

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

JAMIL ALEXANDRE AYACH ANACHE

**MORFOMETRIA, PAISAGEM, EROSÃO E PRODUÇÃO DE
SEDIMENTOS EM BACIA HIDROGRÁFICA**

CAMPO GRANDE

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

JAMIL ALEXANDRE AYACH ANACHE

MORFOMETRIA, PAISAGEM, EROSÃO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA HIDROGRÁFICA

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, na área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho

CO-ORIENTADORA: Prof.^a Dra. Cláudia Gonçalves Vianna Bacchi

Aprovada em 17 de março de 2014.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Teodorico Aves Sobrinho
Orientador – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. Elói Panachuki
Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul

Prof. Dr. Frederico Terra de Almeida
Universidade Federal de Mato Grosso

Prof. Dr. Jorge Luiz Steffen
Suplente – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

CAMPO GRANDE

2014

i

Ficha catalográfica preparada pela
COORDENADORIA DA BIBLIOTECA CENTRAL/UFMS

Anache, Jamil Alexandre Ayach

Morfometria, paisagem, erosão e produção de sedimentos em bacia hidrográfica / Jamil Alexandre Ayach Anache. Campo Grande, 2014.
66p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul,
2014.

Orientador: Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho

1. RUSLE. 2. SDR. 3. Recursos hídricos.

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus
pais João e Alexandra e ao meu irmão
Felipe, pelo apoio incondicional.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Teodorico Alves Sobrinho, pela orientação, parceria, paciência e amizade, sempre acreditando no meu trabalho e nunca me deixando desanimar e à Prof.^a Dra. Cláudia Gonçalves Vianna Bacchi, pela co-orientação deste trabalho, amizade e ajuda, sempre pronta para discutir as ideias e dúvidas deste texto e de tantos outros trabalhos.

Ao Prof. Dr. Elói Panachuki, por ter aceitado o convite de participar da banca e pela ajuda nas análises texturais do solo e ao Prof. Dr. Frederico Terra de Almeida que também se dispôs a participar da avaliação deste trabalho.

Aos colegas do grupo de pesquisa em Hidrologia, Erosão e Sedimentos (HEroS), em especial: à Prof.^a MSc. Isabel Kaufmann de Almeida; ao Prof. Dr. Jorge Luiz Steffen; aos colegas pós-graduandos: Jéssyca Stanieski de Souza, Glauber Altrão Carvalho, Larissa Fernanda Rosa de Almeida; aos alunos de iniciação científica e colaboradores voluntários do grupo: Mariana Godoy, Cristine Pedroso, Rodrigo Pompeu, André Almagro, Pedro Zamboni, Raquel Nishimoto e Julian Sone.

Aos técnicos de laboratório da FAENG: em especial, à Camila Bolognes Couto (Laboratório HEroS), que prestou toda a assistência necessária nas etapas experimentais; e ao Marcelo Campos (LAQUA), que auxiliou em importante fase da pesquisa.

À coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PGTA), Prof.^a Dra. Paula Loureiro Paulo, pela amizade e apoio, à secretaria do programa, Letícia Rodrigues, por todo suporte concedido durante o mestrado, aos professores do PGTA, pelas dicas, conversas, incentivos ao longo do curso e conhecimento compartilhado.

Aos colegas e amigos do PGTA, pela amizade, força nos momentos difíceis e companheirismo na difícil rotina da pós-graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida e à UFMS, pelos auxílios concedidos durante o mestrado.

Aos meus pais, João Jamil Anache e Alexandra Ayach Anache, que estão ao meu lado em todos os momentos da minha vida e me dão todo o suporte para a minha formação e ao meu irmão Felipe Ayach Anache, pelo companheirismo, amizade e paciência.

À minha família, em especial às minhas avós Adibi Issa Ayach e Ermelinda Gonçalves Anache e aos meus padrinhos Elizabete Anache e Wilson Ayach, por todo apoio, conselhos e suporte na minha caminhada, sempre torcendo por mim.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho: Obrigado!

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	8
CAPÍTULO 1: A INFLUÊNCIA DA PAISAGEM NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE BACIA HIDROGRÁFICA	10
RESUMO	10
ABSTRACT	10
1. INTRODUÇÃO	11
2. MATERIAL E MÉTODO.....	12
2.1. Área de Estudo	12
2.2. Discretização espacial e caracterização física	13
2.3. Levantamento de dados espaciais (mapas temáticos)	14
2.4. Correlação dos dados espaciais com as características físicas	15
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
3.1. Discretização espacial e caracterização física	16
3.2. Mapas temáticos.....	19
3.3. Correlação dos dados espaciais com as características físicas	20
4. CONCLUSÕES.....	23
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
CAPÍTULO 2: AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS NA MODELAGEM DA PERDA DE SOLOS.....	26
RESUMO	26
ABSTRACT	26
1. INTRODUÇÃO	27
2. MATERIAL E MÉTODO.....	29
2.1. Área de estudo.....	29
2.2. Amostragem e análise dos solos.....	30
2.3. Cálculo indireto da erodibilidade dos solos	31
2.4. Análise estatística.....	32
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
3.1. Atributos do solo na área de estudo.....	32
3.2. Erodibilidade dos solos na área de estudo quanto à pedologia	33
3.3. Relação entre a erodibilidade e os atributos do solo	36
4. CONCLUSÕES.....	37
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

