos os tipos de estradas. Obtiveram

valores de concentração de sedimentos significativamente mais elevadas nas estradas reabertas com trânsito.

Dong, Zhang e Guo (2012) avaliaram a partir de precipitação simulada, escoamento superficial e perdas de solo em áreas com resíduos oriundos de escavações realizadas para a construção de estradas, em uma zona semiárida da China, com precipitação de 569 mm.ano⁻¹. O experimento foi conduzido em parcelas de material siltoso (mais de 60%) com diferentes inclinações, sendo cinco em área com material solto (inclinação de 19% a 79%) e uma em área com material compactado (declive de 30,6%), em cinco diferentes intensidades de precipitação (0,6, 1,22, 1,74, 2,33 e 2,79 mm.min⁻¹), em um total de trinta simulações.

Os autores observaram que o escoamento superficial mostrou correlação com a densidade do solo e a intensidade de precipitação, enquanto o efeito da declividade sobre o escoamento se mostrou mais complexo, variando com a intensidade de precipitação. Quanto a perda de solo, esta também se relacionou com a densidade do solo e foram estabelecidas equações lineares de predição de erosão em função da declividade para materiais soltos e compactados. Estas relações foram diferentes daquelas obtidas anteriormente para terras agrícolas, sugerindo que ocorrem processos hidrossedimentológicos distintos nas áreas de construção de estradas.

Cao et al. (2015) conduziram experimento de precipitação simulada a fim de avaliar escoamento superficial e produção de sedimentos em parcelas de estradas não pavimentadas localizadas em uma pequena bacia experimental no Planalto de Loess, China, (área com precipitação de 562 mm.ano⁻¹). Foram realizadas simulações sob três gradientes de inclinação (10,5%, 17,6% e 26,8%) e cinco intensidades de precipitação (43,8, 68,4, 83,4, 128,4, e 142,2mm.h⁻¹) com duração de 30 minutos. Os resultados do estudo mostraram que a geração de escoamento nas superfícies de estradas é rápida, inferior a um minuto, com elevados coeficientes de escoamento superficial, com valor médio de 0,80. Verificaram também que as taxas de perda de solo diminuem com o tempo de escoamento em função da diminuição de disponibilidade de materiais soltos carregados facilmente pelo escoamento.

2.5. Estudos que quantificam a contribuição das estradas com sedimentos para as fontes hídricas

São apresentados nesta seção estudos que estimaram a contribuição das estradas para a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica, uma vez que estes apontam as estradas como uma fonte significativa de sedimentos em bacias hidrográficas de uso urbano e agrícolas.

Alguns dos estudos realizaram balanço de sedimentos com base em valores predeterminados para diferentes usos do solo, enquanto outros aplicaram a técnica “fingerprinting”, método que utiliza traçadores naturais (geoquímicos e radiotraçadores) para identificação de fontes de sedimentos em suspensão em bacias hidrográficas. Os resultados dos estudos sugerem que apesar de as estradas ocuparem de 1% a 5% das áreas das bacias, os valores de contribuição dessas unidades para a produção de sedimentos em bacias hidrográficas, foram relativamente elevados, variando de 15% (NELSON E BOOT, 2002) no caso de uma bacia com intensa urbanização e que apresenta diferentes usos do solo a 69% (TIECHER et al., 2014) para o caso de pequena bacia com uso predominantemente agrícola, mas que as estradas estão diretamente conectadas ao sistema de drenagem. Os resultados e conclusões obtidos nesses estudos são apresentados a seguir:

Nelson e Boot (2002) avaliaram como as atividades humanas alteram as taxas de erosão e os processos de transporte difuso em uma bacia com intensa urbanização e que apresenta diversos usos do solo. Desenvolveram um balanço de sedimentos para a Bacia de Issaquah Creek (144 km²) em Washington, EUA, a partir de valores publicados na literatura e validaram o estudo com mais de 50 anos de observações no exutório. Os resultados do estudo sugerem que a intensa urbanização elevou a produção de sedimentos de 24 Mg.km⁻².ano⁻¹ para 44 Mg.km⁻².ano⁻¹, onde as fontes de sedimentos finos correspondem a quase 2/3 e que a contribuição das estradas para a produção total de sedimentos foi de 15%, apesar de nessa bacia a superfície exposta de estradas corresponder a apenas 2% da área.

Gruszowski et al. (2003) realizaram estudo sobre identificação de fontes de sedimentos em uma bacia rural de 15 km² na Reino Unido, que apresenta produção de sedimentos de 423 Mg.km⁻².ano⁻¹. Aplicaram a técnica “fingerprinting” utilizando traçadores naturais (minerais magnéticos, elementos geoquímicos e radionuclídeos) dos sedimentos em suspensão e materiais de base representativos das fontes da bacia, de forma a estimar as contribuições relativas de fontes específicas. Os resultados do estudo sugerem que cerca de 30% da carga de sedimentos finos que chega aos rios foram derivados ou transportados pelas estradas sem pavimentação, e que estas foram identificadas como a segunda fonte de sedimentos na bacia. Os autores comentam que a elevada contribuição das estradas está associada a superfícies com solo exposto que apresentam baixa permeabilidade e, consequentemente, ao rápido estabelecimento de escoamento superficial nessas superfícies.

Mota et al. (2004) investigaram a importância das estradas não pavimentadas enquanto fontes de sedimentos em suspensão em uma bacia agrícola de 11,1 km², em zona de clima temperado na Austrália, onde as estradas ocupam aproximadamente 1% da área e as florestas

40%. Utilizaram traçadores geoquímicos e um modelo de análise multivariada para identificar as fontes dos sedimentos em suspensão de seis eventos de alta frequência de precipitação. Verificaram que as contribuições relativas por unidade de área de estradas com superfície em cascalho, terras cultivadas e terras agrupadas (que inclui as estradas não pavimentadas que não possuem superfície em cascalho) foram respectivamente 500, 100 e 10 vezes maiores que as contribuições de áreas de floresta. Estimam que em termos percentuais as estradas sem pavimentação contribuem com cargas de sedimentos variando de 18% a 39%. Seus resultados sugerem que as estradas não pavimentadas na área são a principal fonte de sedimentos em suspensão. Os autores destacam ainda, que se deve dar ênfase a essas estradas quando do planejamento de medidas de controle de sedimentos em bacias hidrográficas agrícolas.

Rijsdijk (2005) realizou balanço de sedimentos na Bacia do Konto (233 km²), localizada na Ilha de Java, Indonésia. Área montanhosa com solos de origem vulcânica, onde dois terços da área é constituída por floresta e cerca de 20% corresponde a terras de uso agrícola. Estimou que na escala de bacia as estradas, trilhas e áreas povoadas contribuem com quase 40% da produção de sedimentos, apesar de constituírem, cerca de 5% da área total.

Ramos-Scharrón e MacDonald (2007b) quantificaram a produção de sedimentos de diversas fontes (margens dos rios, encostas preservadas, taludes de corte e superfície de estradas não pavimentadas), estimaram o transporte de sedimentos em zona tropical no Caribe e realizaram balanço de sedimentos, com base em três anos de monitoramento e em funções empíricas desenvolvidas para a área. Os valores obtidos para as fontes e funções preditivas desenvolvidas no estudo foram incorporadas em um modelo baseado em SIG para prever produção de sedimentos na escala de bacia.

Os resultados do estudo sugerem que as estradas não pavimentadas correspondem a fonte de sedimentos dominante na área, sendo responsáveis por aumentar a produção de sedimentos na escala de bacia de 3 a 9 vezes em comparação com uma bacia na condição natural preservada. Os valores de erosão obtidos nos taludes de corte de estradas apesar de elevados, na escala de bacia não representaram uma contribuição significativa. Já as bacias de primeira ordem com estradas não pavimentadas apresentaram produção de sedimentos pelo menos cinco vezes maior do que bacias conservadas. Os autores comentam que a contribuição relativa de uma unidade de paisagem para a produção de sedimentos na escala de bacia depende da sua taxa de erosão, potencial de transporte de sedimentos da fonte e abundância espacial da fonte dentro de uma bacia hidrográfica.

Minella, Merten e Clarke (2009) em um estudo sobre identificação de fontes de sedimentos, realizado em uma pequena bacia agrícola (57 ha), em área montanhosa, no sul do

Brasil, onde as estradas e caminhos não pavimentados correspondem a 3% da área, verificaram que a contribuição relativa destes com cargas de sedimentos em suspensão para as fontes hídricas corresponde a 36 %. O estudo foi realizado a partir da análise de sedimentos em suspensão transportados na rede de drenagem, com aplicação da técnica “fingerprinting”, que utiliza traçadores e se baseia no princípio de que os sedimentos em suspensão mantêm algumas de suas propriedades geoquímicas adquiridas nas fontes. Os resultados mostraram ainda, que a contribuição das fontes foi variável no tempo e a proporção relativa da contribuição de cada fonte variou com o manejo e a cobertura do solo e com as obras de manutenção realizadas nas estradas.

Tiecher et al. (2014) avaliaram fontes de sedimentos em uma bacia hidrográfica rural (0,783 km²) de cabeceira no sul do Brasil, com predomínio de cultivos sob plantio direto que apresenta intensa e inadequada exploração dos recursos naturais. Utilizaram a técnica de fingerprinting para quantificação da contribuição relativa das estradas e das lavouras na produção global de sedimentos da bacia, área em que as estradas ocupam 1,5 % da superfície e que para manter a trafegabilidade destas, é adicionada frequentemente uma espessa camada (entre 10-20 cm) de material alóctone rochoso.

O estudo foi conduzido durante um período de dois anos, dividido em quatro períodos de avaliação, em que a contribuição relativa das estradas na produção de sedimentos variou de 42,7 a 69,2 %, e a contribuição das áreas de lavoura, de 30,8 a 57,3 %. Verificaram que o teor de K total no solo da estrada era muito maior que o no solo das lavouras. Isso ocorreu em razão de o material alóctone depositado nas estradas (arenito), possuir grande quantidade de minerais menos intemperizados como feldspatos potássicos (KAlSi₃O₈), que possuem altos teores de K. Além disso, como esse material não era tão intemperizado como o solo das lavouras, possuía também alto teor de bases como o Na e Mg, o que resultou nos teores mais elevados desses nutrientes na estrada do que na lavoura, sendo assim esses elementos foram identificados como traçadores que permitiram distinguir as duas fontes (estradas e lavouras).

Os autores avaliaram que as principais características das vias de acesso que favoreceram o processo erosivo na escala de bacia foram: estradas não pavimentadas, alocação na paisagem sem planejamento, ausência de estruturas de contenção da enxurrada e o fato de estas serem utilizadas como canal escoador do excesso de água provenientes das lavouras. Além destes aspectos, a contribuição predominante das estradas à produção global de sedimentos deveu-se também à composição inadequada do material utilizado para dar maior trafegabilidade (elevada quantidade de areia fina e baixa quantidade de argila), baixa

frequência de manutenção, ligação direta entre as estradas e a rede fluvial, e entrada de escoamento provenientes das lavouras.

Na Tabela 1 apresenta-se um resumo dos estudos que quantificaram a contribuição de estradas para as fontes hídricas através de balanço de sedimentos em bacias ou aplicação da técnica fingerprinting.

Tabela 1 – Resumo dos estudos que apresentaram contribuição de estradas para fontes hídricas em bacias hidrográficas

Área de estudo / Clima	Área de estrada	Contribuição de sedimentos	Método	Fonte
Bacia de Issaquah Creek (144 km ²) Washington, EUA / temperado	2%	15%	Balanço de sedimentos	Nelson e Boot (2002)
Bacia rural (15 km ²) no Reino Unido / temperado	-	30%	fingerprinting	Gruszowski et al. (2003)
Bacia agrícola (11,1 km ²), na Austrália / temperado	1%	18% a 39%	fingerprinting	Mota et al. (2004)
Bacia do Konto (233 km ²), Ilha de Java, Indonésia / tropical	5%	40%	Balanço de sedimentos	Rijsdijk (2005)
Ilha de St. Jhon, Ilhas virgens Americanas / subtropical seco	2%	3 a 9 superior a bacia na condição natural	Balanço de sedimentos	Ramos-Scharrón e MacDonald (2007b)
Bacia agrícola no sul do Brasil (57 ha) / subtropical	3%	36 %	fingerprinting	Minella, Merten e Clarke (2009)
Bacia agrícola no sul do Brasil (0,783 km ²) / subtropical	1,5 %	42,7 a 69,2 %	fingerprinting	Tiecher et al. (2014)

2.6. Modelos de erosão e suas aplicações a estradas

Nesta seção são apresentados modelos disponíveis na literatura, desenvolvidos para a estimativa de erosão bruta e produção de sedimentos e que tiveram sua aplicação avaliadas para estradas, alguns de caráter empírico, outros desenvolvidos a partir de bases físicas. Entre os modelos apresentados, além da Equação Universal de Perdas do Solo, são apresentados dois modelos de bases físicas KINEROS2 e WEPP, desenvolvidos inicialmente para estimativa de produção de sedimentos em áreas agrícolas e bacias hidrográficas e que tiveram sua aplicação avaliada em parcelas de estradas não pavimentadas nos estudos de Ziegler, Giambelluca e Sutherland (2001b), Machado et al. (2003) e Foltz, Copeland e Elliot (2009), além dos modelos empíricos desenvolvidos para estradas WARSEM e SEDMODEL (DUBÉ, MEGAHAN e MCCALMON, 2004), STJEROS (RAMOS-SCHARRÓN e MACDONALD, 2005) e ROADMOD (ANDERSON, 1994).

2.6.1. USLE e MUSLE

A Equação Universal de Perdas do Solo (*Universal Soil Loss Equation*- USLE) foi desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978) e estabelecida com base em dados estudados em mais de 10.000 parcelas com distintas características de clima, solo, relevo e cultivo, de dimensões reduzidas, e submetidas a processos de erosão hídrica superficial laminar e em sulcos. Portanto, este é um modelo para estimativa de erosão bruta de solo.

Entre os modelos de estimativa de erosão de origem hídrica este é o mais conhecido. É um modelo empírico e seu equacionamento é bastante didático para compreensão dos fatores envolvidos no processo erosivo de encostas. A Equação Universal de Perdas do Solo (1) é expressa por:

$$\varepsilon = R.K.L.S.C.P \quad (1)$$

Em que: ε = taxa de erosão bruta (Mg.ha^{-1}); R é o fator de erosividade da chuva em ($\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$); K o fator de erodibilidade do solo em ($\text{Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$); os demais fatores são adimensionais. Há dois fatores topográficos: L, que representa o comprimento de rampa e S que representa a declividade. O fator C representa a vegetação e usos do solo e o fator P representa as práticas conservacionistas. A obtenção dos parâmetros dessa equação é descrita com maiores detalhes em Haan, Barfield e Hayes (1994).

A USLE sofreu várias modificações levando em conta suas limitações, dando origem a modelos como a MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) desenvolvida por (Williams, 1975), em que o índice de erosividade da chuva é substituído por informações do hidrograma produzido por uma chuva isolada, originando como resultado o aporte de sedimentos no exutório da bacia por eventos pluviométricos, e assim permite estimar a carga de sedimentos diretamente na escala de bacias.

Sheridan et al. (2006) aplicaram a MUSLE para investigar o impacto do trânsito e do teor de umidade sobre o escoamento superficial em estradas florestais não pavimentadas em uma área onde o tráfego não é permitido durante eventos de escoamento superficial. Monitoraram continuamente precipitação, escoamento superficial, umidade do solo, cargas de sedimentos e trânsito em seções de estradas submetidas a baixo e alto nível de tráfego (passagem de nove ou mais caminhões previamente à ocorrência do evento) em condições variáveis de umidade dos solo. Os dados foram utilizados para modelagem com a MUSLE de

forma a avaliar a variabilidade de valores de erodibilidade (Fator K) em função dessas variações de umidade e trânsito.

Os autores verificaram baixa variabilidade de valores de K ao se comparar o solo na condição de elevada e de baixa umidade. Já relacionado ao tráfego, observaram que o elevado trânsito de caminhões implicou em uma superfície de solo quatro vezes mais erodível em comparação à condição de baixo trânsito. Concluíram que em estradas florestais bem conservadas com superfície em cascalho, o nível de tráfego de caminhões afeta as descargas de água e sedimentos, enquanto o teor de umidade da superfície possui pouca influência.

2.6.2. Modelos WEPP e KINEROS2

O WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) é um modelo para estimativa de erosão em encostas e bacias hidrográficas, baseado em processos físicos, de simulação contínua e parâmetros distribuídos que incluem precipitação e intensidade, textura e umidade do solo, e ainda parâmetros relacionados à cobertura vegetal e a fisiografia da área. Para aplicação em encostas é dividido em componentes conceituais de: geração climática, irrigação, hidrologia, solos, decomposição residual, hidráulica, fluxo superficial e erosão. É capaz de simular destacamento, deposição e transporte de sedimentos (FLANAGAN e NEARING, 1995).

O componente de erosão do modelo WEPP utiliza a equação permanente de continuidade de sedimento como base dos cálculos de erosão. A erosão do solo é dividida em erosão entre sulcos e erosão em sulcos. A primeira causada pelo impacto das gotas de chuva sobre o solo, e a segunda devido ao excesso da energia cisalhante do escoamento sobre a superfície.

O modelo WEPP foi avaliado por Machado et al. (2003) para estimativa de escoamento e perdas de solo em estradas florestais em Agudos (SP), visando o desenvolvimento de um modelo brasileiro de predição de erosão em estradas florestais. Compararam resultados obtidos na modelagem com valores observados em eventos pluviométricos reais, em segmentos de 20 m e 40 m de comprimento e declividades de 1% e 7%. Os valores de escoamento superficial preditos pelo modelo foram em média 166,58% superiores àqueles observados. Na estimativa de perdas de solo nos segmentos com menores declividades, o modelo não apresentou resposta satisfatória, subestimando os valores. Entretanto, os resultados foram satisfatórios em segmentos com menor comprimento de rampa (20 m) e com maior declividade (7%) com valores 6,73% superiores.

Foltz, Copeland e Elliot (2009) avaliaram a aplicação do modelo WEPP em estradas florestais em Idaho (EUA). Realizaram estimativas de Ks (Condutividade hidráulica saturada) e Ki (coeficiente de erodibilidade entressulcos) com o modelo e compararam com resultados obtidos diretamente em campo a partir de experimentos com simulação de precipitação. Os dois métodos de cálculo estimaram tendências similares de condutividade hidráulica, no entanto, os valores previstos pelo WEPP foram menores. Já na estimativa dos valores de coeficiente de erodibilidade entressulcos, não foram observadas diferenças significativas entre os resultados do modelo e aqueles calculados diretamente.

O KINEROS2 (*Kinematic Runoff and Erosion Model*) é um modelo orientado a evento, de base física, que descreve os processos de infiltração, escoamento superficial e erosão para pequenas bacias agrícolas e urbanas. Descreve a bacia como uma rede de planos e canais e utiliza a técnica das diferenças finitas na solução de equações diferenciais que descrevem o fluxo superficial, a erosão e transporte de sedimentos. O modelo quando parametrizado é capaz de simular concentração de sedimentos, descarga total e transporte de sedimentos (WOOLHISER, SMITH e GOODRICH, 1990).

No estudo de Ziegler, Giambelluca e Sutherland (2001b), o modelo KINEROS2 foi aplicado na estimativa de produção de sedimentos e escoamento superficial em estradas não pavimentadas em áreas montanhosas da Tailândia, na pequena escala de parcelas (aproximadamente 4 m²), variando declividades e condições de umidade do solo. O modelo foi calibrado e validado com base em dados gerados em campo em um experimento com simulação de precipitação. Os autores observaram que, após 15 a 20 minutos de escoamento em um evento, ocorre um declínio no transporte de sedimentos, uma vez que o material solto na superfície do solo se esgota. O modelo não conseguiu prever com precisão essas mudanças na produção e concentração de sedimentos em função do tempo, dado que a erodibilidade na superfície de estradas é dinâmica, e esta varia em função da disponibilidade de material solto na superfície. Entretanto, ao variarem os parâmetros de erosão do modelo em resposta a variação da disponibilidade de sedimentos, a precisão do modelo melhorou 30-40%. Por outro lado, na predição do sedimento total produzido o modelo apresentou pequenos erros.

2.6.3. Modelos WARSEM e SEDMODEL

O WARSEM (*Washington Road Surface Erosion Model*) é um modelo empírico utilizado para estimar a longo prazo a taxa média de sedimentos provenientes de estradas, que são transportados à rede de drenagem. Foi desenvolvido pela Departamento de Recursos

Naturais do Estado de Washington, EUA, e integrado a um modelo de Sistema de Informações Geográficas (SIG), o SEDMODEL (*Road Sediment Delivery Model*) (DUBÉ, MEGAHAN e MCCALMON, 2004).

O modelo WARSEM tem aplicação em bacias hidrográficas de grande escala, é espacialmente distribuído por segmentos de estrada, em que a produção de sedimentos é determinada a partir de quatro componentes: superfície da estrada, talude de corte, talude de aterro e drenagem lateral superficial. As equações utilizadas no modelo são baseadas em relações empíricas entre fatores que tem relação com a erosão das estradas, tais como: uso da estrada, material de origem, pavimentação, declividade da superfície, cobertura vegetal dos taludes de corte, e distância para rede de drenagem.

As premissas reconhecidas do modelo incluem que: segmentos de estrada que estejam a mais de 60 metros em relação à rede de drenagem não transportam sedimentos; a contribuição dos taludes de aterro é insignificante; a drenagem lateral superficial e a superfície da estrada respondem de forma semelhante (DUBÉ, MEGAHAN e MCCALMON, 2004).

Na formulação do modelo, a produção de sedimentos a partir da superfície da estrada e drenagem lateral superficial foram combinadas em uma unidade denominada de sedimento de superfície, de forma que, o total de sedimentos transportado a partir de cada segmento rodoviário foi baseado em dois componentes: superfície rodoviária e talude de corte, conforme a equação (2):

$$E = (R_s + C_s) \cdot A_G \quad (2)$$

Em que: E é total de sedimento transportado até a rede de drenagem natural da bacia por cada segmento de estrada, em Mg.ano^{-1} , R_s é o sedimento da superfície da estrada e da drenagem lateral superficial transportado para a rede de drenagem da bacia por cada segmento de estrada, em Mg.ano^{-1} , C_s é o sedimento do talude de corte transportado para a rede de drenagem da bacia por cada segmento de estrada, em Mg.ano^{-1} e A_G é o fator de idade da estrada, adimensional.

O sedimento de superfície (R_s), obtido a partir da equação (3) varia com a taxa de erosão geológica, representada pelo fator geológico, G (adimensional); com a pavimentação da superfície, dada pelo fator de superfície, S_f (adimensional); com o trânsito, dado pelo fator de tráfego, T (adimensional); com as dimensões da estrada, dadas pelo comprimento, L (pés) e largura incluindo a drenagem lateral, W (pés); com a declividade da estrada, dada pelo fator

de declividade, S (adimensional); com a precipitação, uma vez que E_r é a taxa de erosão ($\text{ton} \cdot \text{acre}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) baseada em um fator de precipitação, e com a capacidade de transporte, representado pelo fator de transporte difuso de sedimentos, SDR_{R-S} (adimensional).

$$R_s = G \times S_f \times T \times L \times W \times S \times E_r \times SDR_{R-S} \quad (3)$$

De forma análoga, pela equação (4) o sedimento do talude de corte (C_s) é quantificado em função do fator geológico, G (adimensional); do fator de cobertura do talude de corte, C_f (adimensional), do comprimento do segmento de estrada, L (pés) e altura do talude de corte (H), além dos fatores E_r e SDR_{R-S} anteriormente definidos.

$$C_s = G \times C_f \times L \times H \times E_r \times SDR_{R-S} \quad (4)$$

No modelo WARSEM, o SDR é uma função da distância entre a saída de escoamento na estrada e um rio. Na concepção do fator de transporte difuso (SDR), baseado no estudo de Megahan e Ketcheson (1996), o modelo admite que os segmentos com longas distâncias em relação à rede de drenagem tendem a ter uma baixa percentagem de produção de sedimentos, desde que a maioria do sedimento da estrada seja retido pela vegetação e não alcance a rede de drenagem. O fator de transporte de cada segmento de estrada pode ser estimado com base na distância do ponto médio da drenagem mais próxima para o ponto médio do segmento de estrada. Dessa forma, a um segmento de estrada que cruza um rio atribui-se fator de transporte de 100%. Segmentos de estrada com 30 e 60 m distante da drenagem, são atribuídos fatores de transporte de 35% e 10%, respectivamente. Estradas paralelas aos córregos contribuem indiretamente para o transporte de sedimentos aos fluxos. Segmentos de estrada localizados a mais de 60 m não transportam sedimentos para a rede de fluxo, uma vez que são retidos pela vegetação.

De acordo com Fu, Newham e Ramos-Scharrón (2010), o modelo WARSEM pode ser visto como uma modificação da Equação Universal de Perdas do Solo, porque é moldado dentro de uma estrutura de modelo semelhante a esta, entretanto, com modificação na abordagem para calcular os fatores do modelo e com a inclusão de fatores adicionais, especialmente concebidos para estimar a erosão da superfície de estradas.

Akay et al. (2008) avaliaram produção de sedimentos de uma rede rodoviária em uma bacia hidrográfica na Turquia, usando o modelo de previsão de sedimentos WARSEM. Técnicas de SIG foram utilizadas para fornecer dados necessários, tais como topografia, rios, estradas, geologia, e precipitação média. Seus resultados indicaram que o modelo integrado

com técnicas de GIS pode auxiliar gestores de estradas na estimativa da produção de sedimentos de forma rápida e eficaz. Os autores destacam que o modelo é capaz de identificar os segmentos de estrada com elevada produção de sedimentos potencial e que técnicas para reduzir a produção de sedimentos podem ser avaliadas através de uma análise de sensibilidade dos fatores de erosão na estrada. No entanto, destacam que o modelo possui limitações em prever a produção de sedimentos, pois este assume que todas as estradas estão em declive e tende a superestimar a produção de sedimentos quando os dados das camadas de SIG não são precisos e quando as informações das estradas não estão completas.

Fu, Newham e Field (2009) aplicaram o modelo WARSEM em duas bacias hidrográficas na Austrália, com características semelhantes às aquelas onde o modelo foi desenvolvido. As bacias são dominadas por florestas de eucalipto nativas com litologias sedimentares, áreas de drenagem de 1500 e 2100 km², e precipitação anual de 700 e 1100 mm. Aproximadamente 89% e 97% das estradas tem superfície em cascalho com declividades entre 10° e 30°. Verificaram que cerca de 9% e 6% do sedimento produzido pelas estradas é transportado para os rios. As simulações com o modelo mostraram ainda que as estradas que contribuem com sedimentos para a rede de drenagem, correspondem a 16% e 14% dos comprimentos totais de estrada nas bacias e que metade da carga de sedimentos transportada para os rios provem de 4% do total de estradas. Verificaram também que os resultados do modelo tendem a superestimar as taxas de erosão da estrada. Ao aplicar cenários com diferentes níveis de tráfego verificaram que a diminuição dos níveis de tráfego diminui em 1/3 a carga de sedimentos transportada.

2.6.4. Modelos STJEROS e ROADMOD

Ramos-Scharrón e MacDonald (2005) desenvolveram um modelo empírico preditivo de erosão para estradas (STJEROS), a partir de medidas de taxas de erosão realizadas na escala de segmento de estrada, com base no monitoramento de 21 segmentos de estradas de terra na ilha de St. John (Ilhas Virgens Americanas), área tropical localizada no Caribe que se caracteriza por relevo acidentado (mais de 80% das declividades são > 30%) e a litologia é dominada por rochas provenientes de fluxos vulcânicos.

Avaliaram a importância da inclinação, precipitação, área de contribuição, tráfego, e regularização para a produção de sedimentos na estrada. Para o desenvolvimento da modelagem, verificaram que as relações com declividade apresentaram valores de coeficiente de determinação R² mais elevados do que aquelas com área de superfície × declividade do

segmento. E que as relações que utilizavam erosividade apresentavam valores de R^2 ligeiramente mais baixos do que as com precipitação total. Verificaram ainda que as estradas que foram regularizadas pelo menos uma vez a cada dois anos tinham taxas de sedimento significativamente mais elevadas do que as estradas não regularizadas.

A análise resultou em duas equações empíricas para prever a produção de sedimentos para estradas regularizadas (5) e não regularizadas (6), que são:

$$Er_g = -0,432 + 4,73 \cdot (S^{1,5} \cdot P) \quad (5)$$

$$Er_u = -0,432 + 1,88 \cdot (S^{1,5} \cdot P) \quad (6)$$

Em que: Er_g é a produção de sedimentos em kg.m^{-2} para estradas regularizadas, Er_u é a produção de sedimentos em kg.m^{-2} para estradas não regularizadas, S é a inclinação do segmento de estrada em m.m^{-1} , e P é a precipitação em cm. Esta formulação do modelo indica explicitamente que as estradas regularizadas da área, para uma dada declividade produzem 2,5 vezes mais sedimentos por unidade de precipitação que uma estrada não regularizada.

Um estudo anterior na mesma área desenvolveu um modelo empírico, denominado ROADMOD, para a predição de erosão para as estradas na ilha de St John (ANDERSON, 1994; ANDERSON e MACDONALD, 1998). A equação (7) do modelo é apresentada a seguir:

$$E = 0,00057 \cdot A \cdot S + 0,034 \quad (7)$$

Em que: E é a média anual de erosão na superfície de estradas, em kg.m^{-2} , A é a área de superfície em m^2 e S é a declividade do segmento de estrada em m.m^{-1} .

Ramos-Scharrón e MacDonald (2005) aplicaram também o modelo ROADMOD aos 21 segmentos de estrada monitorados na Ilha de St. John. Os resultados do modelo indicaram uma taxa de produção anual média de sedimentos de $20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, ou seja, cerca de duas vezes o valor médio de $9,4 \text{ kg m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, obtido a partir das observações em campo.

2.6.5. Outros estudos envolvendo modelagem de erosão em estradas não pavimentadas

Griebeller (2002) desenvolveu um modelo para determinação do espaçamento entre desaguadouros e o dimensionamento do canal e de bacias de acumulação, em estradas não pavimentadas. O modelo desenvolvido tem como dados de entrada: equação de intensidade,

duração e frequência de precipitação, período de retorno e as condições da estrada, da área externa a esta que contribui para o escoamento e do canal de drenagem. As simulações realizadas mostraram ser este modelo bastante sensível aos parâmetros de entrada, apresentando máxima sensibilidade à declividade do canal e mínima ao período de retorno.

Shi et al. (2008) avaliaram a relação entre erosão de solo e distância de estradas em áreas do Sul da China em quatro períodos 1958, 1975, 1982 e 2000, através da interpretação de mapas de erosão utilizando sensoriamento remoto e tecnologia GIS. Verificaram que a área de erosão ao lado de rodovias, em todos os períodos analisados, possuía elevadas taxas e eram relativamente semelhantes entre si. Concluíram que a atividade humana associada à construção de estradas está intimamente relacionada à erosão do solo nessas áreas.

Ramos-Scharrón e MacDonald (2007a) monitoraram escoamento e sedimentos em suspensão em um segmento de estrada durante eventos de chuva natural em bacia, em área tropical nas Ilhas Virgens Americanas, no Caribe. Os dados obtidos em campo foram utilizados para calibrar e testar dois modelos de escoamento, o primeiro utiliza o método do hidrograma unitário e calcula as taxas de infiltração com a equação de Green-Ampt e o segundo utilizou uma abordagem de onda cinemática em uma versão simplificada da equação de St Venant também combinada com a Equação de Green-Ampt. Ambos os modelos foram acoplados a curvas-chave de sedimentos para predizer produção de sedimentos.

Sajjan, Gyasi-Agyei e Sharma (2013) apresentaram aplicação de um modelo de infiltração e escoamento superficial, a partir das equações de Green-Ampt e da continuidade de Saint-Venant, para predizer taxas de condutividade hidráulica saturada com base em resultados de escoamento superficial de dez eventos naturais em doze parcelas experimentais adjacentes instaladas em talude rodoviário, em área experimental na Austrália. O talude apresentava inclinação de 55% e as parcelas tinham diferentes porcentagens de cobertura vegetal em grama (50% e 100%) e também com solo exposto (0% de grama). Os valores de condutividade hidráulica saturada para 0, 50 e 100% de cobertura vegetal foram, respectivamente, 0,1, 1,19 e 2,56 mm h⁻¹. O modelo conseguiu simular o escoamento superficial com desempenho aceitável, apresentando coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe superior a 0,50 em mais de 68 % dos casos e os melhores resultados foram obtidos nas parcelas com solo exposto. Os resultados foram os esperados com uma diminuição dos volumes de escoamento superficial em função do aumento de porcentagem de cobertura vegetal.

2.7. Tecnologias para controle de erosão em estradas e taludes marginais

Navarro-Hevia (2011) destaca que a melhor medida para evitar a erosão de solo é uma adequada cobertura vegetal, uma vez que esta proporciona proteção do solo contra o impacto das gotas de chuva; reduz a quantidade e velocidade do escoamento superficial, e consequentemente, a capacidade erosiva; os talos e troncos sobre o solo capturam sedimentos e as raízes armam o terreno aumentando sua estabilidade e resistência ao arraste. Negishi et al. (2006) também destacam que a recuperação natural de superfícies de taludes em estradas deve iniciar com a revegetação, e que esta alternativa conduz frequentemente a uma redução do escoamento superficial e da erosão de superfície. Nesta seção são apresentados alguns estudos que avaliaram técnicas de bioengenharia de solos para o controle de sedimentos relacionados à infraestrutura viária:

Navarro (2002) em estudo sobre controle de erosão em obras viárias na região de Palência (Espanha), avaliou durante dois anos tratamentos para proteção de taludes de ferrovias. Os quatro tratamentos de teste foram: o plantio de arbustos, hidrossemeadura, hidrossemeadura coberta com manta orgânica de côco e hidrossemeadura coberta com manta de palha. Seus resultados mostraram que as mantas tiveram um excelente desempenho no controle da erosão (99%), a hidrossemeadura produziu bons resultados (80%), enquanto o plantio de arbustos aumentou a perda de solo em relação ao controle (20% a mais) nos primeiros anos devido ao aumento da disponibilidade de sedimentos soltos gerados no plantio, entretanto, com o passar do tempo, essa disponibilidade diminui conduzindo a taxas mais baixas de produção de sedimentos.

Cao et al. (2006) avaliaram a utilização de grama na superfície de estradas não pavimentadas em áreas rurais da China. Verificaram custo de construção de estradas com superfície em grama 71,65% menor que o das estradas em cascalho, e que as despesas de manutenção eram em média 60,97% menores que de estradas com superfície em solo exposto. Os resultados do estudo sugerem que as estradas com superfície em grama podem preencher a lacuna entre as estradas pavimentadas e não pavimentadas em áreas com terrenos em declive e com baixo volume de tráfego, como por exemplo, áreas rurais, reservas naturais e parques, e, assim, minimizar o nível de erosão do solo e danos a paisagem.

Silva (2009) avaliou a eficiência de três diferentes métodos de proteção de talude de estradas rurais não-pavimentadas em área rural no estado de São Paulo, contra o desenvolvimento de processos erosivos. Os métodos de proteção investigados no estudo foram: plantio de mudas de grama; utilização de serrapilheira e; envelopamento com um solo

local com propriedades mais resistentes aos processos erosivos. O método utilizando a serrapilheira mostrou-se mais eficiente na proteção do solo, que em relação ao solo desprotegido, apresentou um percentual de redução de perda de solo de 90%, enquanto que a grama e o envelopamento de solo apresentaram redução de 80% e 65%, respectivamente.

Bochet, Garcia-Fayos e Tormo (2010) em estudo conduzido em Utiel-Requena, área semiárida Mediterrânea, no leste da Espanha, que apresenta precipitação entre 399-419 mm.ano⁻¹, avaliaram tecnologias para proteção de taludes rodoviários. Analisaram erosão e o desempenho de coberturas vegetais, técnicas de hidrossemeadura com espécies nativas e comerciais em taludes de estradas, e monitoraram a germinação e penetração de raízes. Em grupos de taludes com inclinação > 45° e < 45°, analisaram textura do solo, matéria orgânica, nitrogênio total, disponibilidade de fósforo, compactação do solo, dinâmica de umidade e capacidade de armazenamento de água no solo. Os resultados do estudo mostraram que a vegetação é quase ausente (inferior a 10%) em segmentos com ângulos superiores a 45°, relacionados a movimentos de massa e remoção de sementes por escoamento e gravidade; nos taludes com inclinação inferior a 45° o tipo de inclinação e em menor extensão a orientação do declive, tinham forte influência sobre o estabelecimento da cobertura vegetal e erosão; também a compactação do solo foi fator limitante no desenvolvimento da vegetação.

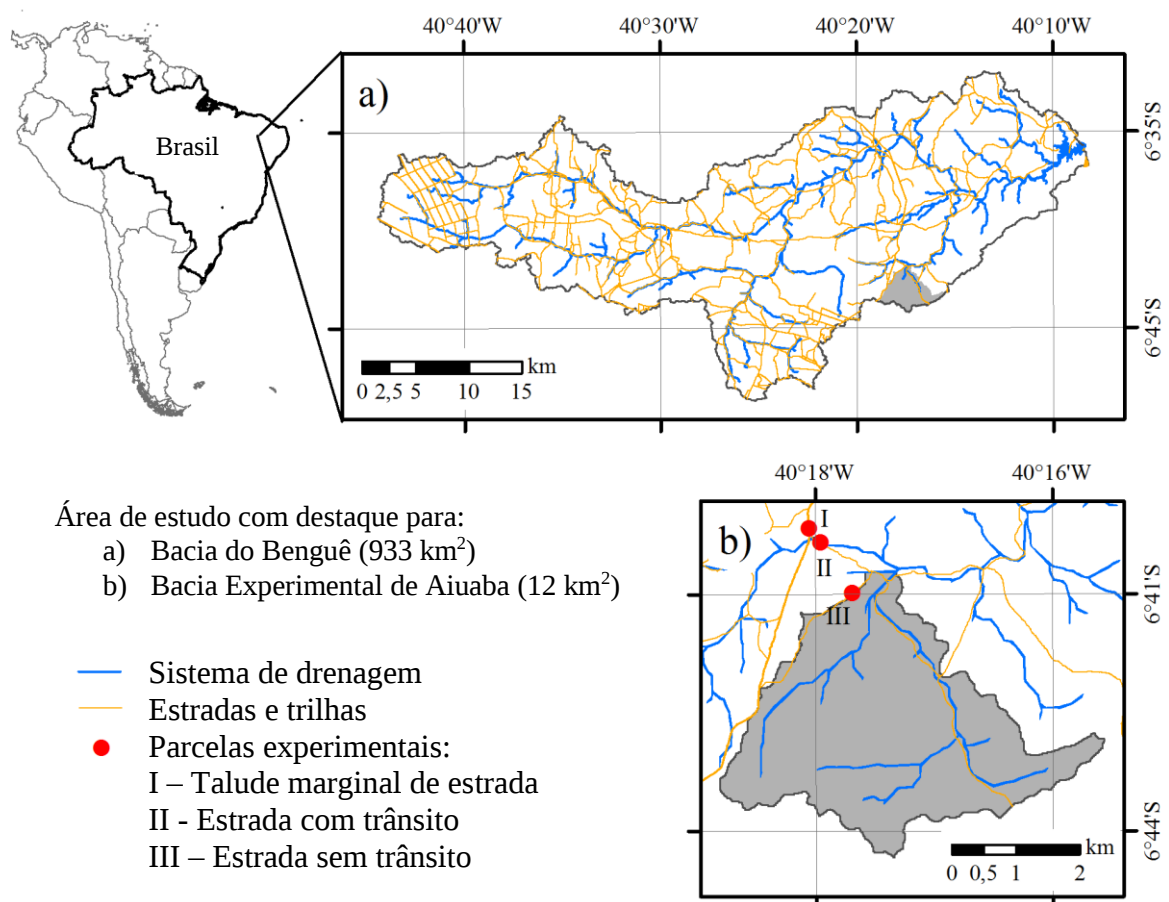
Os resultados do estudo indicaram que o ângulo e tipo de inclinação são os principais fatores que controlam a erosão do solo e a colonização de plantas sobre taludes de estradas em áreas semiáridas. Os autores avaliam que estratégias de restauração com base na melhoria das propriedades do solo e na seleção adequada de espécies nativas, são capazes de superar as difíceis condições hidrológicas e estruturais do solo em regiões semiáridas e sugerem que o uso de espécies nativas deve ser encorajado em projetos de restauração de taludes de estradas, tendo como vantagens ecológicas a prevenção da erosão local e a conservação da biodiversidade.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

Para o desenvolvimento desse estudo foram selecionados segmentos de estradas que dão acesso à Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), representativos das vias rurais da região semiárida do Brasil. A BEA (12 km²) está inserida na bacia hidrográfica do reservatório Benguê (933 km²), dentro do Polígono das Secas e inseridas na bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe (24.600 Km²), no Ceará. Na Figura 1, apresenta-se a localização da área de estudo, com destaque para as parcelas experimentais desse estudo.

Figura 1 – Localização da área de estudo



A BEA situa-se integralmente na Estação Ecológica (ESEC) de Aiuaba, a maior Unidade de Conservação Federal do bioma Caatinga, integralmente preservada desde 1978 e monitorada pelo Grupo de Pesquisa Hidrossedimentológica do Semiárido

(www.hidrosed.ufc.br) desde 2003. Aproximadamente 90% da precipitação anual ocorre nos meses de janeiro a maio, com mais de 60% (em média) de precipitação anual restrita aos meses de fevereiro e março, a precipitação média é de 550 mm ano⁻¹, com coeficiente de variação anual de 30%. A evaporação potencial é de 2550 mm.ano⁻¹ e o coeficiente de aridez é de 0,26, caracterizando a região como uma zona semiárida. A litologia predominante é o complexo cristalino com formação metasedimentar. Os solos da região são geralmente rasos e provenientes de substrato cristalino. Os tipos pedológicos de solos predominantes são os Luvisolos, Latossolos e Argissolos (DE ARAÚJO e GONZALEZ PIEDRA, 2009; PINHEIRO, COSTA e DE ARAÚJO, 2013; MEDEIROS et al. 2014).

De acordo com Medeiros et al. (2014), os coeficientes de escoamento superficial na área são baixos, entre 5 e 12%, com regiões que apresentam coeficientes inferiores a 3%. Essa característica hidrológica resulta em baixa capacidade de transporte de sedimentos, com 60% do sedimento erodido sendo depositado na paisagem antes de atingir o exutório. Além disso, a existência de densa rede de reservatórios superficiais limita a propagação de sedimentos e a Razão de Aporte de Sedimentos decresce com a escala. Araújo e Gonzalez Piedra (2009) verificaram produção de sedimentos na BEA de 2,4 Mg.km⁻².ano⁻¹ (0,024 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹) e na Bacia do Benguê a produção de sedimentos média avaliada por Medeiros et al. (2014) é de 17 Mg.km⁻².ano⁻¹ (0,17 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹).

Na bacia hidrográfica do reservatório Benguê, as estradas não pavimentadas possuem uma extensão aproximada de 1300 km, o que corresponde a uma densidade de 1,4 km.km⁻² e ocupam 0,7 % da área total da bacia.

Foram identificados três padrões de vias que possuem superfície com solo exposto e podem ser potenciais fontes de sedimentos:

- Vias principais – interligam a sede do município de Aiuaba a distritos da área rural, são estradas com largura média de 12 metros e possuem o maior volume de tráfego dentro da bacia (Figura 2);
- Vias secundárias – interligam os pequenos povoados e habitações da área rural, são estradas com largura média de 5 metros e possuem menor volume de tráfego em comparação às principais;
- Vias abandonadas – estradas que foram abertas em meio à vegetação natural, localizadas dentro dos limites da Estação Ecológica de Aiuaba e que atualmente se encontram abandonadas, onde não há trânsito de veículos.

Figura 2 – Típica estrada não pavimentada na Bacia Hidrográfica do Benguê. Via que interliga as comunidades rurais Barra e Cedro (Município de Aiuaba)



Essas estradas não possuem dispositivos de drenagem, e durante eventos pluviométricos se transformam em canais escoadouros com drenagem irregular em sua superfície, facilitando o transporte de água e sedimentos, conforme visualizado na Figura 3. Na imagem, observa-se que as áreas de trilha de roda, que são geradas pelo trânsito de veículos, durante eventos chuva-deflúvio funcionam como caminhos preferenciais de fluxo para o escoamento superficial, contribuindo também para a deterioração da superfície do pavimento. Além das margens que possuem um padrão de escoamento também irregular e onde há uma maior disponibilidade de material solto gerados pelo trânsito de veículos, geram elevadas cargas de sedimentos e quando em conexão com rede de drenagem natural da bacia podem impactar as fontes hídricas.

Além disso, ao fim da quadra chuvosa as estradas apresentam uma série de defeitos o que dificulta a trafegabilidade de veículos, de forma que alguns segmentos passam por um processo de regularização mecânica (Figura 4) com uma frequência anual, que ocorrem geralmente no fim do período de chuvas, que se concentra no primeiro semestre do ano. Os tipos de defeitos identificados, segundo classificação estabelecida para estradas não pavimentadas, proposta por Eaton, Gerard e Cate (1987) foram: atoleiros, panelas, segregação de agregados, afundamentos de trilha de roda, ravinas, afundamentos e erosões laterais devido à ausência de sistema de drenagem.

Figura 3 – Estrada não pavimentada na Bacia Hidrográfica do Benguê, via que interliga as comunidades rurais Barra e Cedro no município de Aiuaba, durante evento pluviométrico de grande magnitude (Janeiro/2016)



Figura 4 – Manutenção de superfície de estrada não pavimentada na Bacia do Benguê, via que interliga as comunidades rurais Gameleira e Aroeira



3.2. Monitoramento

O monitoramento de segmentos de estradas foi realizado em um período de dois anos (2013 e 2014), sob condições naturais. Foram instaladas em setembro de 2012 duas parcelas experimentais para estimativa da produção de sedimentos de estradas vicinais da área de estudo. Um segmento está em uma estrada abandonada (P1), sem trânsito de veículos, com:

declividade $0,04 \text{ m.m}^{-1}$, área de contribuição de 250 m^2 , largura média de $2,5 \text{ m}$ e 100 m de comprimento de rampa, localizada no divisor de águas da BEA (coordenadas UTM 356.925W, 9.259.300S). O segundo segmento foi instalado em uma estrada secundária (P2) em que há trânsito de veículos, via que apresenta baixo volume de tráfego, inferior a $200 \text{ veículos.dia}^{-1}$, suas características geométricas são: declividade $0,024 \text{ m.m}^{-1}$, área de contribuição de 490 m^2 , largura média de 5 m e 100 m de comprimento de rampa, (coordenadas UTM 356.336W, 9.260.036S). Foram monitoradas também duas parcelas em talude rodoviário localizado em uma estrada principal (que interliga a sede do município à zona rural), sendo a primeira com presença de vegetação natural (P3) e a segunda com solo exposto (P4), ambas com declividade de $0,58 \text{ m.m}^{-1}$, largura de 1 m e área de $6,5 \text{ m}^2$.

As parcelas implantadas não foram isoladas por barreiras físicas, de forma a evitar influência de bordas nos processos de escoamento superficial e de transporte de sedimentos. A área de contribuição de cada parcela foi estimada por meio de levantamentos topográficos, destes segmentos, realizados com estação total e GPS geodésico. Procedimento semelhante foi utilizado, por exemplo, por Navarro-Hevia (2002), Ramos-Scharrón e MacDonald, (2005), Rijdsdijk, Bruijnzeel e Sutoto (2007), Negishi et al. (2008) e Ramos-Scharrón (2010).

A produção de sedimentos das vias (P1 e P2) foi avaliada em cada evento pluviométrico, através da quantificação de volumes escoados, acumulados em reservatórios instalados em pontos de descargas para onde o fluxo da plataforma da via era direcionado. Na porção mais baixa de cada parcela, seguindo a linha de drenagem do segmento da estrada, foi instalada uma calha confeccionada em concreto interligada a um reservatório de polietileno com capacidade de acumulação de 500 litros , este reservatório com oito partidores de escoamento foi interligado a um segundo reservatório com igual capacidade, ambos utilizados para acumulação dos volumes escoados e retenção de sedimentos transportados.

Na Figura 5 apresenta-se o segmento de estrada abandonada (P1) sem trânsito de veículos e respectivos reservatórios de acumulação de escoamento e sedimentos. Na superfície da estrada sem trânsito, apesar de abandonada, observa-se pouca recomposição de vegetação, demonstrando a susceptibilidade dos solos do semiárido à desertificação. Wischmeier e Smith (1978) destacam que a erosão hídrica em áreas semiáridas é agravada pela baixa umidade e secas periódicas que reduzem o período em que o crescimento das plantas proporciona uma boa cobertura do solo.

Além disso, Ávila e Medeiros (2014) identificaram na região áreas classificadas como de baixa susceptibilidade à erosão, mas que apresentam processos erosivos avançados, o que se deve ao uso do solo antes da implantação da Estação Ecológica de Aiuaba. Esse fato

demonstra a elevada susceptibilidade da Caatinga aos processos erosivos, visto que após 34 anos de pousio, a vegetação ainda não conseguiu se recuperar totalmente em algumas áreas e existem regiões com processos erosivos intensos.

Figura 5 – Segmento monitorado da estrada abandonada (a) e vista de jusante para montante (b) dos reservatórios para acumulação do volume escoado durante eventos de precipitação



Nos segmentos monitorados no talude viário (P3 e P4), foram instaladas armadilhas para a captura de sedimentos, construídas em chapa de aço de acordo com o modelo de Gerlach (1967) com largura de 0,10 m e profundidade de 0,08 m, entretanto foram confeccionadas com modificação no comprimento de 0,50 m para 1 m, de forma a captar uma maior área de contribuição do talude. Estas armadilhas instaladas próximo a base do talude, também foram conectadas a reservatórios de polietileno com capacidade de 250 litros, para acumulação do escoamento superficial do talude, depois de cada evento pluviométrico.

Na Figura 6 são apresentadas as parcelas com e sem vegetação, monitoradas no talude viário. Observa-se que a compactação do solo na parte superior do talude, mais próxima à plataforma da via, dificulta o desenvolvimento natural das espécies vegetais. Quanto à vegetação do talude, destaca-se a presença de extrato herbáceo, arbustivo e subarbustivo. As espécies predominantes são marmeleiro (*Croton sonderianus*) e mofumbo (*Combretum leprosum*) de caráter arbustivo, velame (*Croton heliotropiifolius*) de caráter subarbustivo, há ainda em menor proporção a presença de salsa (*Ipomoea brasiliensis*), jitirana (*Ipomoea*

sericophylla) e alfazema brava (*Hyptis suaveolens* L. *Point*), além de algumas gramíneas (sp). Estas espécies vegetais são naturais e próprias do Caatinga, bioma que apresenta espécies espinhosas, xerofíticas e caducifólias, e na área de estudo se apresentam com árvores e arbustos de densidade variável, desde floresta seca muito densa a locais quase desérticos, com arbustos isolados.

Figura 6 – Talude viário e parcela com e sem vegetação (a) durante instalação das armadilhas para captura de sedimentos em setembro de 2012; (b) final do período de chuvas de 2013 em que se observa recomposição da vegetação na parcela sem vegetação



A estimativa da perda de solo de cada segmento de estrada foi realizada pela multiplicação de volumes escoados pelas medidas de concentração de sedimentos suspensos, somados ao material sólido retido nos reservatórios. Os valores obtidos integrados no tempo permitiram calcular a produção de sedimentos. De forma análoga, quantificou-se a perda de solo nos segmentos do talude marginal. Depois de cada evento de chuva, o volume de água nos reservatórios era medido e determinava-se a concentração de sedimentos em laboratório, em amostras de 100 mL, com três repetições, coletadas de uma suspensão bem misturada. Foi utilizado o método da filtração, realizado com microfiltros de fibra de vidro com diâmetro de 47 mm, com porosidade de 1,5 μm .

O sedimento depositado no fundo dos reservatórios e/ou das armadilhas de sedimentos foi coletado, seco em estufa a 105°C e pesado diretamente. Foram caracterizados também parâmetros físicos dos sedimentos, granulometria e densidade de partículas. As análises de concentração de sedimentos foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental e as demais análises foram realizadas no Laboratório de Mecânica dos Solos, ambos no Departamento de Construção Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (Campus Fortaleza).

O registro pluviométrico dos eventos naturais foi realizado por meio de pluviômetro de balsa automática, com resolução de 0,254 mm por basculhada, com dados coletados a cada 5 minutos, instalado nas coordenadas UTM 357.481W, 9.258.732S (Figura 7). O fator R de erosividade da chuva (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹) foi estimado pelo método proposto por Wischmeier e Smith (1978) e modificado por Foster et al. (1981), tendo por base a precipitação pluviométrica medida nessa estação. O fator R é calculado a partir da energia cinética da chuva, utilizando as equações (8), (9) e (10):

$$e = 0,119 + 0,0873 \cdot \log_{10} I \quad (8)$$

$$E = e \cdot P \quad (9)$$

$$R = E \cdot I_{30} \quad (10)$$

Em que: R é a erosividade da chuva (MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹); e é a energia cinética por unidade de lâmina da chuva, em MJ.ha⁻¹.mm⁻¹; I é a intensidade média de precipitação, em mm.h⁻¹; E é a energia cinética total do evento de precipitação, em MJ.ha⁻¹; P é a precipitação do evento, em mm; e I₃₀ é a máxima intensidade em 30 minutos, em mm.h⁻¹.

Figura 7 – Estação Pluviométrica Automática (EP1) utilizada no estudo



Fonte: www.hidrosed.ufc.br

Além disso, algumas propriedades físicas do solo da superfície de estradas foram quantificadas como forma de caracterizar o material que compõe os segmentos de estradas e

talude viário, uma vez que o solo é um dos fatores intervenientes no processo físico de erosão. As variáveis analisadas foram: massa específica aparente, condutividade hidráulica e erodibilidade. A erodibilidade ($\text{Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$) foi calculada a partir da equação desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978) e tem como fatores de cálculo os percentuais de argila, silte e areia fina, matéria orgânica, além de parâmetros que descrevem a estrutura do solo e a permeabilidade do material, de acordo com a equação (11):

$$K = \frac{0,1317}{100} \cdot \left[2,1 \cdot 10^{-4} \cdot (12 - MO) \cdot ((Sil + Af) \cdot (100 - Arg))^{1,14} + 3,25 \cdot (S_1 - 2) + 2,5 \cdot (P_1 - 3) \right] \quad (11)$$

Em que: K é o fator de erodibilidade do solo ($\text{Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$); MO é o percentual de matéria orgânica (%); $Sil + Af$ corresponde ao percentual de silte + areia fina (%); Arg é o percentual de argila (%); S_1 é parâmetro que descreve a estrutura do solo (adimensional) e P_1 é o parâmetro que descreve a permeabilidade (adimensional), estimado a partir de valores de condutividade hidráulica saturada do solo.