CAPÍTULO 3: MODELAGEM DO FATOR C DA (R)USLE EM PASTAGEM BASEADA NO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA	40
RESUMO	40
ABSTRACT	40
1. INTRODUÇÃO	41
2. MATERIAL E MÉTODO.....	43
2.1. Área de Estudo	43
2.2. Obtenção do fator C	44
2.3. Modelagem do fator C.....	45
Estimativa do fator C	45
2.4. Análise estatística e avaliação dos modelos	46
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4. CONCLUSÕES.....	49
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
CAPÍTULO 4: PERDAS DE SOLOS E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA HIDROGRÁFICA: UMA ABORDAGEM DISTRIBUÍDA	52
RESUMO	52
ABSTRACT	52
1. INTRODUÇÃO	53
2. MATERIAL E MÉTODO.....	54
2.1. Área de Estudo	54
2.2. Estimativa da perda de solos (A).....	55
2.3. Estimativa da produção de sedimentos (SY).....	58
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
3.1. Estimativa da perda de solos (A).....	58
3.2. Estimativa da produção de sedimentos (SY).....	60
4. CONCLUSÕES.....	63
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
CONCLUSÕES GERAIS	66

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Localização da área de estudo.....	12
Figura 2. Etapas de obtenção de elevação, declividade e HRUs.....	14
Figura 3. Sistema de drenagem da sub-bacia e suas HRUs.....	16
Figura 4. Modelo Digital de Elevação e carta de declividade da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba.....	17
Figura 5. Mapas temáticos de geologia e geomorfologia da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba.....	19
Figura 6. Mapa temático de pedologia da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba.....	20

CAPÍTULO 2

Figura 1. Localização da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba (acima), distribuição das classes de solo na área de estudo (A) e pontos de amostragem de solo (B). As classes de solo seguem o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos.....	30
Figura 2. Efeitos de fator K da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba obtidos por métodos indiretos.....	35

CAPÍTULO 3

Figura 1. Localização da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba (acima), pontos de simulação de chuva para determinação do fator C (A) e mapeamento do NDVI (B).....	43
Figura 2. Simulador de Chuvas InfiAsper. (1) estrutura; (2) unidade de aplicação de água; (3) sistema elétrico; (4) bomba d'água; (5) coletor de escoamento (Alves Sobrinho et al., 2008).....	44

CAPÍTULO 4

Figura 1. Localização da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba e subdivisões em unidades de resposta hidrológica (HRU).....	54
Figura 2. Fatores componentes do modelo RUSLE (R, K, LS, C, P) e o resultado da integração caracterizado no mapa A (perda de solos).....	61
Figura 3. SDR (relação de aporte de sedimentos) expressa de forma distribuída e SY (produção de sedimentos) ao longo da área de estudo.....	62
Figura 4. Produção de sedimentos nas HRUs da área de estudo.....	63

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1. Características físicas e seus métodos de obtenção.....	13
Tabela 2. Classificação dos coeficientes de correlação de Pearson.....	15
Tabela 3. Características físicas da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba e de suas HRUs.....	17
Tabela 4. Distribuição das classes temáticas na sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba e nas suas HRUs.....	20
Tabela 5. Matriz de correlação entre as classes temáticas e as características físicas das sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba.....	21

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Média ($\pm$ desvio padrão) da matéria orgânica e da textura do solo para diferentes classes de solo (em porcentagem).....	33
Tabela 2. Médias das variáveis de entrada das equações de estimativa do fator K: M (adimensional), a (em porcentagem), b (adimensional), c (adimensional), Dg (mm), DMP (mm), REL (adimensional), C (em porcentagem), SN1 (adimensional).....	33
Tabela 3. Média ($\pm$ desvio padrão) da erodibilidade do solo para diferentes classes de solo...	34
Tabela 4. Matriz de correlação entre as características do solo e os valores estimados de fator K obtidos pelos modelos avaliados (valores em negrito apresentam forte correlação).....	36

CAPÍTULO 3

Tabela 1. Valores de perdas de solo com cobertura (CC) e sem cobertura (SC) em kg.m^{-2} , fator C (observados e modelados) e NDVI obtido por sensoriamento remoto.....	47
Tabela 2. Ajuste estatístico dos modelos avaliados.....	47

INTRODUÇÃO GERAL

A erosão dos solos é considerada como um dos principais problemas ambientais da atualidade, ameaçando as atividades agropecuárias devido à degradação do solo. Além disso, a erosão do solo contribui para a produção de sedimentos em bacias hidrográficas, que podem ser depositados em reservatórios e diminuir a sua vida útil e também diminuir as calhas dos rios e potencializar a ocorrência de inundações.