3.3. Modelagem preditiva de erosão nos segmentos de estradas

3.3.1. Aplicação da USLE associada à equação de Maner

Para a predição da produção de sedimentos nos segmentos de estrada monitorados neste estudo, aplicou-se a Equação Universal de Perdas do Solo (*Universal Soil Loss Equation*- USLE), que estima erosão bruta do solo, apresentada no item 2.6.1 (Equação 1). A USLE foi associada a uma equação empírica de *Maner*, que permite estimar a razão de aporte de sedimentos (*Sediment Delivery Ratio* – SDR), e se baseia na fisiografia da área. Esta equação associada à USLE vem sendo utilizada pelo grupo de pesquisa HIDROSED para estimativa de produção de sedimentos em bacias (ver DE ARAÚJO, 2003; MEDEIROS, DE ARAÚJO e MAMEDE, 2009).

A equação de *Maner* (Equação 12) considera o efeito da declividade do terreno para o cálculo da razão de aporte de sedimentos (SDR), em que, L_M representa o maior comprimento na bacia paralelo à drenagem principal (m) e F_R o desnível entre a cota média do divisor e a cota do exutório.

$$\log(SDR) = 2,943 - 0,824 \cdot \log(L_M / F_R) \quad (12)$$

A USLE associada à equação de *Maner* foi aplicada para as parcelas monitoradas nas estradas com e sem trânsito, tendo por base os eventos dos anos de 2013 e 2014, com exceção dos dois últimos eventos de 2014 em que não foi possível o cálculo do fator erosividade, devido a não disponibilidade de dados pluviométricos por problemas na estação automática, de forma que foi obtida somente a precipitação total desses eventos em pluviômetro manual totalizador.

Para se avaliar a aplicabilidade desta abordagem (USLE + Equação de *Maner*), as parcelas monitoradas na superfície de estradas foram consideradas como microbacias, uma vez que estas tem área de contribuição de 0,025 ha (estrada sem trânsito) e 0,049 ha (estrada com trânsito), e rampa de 100 metros, portanto aproximadamente 5 vezes o comprimento da parcela padrão (22,1 metros de comprimento e declividade de 9%) utilizada para estabelecimento da USLE. Uma vez que a USLE foi desenvolvida para estimativa da erosão bruta e não leva em consideração as deposições que ocorrem ao longo da topografia nem a influência da potência do escoamento em gerar transporte, o conceito de SDR tem sido aplicado para quantificação da produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

O fator R de erosividade foi calculado para cada evento de chuva que gerou escoamento na superfície de estradas, a partir das medidas de precipitação, calculado com base nas equações (8), (9) e (10), conforme descrito no item 3.2. Ao fator K de erodibilidade, foi atribuído o valor mediano obtido para cada segmento (0,012 e 0,035 Mg.ha.h.MJ⁻¹.mm⁻¹.ha⁻¹ para as estradas sem e com trânsito, respectivamente), a partir de valores calculados com aplicação da equação (11) e com parâmetros físicos do solo obtidos de amostras coletadas da camada superficial das estradas, conforme também descrito no item 3.2. Os valores de erosividade e erodibilidade são apresentados nos itens 4.1.e 4.2, respectivamente.

Os parâmetros relacionados à fisiografia ou características geométricas da área foram estimados a partir do levantamento topográfico das parcelas. O fator combinado L.S que representa comprimento de rampa e declividade foi calculado pela equação (13), em que, L_R é o comprimento de rampa (m) e D_M corresponde à declividade média (%) do segmento, conforme proposta de Bertoni e Lombardi Neto (1990).

$$L.S = 0,00984 \cdot L_R^{0,63} \cdot D_M^{1,18} \quad (13)$$

Com relação ao fator C, que representa o efeito da cobertura vegetal e usos do solo, considerou-se este constante e admitiu-se valor igual a 1 em ambas as parcelas, uma vez que o solo da superfície de estradas não pavimentadas encontra-se desnudo. O fator P, que

representa as práticas conservacionistas, também foi admitido igual 1 devido à ausência destas práticas na área. Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros utilizados nesta modelagem.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados para as estradas com e sem trânsito na modelagem utilizando a abordagem USLE associada à equação de Maner

Parcela	K (Mg.ha.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹ .ha ⁻¹)	L _R (m)	D _M (%)	L.S
Estrada sem trânsito	0,012	100	4,0	0,92
Estrada com trânsito	0,035	100	2,4	0,50

3.3.2. Aplicação das modelos empíricos STJEROS e ROADMOD

Foram avaliados na área de estudo, ainda, dois modelos empíricos desenvolvidos para predição de produção de sedimentos de segmentos de estradas, o STJEROS (RAMOS-SCHARRÓN e MACDONALD, 2005) e ROADMOD (ANDERSON, 1994), já descritos no item 2.6.4. Os modelos têm equações elaboradas com base em dados obtidos em monitoramento de segmentos de estradas em uma área tropical do Caribe, que se caracteriza por precipitação entre 900 e 1400 mm anuais, elevação entre 0 e 500 m, litologia vulcânica, predominância de florestas quanto a ocupação da área, tipo de solo caracterizado como raso, pedregulhoso e franco argiloso, declividade de estradas entre 0 e 37%, com trânsito moderado de caminhões e veículos leves.

A eleição destes modelos para aplicação neste estudo, apesar de empíricos e desenvolvidos especificamente para aquela área, se deu por apresentarem simples equacionamento que requer poucos parâmetros de entrada. O STJEROS permite estimar a produção de sedimentos anual de um segmento de estrada com base na precipitação anual e declividade do segmento, e diferencia estradas que passam por manutenção por meio de regularização mecânica de superfície (equação 5) de não regularizadas (equação 6). Por sua vez, o ROADMOD permite estimar a produção média anual de sedimentos de estradas somente com base nos valores de declividade e área de superfície do segmento (equação 7).

Os dados obtidos nas medições em campo realizadas nos anos de 2013 e 2014, foram utilizados para aplicação e avaliação destes modelos em prever a produção de sedimentos na área de estudo. A equação 5 foi aplicada a parcela da estrada com trânsito, uma vez que em ambos os anos de monitoramento este segmento passou por manutenção, enquanto a equação 6 foi aplicada à estrada sem trânsito, que não passou por processo de regularização mecânica.

Já a equação 7 foi aplicada para ambos os segmentos. As equações foram aplicadas sem calibração.

3.4. Aproximação fingerprinting de identificação de fontes de sedimentos

Como forma de buscar compreender como os processos hidrossedimentológicos de uma bacia hidrográfica respondem aos efeitos de mudanças no uso do solo, nesta pesquisa buscou-se avaliar a aplicabilidade da técnica fingerprinting na Bacia do Benguê na identificação de estradas enquanto fontes de sedimentos para o reservatório, seguindo a mesma metodologia aplicada por Da Silva (2015), que permitiu identificar as contribuições relativas dos seis tipos de solos presentes na bacia, enquanto fontes de sedimentos.

Da Silva (2015) avaliou a aplicação da técnica fingerprinting na identificação da origem de sedimentos na bacia do reservatório Benguê, área onde estão inseridas as estradas objeto desta pesquisa. A autora realizou comparações de propriedades físicas e mineralógicas dos solos como fontes potenciais de sedimentos da bacia e dos sedimentos assoreados e analisou propriedades traçadoras naturais para a discriminação de fontes de sedimentos, depositados no reservatório Benguê, por meio de métodos estatísticos multivariados (aproximação fingerprinting). As fontes contempladas no estudo foram as diversas manchas de solos presentes na área (Luvissolos, Latossolos, Planossolos, Argissolos, Neossolos Distróficos e Neossolos Eutróficos). Cada tipo de solo foi tratado como uma fonte potencial, com o total de seis fontes de sedimentos avaliadas.

A metodologia aplicada por Da Silva (2015) seguiu a seguinte sequência:

- i) Coletas de amostras de solo das fontes e dos sedimentos assoreados;
- ii) Análises mineralógicas utilizando microscopia eletrônica de varredura/espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS), que fornecem informações sobre a distribuição do tamanho, mineralogia e a morfologia de partículas para identificar as propriedades mineralógicas dos solos e dos sedimentos.

Da Silva (2015) explica que a imagem eletrônica de varredura é formada pela incidência de um feixe de elétrons na amostra, sob condições de vácuo, provocando uma série de emissões de sinais relacionados com a interação dos elétrons com a amostra. Os sinais emitidos encontram-se sob a forma de elétrons e de fótons (menor porção de radiação eletromagnética), os quais são captados por detectores apropriados, sendo amplificados e processados num sistema analisador específico para cada tipo de sinal.

Já o sistema EDS (*Energy Dispersive System*), funciona a partir da emissão de raios X característicos e permite a análise composicional dos materiais, sendo possível a quantificação dos elementos presentes em porcentagem atômica ou em peso.

iii) Análise individual da capacidade discriminante de cada elemento que foi determinado na análise mineralógica, utilizando um teste não paramétrico (teste-H ou Kruskal-Wallis) para selecionar um conjunto de variáveis que possuem capacidade discriminante entre fontes. O teste-H permite estabelecer se há diferenças significativas entre as fontes e quais parâmetros possibilitarão separá-las. Avalia uma hipótese nula em que k amostras aleatórias independentes são provenientes de uma mesma população, de acordo com a Equação (14):

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{s=1}^k \frac{R_s}{n_1} - 3(n+1) \quad (14)$$

Em que: R_s se refere à soma das posições em que cada amostra da fonte s assume quando todas as amostras são colocadas em ordem crescente (série); n_1 o número de observações da fonte s; n a soma dos n_1 e k o número de fontes.

Sobre o teste-H ou Kruskal-Wallis, Minella (2007) explica que ao se testar as diferenças para uma variável i qualquer entre 3 fontes, por exemplo, e que tem-se 6 amostras ($n_1 = 6$) coletadas para cada fonte, em que o valor de n é a soma dos n_1 , no caso igual a 18. Este conjunto n de dados são dispostos em ordem decrescente e associados ao primeiro valor o número 1, ao segundo o número 2, e assim por diante, formando uma série de valores compondo as amostras de todas as fontes. Para cada fonte são somados os valores das séries (R_s), e desta forma é possível calcular o valor de H. A hipótese nula (H_0) a ser testada admite que as populações são idênticas e a hipótese alternativa (H_1) é de que as populações se diferem. Quando o valor de H calculado exceder o valor crítico de H, com grau de significância de 5%, a hipótese nula deve ser rejeitada, ou seja, a probabilidade é pequena (5% ou menos) de se observar diferenças das amostras, se as observações são provenientes da mesma população, ou seja, a variável apresenta capacidade discriminante entre as fontes.

iv) Análise da contribuição em porcentagem de cada fonte de sedimento para o sedimento assoreado no reservatório, por meio de aplicação de análise multivariada, que correlaciona as concentrações dos elementos químicos das fontes e dos sedimentos que chegam ao exutório da bacia (ver COLLINS, WALLING e LEEKS, 1997, WALLING e WOODWARD, 1995, WALLING e COLLINS, 2000).

De acordo com Minella et al. (2009), para analisar as contribuições de cada fonte é necessário comparar o conjunto de variáveis traçadoras identificadas nas fontes e nos sedimentos de maneira que se possa encontrar a melhor proporção de cada fonte para reproduzir as concentrações dos elementos químicos observados nas amostras de sedimento coletado no exutório. Esta condição é atingida por meio da aplicação da análise da classificação multivariada e uma função de minimização para a solução de sistemas sobredeterminados.

As análises mineralógicas realizadas por Da Silva (2015) permitiram identificar 23 variáveis (Ag, Al, Ba, C, Ca, Ce, Cr, Cu, Fe, Ir, K, La, Mg, Mn, Na, Nd, Ni, P, S, Si, Ti, Y e Zr) presentes nas amostras das fontes e 20 elementos (Ag, Al, Ba, C, Ce, Cr, Fe, Ir, K, La, Mg, Mn, Na, Nd, Ni, P, Si, Ti, Y e Zr) no sedimento assoreado no reservatório Benguê. Segundo a autora, esses elementos identificados na bacia do Benguê são frequentemente encontrados em outras áreas que aplicaram o método, como por exemplo no estudo de Minella (2007). O resultado do Teste Kruskal-Wallis, mostrou dez variáveis (C, Ca, Cr, Cu, Ir, Na, Ni, S, Y e Zr) que permitiram diferenciar entre si as seis fontes.

Os resultados do estudo de Da Silva (2015) para a classificação de fontes de sedimentos assoreados no reservatório Benguê, considerando-se as seis fontes potenciais mostraram como contribuições médias das fontes de 50% para o Argissolo (corresponde a 10% da área), 17% para o Neossolo Eutrófico (7% de área), 16% para o Neossolo Distrófico (8% de área), 14% para o Planossolo (30% de área), 3% para o Luvisolo (15% de área), não sendo identificadas contribuições do solo Latossolo (30% da área). A fonte Argissolo foi a que mais contribuiu para a formação do sedimento de fundo do reservatório Benguê, explicado pela proximidade dessa mancha de solo ao reservatório, assim devido aos processos erosivos que ocorrem na bacia, há o carreamento de uma maior quantidade de sedimentos dessa fonte para o reservatório.

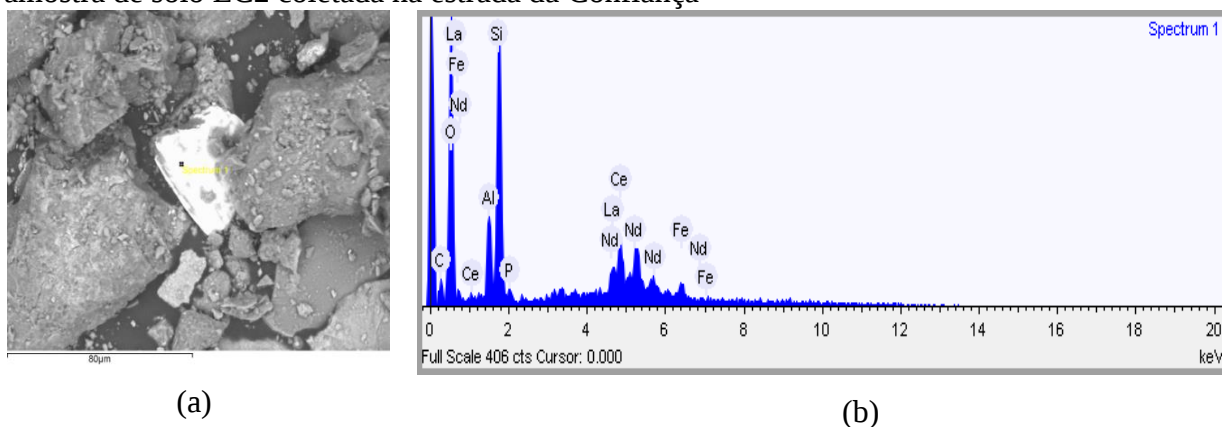
Seguindo a sequência metodológica avaliada por Da Silva (2015), realizou-se inicialmente a coleta de amostras da superfície de estradas selecionadas como representativas da área e que seriam possíveis fontes potenciais de sedimentos. Foram coletadas um total de 12 amostras, sendo 4 amostras na estrada que interliga as localizadas Gameleira e Aroeira, (EG1, EG2, EG3 e EG4), 4 na estrada que interliga Barra e sede do município (EB1, EB2, EB3 e EB4) e 4 na estrada da Confiança (EC1, EC2, EC3 e EC4), que interliga as comunidades Barra e Cedro.

Da Silva (2015) adverte que para representar cada fonte devem ser realizadas no mínimo quatro coletas, cada amostra sendo composta por cinco sub-amostras, sendo uma

central e as outras distribuídas espacialmente, em função: da abrangência, da posição na vertente, áreas homogêneas de cobertura vegetal, cor do solo e textura. Seguindo esta recomendação, as coletas foram realizadas com uma quantidade de material de aproximadamente 1 kg por amostra. Estas foram secas ao ar e encaminhadas para análises mineralógicas realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará.

Em laboratório, as amostras foram submetidas a análise de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS), na qual elétrons emitidos pelo equipamento incidem sobre uma amostra produzindo um espectro de elementos químicos identificados, conforme exemplificado na Figura 8, permitindo-se estimar a composição química da amostra com as respectivas concentrações de cada elemento. No espectro, os picos produzidos possibilitam a quantificação dos elementos químicos presentes na amostra, em que no eixo das ordenadas é apresentado o número de fótons associado a cada elemento e no eixo das abscissas a energia de fótons (KeV) da radiação eletromagnética incidente. Na amostra da Figura 8 por exemplo, foram determinados os seguintes elementos e respectivas concentrações Al (7%), C (27%), Si (24%), P (1%), Fe (4%), La (9%), Ce (19%), Nd (7%).

Figura 8 – Imagem da superfície da amostra (a) obtida na Microscopia Eletrônica de Varredura e respectivo espectro (b) gerado na Espectroscopia de Energia Dispersiva da amostra de solo EC2 coletada na estrada da Confiança



As análises mineralógicas realizadas permitiram identificar um total de 29 elementos (Ag, Al, Ba, C, Ca, Ce, Cr, Cs, Eu, Fe, Ir, K, La, Mg, Mn, Na, Nd, Ne, Ni, P, Pb, S, Si, Sm, Tb, Ti, Yb, Zr, Zn) nas amostras das estradas. Em seguida, aplicou-se o Teste de Kruskal-Wallis (Equação 14) para avaliar se haviam diferenças significativas entre os percentuais dos elementos encontrados no solo das estradas e na mancha de solo do entorno, utilizando as

determinações realizadas anteriormente por Da Silva (2015) para estas manchas de solo, de forma a discriminar as estradas como uma fonte de sedimentos na bacia do Benguê.

Entretanto, os resultados do teste H para todos os elementos comuns às estradas e às manchas de solo, mostraram que não houve diferença estatisticamente significativa entre as concentrações dos elementos encontrados nas estradas e nas manchas de solo do entorno, de forma que as estradas não poderiam se distinguir das manchas de solo como uma fonte de sedimentos para aplicação desta metodologia. Logo, a aproximação fingerprinting não apresentou resposta quando aplicada na Bacia do Benguê incluindo a abordagem em função do uso do solo, em que as estradas seriam avaliadas enquanto fonte de sedimentos, por estas não se distinguirem como fonte na bacia em relação às outras fontes já discriminadas anteriormente no estudo de Da Silva (2015).

Esse resultado se deve, possivelmente, às condições de implantação das estradas analisadas na área de estudo, que seguem rigorosamente a topografia, com poucas seções de aterro e corte (essas verificadas particularmente na estrada da Confiança, que liga as comunidades de Barra e Cedro), o que indica uma simples retirada da vegetação para construção da estrada, com pouca ou nenhuma transferência de material a partir de outras áreas. Essa hipótese é reforçada pela ausência de jazidas de material terroso exploradas na região. Com isso, o material das estradas se assemelha ao dos solos no entorno, impossibilitando de distingui-los por técnica fingerprinting.

3.5. Comparação de taxas de erosão bruta na bacia do Benguê

Como forma de avaliar a contribuição de sedimentos das estradas na escala da bacia do Benguê, realizou-se um comparativo entre taxas de erosão estimadas a partir da aplicação da Equação Universal de Perdas do Solo para as estradas e para as demais áreas da bacia. Na bacia do Benguê, a perda de solo de forma espacializada foi estimada a partir da aplicação da USLE utilizando-se técnicas de geoprocessamento com o auxílio do software ArcGIS, para uma malha de pontos com espaçamento de 60 metros, sendo a equação empregada no cálculo da erosão em cada uma das células.

Segue-se a descrição da determinação dos fatores empregados na USLE seguindo esta abordagem:

O fator R de erosividade da chuva, foi estimado com base nas informações de precipitação registradas em seis postos pluviométricos, sendo considerados além da EP1

(instalada na BEA sob a responsabilidade do grupo HIDROSED) cinco postos monitorados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) inseridos na bacia do Benguê, que possuíam dados disponíveis para os anos de 2013 e 2014.

A erosividade da chuva foi calculada pelas equações (15) e (16), conforme proposta de Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) para a região sudeste do Brasil, mas com validade verificada para o semiárido brasileiro por De Araújo (2003).

$$R_m = 67,355 \cdot \left(\frac{P_m^2}{P_a} \right)^{0,85} \quad (15)$$

$$R = \sum_{i=1}^{12} R_m \quad (16)$$

Em que: R e R_m são respectivamente as erosividades anuais e mensais, em MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, P_a e P_m são as precipitações anuais e mensais, em mm.

No programa ArcGIS foi gerado um mapa (com resolução de 60 metros) de isoietas a partir da interpolação dos valores de erosividade média dos anos de 2013 e 2014, determinados para cada posto pluviométrico, usando o método da *Krigagem*. Na Tabela 3 são apresentados os postos utilizados no estudo, com respectivos valores de erosividade calculados para os anos de 2013 e 2014, e valor médio utilizado na geração do mapa.

Tabela 3 – Valores de erosividade calculados para os anos de 2013-2014 dos postos pluviométricos utilizados no estudo

Posto / Identificação	Lat_grau	Long_grau	Erosividade (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹)		
			2013	2014	Média
1 EP1	-6.704	-40.289	3881	3288	3585
2 Aiuaba	-6.567	-40.117	2078	6511	4294
3 Bom nome	-6.650	-40.517	3775	3771	3773
4 Cedro	-6.750	-40.267	2900	3812	3356
5 Barão de Aquiraz - Campo Sales	-6.867	-40.367	4173	4753	4463
6 Canabrava-Cogoci – Parambu	-6.433	-40.717	3673	4880	4277

A erodibilidade foi determinada com base no mapa pedológico da bacia (ver Medeiros, 2009), cujos valores de erodibilidade foram atribuídos a cada mancha de solo. Os valores de erodibilidade foram utilizados para gerar um mapa de fator K, atribuindo-se valores respectivos de erodibilidade a cada célula, em função do tipo de solo correspondente. Na Bacia são identificados seis manchas de solo Argissolo, Neossolo Eutrófico, Neossolo Distrófico, Planossolo, Luvisolo e Latossolo. Na Tabela 4 são apresentados os respectivos

valores de erodibilidade atribuídos a cada tipo de solo, bem como o percentual correspondente de área de cada tipo de solo da bacia.

Tabela 4 – Valores de erodibilidade (fator K) atribuídos para cada mancha de solo da bacia

Classificação pedológica	Área (%)	Fator K (Mg.ha.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹ .ha ⁻¹)
Luvissolos	15	0,033
Latossolos	30	0,018
Planossolo	30	0,031
Argissolo	10	0,015
Neossolo Distrófico	8	0,031
Neossolo Eutrófico	7	0,025

Para estimativa dos fatores topográficos (L e S), foi utilizado um modelo digital de elevação com resolução de 15 m elaborado por Creutzfeldt (2006) a partir de imagens ASTER. O fator de comprimento de rampa (L), que indica a relação de perda de solo entre um comprimento de declive qualquer e um comprimento de rampa de 22 m, foi calculado a partir da equação (17) para cada ponto da malha, conforme proposta de Desmet e Govers (1996):

$$L = \frac{(U + D^2)^{m+1} - U^{m+1}}{D^{m+2} x^m (22,13)^m} \quad (17)$$

Em que: U é a área de contribuição de fluxo para a célula, em m²; D é o tamanho da célula, em m; x é um fator de correção em função da orientação da célula (igual a 1 quando o fluxo sai por um dos quatro lados e igual a 1,41 quando o fluxo sai por um vértice). O parâmetro *m* é função da declividade média do pixel (*s*), de forma que são atribuídos os seguintes valores para *m*: 0,5 para *s* superior a 5%; 0,4 para 3% < *s* < 5%; 0,3 para 1% < *s* < 3% e 0,2 para *s* inferior a 1%.

Conforme proposta de Williams e Arnold (1997), o fator de declividade (S), que expressa a relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9%, foi calculado com base na declividade (*s*, em m.m⁻¹) de acordo com a equação (18):

$$S = (65,41s^2 + 4,56s + 0,065) \quad (18)$$

Para identificação do uso e ocupação do solo, tomou-se como referência o trabalho realizado por Creutzfeldt (2006), que identificou doze classes na bacia do reservatório Benguê: agricultura, agropecuária, área urbana, Caatinga arbórea arbustiva conservada, Caatinga arbórea arbustiva perturbada, corpo hídrico perene, corpo hídrico intermitente,

estrada não pavimentada, floresta seca em superfície dissecada, vegetação de tabuleiro conservada, vegetação de tabuleiro dissecada, vegetação de tabuleiro em regeneração. Os valores atribuídos ao fator C de vegetação e uso do solo, foram estimados pelo autor com base em medidas de densidade da vegetação em campo e a partir de valores disponíveis na literatura. Na área, aproximadamente 7% da superfície está atribuída ao uso agrícola, 23% à agropecuária e 70% à cobertura vegetal. Já o fator de práticas conservacionistas foi admitido igual a um para toda a bacia, uma vez que não se observam medidas de controle dos processos erosivos na região. Na tabela 5 são apresentados os valores de fator C atribuídos a cada classe de vegetação e uso do solo.

Tabela 5 - Fator C para cada classe de vegetação e uso do solo na Bacia do Benguê

Vegetação e uso do solo na Bacia	Fator C médio
Agricultura	0,500
Agropecuária	0,160
Caatinga arbustiva arbórea conservada	0,020
Caatinga arbustiva arbórea degradada	0,060
Floresta seca	0,009
Vegetação de tabuleiro conservada	0,004
Vegetação de tabuleiro degradada	0,040
Vegetação de tabuleiro em regeneração	0,010

Fonte: Creutzfeldt (2006)

A quantificação da perda de solo das estradas da bacia foi realizada a partir das taxas de produção de sedimentos dos segmentos de estradas, obtidas no monitoramento realizado nos anos de 2013 e 2014, associada a razão de aporte de sedimentos (SDR) média estimada através da modelagem realizada conforme descrito no item 3.3.1, em que esta foi estimada a partir da produção de sedimentos monitorada e erosão bruta calculada pela USLE, com resultados apresentados no item 4.6.1. Para a quantificação do valor total de erosão das estradas, as taxas obtidas foram multiplicadas pela área de superfície de 6,5 km² das estradas existentes na bacia do Benguê que corresponde a 0,7% da superfície total. Desse total, 0,1 km² correspondem a estradas abandonadas sem trânsito, que são aquelas que estão inseridas na Estação Ecológica de Aiuaba, as demais estradas da bacia do Benguê foram consideradas como estradas com trânsito.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Precipitação e Erosividade

No ano de 2013 foram registradas precipitação de 575 mm.ano^{-1} e erosividade de $3881 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$, e em 2014 valores de 382 mm.ano^{-1} e $3288 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$, respectivamente. Cabe destacar que os anos de monitoramento foram secos. A pluviometria média é de 550 mm e a erosividade média da área é de $4600 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$, classificada como moderada (DE ARAÚJO e GONZALEZ PIEDRA, 2009; MEDEIROS e DE ARAÚJO, 2014). Durante os dois anos foram registrados 31 eventos de precipitação que geraram escoamento superficial nos segmentos de estradas, sendo 15 em 2013 e 16 em 2014, com um total de 417 mm tendo precipitado nos 15 eventos que geraram escoamento em 2013 (73% do total anual) e 271 mm foi o total que precipitou nos 16 eventos que geraram escoamento em 2014 (71% do total anual).

Os eventos no semiárido brasileiro são caracterizados por curta-duração e alta intensidade. Medeiros e de Araújo (2014), avaliaram registros diários de precipitação na área de estudo, no período de 1939 a 2011, e verificaram que a precipitação é temporalmente concentrada não apenas em alguns meses do ano, mas principalmente, em alguns eventos de precipitação. Em média, há apenas 42 dias com precipitação por ano. Considerando-se apenas precipitação diária com magnitude superior a 12 mm, abaixo da qual não há nenhuma ocorrência de escoamento na BEA (Figueiredo et al., 2016), há uma média de apenas 15 dias por ano com precipitação capaz de gerar escoamento na bacia hidrográfica. Em 77% dos anos da série, o dia mais chuvoso contém 5 a 15% de toda a precipitação anual. A concentração temporal da erosividade é ainda maior do que a de precipitação: o percentil 10 dos maiores eventos de magnitude abrange 51% da precipitação, mas 80% da erosividade das chuvas. A forte concentração temporal de precipitação causa eventos com alta intensidade e erosividade, permitindo assim a desagregação e o transporte do solo.

Na Tabela 6 são apresentados valores de precipitação, duração, intensidade média, intensidade máxima e erosividade dos eventos em que houve escoamento superficial nos segmentos de estradas.

Tabela 6 – Valores de precipitação (P), duração, intensidade média (I), intensidade máxima para diversos intervalos em minutos (I_{5max}- I_{30max}) e erosividade (R) dos eventos com escoamento superficial nos segmentos de estradas analisados (2013-2014)

Nº	Data	Duração (min)	P (mm)	I (mm.h ⁻¹)	I _{5max} (mm.h ⁻¹)	I _{10max} (mm.h ⁻¹)	I _{30max} (mm.h ⁻¹)	R (MJ.mm.ha ⁻¹ h ⁻¹)
1	03/01/2013	150	12	5	21	15	9	20
2	04/01/2013	155	29	11	82	79	45	276
3	07/02/2013	55	8	8	27	21	12	18
4	16/02/2013	415	53	8	34	29	25	265
5	26/03/2013	105	41	23	73	66	37	359
6	30/03/2013	345	9	2	12	12	6	7
7	04/04/2013	235	11	3	27	26	14	25
8	19/04/2013	290	51	11	58	50	27	286
9	26/04/2013	130	17	8	34	34	16	51
10	01/05/2013	55	19	21	52	38	20	89
11	05/06/2013	90	11	7	58	41	14	28
12	22/06/2013	90	13	4	21	15	11	23
13	09/09/2013	130	29	13	43	26	14	162
14	20/12/2013	410	64	9	76	38	24	492
15	23/12/2013	370	50	8	67	49	20	484
16	13/01/2014	130	23	14	52	46	31	154
17	31/01/2014	245	12	3	24	18	10	19
18	04/02/2014	285	31	7	24	17	9	55
19	06/02/2014	75	6	5	12	12	9	9
20	10/02/2014	145	17	7	30	26	18	59
21	11/02/2014	345	44	8	27	27	19	164
22	06/03/2014	50	10	12	40	35	15	31
23	18/03/2014	60	15	15	27	24	15	50
24	28/03/2014	75	17	14	40	37	17	65
25	30/03/2014	50	5	6	24	14	10	10
26	02/04/2014	90	37	25	67	59	42	372
27	22/05/2014	110	8	4	18	17	13	17
28	29/05/2014	210	6	2	3	3	3	2
29	19/09/2014	200	7	2	9	8	5	5
30	17/11/2014	-	18	-	-	-	-	-
31	24/11/2014	-	32	-	-	-	-	-
Mínimo		50	5	2	3	3	3	2
Máximo		415	64	25	82	79	45	492
Mediana		130	17	8	30	26	15	51
Média		176	23	9	37	30	18	124
Desvio padrão		116	16	6	22	18	11	150
CV (%)		66	72	67	58	59	60	121

A duração dos eventos que geraram escoamento na superfície das estradas variou de 55 a 415 minutos e a intensidade média de precipitação variou de 2 mm.h^{-1} a 25 mm.h^{-1} . A mediana dos valores de precipitação e duração de eventos foram, respectivamente, 15 mm e 140 min. Os valores máximos de intensidade de precipitação a cada 10 e 30 minutos foram, respectivamente, 79 mm.h^{-1} e 45 mm.h^{-1} . A erosividade da chuva, apresentou variação de 7 a $359 \text{ MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$ por evento. Para os dois últimos eventos de precipitação de 2014, devido a problemas ocorridos com a estação pluviométrica automática utilizada no estudo, apresenta-se apenas a pluviometria obtida a partir de pluviômetro totalizador manual instalado na área.

O menor evento de precipitação que foi capaz de gerar escoamento nos segmentos de estrada e talude foi de 5 mm e intensidade média de 2 mm.h^{-1} . Similar comportamento foi observado no estudo de MacDonald, Sampson e Anderson (2001) nas Ilhas Virgens Americanas, em parcelas de superfícies de estradas, onde o escoamento superficial nesses segmentos se estabelecia quando a precipitação excedia 6 mm.

4.2. Caracterização do material das estradas e dos sedimentos

Nesta seção são apresentados alguns parâmetros físicos dos solos, como: granulometria, massa específica aparente, condutividade hidráulica saturada e erodibilidade (fator K da USLE) das estradas não pavimentadas da área de estudo e também dos sedimentos gerados nas parcelas monitoradas.

4.2.1. Condutividade Hidráulica e Massa Específica Aparente do Solo

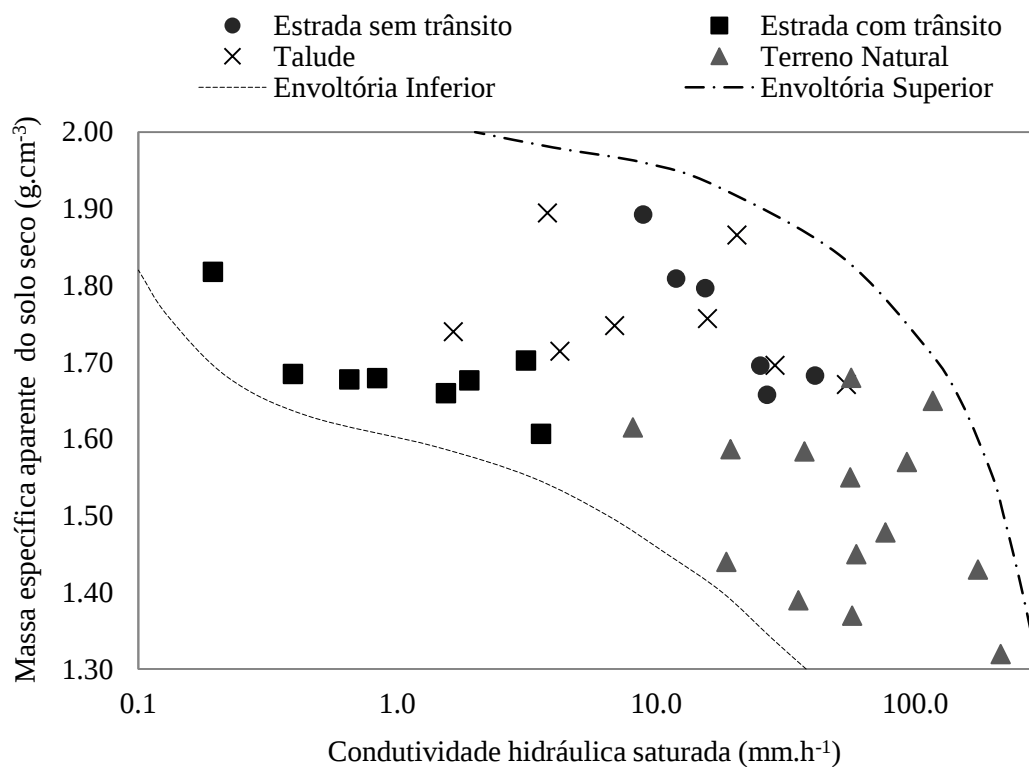
A massa específica aparente das estradas e talude monitoradas neste estudo apresentou valor médio de $1,73 \text{ g.cm}^{-3}$ (mínimo de $1,61 \text{ g.cm}^{-3}$, máximo de $1,90 \text{ g.cm}^{-3}$ e CV igual a 4,6%), com base em vinte e dois valores obtidos a partir de coletas de amostras indeformadas na estrada principal, secundária, abandonada e talude da via principal. Neste estudo foram coletadas também quinze amostras em terreno natural na bacia do reservatório Benguê, que inclui a Bacia Experimental de Aiuaba, as quais apresentaram valor médio representativo de $1,42 \text{ g.cm}^{-3}$ (mínimo de $1,32 \text{ g.cm}^{-3}$, máximo de $1,68 \text{ g.cm}^{-3}$, e CV igual a 7,2%).

A massa específica aparente do solo é uma grandeza que não apresenta muita variabilidade, comportamento verificado pelos baixos valores de coeficiente de variação obtidos tanto na área preservada como na superfície e talude de estradas. Os valores foram

maiores para as estradas, nas quais o valor mínimo é superior ao máximo encontrado na BEA. O valor médio de massa específica aparente para as estradas e talude foi 22% mais elevado que o da área preservada. Além disso, na área preservada a vegetação amortece o impacto das gotas de chuva, diminuindo o efeito de compactação da chuva. A compactação das estradas gera maiores valores de massa específica e consequentemente menores valores de condutividade hidráulica, o que contribui para a maior geração de escoamento superficial nessas áreas, mesmo em anos considerados secos, como os anos em estudo.

Na Figura 9 são apresentados valores de condutividade hidráulica e massa específica aparente das estradas com e sem trânsito, talude viário e terreno natural com vegetação nativa, além de duas curvas decrescentes envoltórias. A estrada com trânsito tem tendência mais próxima da envoltória inferior. Já a estrada sem trânsito e o talude se aproximam mais da envoltória superior, porém, o talude apresenta fraca tendência pois mescla terreno natural e compactado, enquanto que o terreno natural não apresenta tendência, com maior variabilidade.

Figura 9 – Valores de condutividade hidráulica e massa específica aparente do solo das estradas com e sem trânsito, talude viário e área com vegetação natural. A escala logarítima no eixo x indica que a condutividade hidráulica para as diferentes paisagens varia duas ordens de magnitude



Na estrada com trânsito, a condutividade hidráulica saturada variou de 0,19 a 3,6 mm h⁻¹ (média 1,53 mm h⁻¹ e mediana 1,19 mm.h⁻¹), enquanto que na estrada abandonada variou entre 9 e 41 mm h⁻¹ (média 22 mm.h⁻¹ e mediana 20 mm.h⁻¹). A condutividade hidráulica saturada variou de 0,2 a 54 mm.h⁻¹ nas estradas e talude, com média de 13 mm.h⁻¹ e mediana de 9 mm.h⁻¹, sendo que a estrada com trânsito apresentou valores de condutividade hidráulica saturada menores que a estrada sem trânsito. Valores de condutividade hidráulica saturada para as amostras coletadas na camada superficial de (0 a 10 cm) na área de terreno natural na bacia do Benguê apresentaram média de 75 mm.h⁻¹ (mínimo de 8 mm.h⁻¹, máximo de 214 mm.h⁻¹ e CV igual a 77%). Figueiredo et al. (2016) verificaram na Bacia Experimental de Aiuaba que a condutividade hidráulica saturada média é 25 mm.h⁻¹ e a mediana 9 mm.h⁻¹ (com base em 179 medidas de condutividade hidráulica saturada realizadas em campo), ou seja, nas áreas com terreno natural a condutividade hidráulica saturada é cerca de uma ordem de grandeza mais elevada que na estrada com trânsito.

Similar comportamento foi observado no estudo de Ziegler e Giambelluca (1997), que investigaram propriedades físicas dos solos controladoras do escoamento superficial em estradas rurais não pavimentadas e terras circunvizinhas em uma bacia montanhosa tropical na Tailândia. Seus resultados indicam que os valores de condutividade hidráulica saturada em estradas não pavimentadas são cerca de uma ordem de magnitude menores que em outros tipos de usos do solo. Também, Ziegler et al. (2007) registraram em superfície de estradas não pavimentadas, em bacia experimental na Malásia, baixos valores de condutividade hidráulica saturada, inferiores a 2 mm.h⁻¹, valor similar aqueles determinados na estrada com trânsito da área de estudo. Foltz, Copeland e Elliot (2009) verificaram coeficientes de variação de escoamento superficial maiores em estradas abandonadas que em estradas reabertas com trânsito, os valores foram obtidos a partir de simulação de precipitação realizada em parcelas experimentais. Esses autores comentam que variabilidade espacial elevada, caracterizada por elevado CV, é uma característica dos solos florestais não perturbados, enquanto a baixa variabilidade espacial é uma característica dos solos florestais perturbados.

4.2.2. Granulometria

Com base em resultados de análises granulométricas realizadas em amostras coletadas da camada superficial de solo (0 a 10 cm) na plataforma de estradas e no talude monitorado, a Tabela 7 apresenta os percentuais médios, mínimos e máximos das frações constituintes dos solos (pedregulhos, areias, siltes e argilas). A mesma caracterização foi realizada em amostras

de sedimentos que foram coletados nos reservatórios de acumulação de escoamento superficial nos segmentos de estradas monitorados. A comparação entre solo e sedimento oriundo da plataforma de estradas é apresentado no gráfico da Figura 10. Verifica-se que o solo da superfície da estrada com trânsito apresenta uma proporção de partículas com tamanho inferior a 2 mm de mais de 80%, além de elevada proporção de areias finas e siltes, partículas mais facilmente carregadas pelo escoamento por serem de pequeno diâmetro e não apresentarem coesão, e que correspondem a 45% do material. Na estrada sem trânsito, o percentual de partículas < 2 mm e de siltes e areias finas, correspondem a 59 % e 23 %, respectivamente.

Tabela 7 – Percentuais das frações granulométricas do sedimento coletado nos eventos chuva-deflúvio nos segmentos monitorados na estrada com e sem trânsito e do solo da camada superficial (0-10 cm) das estradas com e sem trânsito e do talude viário

Unidades	Estrada com trânsito		Estrada sem trânsito		Encosta
Tipo de material	Solo	Sedimento	Solo	Sedimento	Solo
n° de amostras	7	21	7	7	8
Pedregulho (%) - > 2 mm					
<i>Média</i>	19 ± 19	7 ± 7	41 ± 7	19 ± 28	47 ± 6
<i>Mínimo</i>	1	0	34	0	38
<i>Máximo</i>	55	27	49	71	57
Areia (%) - 2,0 - 0,1 mm					
<i>Média</i>	29 ± 13	48 ± 15	30 ± 8	13 ± 12	15 ± 4
<i>Mínimo</i>	8	20	19	3	9
<i>Máximo</i>	50	80	36	37	21
Areia fina (%) - 0,1 - 0,05 mm					
<i>Média</i>	17 ± 9	12 ± 8	10 ± 2	26 ± 2	16 ± 8
<i>Mínimo</i>	2	1	7	4	9
<i>Máximo</i>	30	29	11	64	31
Silte (%) - 0,05 - 0,002 mm					
<i>Média</i>	28 ± 8	31 ± 14	13 ± 3	36 ± 16	19 ± 6
<i>Mínimo</i>	19	5	9	15	11
<i>Máximo</i>	43	57	16	60	27
Argila (%) - <0,002 mm					
<i>Média</i>	7 ± 5	2 ± 3	7 ± 4	7 ± 7	3 ± 2
<i>Mínimo</i>	2	0	3	0	1
<i>Máximo</i>	17	12	12	21	6

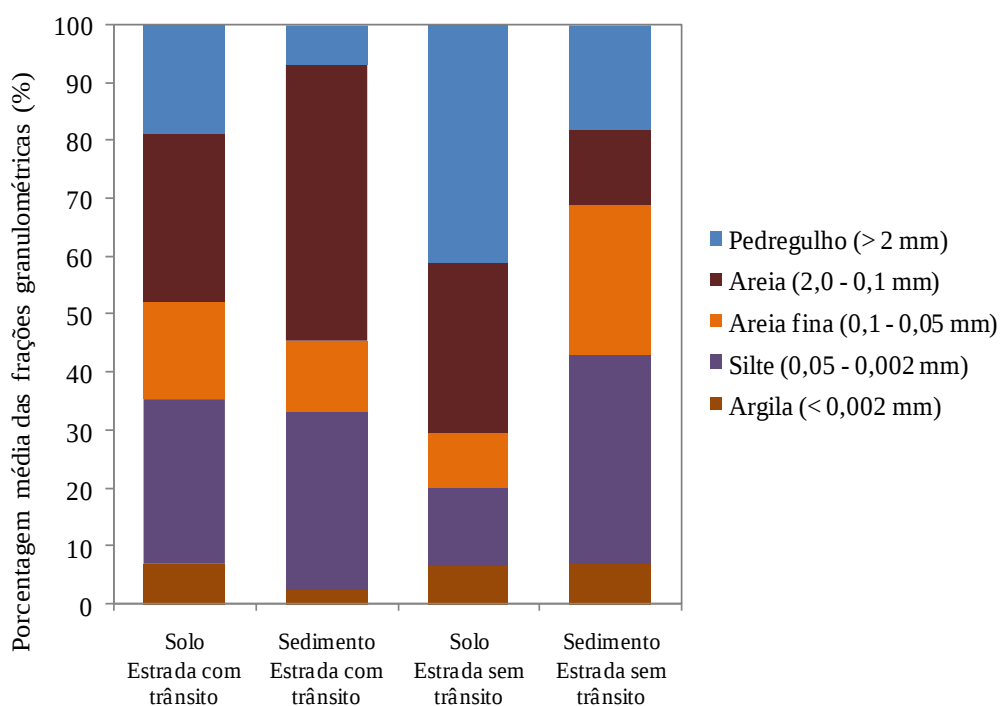
Reid e Dune (1984) avaliam que superfícies de estradas não pavimentadas são importantes fontes de sedimentos, porque a maioria do sedimento desta fonte é fino, menor que 2 mm, implicando em uma elevada proporção de sedimentos finos que é introduzida

diretamente no sistema de drenagem. Além disso, o material fino é o mais nocivo à vida piscícola e à qualidade da água por apresentar capacidade de carrear poluentes adsorvidos.

Comparando-se a granulometria do solo e dos sedimentos gerados nos segmentos de estrada monitorados, verifica-se em ambas as parcelas das estradas com e sem trânsito, um aumento da proporção de finos que são carreados pelo escoamento, processo físico denominado de enriquecimento de finos. Para a estrada com trânsito, os valores médios obtidos a partir da análise granulométrica do solo e do sedimento, de percentual de partículas menores que 2 mm, foi de 81% e 93% respectivamente, e para a estrada sem trânsito os valores são 59% e 82%, respectivamente.

Apesar de o solo da estrada sem trânsito ser mais grosseiro que o da estrada com trânsito, o sedimento produzido naquela é mais fino que o dessa estrada, ainda que a estrada sem trânsito apresente maior declividade, o que resulta em uma maior energia do escoamento e capacidade de transporte de sedimentos de maiores diâmetros. Esse comportamento pode estar associado à geração de poeira pelo tráfego de veículos na estrada com trânsito, provocando a perda de parte do material fino pela própria passagem dos veículos, e não pelo escoamento. Da Figura 10, é possível constatar que o processo de enriquecimento de finos pela seletividade do escoamento, relatado na literatura (Haan et al. 1994), é mais evidente na estrada sem trânsito.

Figura 10 – Porcentagem média das frações granulométricas da camada de solo superficial e do sedimento coletado nos segmentos de estrada monitorados



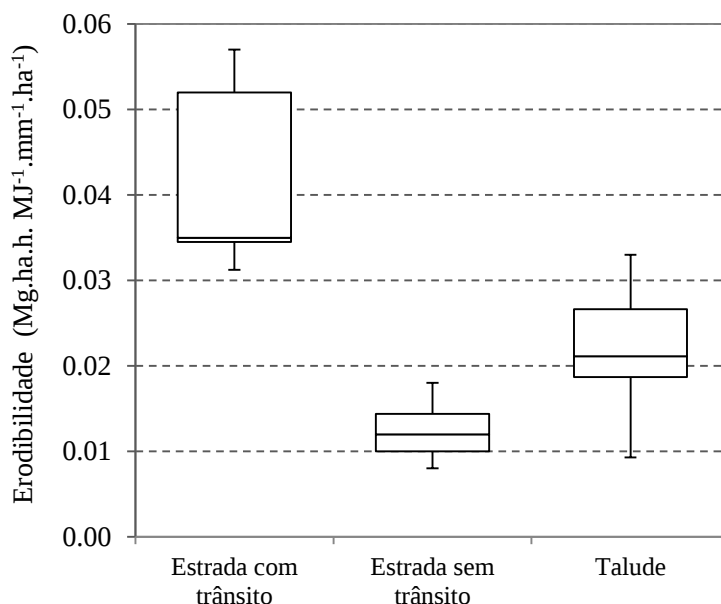
4.2.3. Erodibilidade

Na Figura 11 são apresentados valores de erodibilidade (Fator K da USLE), que representam a susceptibilidade dos solos a sofrerem erosão, obtidos a partir de amostras de solo coletadas da superfície das estradas com e sem trânsito e do talude viário monitorados neste estudo.

Na estrada com trânsito (classificação pedológica Luvisolo) os valores de erodibilidade variaram de 0,031 a 0,057 $\text{Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (média 0,042 e mediana 0,035 $\text{Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$), para a estrada sem trânsito (classificação pedológica Latossolo) os valores variaram de 0,008 a 0,018 $\text{Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (média e mediana 0,012 $\text{Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$). No talude viário monitorado, os valores variaram de 0,009 a 0,033 $\text{Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ (média 0,022 e mediana 0,021 $\text{Mg.ha.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}.\text{ha}^{-1}$).

A estrada com trânsito apresentou valores de erodibilidade do solo mais elevados que a estrada sem trânsito devido à elevada proporção de silte e areia fina presentes em sua textura. Essas frações representam quase 50% do solo da estrada com trânsito, tendo por base os resultados de análise granulométrica apresentados na Figura 10 e Tabela 7, enquanto que para o solo da estrada sem trânsito, esses valores correspondem a cerca de 20% da fração granulométrica. Além disso, o solo da estrada sem trânsito apresenta elevada proporção de partículas com diâmetro superior a 2 mm, cerca de 40%.

Figura 11 – Valores de erodibilidade (Fator K da USLE) para o solo das estradas com e sem trânsito e para o talude marginal viário. O valor central da coluna indica a mediana dos valores, e as extremidades indicam a variação de valores, máximos, mínimos e quartis



Geralmente, solos pobres em partículas cimentantes são mais susceptíveis à erosão devido às baixas coesão e plasticidade, podendo ser facilmente transportados. A susceptibilidade à erosão de solos com elevada proporção de silte é maior, devido a esta ser uma partícula de pequeno diâmetro, leve e sem coesão, que se desagrega e é facilmente transportada, em comparação com a fração argila que é fina, mas que possui forças de coesão. Luce e Black (1999) verificaram que a textura da superfície de estrada tem um forte efeito na produção de sedimentos, tendo constatado que a produção de sedimentos de estradas com superfície em solo com elevada proporção de silte era cerca de nove vezes mais elevada que a de uma composta por superfície em cascalho em parcelas experimentais em estradas florestais em Oregon (EUA).

4.3. Produção de sedimentos das estradas com trânsito e sem trânsito

Na Tabela 8 são apresentados valores de precipitação, coeficiente de escoamento superficial, concentração de sedimentos e produção de sedimentos dos eventos obtidos nas parcelas das estradas com e sem trânsito. Foram excluídos desta análise comparativa entre os segmentos três eventos que ocorreram somente na estrada com trânsito e que apresentaram baixos valores de precipitação (inferior a 7 mm) e de erosão (menos de 10% do valor total da produção de sedimentos), que podem ter ocorrido por baixa magnitude de precipitação, não sendo suficiente para gerar escoamento na superfície da estrada sem trânsito que possui solo mais permeável. Os eventos desconsiderados na análise ocorreram nos dias 13/09/13 (produção de sedimentos 0,001 Mg.ha⁻¹), 13/02/14 (produção de sedimentos 0,008 Mg.ha⁻¹) e 19/02/14 (produção de sedimentos 0,013 Mg.ha⁻¹).

Realizou-se teste de significância estatística para os valores de coeficiente de escoamento superficial, concentração de sedimentos e produção de sedimentos entre os segmentos de estradas com e sem trânsito. A distribuição estatística utilizada foi o teste U ou de Mann-Whitney, indicado para avaliar duas amostras independentes, e que não possuem distribuição normal. Os procedimentos estatísticos foram realizados com auxílio do programa estatístico, SPSS®. O resultado do teste mostrou que, para as três variáveis, as parcelas são significativamente diferentes ao nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), com p-valor de 0,032 para CR(%), de 0,00001 para concentração de sedimentos e de 0,0009 para produção de sedimentos.

Tabela 8 – Características dos eventos: precipitação, coeficiente de escoamento superficial (CR), concentração de sedimentos e produção de sedimentos das estradas com e sem trânsito

N	Data do Evento	Precipitação (mm)	CR (%)	Estrada sem trânsito		Estrada com trânsito		Produção de sedimentos (Mg.ha ⁻¹)
				Concentração de sedimentos (mg L ⁻¹)	Produção de sedimentos (Mg.ha ⁻¹)	Concentração de sedimentos (mg L ⁻¹)	Produção de sedimentos (Mg.ha ⁻¹)	
1	03/01/2013	12	13	810	0,0136	9	2172	0,0717
2	04/01/2013	29	52	257	0,0783	23	1648	0,1347
3	07/02/2013	8	22	716	0,0159	10	1566	0,0298
4	16/02/2013	53	30	628	0,1136	15	1410	0,1775
5	26/03/2013	42	32	207	0,0282	18	416	0,0891
6	30/03/2013	9	18	221	0,0037	8	948	0,0263
7	04/04/2013	11	15	137	0,0066	7	189	0,0319
8	19/04/2013	51	38	237	0,0620	28	344	0,0833
9	26/04/2013	17	10	172	0,0046	5	317	0,0103
10	02/05/2013	19	9	135	0,0079	4	286	0,0243
11	05/06/2013	11	16	530	0,0269	3	5336	0,0296
12	23/06/2013	13	13	179	0,0097	6	3940	0,0518
13	09/09/2013	29	7	179	0,0197	3	263	0,0273
14	20/12/2013	64	26	129	0,0550	14	345	0,0679
15	23/12/2013	50	4	113	0,0390	18	210	0,0599
16	13/01/2014	23	24	199	0,0661	3	446	0,0331
17	31/01/2014	12	1	606	0,0006	6	705	0,0115
18	04/02/2014	31	11	203	0,0069	22	573	0,0813
19	06/02/2014	6	26	101	0,0016	13	436	0,0202
20	10/02/2014	17	14	138	0,0033	47	536	0,0644
21	11/02/2014	44	32	154	0,0216	18	412	0,0696
22	06/03/2014	10	17	483	0,0234	11	748	0,0340
23	18/03/2014	15	13	357	0,0291	5	451	0,0337
24	28/03/2014	17	66	144	0,0165	4	177	0,0248
25	30/03/2014	5	1	387	0,0002	14	462	0,0129
26	02/04/2014	37	21	320	0,0524	2	386	0,0323
27	22/05/2014	8	2	78	0,0001	10	951	0,0073
28	29/05/2014	6	1	185	0,0001	14	3721	0,0297
29	19/09/2014	7	2	186	0,0002	10	3043	0,0384
30	17/11/2014	18	47	136	0,0115	4	1648	0,0418
31	24/11/2014	32	49	186	0,0616	2	145	0,0215

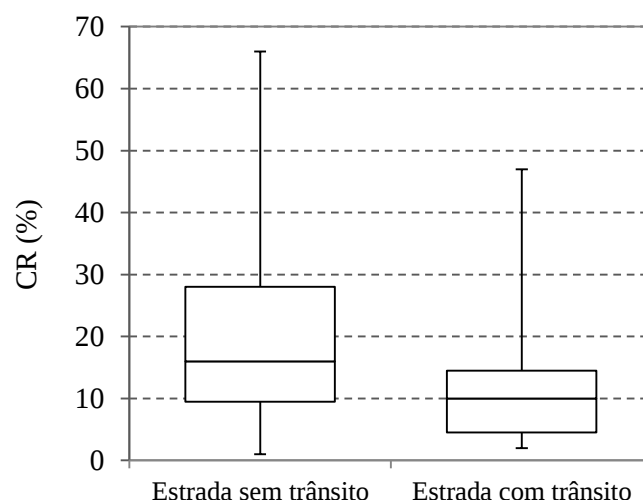
As taxas de erosão anual para a estrada sem trânsito e com trânsito, foram respectivamente, 0,48 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ e 0,92 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ no ano de 2013 e 0,30 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ e 0,56 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ no ano de 2014, respectivamente. Ao se analisar a produção de sedimentos total normalizada pela declividade, na estrada com trânsito o valor foi cerca de 3

vezes mais elevado que na estrada sem trânsito para ambos os anos de monitoramento. Os valores foram normalizados pela declividade devido à diferença entre as parcelas monitoradas na estrada com trânsito (2,4%) e sem trânsito (4,0%).

Por outro lado, ao se normalizar os valores de erosão pelo produto da declividade com erodibilidade mediana, o valor obtido para a estrada com trânsito foi apenas 10% superior ao da estrada sem trânsito, uma vez que o solo da camada superficial da estrada com trânsito é mais susceptível à erosão (Figura 11). Entretanto, outros fatores que não só a susceptibilidade do solo da camada superficial, influenciam e condicionam o processo físico de erosão. Os estudos de Ziegler, Sutherland e Giambelluca (2001a) e Sheridam et al. (2006) sugerem que a erodibilidade do solo em estradas é um parâmetro dinâmico que varia no tempo em função da umidade do solo, do trânsito, de atividades de manutenção e da disponibilidade de material solto na superfície. Também Foltz, Copeland e Elliot (2009) avaliaram que a erodibilidade na superfície de estradas diminui exponencialmente com o aumento cumulativo de fluxo.

Os valores de coeficiente de escoamento superficial dos eventos para a estrada sem trânsito variaram de 1% a 66% (média 20% e mediana 16%) e na estrada com trânsito variaram de 2% a 47% (média 12% e mediana 10%). Os valores de coeficiente de escoamento superficial do solo da estrada sem trânsito no geral (Figura 12) foram maiores que da estrada com trânsito, apesar de o solo apresentar granulometria mais granular com presença de pedregulhos (fragmentos de rocha) e maiores valores de condutividade hidráulica.

Figura 12 – Valores de coeficientes de escoamento superficial das estradas com e sem trânsito. O valor central da coluna indica a mediana dos valores, e as extremidades indicam a variação de valores máximos, mínimos e quartis



Entretanto, o segmento de estradas sem trânsito apresenta maiores declividades e a espessura da camada de solo é menor, com a presença de substrato rochoso pouco permeável logo abaixo e aflorante em alguns locais devido a processos erosivos intensos na área. Essa camada subsuperficial de rocha representa uma restrição ao fluxo de água, limitando a capacidade de armazenamento de água no solo e conduzindo a maior escoamento superficial na estrada sem trânsito.

Na Bacia Experimental de Aiuaba, área quase que completamente preservada com 12 km² e declividade média de 19,4%, Figueiredo et al. (2016) verificaram que o coeficiente de runoff (CR) médio é baixo, da ordem de 0,77%, com mediana de 0,5% e valor máximo de 2,61% (com base em oito anos de monitoramento de chuva e vazão, de 2003 a 2010) e De Araújo e Gonzalez Piedra (2009) verificaram que a produção de sedimentos é de 2,4 Mg.km⁻².ano⁻¹ (0,024 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹). Além dos baixos coeficientes de escoamento superficial, a região é caracterizada pela ocorrência de poucos eventos capazes de gerar escoamento, e Figueiredo et al. (2016) verificaram a ocorrência de escoamento em apenas 5 ocasiões na BEA no ano de 2013. Medeiros et al. (2014) destacam que essa característica provoca a quebra de conectividade na área, limitando a transferência de sedimentos das encostas para o sistema de drenagem.

As estradas sem e com trânsito apresentaram taxas de produção de sedimentos, respectivamente, 20 e 38 vezes maior em 2013 que a média produzida na BEA. Já no ano de 2014 os valores foram 12 e 23 vezes maior, respectivamente. Entretanto, são valores que não permitem uma comparação direta de produção de sedimentos devido à diferença de escala, uma vez que na maior área, espera-se uma maior quantidade de barreiras ao transporte de sedimentos, produzindo a redução da Razão de Aporte de Sedimentos (RAS) com o aumento da área da bacia, já relatada na literatura. Além disso, a estimativa realizada por De Araújo e Gonzalez Piedra (2009) contabiliza medidas de cinco anos (2003 a 2007) e o ano de 2004 foi excessivamente úmido, enquanto os anos de 2013 e 2014, em que foi realizado o monitoramento das estradas, foram secos.

Dos Santos (2012) realizou estudo comparativo sobre erosão e escoamento superficial conduzido em microbacias experimentais em Iguatu (áreas de 1 a 3 ha), também no bioma Caatinga, nos anos de 2009 a 2011 (precipitação de 800 mm a 1374 mm), sendo uma microbacia com vegetação nativa e outra desmatada, com declividades médias de 10,6% e 5,6%, respectivamente. O autor verificou coeficientes de escoamento superficial variando de 2 a 14% na área com vegetação nativa e 14 a 29% na área desmatada, além de perdas de solo variando de 0,167 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ a 3,381 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ na área com vegetação nativa e de

0,790 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ a 3,115 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ na área desmatada. Esta região, apresenta maiores precipitações e declividades e consequentemente, maiores valores de erosão, comparativamente aos valores obtidos nas estradas da área de estudo.

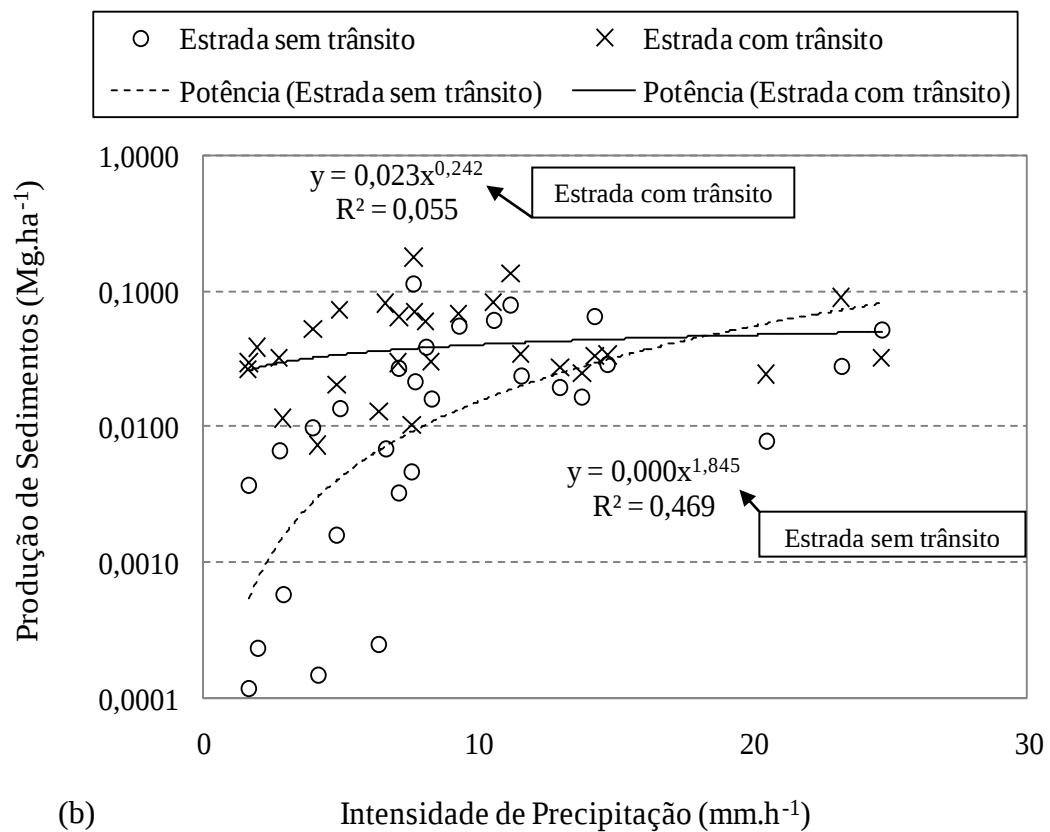
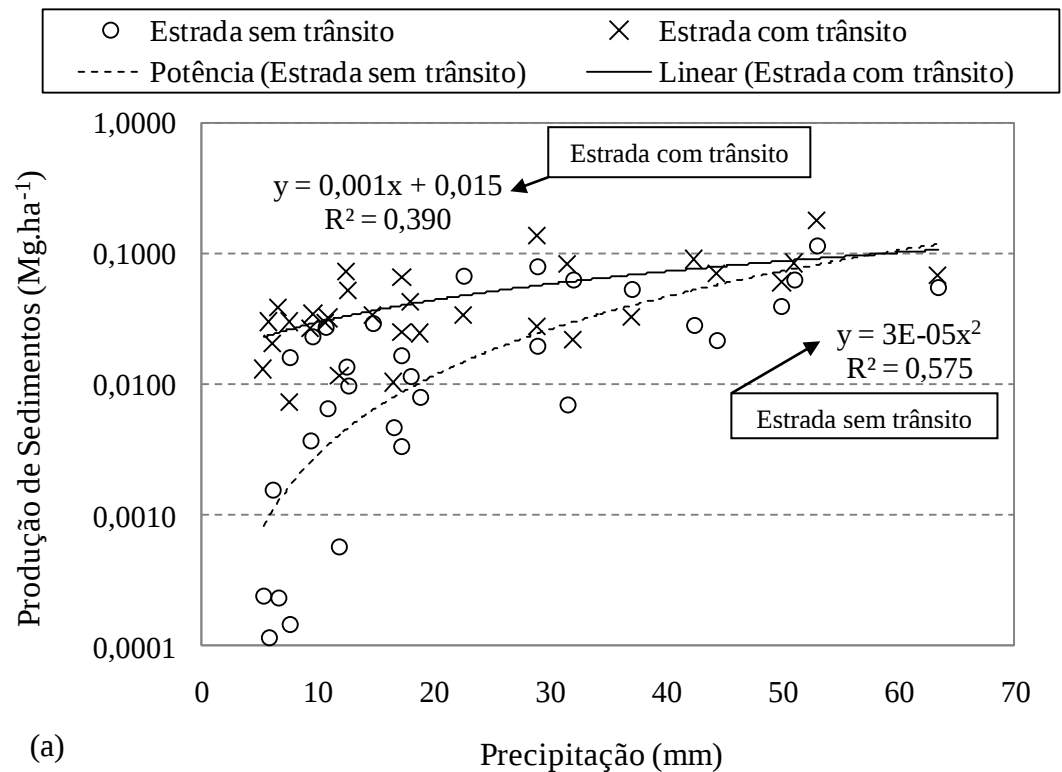
Ramos-Scharrón (2010) quantificou taxas de erosão de nove segmentos de estradas não pavimentadas abandonadas em uma área do sub-tropical seco, em Porto Rico. A taxa média global de produção de sedimentos foi de 0,84 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, associada a uma precipitação de 760 mm.ano⁻¹ em que o intervalo de valores observados foi 15-50 vezes maior do que as taxas de erosão naturais localmente medidos. Os valores obtidos para as estradas da área de estudo estão na mesma ordem de grandeza daqueles obtidos pelo autor.

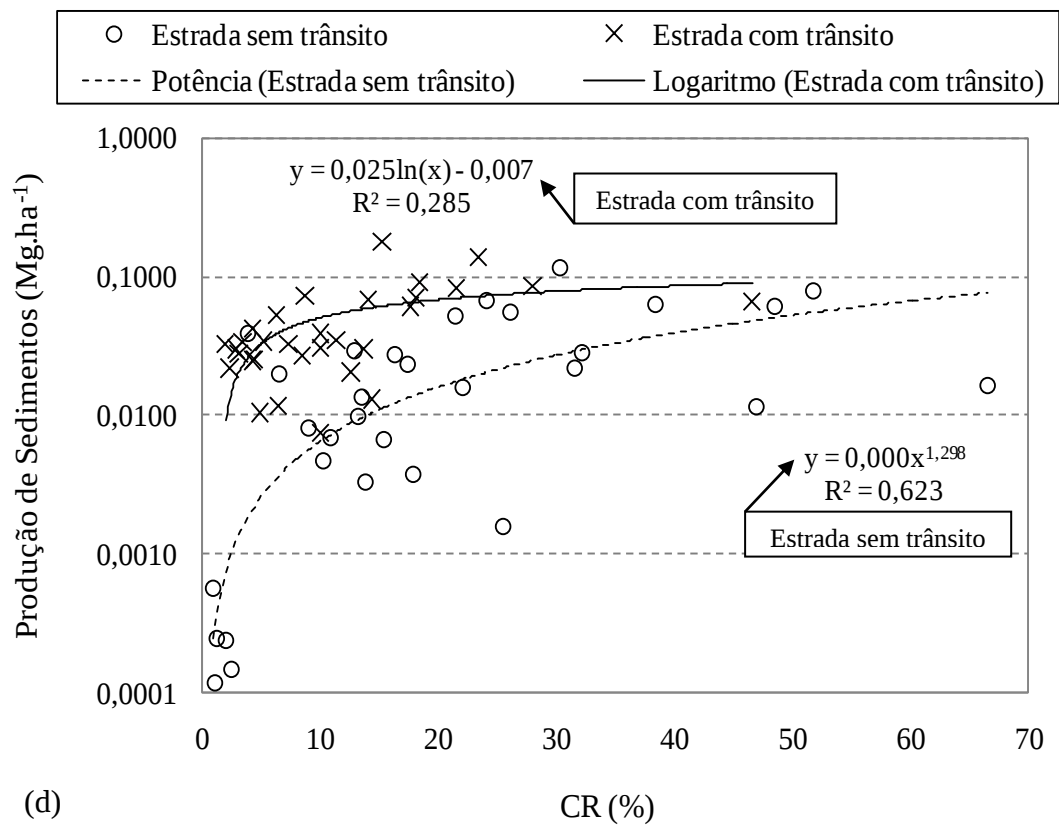
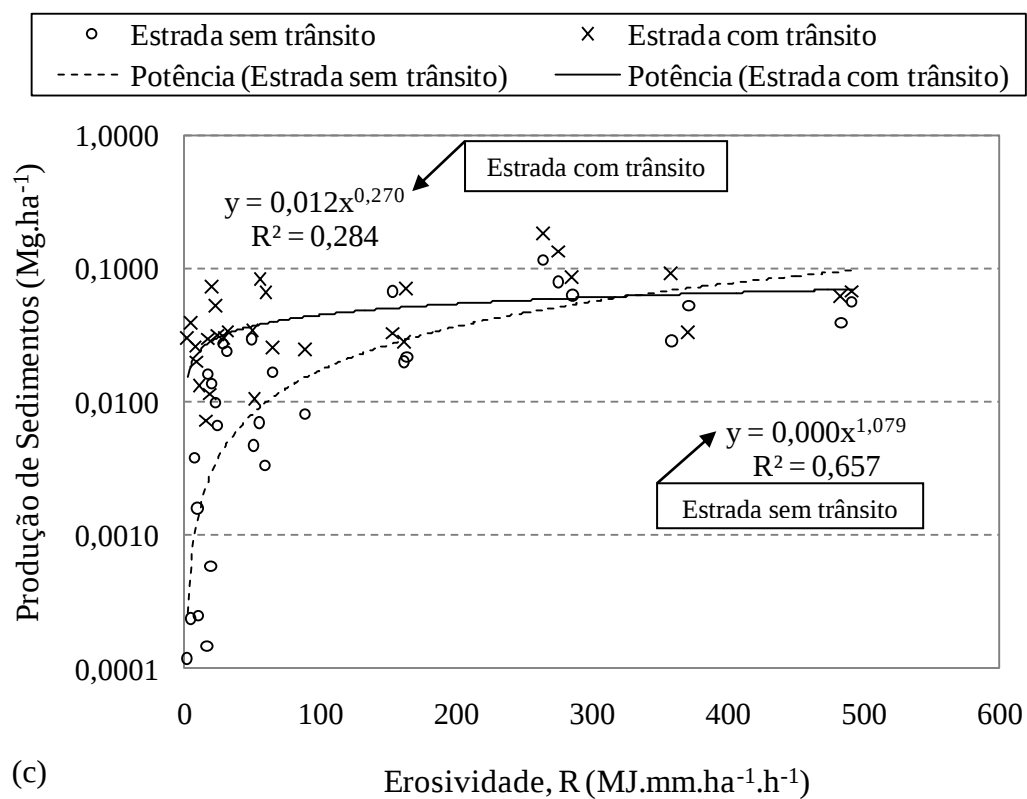
Estudos prévios apresentaram valores de produção de sedimentos para estradas superiores aos da área de estudo, entre estes: Rijdsdijk, Bruijnzeel e Sutoto (2007) estimaram na bacia do Konto, na Indonésia, valores de escoamento superficial em superfície de estradas de terra de 65% e produção de sedimentos de 70 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, em área que apresenta solos de origem vulcânica e precipitações que variam de 1735 mm a 4500 mm. MacDonald, Sampson e Anderson (2001), em estudo nas Ilhas Virgens, observaram produção de sedimentos anual variando de 90 a 150 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ em parcelas experimentais de estradas não pavimentadas. Já na escala de segmento de estrada, a produção de sedimento estimada foi de 1 a 74 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹.

Ramos-Scharron e MacDonald (2007b), em estudo também nas Ilhas Virgens, avaliaram taxas de produção de sedimentos em superfície de estradas regularizadas variando de 57 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ para estradas com 2% de declividade a 580 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ para estradas com 21% de declividade, associadas a uma precipitação que geralmente excede 1000 mm.ano⁻¹ e que apresenta elevada erosividade. Já para estradas abandonadas os autores obtiveram valores de 12 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹.

Na Figura 13 são apresentados os resultados de produção de sedimentos dos eventos (estradas com e sem trânsito) relacionados com valores de precipitação, intensidade de precipitação, erosividade da chuva e coeficiente de escoamento superficial.

Figura 13 – Produção de sedimentos dos eventos nos segmentos de estradas monitorados versus precipitação (a) , intensidade de precipitação (b), erosividade da chuva (c), e coeficiente de escoamento superficial (d)





Os coeficientes de determinação R^2 entre as variáveis investigadas foram mais baixos para a estrada com trânsito, variando de 0,055 e 0,390 (área que apresenta interferências externas do próprio trânsito e de atividades de manutenção da via), sendo a pior correlação com a intensidade de precipitação. Já na estrada sem trânsito, por se tratar de uma área mais próxima ao ambiente natural, os valores de R^2 foram superiores e variaram de 0,469 a 0,657, sendo que as maiores correlações foram obtidas em relação à erosividade e ao escoamento, que são as variáveis utilizadas na RUSLE e na MUSLE, respectivamente. Isso demonstra que a base conceitual utilizada na concepção desses modelos se aplica à estimativa da erosão também em estradas.

Para eventos de grande magnitude, a produção de sedimentos é semelhante nas duas estradas, enquanto que eventos de pequena magnitude geram bem mais sedimentos na estrada com trânsito. Isso se deve à disponibilidade de sedimentos pela passagem de veículos, ou seja, na estrada com trânsito há sempre sedimento disponível que é carregado mesmo em eventos de pequena magnitude.

Outros fatores, como a umidade antecedente do solo, influenciam o processo físico de geração de escoamento superficial e, conseqüentemente, na produção de sedimentos, de forma que, eventos com mesma precipitação, intensidade ou erosividade, podem apresentar valores de coeficiente de escoamento superficial e produção de sedimentos diferentes.

Foltz, Copeland e Elliot (2009), utilizando simulações de chuva em Idaho, EUA, observaram que um evento de alta intensidade em um solo seco produziu maiores valores de concentração de sedimentos no escoamento superficial do que a mesma intensidade em solos com umidades mais elevadas. Cao et al. (2015) destacam que a intensidade de precipitação, umidade inicial do solo e a declividade são fatores-chave para modelar o escoamento superficial e a produção de sedimentos de superfície de estradas não pavimentadas. Ramos-Scharrón (2010) também encontrou baixa correlação entre precipitação e produção de sedimentos de segmentos de estradas não pavimentadas abandonadas em uma bacia subtropical seca em Porto Rico.

4.3.1. Influência do Trânsito de Veículos e Atividades de Manutenção

A abertura de estradas rurais na região não leva em consideração a rede de drenagem natural da bacia nem a necessidade de sistema de drenagem da estrada, de forma que as estradas não possuem dispositivos de escoamento das águas que escoam em seu leito. Essa característica favorece a degradação da superfície da estrada durante o período de chuvas em

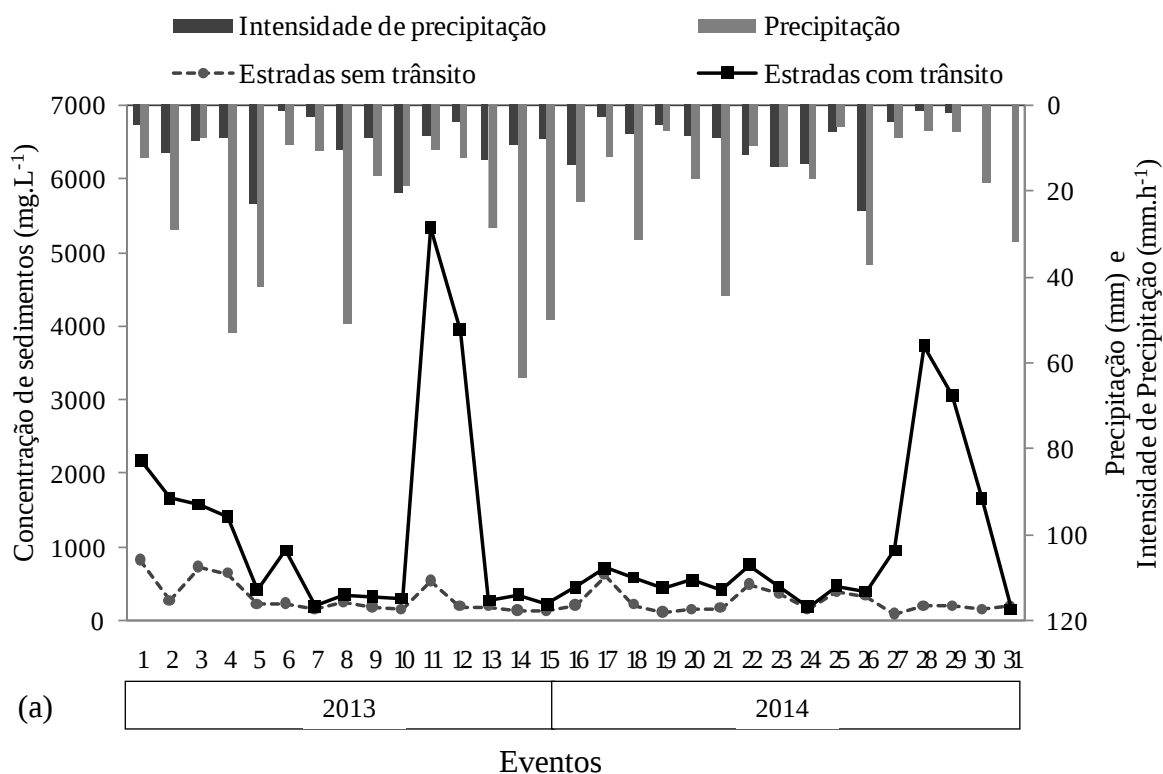
que há geração de escoamento na superfície desnuda do solo. São periódicas as atividades de manutenção das vias com maquinaria para possibilitar o trânsito de veículos. Tais atividades geram uma disponibilidade maior de sedimentos, que são carregados para a rede de drenagem natural em uma bacia hidrográfica após a ocorrência de escoamento na superfície das estradas e dos taludes viários.

Nas Figuras 14 e 15 são apresentados valores de concentração e produção de sedimentos, respectivamente, dos eventos ocorridos na estrada sem trânsito e com trânsito, em ordem cronológica. A concentração de sedimentos dos eventos variou de 78 mg.L⁻¹ a 810 mg.L⁻¹ na estrada sem trânsito e na estrada com trânsito variou de 145 mg.L⁻¹ a 5.336 mg.L⁻¹. Quinze dias após o décimo evento, ocorreram atividades de manutenção na superfície da estrada com trânsito, com uso de máquinas para possibilitar a passagem de veículos. Próximo a esta área existe uma fonte subterrânea de água e uma fábrica de envase de água adicionada de sais, existindo trânsito de caminhões para o transporte do produto, além de carros pipa, que em períodos de estiagem, transportam água para a população da zona rural.

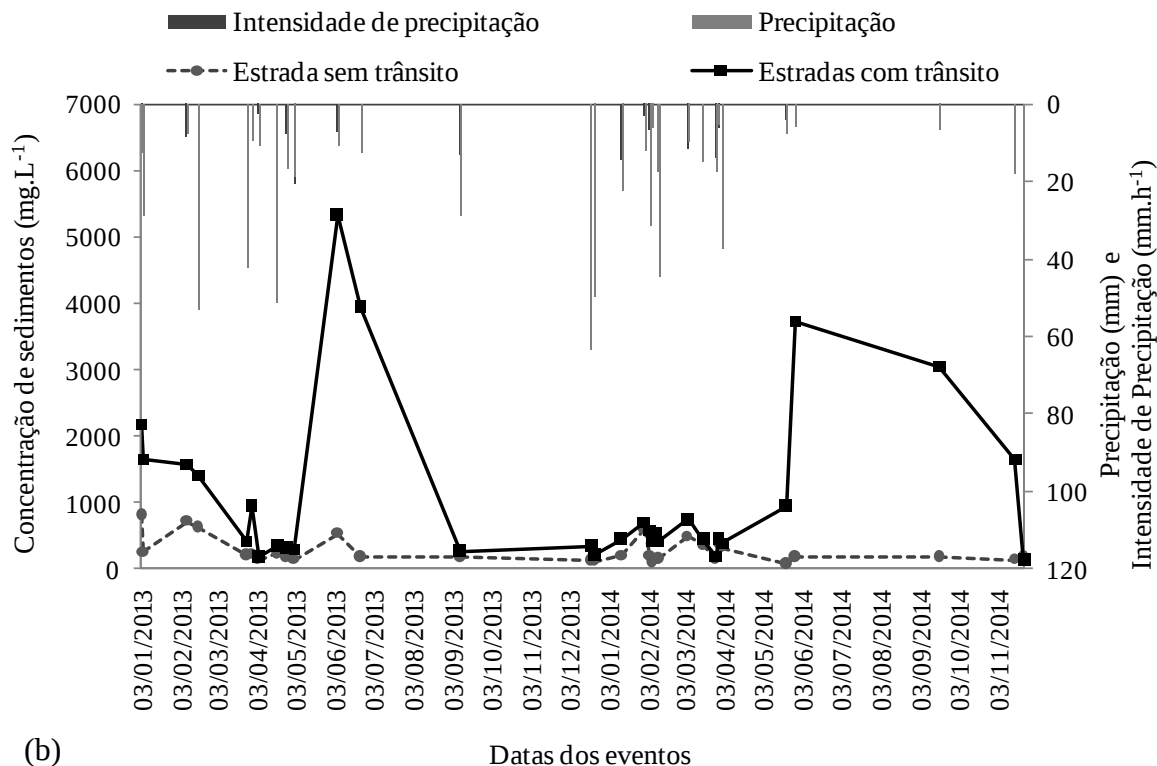
Os valores de concentração de sedimentos na estrada com trânsito apresentaram variação de aproximadamente 200 mg.L⁻¹ a 2000 mg.L⁻¹ nos primeiros dez eventos, antes de ocorrer uma regularização da via. Após a manutenção, esses valores superaram 5.000 mg.L⁻¹, ou seja, duas vezes mais que o máximo valor observado anteriormente. Entretanto, após a ocorrência de dois eventos posteriores à manutenção, há um decréscimo dos valores de concentração de sedimentos, verificado nos eventos 13 (09/09/2013), 14 (20/12/13) e 15 (23/12/2013), que ocorreram no segundo semestre de 2013, no período seco.

O comportamento de pico apresentado nas concentrações de sedimentos dos eventos 11 (05/06/2013) e 12 (23/06/2013) não fica evidenciado nos valores de produção de sedimentos destes eventos (Figura 15), uma vez que estes eventos apresentaram baixos valores de intensidade de precipitação, baixos coeficientes de escoamento superficial e, conseqüentemente, baixos valores de produção de sedimentos. Mesmo comportamento de pico de concentrações foi observado no ano de 2014, nos eventos 28 (29/05/2014) e 29 (19/09/2014) que ocorreram após manutenção da estrada seguido de decaimento nos eventos 30 (17/11/2014) e 31 (24/11/2014), uma vez que, com o passar do tempo a disponibilidade de sedimentos, soltos na via vai diminuindo.

Figura 14 – Valores de concentração de sedimentos das estradas sem trânsito e com trânsito, precipitação e intensidade média de precipitação de cada evento em ordem de ocorrência, (a) por número de evento e (b) por data de evento

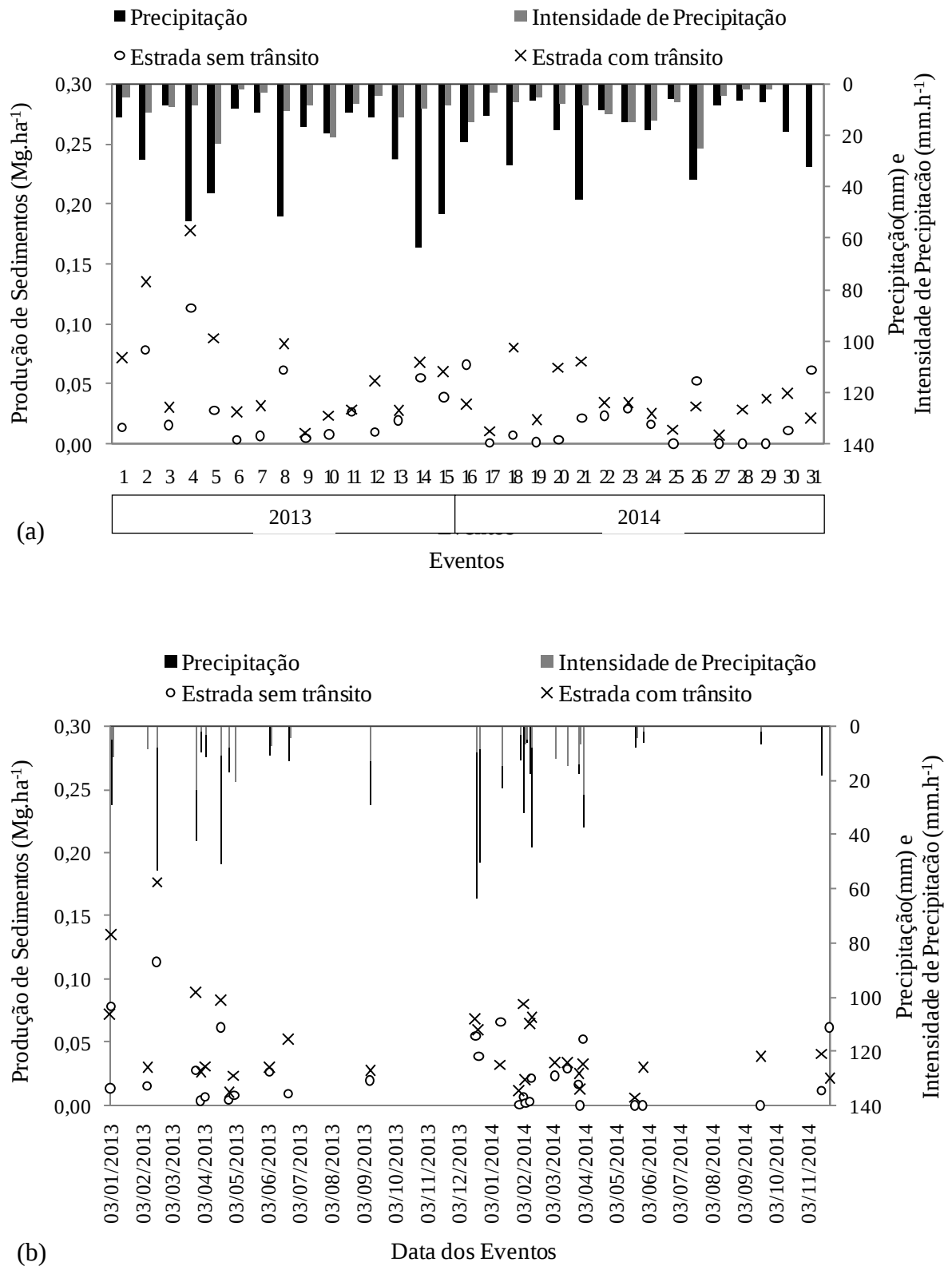


(a)



(b)

Figura 15 – Valores de produção de sedimentos das estradas sem e com trânsito, precipitação e intensidade de precipitação de cada evento em ordem de ocorrência

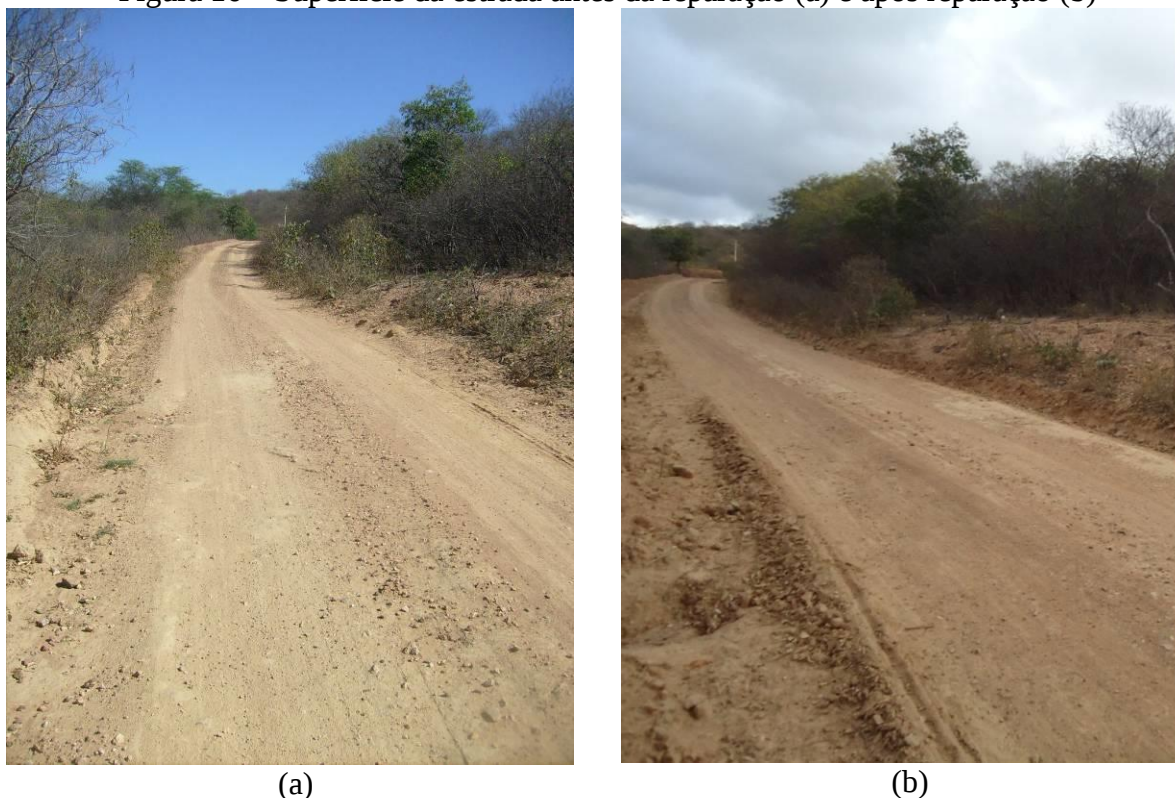


Ziegler, Sutherland e Giambelluca (2001a) comentam que o fornecimento de material solto em estradas está em fluxo constante, de forma que esta se comporta como uma superfície com erodibilidade variável. Durante a estação chuvosa, a disponibilidade de material solto gerado antes de cada evento é diminuída porque o período entre eventos é menor. Abundância de material solto na superfície da estrada em determinado momento é uma função do tráfego e de outros processos que ocorrem desde o último evento do escoamento superficial. Os autores, em um estudo na Tailândia, observaram em eventos com precipitação simulada, um aumento de três a quatro vezes na concentração de sedimentos instantânea após a passagem de motocicletas, e após a passagem de caminhões esse aumento foi de sete vezes. Além disso, a passagem de um veículo redistribui material solto existente em caminhos preferenciais de fluxo.

Apesar de produzirem elevadas concentrações de sedimentos, as atividades de manutenção não foram suficientes para impactar significativamente a produção de sedimentos, pois ocorreram no fim do período de chuvas em ambos os anos do período de monitoramento, quando a precipitação se torna mais escassa e resulta em baixo fluxo superficial, com baixo escoamento e capacidade de transporte. Estes dados corroboram com o comportamento do escoamento e produção de sedimentos observado na bacia em estudos anteriores realizados por Medeiros et al. (2014), que verificaram que a produção de sedimentos é limitada pelas condições de transporte e não pela disponibilidade de material erodido, demonstrando que elevado fluxo superficial de água implica em alta capacidade de transporte, gerando elevada produção de sedimentos.

Maiores valores de concentração de sedimentos e consequente produção de sedimentos foram obtidos após a regularização mecânica da plataforma da estrada. Similar tendência foi observada em estudos anteriores sobre produção de sedimentos provenientes de estradas, que indicam que o tráfego de veículos e atividades de manutenção da estrada aumentam a produção de sedimentos, pois geram material solto na superfície que pode ser facilmente transportado pelo escoamento superficial durante eventos chuva-deflúvio (Ex.: REID e DUNE, 1984; LUCE e BLACK, 1999; MEGAHAN, WILSON e MONSEN, 2001; ZIEGLER, SUTHERLAND e GIAMBELLUCA, 2001a; RAMOS-SCHARRON e MACDONALD, 2005, SHERIDAM et al. 2006, RAMOS-SCHARRON e MACDONALD, 2007b; NAVARRO-HEVIA et al., 2015).

Figura 16 – Superfície da estrada antes da reparação (a) e após reparação (b)



Após um processo de regularização da plataforma da estrada, a emissão de sedimentos diminui com a precipitação acumulada. À medida que novos eventos pluviométricos vão ocorrendo há o carreamento de material e consequentemente uma diminuição na disponibilidade de sedimentos. Ramos-Scharrón e MacDonald (2007b) verificaram que as taxas de produção de sedimentos de estradas não regularizadas eram aproximadamente 40% menores do que em estradas recentemente regularizada uma bacia tropical no Caribe.

Também Ramos-Scharrón e MacDonald (2005) relatam que estradas regularizadas, para uma dada declividade, produzem 2,5 vezes mais sedimentos por unidade de precipitação que uma estrada não regularizada, e que a magnitude e variabilidade das taxas de erosão tendem a diminuir entre um e dois anos após um processo de regularização. Reid e Dune (1984) observaram que um segmento de estrada com tráfego pesado (superior a 4 caminhões carregados de madeira por dia) produzia 130 vezes mais sedimentos que uma estrada abandonada.

Em estudo para avaliar o impacto de estradas não pavimentadas na China por meio de experimentos de chuva simulada, Cao et al. (2015) observaram que as taxas de perda de solo diminuíram em superfícies com material solto após eventos de precipitação de alta intensidade. Navarro-Hevia et al. (2015) verificaram, em estudo na Espanha em uma linha ferroviária (analisaram um período total de 12 anos), que as taxas de sedimentos lançados

para a rede de drenagem no primeiro ano de monitoramento após regularização dos taludes de corte foram muito elevadas ($109 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) e que estas taxas decaíram no ano seguinte e se estabilizaram em torno de 20% desse valor.

Na Figura 16 apresenta-se a superfície da estrada com trânsito antes (a) e após (b) a regularização mecânica. Os maiores valores de concentração de sedimentos obtidos nos eventos de chuva que ocorreram após a regularização da plataforma da estrada sugerem que o material solto disponível na superfície é mais erodível que o material compactado.

Ainda, de acordo com Ziegler, Sutherland e Giambelluca (2001a), a preparação de superfície refere-se a qualquer fenômeno que contribua para a disponibilidade ou transporte de material. Em áreas tropicais que apresentam um período de chuvas concentrado, a preparação entre eventos é extensa durante a estação seca. Quando a preparação entre eventos é grande, volumes de fluxos relativamente pequenos podem transportar cargas de sedimentos significativos. Se o material solto está disponível, muito será transportado logo após a geração de fluxo, mesmo eventos de baixa magnitude são capazes de arrastamento de sedimentos na superfície da estrada. No âmbito deste estudo, as taxas de produção de sedimentos não foram tão impactadas, pois as atividades de manutenção em ambos os anos ocorreram no fim do período de chuvas, e após a regularização ocorreram poucos eventos e em espaço de tempo maior com menos intensidade de precipitação.

4.4. Produção de sedimentos nas parcelas do talude com vegetação e sem vegetação

Foram registrados no período de estudo um total de 22 eventos que geraram escoamento nos segmentos de talude, nove ocorreram em 2013 e treze eventos em 2014. Realizou-se também, teste de significância estatística para os valores de coeficiente de escoamento superficial, concentração de sedimentos e produção de sedimentos entre os segmentos de talude com e sem vegetação. O resultado do teste mostrou que para as três variáveis as parcelas do talude são significantemente diferentes ao nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$), com p-valor de 0,008 para CR (%), de 0,001 para concentração de sedimentos e de 0,00006 para produção de sedimentos.

Na Tabela 9 são apresentados os valores de precipitação, coeficiente de escoamento superficial, concentração de sedimentos e produção de sedimentos dos eventos ocorridos em 2013 e 2014, das parcelas com e sem vegetação do talude rodoviário.

Tabela 9 – Características dos eventos, precipitação, coeficiente de escoamento superficial, concentração e produção de sedimentos das parcelas com e sem vegetação dos taludes

Evento	Data do Evento	Precipitação (mm)	Talude com Vegetação			Talude sem Vegetação		
			CR(%)	Concentração de sedimentos (mg.L ⁻¹)	Produção de sedimentos (Mg.ha ⁻¹)	CR(%)	Concentração de sedimentos (mg.L ⁻¹)	Produção de sedimentos (Mg.ha ⁻¹)
1	04/01/2013	29	5	653	0,0101	11	690	0,0214
2	16/02/2013	53	6	43	0,0013	6	1327	0,0411
3	26/03/2013	42	7	172	0,0053	7	648	0,0987
4	04/04/2013	11	7	428	0,0066	14	1506	0,0117
5	01/05/2013	19	16	404	0,0122	58	395	0,0438
6	23/06/2013	13	6	117	0,0018	12	3010	0,0233
7	09/09/2013	29	16	65	0,0030	45	145	0,0191
8	20/12/2013	64	1	162	0,0013	5	250	0,0087
9	23/12/2013	50	3	62	0,0010	43	342	0,0780
11	13/01/2014	23	15	79	0,0027	45	378	0,0375
12	31/01/2014	12	6	173	0,0013	7	2506	0,0194
13	04/02/2014	31	10	49	0,0015	17	2083	0,1058
14	11/02/2014	44	2	32	0,0002	23	42	0,0032
15	19/02/2014	10	8	59	0,0005	8	82	0,0006
16	06/03/2014	10	8	102	0,0008	8	224	0,0017
17	18/03/2014	15	5	35	0,0003	35	87	0,0044
18	28/03/2014	17	4	94	0,0007	5	205	0,0016
19	31/03/2014	5	15	60	0,0005	15	258	0,0020
20	02/04/2014	37	2	31	0,0002	8	110	0,0032
21	19/09/2014	7	16	241	0,0026	17	315	0,0034
22	17/11/2014	18	4	48	0,0004	19	80	0,0027
23	24/11/2014	32	2	670	0,0052	11	852	0,0290

As concentrações de sedimentos dos eventos apresentaram variação de 31 mg.L⁻¹ a 670 mg.L⁻¹ no segmento de talude com vegetação, enquanto no segmento em que houve retirada da vegetação antes do monitoramento (mesmo período de instalação das parcelas) a variação foi de 42 mg.L⁻¹ a 3.010 mg.L⁻¹. Os valores superiores a 2000 mg.L⁻¹ foram influenciados por atividades de manutenção da via, que geraram maior disponibilidade de sedimentos soltos na superfície, facilmente carregáveis. Após o quinto evento, ocorreram atividades de manutenção na superfície dessa estrada. No evento 6, posterior à manutenção, se observa um pico na concentração de sedimentos (Figura 17), enquanto que nos eventos seguintes observa-se um decréscimo dos valores de concentração de sedimentos. No ano de 2014, os eventos 11 e 12 também apresentaram pico na concentração de sedimentos seguido de decaimento no evento 13, entretanto ao se analisar as taxas de sedimentos esse comportamento não fica evidente pois se tratam de eventos de baixa intensidade de

precipitação. Este comportamento de decaimento também foi observado em estudos como o de Cao et al. (2015), pois a disponibilidade de sedimentos vai diminuindo com a ocorrência de fluxo superficial.

Os coeficientes de escoamento superficial das parcelas para o talude sem vegetação variaram de 5% a 58% (mediana 11% e média 18%), enquanto a parcela com vegetação apresentou variação de 1% a 16% (mediana 7% e média 8%), sendo os valores registrados no segmento sem vegetação similares aos da superfície da estrada. A relação entre as concentrações de sedimentos dos segmentos sem vegetação e com vegetação para cada evento variou de 1 a 43 vezes, e as taxas de produção de sedimentos variaram de 2 a 31 vezes.

A produção específica de sedimentos da encosta sem vegetação foi $0,35 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e $0,22 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, para os anos de 2013 e 2014, respectivamente. No segmento com vegetação, estes valores foram respectivamente, $0,04 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e $0,02 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, ou seja, a encosta sem vegetação apresentou perda de solo de nove a onze vezes superior àquela do segmento com vegetação. Além disso, o ano de 2013, apesar do menor número de eventos, apresentou eventos mais erosivos com impacto na produção anual de sedimentos, que foi 37% superior à de 2014. Nas Figuras 17 e 18, apresenta-se a variação da concentração de sedimentos e produção de sedimentos, evento a evento.

Figura 17 – Concentração de sedimentos dos segmentos de talude rodoviário com e sem a presença de vegetação

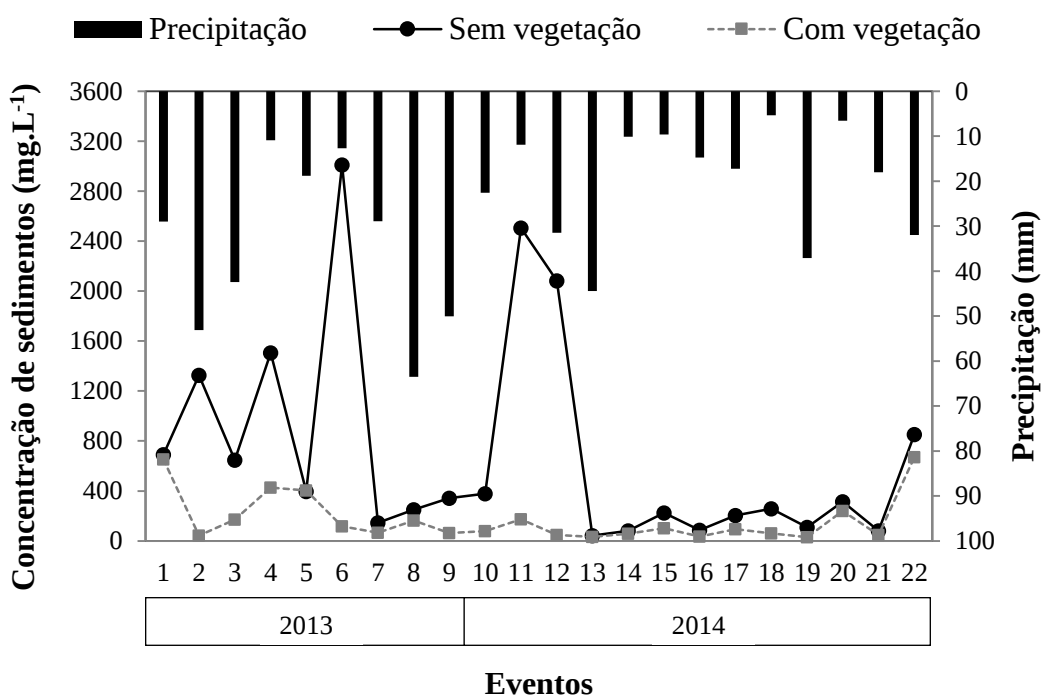
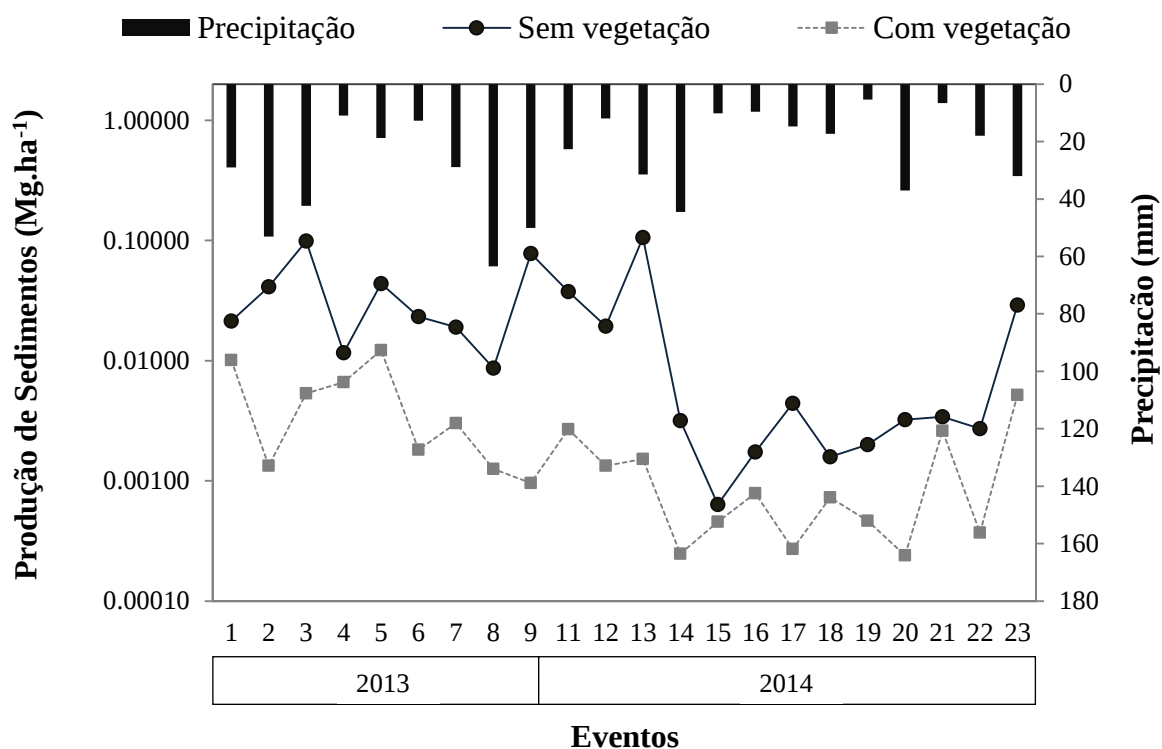


Figura 18 – Produção de sedimentos dos segmentos de talude rodoviário com e sem a presença de vegetação



Comportamento similar foi observado no estudo de Luce e Black (1999), que monitoraram parcelas experimentais em estradas florestais em bacia hidrográfica em Oregon (EUA). Os autores verificaram que a regularização de estradas aumenta a produção de sedimentos, porém é menos significativa quando a vegetação nas margens e no sistema de drenagem é mantida e os agregados da superfície são menos erodíveis que o solo nativo presente nos taludes marginais e bueiros. Verificaram também que nos segmentos de estrada onde a vegetação foi retirada dos taludes de corte, a produção de sedimentos foi sete vezes superior à daqueles com vegetação.

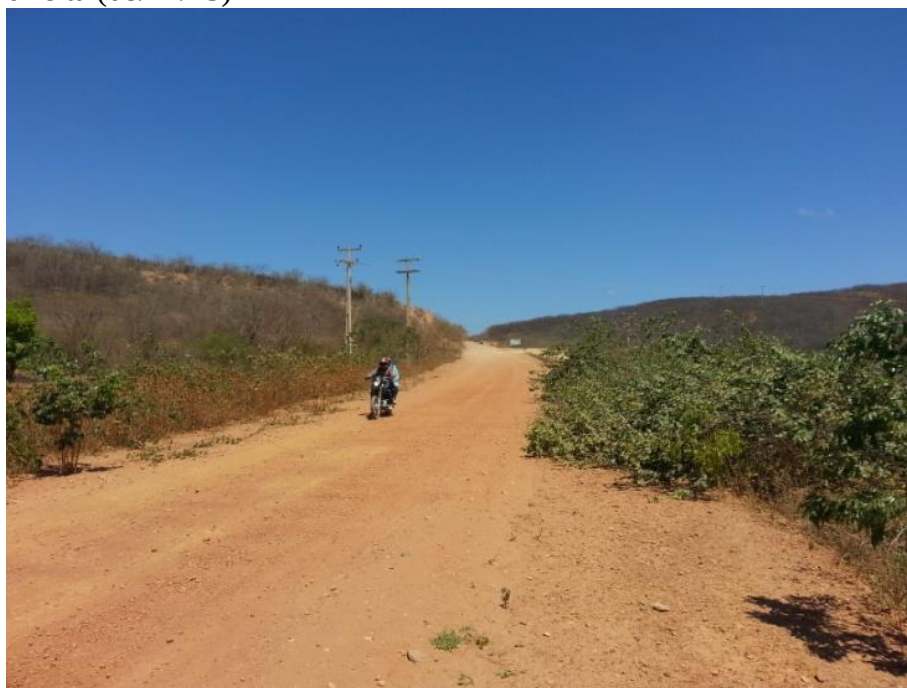
Ademais, o estudo de Navarro-Hevia (2002) sobre controle de erosão em obras ferroviárias na Espanha, utilizou tratamentos para proteção de taludes com resultados de até 99% de eficiência no controle da erosão. Ainda, Cerdá (2007) por meio de experimentos com chuva simulada, avaliou perdas de solo em parcelas de aterros rodoviários na Espanha, tendo verificado que aterros desnudos (ainda em períodos de construção), contribuíram com 30 vezes mais sedimentos que aterros com vegetação.

A vegetação natural de Caatinga mostrou funcionar como uma barreira aos sedimentos transportados da superfície da via e gerados no próprio talude, com importância na quebra de conectividade entre os fluxos de sedimentos provenientes de estradas não pavimentadas e o

sistema de drenagem da bacia. A vegetação atua interceptando a precipitação, aumentando a resistência do solo ao destacamento, reduz o impacto das gotas de chuva, o escoamento superficial e a capacidade de transporte de sedimentos, o que é sugerido pelos dados de coeficiente de escoamento superficial e produção de sedimentos.

Os dados obtidos indicam o efeito benéfico da vegetação nos taludes para a retenção de sedimentos. Entretanto, há o aspecto a ser considerado a respeito das condições de segurança das estradas quanto a visibilidade e trafegabilidade, quando a vegetação se desenvolve invadindo o acostamento ou a faixa de rolamento, representando situação de risco à segurança, de forma que se recomenda poda da vegetação, cujos galhos invadam a via, visando remover pontos críticos que impeçam o fluxo contínuo e seguro do tráfego. Na Figura 19 apresenta-se segmento do talude monitorado (08/12/15), em que o desenvolvimento da vegetação do talude apresenta invasão do acostamento da via na margem direita.

Figura 19 – Vegetação do talude monitorado neste estudo, com invasão do acostamento da via na margem direita (08/12/15)



4.5. Comparação entre produção de sedimentos da superfície de estradas medida e modelada

4.5.1. Abordagem USLE associada à Equação de Maner

Na Tabela 10 são apresentados os valores de erosão bruta (E), calculada pela aplicação da USLE, produção de sedimentos observada e calculada associando-se a USLE à equação de

razão de aporte de sedimentos de *Maner* ($E.SDR_{Maner}$), e SDR em percentual calculada pela razão entre a produção de sedimentos observada e a erosão bruta calculada com a USLE, dos eventos ocorridos em 2013 e 2014, para os segmentos de estradas com e sem trânsito.

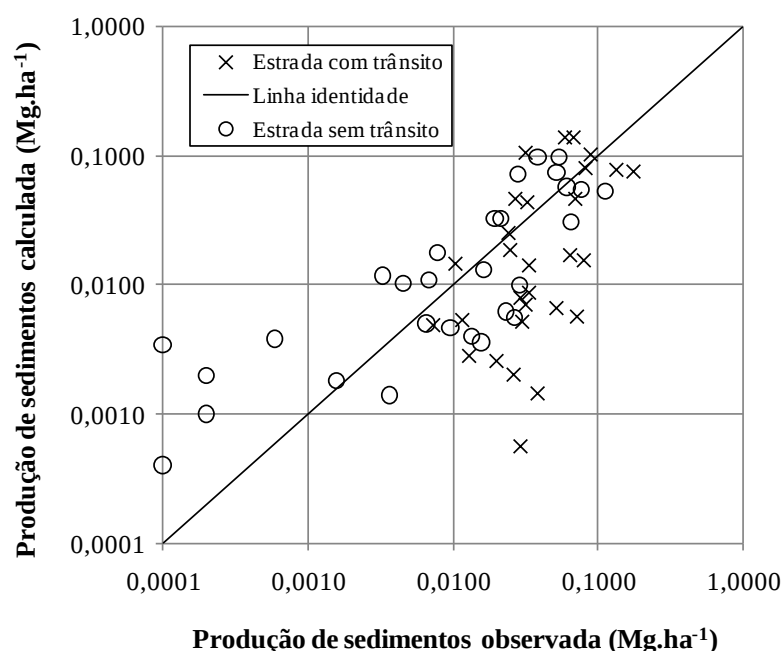
Tabela 10 – Erosão bruta (E), produção de sedimentos calculada ($E.SDR_{Maner}$), observada e SDR dos eventos (razão entre a produção de sedimentos observada e erosão bruta) dos eventos para os segmentos de estradas com e sem trânsito

ESTRADA SEM TRÂNSITO						ESTRADA COM TRÂNSITO			
Nº do evento	Data do Evento	E (Mg.ha ⁻¹)	Produção de sedimentos (Mg.ha ⁻¹)			E (Mg.ha ⁻¹)	Produção de sedimentos (Mg.ha ⁻¹)		
			Calculada	Observada	SDR (%)		Calculada	Observada	SDR (%)
1	03/01/2013	0,2206	0,0040	0,0136	6,2	0,3522	0,0057	0,0717	20,4
2	04/01/2013	3,0445	0,0500	0,0783	2,6	4,8598	0,0782	0,1347	2,8
3	07/02/2013	0,1986	0,0030	0,0159	8,0	0,3169	0,0051	0,0298	9,4
4	16/02/2013	2,9232	0,0480	0,1136	3,9	4,6661	0,0750	0,1775	3,8
5	26/03/2013	3,9601	0,0650	0,0282	0,7	6,3213	0,1017	0,0891	1,4
6	30/03/2013	0,0772	0,0010	0,0037	4,8	0,1233	0,0020	0,0263	21,3
7	04/04/2013	0,2758	0,0040	0,0066	2,4	0,4402	0,0071	0,0319	7,2
8	19/04/2013	3,1548	0,0520	0,0620	2,0	5,0359	0,0810	0,0833	1,7
9	26/04/2013	0,5626	0,0090	0,0046	0,8	0,8980	0,0144	0,0103	1,1
10	01/05/2013	0,9817	0,0160	0,0079	0,8	1,5671	0,0252	0,0243	1,6
11	05/06/2013	0,3089	0,0050	0,0269	8,7	0,4930	0,0079	0,0296	6,0
12	22/06/2013	0,2537	0,0040	0,0097	3,8	0,4050	0,0065	0,0518	12,8
13	09/09/2013	1,7870	0,0290	0,0197	1,1	2,8525	0,0459	0,0273	1,0
14	20/12/2013	5,4272	0,0892	0,0550	1,0	8,6632	0,1393	0,0679	0,8
15	23/12/2013	5,3389	0,0877	0,0390	0,7	8,5223	0,1371	0,0599	0,7
16	13/01/2014	1,6987	0,0304	0,0661	3,9	2,7116	0,0436	0,0331	1,2
17	31/01/2014	0,2096	0,0038	0,0006	0,3	0,3346	0,0054	0,0115	3,4
18	04/02/2014	0,6067	0,0109	0,0069	1,1	0,9684	0,0156	0,0813	8,4
19	06/02/2014	0,0993	0,0018	0,0016	1,6	0,1585	0,0025	0,0202	12,7
20	10/02/2014	0,6508	0,0117	0,0033	0,5	1,0389	0,0167	0,0644	6,2
21	11/02/2014	1,8091	0,0324	0,0216	1,2	2,8877	0,0464	0,0696	2,4
22	06/03/2014	0,3420	0,0061	0,0234	6,8	0,5459	0,0088	0,0340	6,2
23	18/03/2014	0,5515	0,0099	0,0291	5,3	0,8804	0,0142	0,0337	3,8
24	28/03/2014	0,7170	0,0128	0,0165	2,3	1,1445	0,0184	0,0248	2,2
25	30/03/2014	0,1103	0,0020	0,0002	0,2	0,1761	0,0028	0,0129	7,3
26	02/04/2014	4,1035	0,0735	0,0524	1,3	6,5502	0,1053	0,0323	0,5
27	22/05/2014	0,1875	0,0034	0,0001	0,1	0,2993	0,0048	0,0073	2,4
28	29/05/2014	0,0221	0,0004	0,0001	0,5	0,0352	0,0006	0,0297	84,3
29	19/09/2014	0,0552	0,0010	0,0002	0,4	0,0880	0,0014	0,0384	43,6

A razão de aporte de sedimentos (Sediment Delivery Ratio – SDR) calculada pela equação de Maner para as estradas sem e com trânsito foram, respectivamente 1,79% e 1,61%. O maior valor foi obtido para estrada sem trânsito por apresentar maior valor de declividade, sendo este um parâmetro da equação de Maner, porém ambos valores foram baixos. Foram calculados também os valores individuais de SDR (%) para cada evento a partir da produção de sedimentos observada e erosão bruta calculada pela USLE. Utilizando-se esta abordagem, a estrada sem trânsito apresentou menores valores de SDR que variaram de 0,1% a 8,7% (mediana 1,1% e média 2,5%), mas na mesma ordem de grandeza do valor obtido pela equação de Maner. Enquanto, na estrada com trânsito os valores em geral foram maiores e apresentaram maior variação, de 0,5% a 84,3% (mediana 3,8% e média 9,5%).

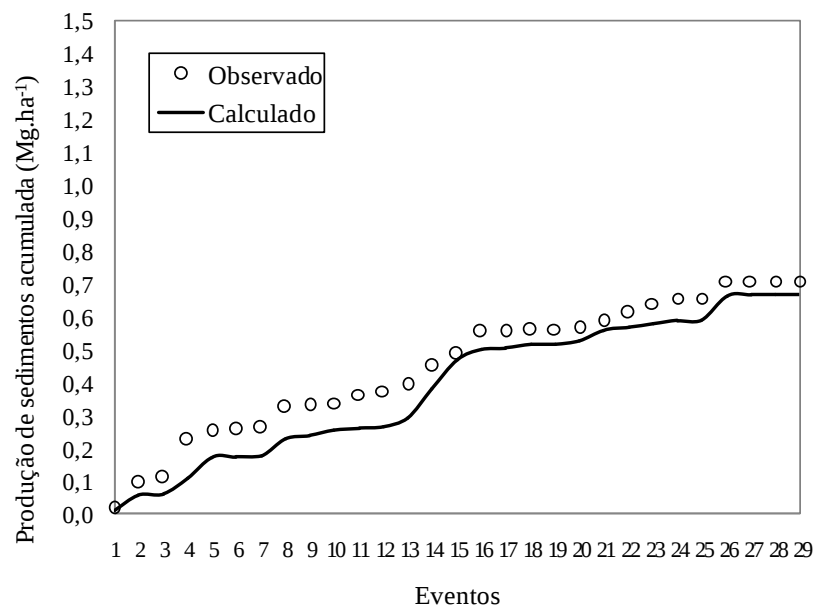
Essa maior variabilidade de valores para a estrada com trânsito também se refletiu no resultado geral da modelagem que apresentou maior erro para esse segmento. Comparando-se os valores medidos e modelados de produção de sedimentos total dos eventos, o erro da modelagem para a estrada sem trânsito foi de 5% no ano de 2013 com superestimativa e 10% no ano de 2014 com subestimativa, enquanto para a estrada com trânsito o erro foi de 20% em 2013 e de 42% no ano de 2014, com tendência de subestimativa. O resultado geral da modelagem apresenta uma tendência de subestimativa de valores, entretanto analisando os eventos individualmente, o resultado da modelagem não apresentou tendência, conforme se verifica no gráfico da Figura 20.

Figura 20 - Comparação entre a produção de sedimentos observada e calculada (USLE + SDR por Maner) dos eventos monitorados

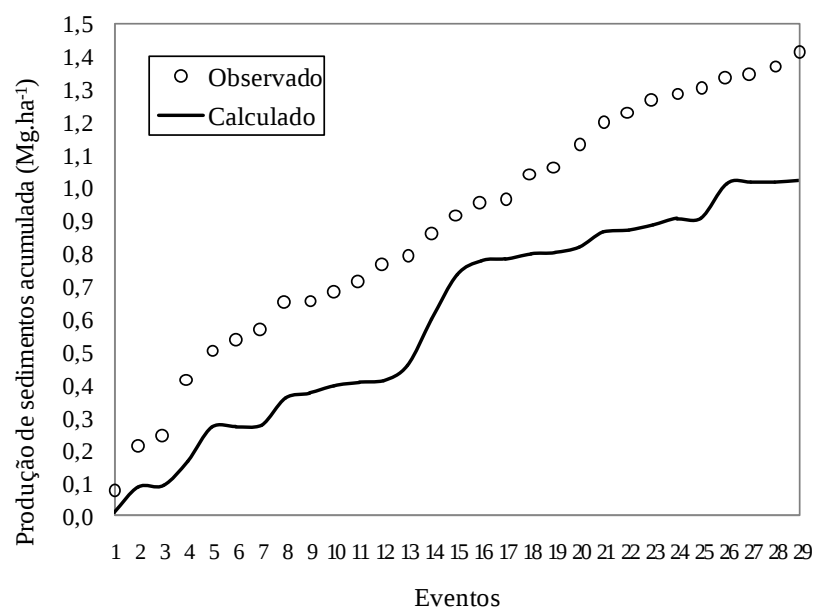


Na Figura 21 apresenta-se a comparação da produção de sedimentos acumulada observada e calculada (USLE + SDR por Maner) dos eventos monitorados (a) na estrada sem trânsito e (b) na estrada com trânsito, em função dos eventos em ordem de ocorrência.

Figura 21 – Comparação da produção de sedimentos acumulada observada e calculada (USLE + SDR por Maner) dos eventos monitorados (a) na estrada sem trânsito e (b) na estrada com trânsito, em função dos eventos em ordem de ocorrência



(a) Estrada sem trânsito



(b) Estrada com trânsito

Observa-se que as curvas da Figura 21 que representam os valores observados e calculados de produção de sedimentos acumulados para a estrada sem trânsito (a) se encontram próximas, enquanto para a estrada com trânsito (b) há um distanciamento dessas curvas. O maior erro encontrado na modelagem para a estrada com trânsito pode ter relação com processos que ocorrem na superfície dessa estrada devido a influências externas, como exemplo o tráfego de veículos e atividades de manutenção, que influenciam na variação da disponibilidade de material solto, na erodibilidade do solo e consequentemente no processo de geração de sedimentos, fenômeno não considerado nos parâmetros da modelagem utilizada. Por sua vez, os processos hidrossedimentológicos da estrada sem trânsito se aproximam mais daqueles que ocorrem em uma área para qual esta abordagem da modelagem foi desenvolvida, ou seja, sem influências externas de trânsito e manutenções.

A variabilidade de processos que ocorrem em superfícies de estradas com trânsito é reportada no estudo de Sheridan et al. (2006) que investigaram o impacto do trânsito sobre taxas de erosão e escoamento superficial em estradas florestais não pavimentadas na Austrália. A partir de dados de monitoramento de seções de estradas e aplicação da MUSLE, os autores verificaram que seções com elevado trânsito de caminhões apresentaram valores de erodibilidade (Fator K) superficial do solo quatro vezes superiores aqueles obtidos na modelagem para a condição de baixo trânsito.

4.5.2. Modelos STJEROS e ROADMOD

O modelo empírico STJEROS, que permite calcular a perda de solo em superfície de estradas com base em valores de precipitação e declividade dos segmentos e diferencia em seu equacionamento as estradas que passam por manutenção, quando aplicado às estradas da área de estudo sem calibração apresentou erros de estimativa de cerca de uma ordem de grandeza em relação aos valores obtidos no monitoramento, com erros pouco maiores para a estrada sem trânsito. Na Tabela 11 se apresenta a comparação entre os valores de perda de solo (kg.m^{-2}) medidos e modelados para os anos de 2013 e 2014 e a razão entre valores modelados e medidos.

Tabela 11 – Perda de solo (kg.m^{-2}) medida e modelada com STJEROS, razão modelada/medida

Ano	Estrada sem trânsito			Estrada com trânsito		
	Perda de solo (kg.m^{-2})		Razão	Perda de solo (kg.m^{-2})		Razão
	Medida	Modelada		Medida	Modelada	
2013	0,048	0,43	9	0,092	0,58	6
2014	0,030	0,14	5	0,056	0,24	4

Já o modelo ROADMOD também empírico, que apresenta um equacionamento mais simplificado e que permite estimar apenas uma taxa média anual de perda de solo, a partir de valores de declividade e área de superfície de segmentos de estradas, quando aplicado sem calibração aos segmentos de estrada da área de estudo apresentou valores com mesma ordem de grandeza dos valores monitorados. Este modelo no seu equacionamento não diferencia estradas que são submetidas a trânsito e manutenção de estradas abandonadas.

A perda de solo para a estrada sem trânsito estimada pelo modelo ROADMOD foi de $0,040 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, com erro de -17% para o ano de 2013 e +32% para 2014. Enquanto para a estrada com trânsito, o valor estimado pelo modelo foi de $0,041 \text{ kg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, com erro de -56% para o ano de 2013 e -27% para 2014.

Na comparação da perda de solo medida e modelada, os erros da modelagem (Tabela 12) foram sempre maiores para a estrada com trânsito levando-se em consideração os resultados obtidos nas três abordagens aplicadas, USLE associada à equação de Maner, modelos STJEROS e ROADMOD, o que evidencia que os processos hidrossedimentológicos que ocorrem em uma estrada são mais complexos, quando esta está submetida a fatores externos como trânsito e atividades de manutenção. Esses aspectos podem ser bastante variáveis no tempo, e não são explicados pelas equações dos modelos ou difíceis de serem explicadas por equações quando se trata de modelagem especificamente elaborada para estradas.

Tabela 12 – Comparativo de erro entre os três modelos

Ano	Estrada sem trânsito			Estrada com trânsito		
	USLE+Maner	STJEROS	ROADMOD	USLE+Maner	STJEROS	ROADMOD
2013	5%	802%	-17%	-20%	530%	-56%
2014	-10%	375%	32%	-42%	328%	-27%

No caso de uma estrada sem trânsito e/ou manutenções, os processos hidrossedimentológicos se aproximam mais de uma área natural, logo com erros menores, pois as equações propostas para essas condições conseguem explicar melhor o processo físico.

4.6. Taxas de erosão total na superfície de estradas e na bacia do Benguê (2013-2014)

A produção de sedimentos média dos anos de 2013 e 2014 dos segmentos de estrada com e sem trânsito, obtida a partir do monitoramento, foi de $0,74 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e $0,39 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, respectivamente. O SDR médio do período de estudo (2013-2014) estimado para as estradas com e sem trânsito utilizado no balanço foi de 2,22% e 1,78%, respectivamente. Associando-se esses valores e levando-se em consideração a área de superfície das estradas com e sem trânsito na bacia do Benguê, a erosão total na superfície de estradas com e sem trânsito foi de $21.311 \text{ Mg.ano}^{-1}$ e 182 Mg.ano^{-1} , sendo a erosão específica de $33,3 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e $21,9 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Na Tabela 13 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos a partir da modelagem para as estradas existentes na bacia do Benguê, com os respectivos valores de produção de sedimentos, SDR, e erosão para as estradas com e sem trânsito.

Tabela 13 - Valores médios para as estradas com e sem trânsito, dos anos de 2013 e 2014 de produção de sedimentos, Razão de aporte de sedimentos, e erosão bruta total

Estrada	Área (Km^2)	Produção de sedimentos ($\text{Mg. ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$)	SDR (%)	Erosão total (Mg. ano^{-1})	Erosão Específica ($\text{Mg. ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$)
com trânsito	6,4	0,74	2,22%	21.311	33,3
sem trânsito	0,1	0,39	1,78%	182	21,9

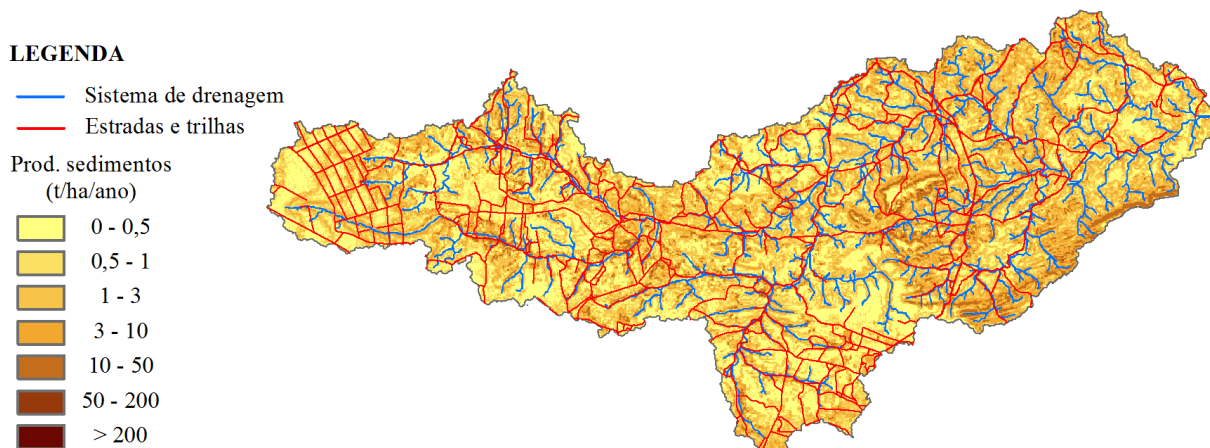
A partir da aplicação da USLE na bacia do Benguê para as áreas naturais, a perda de solo média total para os anos de 2013 e 2014 foi de $3,4 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, valor médio obtido a partir dos valores para as classes de erosão estimadas na modelagem espacializada. Na Tabela 14 apresenta-se os valores totais de erosão estimados para cada classe. A erosão total obtida para cada classe foi calculada pela multiplicação do valor de erosão central da classe pela área de superfície correspondente de cada classe. Essas áreas foram estimadas a partir do número de pixels da classe correspondente, contabilizado com o auxílio do programa ArcGIS, em que cada pixel tem 60 m de lado.

Tabela 14 - Valores de erosão em função de classes e erosão total média do período (2013 a 2014)

Classes de erosão e Valor central da classe	Área (km ²)	Área (%)	Erosão total (Mg.ano ⁻¹)
0 - 0,5 (0,25)	258,4	27,85%	6.461
0,5 – 1 (0,75)	192,6	20,76%	14.445
1 – 3 (2)	275,3	29,67%	55.070
3 – 10 (6,5)	158,6	17,10%	103.117
10 – 50 (30)	42,2	4,55%	126.619
50 – 200 (125)	0,7	0,08%	9.135
> 200 (250)	0,004	0,00%	90
TOTAL	928,0		314.937

As taxas de perdas de solo na bacia do Benguê nos anos de 2013 e 2014 foram extremamente baixas (Figura 22), em que 95% da área apresentou-se na classe baixa, (entre 0-10 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹), 4,5% classificada como moderada (entre 10-50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹) e menos de 1% da bacia com perda de solo alta ou muito alta (50-200 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹), segundo classificação apresentada por Lima e Lopes (2009). Ressalta-se que os anos de estudo coincidem com período de seca na região.

Figura 22 – Erosão na Bacia do Benguê (2013-2014), espacializada por classes de erosão



Ávila e Medeiros (2014) avaliaram perdas de solo com aplicação da USLE para o período de 2004 a 2011 na área da Estação Ecológica de Aiuaba (117,47 km²), escala menor parcialmente inserida na bacia do Benguê, e verificaram perdas de solo distribuídas nas seguintes classes: 79,6% da área entre 0-10 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹(baixa); 17,4% da área entre 10-50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹(moderada) em; 2,9% da área entre 50-200 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹(alta) e perda de solo

maior que 200 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹(muito alta) em apenas 0,1% da área total. Os autores verificaram comportamento de variação de taxas de erosão similares aos obtidos neste estudo.

Comparando-se somente as taxas de erosão bruta obtidas neste balanço, observa-se que as taxas das estradas com e sem trânsito, foram respectivamente, 10 e 6 vezes superiores à taxa média de erosão da bacia dos anos de 2013 e 2014, ou seja, cerca de uma ordem de magnitude maiores. Entretanto, ao se comparar a contribuição em termos percentuais relativamente à perda de solo total na bacia, as estradas contribuem com 6,8% do total de erosão bruta gerada na bacia, contribuição relativamente elevada, levando-se em consideração a abundância espacial das estradas enquanto fontes de sedimentos dentro da bacia do Benguê, uma vez que estas correspondem a tão somente 0,7% da área total de superfície da bacia.

Devido a bacia do Benguê ser uma área de quase 1000 km², caracterizada por uma densa rede de reservatórios, em que os processos de transporte e transferência de sedimentos dentro da bacia são muito variáveis e complexos, sofrendo influências inclusive de variação de escalas e difíceis de serem estimados com precisão, optou-se neste estudo apenas por se realizar um comparativo entre taxas de erosão estimadas pela aplicação da USLE.

Medeiros, De Araújo e Mamede (2009) destacam que a aplicação da USLE na escala de bacia não considera explicitamente a deposição de sedimentos ao longo da topografia causada pela redução da capacidade de transporte. Esta redução pode ocorrer, por exemplo, devido a mudanças de declividade e infiltração de parte do escoamento. Como as equações de SDR são empregadas de modo concentrado para toda a área da bacia, admite-se que o padrão de produção de sedimentos segue aquele indicado pela USLE para erosão bruta. Esse padrão é questionável, uma vez que havendo condições de transporte adequadas, a produção de sedimentos pode se igualar à erosão bruta, enquanto que altas taxas de infiltração podem resultar em deposição de grande parcela do sedimento erodido a montante. Entretanto, na bacia do Benguê os autores avaliaram com base na equação de Maner, uma razão de aporte de sedimentos de 7%.

Além disso, Fu, Newham e Ramos-Scharrón (2010) reportam que no desenvolvimento de modelagem preditiva de erosão de estradas há pouco enfoque na questão de transporte e emissão de sedimentos, como resultado do pouco conhecimento do processo físico de transporte e da dificuldade em obter dados monitorados para testar o grau de conectividade entre a infraestrutura viária enquanto fonte de sedimentos e os cursos de água. No escopo deste estudo, também não se conseguiu explicar como ocorrem os mecanismos de transporte de sedimentos para os cursos de água na escala da bacia, uma vez que o monitoramento realizado limitou-se à pequena escala, de segmentos de estradas e de parcelas que possuem

pouca representatividade da variabilidade de processos que ocorrem na escala de bacia. Entretanto, os resultados deste estudo são importantes para melhor compreensão de como ocorrem em áreas semiáridas os processos hidrológicos e sedimentológicos na pequena escala, e qual o impacto de estradas não pavimentadas em bacias rurais, nesses processos, enquanto atividade antropogênica.

Também a abordagem fingerprinting, não se mostrou uma técnica adequada na escala de bacia do Benguê, na identificação de estradas enquanto fontes de sedimentos. Dessa forma, chama-se atenção para a necessidade de um monitoramento de estradas mais amplo no semiárido, a ser realizado em diferentes condições de vegetação, declividade, precipitação, fatores que influenciam no processo e em segmentos com diferentes escalas, de forma a se buscar compreender os processos de conectividade com as fontes hídricas, e como atividades antrópicas impactam essas fontes.

5. CONCLUSÕES

Durante dois anos foi conduzido monitoramento sob condições de chuva natural para caracterizar escoamento e produção de sedimentos de segmentos de superfície de estradas não pavimentadas e taludes viários em região semiárida. Foi possível concluir que:

- Os valores de produção de sedimentos foram inferiores aos reportados na literatura para estradas não pavimentadas, variando de $0,30 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ a $0,92 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, porém trata-se de uma área semiárida com baixa pluviometria e caracterizada por baixos valores de coeficiente de escoamento superficial, além de os dois anos de monitoramento terem coincidido com períodos de seca na região.

- A produção de sedimentos anual (normalizada pela declividade) da estrada com trânsito foi três vezes mais elevada que da estrada sem trânsito, e os resultados do estudo sugerem que a produção de sedimentos nas estradas e taludes desnudos é pelo menos uma ordem de magnitude superior àquela registrada em área completamente preservada.

- As atividades de manutenção nas estradas e o trânsito de veículos contribuem para aumento da disponibilidade de sedimentos com impacto nos valores de concentração de sedimentos, mas impactando menos as taxas de produção de sedimentos que dependem do escoamento superficial e da intensidade de precipitação dos eventos que ocorrem após manutenção dessas estradas.

- A produção de sedimentos do segmento de talude sem vegetação foi cerca de dez vezes superior à do talude com vegetação, mostrando o potencial da vegetação de Caatinga, natural do semiárido brasileiro, na captura de sedimentos. É possível concluir que a vegetação tem papel importante na quebra de conectividade entre os fluxos de sedimentos provenientes de estradas não pavimentadas e o sistema de drenagem da bacia.

- A USLE associada à equação de Maner mostrou-se uma abordagem adequada para predição da produção de sedimentos, na escala de segmento de estrada, em que os melhores resultados foram obtidos para a estrada sem trânsito, devido a não interferência neste segmento, de fatores externos como trânsito e atividades de manutenção, não considerados no equacionamento do modelo.

- Na escala da bacia do Benguê (933 km^2), onde as estradas ocupam 0,7% da área de superfície, a aplicação de modelagem com a Equação Universal de Perdas do Solo, mostrou que estas contribuíram com aproximadamente 7% do total de perdas de solo na bacia.

- Quanto à avaliação da contribuição das estradas para as fontes hídricas, a utilização da abordagem fingerprinting, não se mostrou uma técnica adequada na região semiárida na escala de bacia do Benguê, para identificação de estradas enquanto fontes de sedimentos, pois a composição mineralógica do material das estradas era semelhante a do solo no entorno, não sendo possível a distinção destas como fontes de sedimentos utilizando a técnica.

- Este estudo demonstra que a produção de sedimentos de estradas sem pavimentar em região semiárida caracterizada por escassez hídrica supera o nível admissível de água para abastecimento o que sugere a gravidade do problema da erosão nas estradas da área de estudo. É importante investir na adequação das estradas e taludes marginais tendo como argumento, além de melhorias para a própria infraestrutura, o ganho ambiental através da redução de impactos dessas mudanças no uso do solo sobre a produção de sedimentos em bacias hidrográficas rurais. Deve-se refletir sobre a importância deste aspecto na gestão, planejamento e conservação das infraestruturas viárias e sobre a importância de se incluir nos planos de manejo de bacias hidrográficas no semiárido, ações para o controle dos sedimentos provenientes da infraestrutura viária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAY, A. E.; ERDAS, O.; REIS, M.; YUKSEL, A. 2008. Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques. **Building and Environment**, 43: 687–695.
- ALMEIDA, C. L.; OLIVEIRA, J. G. B. ; DE ARAÚJO, J. C. 2012. Impacto da recuperação de área degradada sobre as respostas hidrológicas e sedimentológicas em ambiente semiárido. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 1, p. 39-50.
- ANDERSON, D.M. 1994. Analysis and modeling of erosion hazards and sediment delivery on St. John, US Virgin Islands. **US National Park Service Water Resources Division**, Technical Report NPS/NRWRD/NRTR-94/34. Fort Collins, Colorado.
- ANDERSON, D.M., MACDONALD, L.H., 1998. Modelling road surface sediment production using a vector geographic information system. **Earth Surface Processes and Landforms**, 23 (2): 95–107.
- ÁVILA, G.G. & MEDEIROS, P.H.A. 2014. Susceptibilidade à erosão e vulnerabilidade da Caatinga aos processos erosivos na ESEC de Aiuaba- CE. **Revista Conexões - Ciência e tecnologia**, 8: 48-56.
- BARROSO, S. H. A. 2002. **Estudos de solos da Região Metropolitana de Fortaleza para Aplicação na Engenharia Rodoviária**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, São Paulo, 178 p.
- BERTONI, J. ; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo: Uso em manejo e práticas conservacionistas**. 1. ed. São Paulo: Editora Ícone, 1990. 393 p.
- BOCHET, E.; GARCÍA-FAYOS, P.; TORMO, J. 2010. How can we control erosion of roadslopes in semiarid Mediterranean areas? Soil improvement and native plant establishment. **Land Degradation & Development**, 21 (2): 110-121. DOI: 10.1002/ldr.911.
- CAO, C. S.; CHEN, L.; GAO, W. 2006. Impact of planting grass on terrene roads to avoid soil erosion. **Landscape and Urban Planning**, 78: 205–216.
- CAO, L.; ZHANG, K.; DAI, H.; LIANG, Y. 2015. Modeling interrill erosion on unpaved roads in the loess plateau of China. **Land Degradation and Development**. 26: 825–832. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2253>.
- CARVALHO, N. O. 1994. **Hidrossedimentologia prática**. CPRM, Rio de Janeiro, 372p.
- CASARIN, R. D. 2008. **Controle de Erosão em Estradas Rurais não Pavimentadas, Utilizando Sistema de Terraceamento com Gradiente Associado a Bacias de Captação**. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 101f.

CASARIN, R. D.; OLIVEIRA, E. L. 2009. Controle de erosão em estradas rurais não pavimentadas, utilizando sistema de terraceamento com gradiente associado a bacias de captação. **Irriga**, ISSN 1808-3765. Botucatu, 14: 548-563.

CERDÁ, A. 2007. Soil water erosion on road embankments in eastern Spain. **Science of the Total Environment**, 378: 151-155. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.01.041.

CREUTZFELDT, B. N. A. 2006. **Remote sensing based characterisation of land cover and terrain properties for hydrological modelling in the semi-arid Northeast of Brazil**. Dissertação (Mestrado em Geoecologia), Universidade de Potsdam, Alemanha.

COLLINS, A. L.; WALLING, D. E.; LEEKS, G. J. L. 1997. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique. **Catena**, 29:1-27.

DA SILVA, E.M.R. 2015. **Identificação das fontes de sedimentos através da técnica de fingerprinting em Bacia Hidrográfica no Semiárido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 59f.

DE ARAÚJO. J. C. 2003. Assoreamento em reservatórios do semi-árido: modelagem e validação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, 8(2):39-56.

DE ARAUJO, J. C. & GONZALEZ PIEDRA, J. I. 2009. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. *Hydrological Processes*. 23: 1169–1178.

DETER/CE. 1994. Departamento de Edificações, Rodovias e Transportes. **Especificações Gerais para Serviços e Obras Rodoviárias**. Fortaleza.

DESMET, P.J.J. & GOVERS, G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, 51: 427-433.

DISEKER, E.G. & RICHARDSON, E.C. 1961. Roadside sediment production and control. **Transactions of the ASAE**, 4 (1): 62-64, 68

DISEKER, E.G. & RICHARDSON, E.C. 1962. Erosion rates and control methods on highway cuts. **Transactions of the American Society Agricultural Engineers**, 5: 153–155.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte. 2015. **Sistema Nacional de Viação**. Brasília. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao>. Acesso em: 09/11/2015.

DONG, J.; ZHANG, K.; GUO, Z. 2012. Runoff and soil erosion from highway construction spoil deposits: A rainfall simulation study. **Transportation Research Part D** 17: 8-14. DOI: 10.1016/j.trd.2011.09.007

DOS SANTOS, J.C.N. 2012. **Mensuração da Erosão do Solo no semiárido em diferentes usos de terras e escalas espaciais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola - Manejo

e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 100f.

DUBÉ, K., MEGAHAN, W., MCCALMON, M., 2004. **Washington Road Surface Erosion Model (WARSEM) Manual**. Department of Natural Resources, State of Washington.

EATON, R. A. e S. GERARD e D. W. CATE. 1987. **Rating unsurfaced Roads – A Field Manual for Mensuring Maintenance Problems**. Special Report. 85-15 U.S. Army Corps of Engineers. Cold Regions Research & Engineering Laboratory.

FIGUEIREDO, J.V. , DE ARAÚJO, J. C.; MEDEIROS, P.H.A.; COSTA, A.C. 2016. Runoff initiation in a preserved semi-arid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**. Article first published online: 6 MAR 2016. DOI:10.1002/hyp.10801

FLANAGAN, D.C., NEARING, M.A. (Eds.), 1995. USDA – **Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation**. NSERL Report No.10. USDA-Agricultural Research Service, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.

FRANCKE, T.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A., MAMEDE, G. L.; MÜLLER, E. N. 2008. Automated catena-based discretisation of landscape for the derivation of hydrological modelling units. **International Journal of Geographical Information Science**, 22(2): 111-132.

FOLTZ, R.B. & BURROUGHS, E.R. 1990. Sediment production from forest roads with wheel ruts. **Symposium Proceedings of IR Conference Watershed Mgt/IRDivfASCE**. Durango: 266-275.

FOLTZ, R.B.; COPELAND, N.S.; ELLIOT, W.J. 2009. Reopening abandoned forest roads in northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters. **Journal of Environmental Management**, 90: 2542–2550.

FOSTER, G.R, MCCOOL D.K., RENARD, K.G., MOLDENHAUER, W. C. 1981. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, 36:355–359.

FOSTER, I. D. L., ROWNTREE, K. M.; BOARDMAN, J. AND MIGHALL, T. M. 2012. Changing Sediment Yield and Sediment Dynamics in The Karoo Uplands, South Africa; post-European Impacts. **Land Degradation & Development**. 23: 508–522.

FU, B., NEWHAM, L.T.H., FIELD, J.B. 2009. Modelling erosion and sediment delivery from unsealed roads in southeast Australia. **Mathematics and Computers in Simulation**, 79: 2679–2688.

FU, B.: NEWHAM, L.T.H.; RAMOS-SCHARRÓN, C.E. 2010. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. **Environmental Modelling and Software**, 25: 1-14.

GERLACH, T. 1967. Hillslope troughs for measuring sediment movement, In: Tricart, J. Se Macar, P. 1967. Field methods for the study of slope and fluvial processes. **Revue de Geomorphologie Dynamique**, spc. num. Cong. New-Dehli 1968: 173.

GRIEBELER, N. P. 2002. **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. 134 f.

GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; SILVA, J. M. A. 2009. Controle da erosão em estradas não pavimentadas. In: PRUSKI, F. F. (Ed). **Conservação do solo e da água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2ª ed. Viçosa - MG: Editora UFV. Cap. 7, p. 166-215.

GRUSZOWSKI, K. E. , FOSTER, I. D. L., LEES, J. A. CHARLESWORTH, S. M. 2003. Sediment sources and transport pathways in a rural catchment, Herefordshire, UK. **Hydrological Processes**, 17: 2665–2681.

GÜNTNER, A. & BRONSTERT, A. 2004. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. **Journal of Hydrology**, 297(1-4): 136-161.

GÜNTNER, A.; KROL, M.; ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. 2004. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region. **Hydrological Sciences Journal**, 49: 901-918.

HAAN, C.T.; BARFIELD, B.J.; HAYES, J.C. 1994. **Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments**. Academic Press, San Diego, 588p.

HAIGH, M.J. 1985. Geomorphic evolution of Oklahoma roadcuts. **Z. Geomorph.N.F.**, 29 (4): 439-452.

JORDÁN A, MARTÍNEZ-ZAVALA L. 2008. Soil loss and runoff rates on unpaved forest roads in southern Spain after simulated rainfall. **Forest Ecology and Management**, 255 (3-4): 913-919. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.10.002.

LIMA, J.E.F.W.; LOPES, W.T.A. 2009. **Estimativa da erosão no estado do Tocantins utilizando a equação universal de perda de solo**. In: IDE, C.N.; do VAL, L.A.A.; RIBEIRO, M.L. Produção desedimentos e seus impactos ambientais, sociais e econômicos. Editora Oeste.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. **Equação de erosividade da chuva do município de Campinas**. Campinas, SP: Instituto Agrônomo de Campinas, 1992.

LUCE, C. H. E BLACK, T. A. 1999. Sediment production from forest roads in western Oregon. **Water Resources Research**, 35 (8): 2561-2570.

MACHADO, C. C. , GARCIA, A. R., SILVA, E., FONTES, A. M. 2003. 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-MG, v.27, n.3, p.295-300.

MACDONALD, L.H.; SAMPSON, R.W.; ANDERSON, D.M. 2001. Runoff and road erosion at the plot and road segment scales, St. John, US Virgin Islands. **Earth Surface Processes and Landforms**, 26: 251–272.

MAMEDE, G. L. 2008. **Reservoir sedimentation in dryland catchments: modelling and management**. Tese de Doutorado, Instituto de Geocologia, Universidade de Potsdam, Alemanha.

MEDEIROS, P. H. A. 2009. **Processos Hidrossedimentológicos e Conectividade em Bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil - Universidade Federal do Ceará, 165f.

MEDEIROS, P.H.A.; ARAÚJO, J.C. ; MAMEDE, G.L. 2009. Padrão espacial da produção de sedimentos em bacias hidrográficas: o caso do Benguê, Ce. In: Carlos Nobuyoshi Ide; Luiz Augusto Araujo do Val; Maria Lúcia Ribeiro. (Org.). **Produção de sedimentos e seus impactos ambientais, sociais e econômicos**. 1ed. Campo Grande: Editora Oeste, 2009, v. , p. 337-356.

MEDEIROS, P.H.A.; DE ARAÚJO, J.C.; MAMEDE, G.L.; CREUTZFELDT, B.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. 2014. Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: a synthesis for the Upper Jaguaribe Basin, Brazil. **Journal of Soils and Sediments** (Print), 14: 1938-1948.

MEDEIROS, P.H.A. & DE ARAÚJO, J.C. 2014. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. **Journal of Soils and Sediments**, 14: 1216-1223.

MEGAHAN, W.F., 1978. Erosion processes on steep granitic road fills in Central Idaho. **Soil Science Society of America Journal**, 42 (2), 350–357.

MEGAHAN, W.F., KETCHESON, G.L. 1996. Predicting downslope travel of granitic sediments from forest roads in Idaho. **Journal of the American Water Resources Association** 32 (2), 371–382.

MEGAHAN, W.F., WILSON, M., MONSEN, S.B. 2001. Sediment production from granitic cut-slopes on forest roads in Idaho, USA. **Earth Surface Processes and Landforms**, 26: 153–163.

MEYER, G.J.; SCHOENEGER, P.J.; HUDDLESTON, J.H. 1975. Sediment yield from roadsides: an application of the universal soil loss equation. **Journal of soil and water conservation**, 30(6): 289-291

MINELLA, J. P. G. **Utilização de técnicas hidrossedimentométricas combinadas com a identificação de fontes de sedimentos para avaliar o efeito do uso e manejo do solo nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica rural no Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; WALLING, D. E. ; REICHERT, J. M. 2009. Changing Sediment yield as an indicator of improved soil management practices in southern Brazil. **Catena** (Cremlingen), v. 79, p. 228-236.
- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; CLARKE, R. T. 2009. Método fingerprinting para identificação de fontes de sedimentos em bacia rural. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 633/638.
- MOTHA, J.A.; WALLBRINK, P.J.; HAIRSINE, P.B.; GRAYSON, R.B. 2004. Unsealed roads as suspended sediment sources in an agricultural catchment in south-eastern Australia. **Journal of Hydrology**, 286: 1–18.
- MÜLLER, E. N.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G. L. 2010. Modelling sediment export, retention and reservoir sedimentation in drylands with the WASA-SED Model. **Geoscientific Model Development**, 3, 275-291.
- NAVARRO-HEVIA, J. H. 2002. **Control de La Erosión en Desmontes originados por obras de infraestructura viária: aplicação al entorno de Palencia Capital**. Tesis Doctoral - Departamento de Ingeniería Forestal - Universidad Politécnica de Madrid. 811f.
- NAVARRO-HEVIA, J., VÉLEZ, M., ROJO, A.; CRUZ, P. 2006. **Estudio de la revegetación, producción y emisión de sedimentos durante las obras de la autovía Oviedo-Salas (Asturias)**. I Congreso Nacional de Medio Ambiente en Carreteras. Santander, 25-28 de abril, 2006.
- NAVARRO-HEVIA. 2011. Control de sedimentos em obras com impacto fluvial para el desarrollo de La Vigilancia Ambiental. **Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales** 32:29-41. ISSN: 1575-2410.
- NAVARRO-HEVIA, J.; FARIAS, T. R. L.; DE ARAÚJO, J. C.; OSORIO-PELÁEZ, C.; PANDO, V. 2015. Soil Erosion In Steep Road Cut Slopes In Palencia (Spain). **Land Degradation & Development**. Doi:10.1002/ldr.459.
- NEGISHI, J.N. ; SIDLE, R.C. ; NOGUCHI, S. ; NIK, A. R. ; STANFORTH, R. 2006. Ecological roles of roadside fern (*Dicranopteris curranii*) on logging road recovery in Peninsular Malaysia: Preliminary results . **Forest Ecology and Management** 224:176–186.
- NEGISHI, J. N.; SIDLE, R. C.; ZIEGLER, A. D.; NOGUCHI, S; ABDUL RAHIM, N. 2008. Contribution of intercepted subsurface flow to road runoff and sediment transport in a logging-disturbed tropical catchment. **Earth Surface Processes and Landforms**, 33: 1174–1191.
- NELSON, E.J.; BOOTH, D. B. 2002 Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed. **Journal of Hydrology**, n. 264, p. 51-68.
- NOGAMI, J. S. & VILLIBOR, D. F. 1995. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 240p.

NUNES, T. V. L. 2003. **Método de Previsão de Defeitos em Estradas Vicinais de Terra com Base no Uso de Redes Neurais Artificiais**. Trecho de Aquiraz-CE. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, 118f.

ODA, S. 1995. **Caracterização de uma Rede Municipal de Estradas não Pavimentadas**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PARENTE, F. E. 2000. **Rodovias de Baixo Volume de Tráfego em Revestimento Asfáltico (TCP – Tratamento Contra Pó)**. Monografia de Especialização. 62 p. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará.

PINHEIRO, E.A. R.; COSTA, C.A.G.; DE ARAÚJO, J.C. 2013. Effective root depth of the Caatinga biome. **Journal of Arid Environment**, 89:1–4

RABELO, A. N. 2006. **Contribuição ao Estudo da Imprimação Betuminosa das Bases Rodoviárias do Estado do Ceará** - Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará.

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

RAMOS-SCHARRÓN, C.E.; MACDONALD, L.H. 2007a. Runoff and suspended sediment yields from an unpaved road segment, St. John, U.S. Virgin Islands. **Hydrological Processes**, 21: 35–50.

RAMOS-SCHARRÓN, C.E., MACDONALD, L.H., 2007b. Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St. John, U.S. Virgin Islands. **Catena**, 71: 250–266

RAMOS-SCHARRÓN, C.E. 2010. Sediment production from unpaved roads in a sub-tropicaldry setting — Southwestern Puerto Rico. **Catena**, 82: 146–158.

RAMOS-SCHARRÓN, C.E. 2012. Effectiveness of an erosion control method in reducing sediment production rates from an unpaved road. **Journal of Soil and Water Conservation** 67(2): 87-100.

RAMOS-SCHARRÓN, C. E., REALE-MUNROE, K., ATKINSON, S. C. 2014. Quantification and modeling of foot trail surface erosion in a dry sub-tropical setting. **Earth Surface Processes and Landforms**, 39: 1764–1777. DOI: 10.1002/esp.3558

REID, L.M., DUNNE, T., 1984. Sediment production from forest road surfaces. **Water Resources Research** 20, 1753–1761.

RIJSDIJK, A., 2005. Evaluating sediment sources and delivery in a tropical volcanic watershed. **International Association of Hydrological Sciences Publication**, 292: 16–23.

RIJSDIJK, A.; BRUIJNZEEL, L.A. S.; SUTOTO, C. K. 2007. Runoff and sediment yield from rural roads, trails and settlements in the upper Konto catchment, East Java, Indonesia. **Geomorphology**, 87: 28–37.

SAJJAN, A. K.; GYASI-AGYEI, Y.; SHARMA, R. H. 2013. Rainfall–runoff modelling of railway embankment steep slopes. **Hydrological Sciences Journal**, 58 (5): 1162-1176. DOI: 10.1080/02626667.2013.802323.

SHERIDAN, G. J. ; NOSKE, P. J. ;WHIPP, R. K. E; WIJESINGHE, N. 2006. The effect of truck traffic and road water content on sediment delivery from unpaved forest roads **Hydrological Processes**, 20: 1683–1699.

SHI , X.Z.; WANG , K.; WARNER , E.D.; YU, D.S.; WANG, H.J.; YANG, R.W.; LIANG, Y.; SHI, D.M. 2008. Relationship between soil erosion and distance to roadways in undeveloped areas of China. **Catena**, 72: 305–313.

SIDLE, R. C.; ZIEGLER, A. D.; NEGISHI, J.N.; NIK, A. R.; SIEW, R.; TURKELBOOM, F. 2006. Erosion processes in steep terrain—Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. **Forest Ecology and Management**, 224: 199–225.

SILVA, D. J. B. V. 2009. **Avaliação de métodos de baixo custo para a proteção de taludes em estradas rurais não pavimentadas**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. 71 f.

SPINELLI, R. & MARCHI, E. 1998. A Literature Review of the Environmental Impacts of Forest Road Construction. Proceedings of the Seminar on Environmentally Sound Forest Roads and Wood Transport. **FAO Corporate Document Repository**. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/X0622E/X0622E00.htm>, acesso em: 23/01/2014.

VILLIBOR, D. F ;NOGAMI, J. S.; FABBRI, G. T. P. 1968. Proteção a erosão em Pavimentos de Baixo Custo. **Anais da 21ª Reunião Anual de Pavimentação**, Salvador-BA.

XU, X. L.; LIU, W.; KONG, Y. P.; ZHANG, K. L; YU, B.F.; CHEN, J.D. 2009. Runoff and water erosion on road side-slopes: effects of rainfall characteristics and slope length. **Transportation Research Part D – Transport and Environment**, 14: 497-501. DOI: 10.1016/j.trd.2009.05.006.

WALLING, D. E.;COLLINS A. L. **Integrated assessment of catchment sediment budgets: a technical manual**. Exeter: Department for International Development. 2000.

WALLING, D. E.; WOODWARD, J. C. 1995. Tracing sources of suspended sediment river basins: a case study of the River Culm, Devon, UK. **Marine Freshwater Resources**, 46: 327-336.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1978. **Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning**. Agricultural Handbook No.537. US Department of Agriculture: Washington, D.C.

WOOLHISER, D.A.; SMITH, R.E.; GOODRICH, D.C., 1990. **KINEROS—a kinematic runoff and erosion model, documentation and user manual**. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77.

WILLIAMS, J.R., 1975. Sediment yield predictions with universal equation using runoff energy factor. In: **Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources**. Proceedings of the Sediment Yield Workshop, USDA Sedimentation Lab, Oxford, Mississippi, 28–30 November 1972. USDA-Agricultural Research Service, pp. 244–252. ARS-S-40.

WILLIAMS, J.R. & ARNOLD, J.G. 1997. A system of erosion – sediment yield models. **Soil Technology**, 11, 43-55.

THOMAZ, E.; VESTENA, L.R.; RAMOS-SCHARRÓN, C.E. 2014. The effects of unpaved roads on suspended sediment concentration of third- to fifth-order streams – A case study from southern Brazil. **Water and Environment Journal**, 28: 547-555. DOI: 10.1111/wej.12070.

TIECHER, T.; MINELLA, J. P. G.; MIGUEL, P.; ALVAREZ, J. W. R.; PELLEGRINI, A.; CAPOANE, V.; CIOTTI, L. H.; SCHAEFER, G. L.; DOS SANTOS, D. R. 2014. Contribuição das fontes de sedimentos em uma bacia hidrográfica agrícola sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** (Impresso), 38: 639-649.

ZIEGLER, A.D. & GIAMBELLUCA, T. W. 1997. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. **Journal of Hydrology**, 196: 204-229.

ZIEGLER, A.D.; SUTHERLAND, R.A.; GIAMBELLUCA, T.W. 2000. Runoff generation and sediment production on unpaved roads, footpaths and agricultural land surfaces in northern Thailand. **Earth Surface Processes and Landforms**, 25: 519–534

ZIEGLER, A.D., SUTHERLAND, R.A., GIAMBELLUCA, T.W. 2001a. Interstorm surface preparation and sediment detachment by vehicle traffic on unpaved mountain roads. **Earth Surface Processes and Landforms**, 26: 235–250.

ZIEGLER, A. D. ; GIAMBELLUCA, T. W.; SUTHERLAND, R. A. 2001b. Erosion prediction on unpaved mountain roads in northern Thailand: validation of dynamic erodibility modelling using KINEROS2. **Hydrological Processes**, 15: 337–358.

ZIEGLER, A.D.; GIAMBELLUCA, T.W.; SUTHERLAND, R.A.; NULLET, M.A.; YARNASAR, N. S.; PINTHONG, J.; PREECHAPANYA, P.; JAIAREE, S. 2004. Toward understanding the cumulative impacts of roads in upland agricultural watersheds of northern Thailand. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 104: 145–158. DOI:10.1016/j.agee.2004.01.012.

ZIEGLER, A.D.; NEGISHI, J.N.; SIDLE, R.C.; GOMI, T.; NOGUCHI, S.; NIK, A.R. 2007. Persistence of road runoff generation in a logged catchment in Peninsular Malaysia. **Earth Surface Processes and Landforms**, 32: 1947–1970.