O monitoramento do uso e manejo do solo e a sua influência na perda de solos é muitas vezes inviável devido aos custos elevados. Assim, os modelos preditivos de erosão e produção de sedimentos a serem aplicados em escala de bacia hidrográfica utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são alternativas para dirigir as ações de conservação do solo e da água na área de interesse.

Modelos empíricos de simples aplicação como a Equação Universal de Perdas de Solos (USLE) e a Equação Universal de Perdas de Solos Revisada (RUSLE) são exemplos de metodologias largamente aplicadas no mundo para estimar taxas de erosão e podem ser adaptadas utilizando o conceito da relação aporte de sedimentos (SDR) para calcular a produção de sedimentos da bacia hidrográfica e de suas unidades de resposta hidrológica (HRU).

Deste modo, pode-se adotar abordagem distribuída com o intuito de espacializar as variáveis que se pretende estudar, criando mapas que subsidiam as tomadas de decisão por parte dos gestores da área estudada. A RUSLE, modelo utilizado neste trabalho, é composta por cinco fatores que resultam na estimativa da perda de solo média anual, sendo: erosividade da chuva e do escoamento superficial (R); erodibilidade do solo (K); fator topográfico (LS); uso e manejo do solo (C) e práticas conservacionistas (P).

Apesar de modelos empíricos como a (R)USLE serem simplificados, a aquisição de seus fatores são objetos de estudo de diversos trabalhos. Fatores como K e C necessitam de estudos experimentais para serem calibrados nas condições brasileiras. No entanto, a calibração pode ser inviabilizada por questões econômicas. Assim, métodos indiretos existem para auxiliar na obtenção dos fatores, evitando as etapas experimentais. Porém, é necessário que as alternativas para aquisição de fatores componentes da RUSLE sejam utilizadas com critério e coerência com as condições onde se pretende aplicar o modelo.

A sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba, responsável por parte do abastecimento da água de Campo Grande, capital do Estado de Mato Grosso do Sul, é a área

de estudo do presente trabalho, definida como Área de Proteção Ambiental (APA). A área integra duas unidades geológicas distintas (arenito e basalto), dois tipos geomorfológicos (colinas muito amplas e planícies fluviais), três classes de solos (Neossolo Quartzarênico óritico, Neossolo Quartzarênico hidromórfico e Latossolo Vermelho distrófico) e sete unidades de resposta hidrológica.

Assim, o trabalho teve como objetivo geral estimar a perda de solos e a produção de sedimentos em bacia hidrográfica de modo a auxiliar na gestão dos recursos hídricos. Para isso, foram traçados quatro objetivos específicos que caracterizam as variáveis operacionais da pesquisa: (I) Caracterizar fisicamente a bacia hidrográfica em estudo; (II) Verificar a correlação das características físicas com os dados de geologia, geomorfologia e pedologia da área de estudo; (III) Estudar alternativas para a obtenção de fatores componentes de modelo preditivo de erosão do solo; (IV) Estimar a produção de sedimentos de forma distribuída em bacia hidrográfica através de modelo preditivo de erosão do solo.

Portanto, esta dissertação está apresentada em 4 capítulos (artigos), que refletem os objetivos do trabalho. O primeiro capítulo traz a caracterização física da área de estudo (etapa imprescindível em estudos de qualquer natureza em escala de bacia hidrográfica) e investiga a correlação das características físicas com os dados de geologia, geomorfologia e pedologia. O segundo e o terceiro capítulo estudam alternativas para a obtenção dos fatores K e C, componentes da RUSLE, propondo soluções para aquisição destes dados. Por fim, o quarto capítulo traz a aplicação do modelo RUSLE de forma distribuída para a estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica inserida no bioma Cerrado, constituindo ferramentas de suporte à tomada de decisão na área.

CAPÍTULO 1: A INFLUÊNCIA DA PAISAGEM NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE BACIA HIDROGRÁFICA

RESUMO

A delimitação e discretização das bacias hidrográficas são necessárias, para que suas características topograficamente definidas sejam conhecidas e interpretadas. As características da paisagem, como geologia, geomorfologia e pedologia, são temas importantes e que podem estar correlacionados com as características morfométricas da unidade territorial. Portanto, este estudo tem como objetivo verificar a correlação das características físicas com os dados de geologia, geomorfologia e pedologia da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba, que é de 5ª ordem. Sistema de Informações Geográficas (SIG) foi utilizado no levantamento e integração dos dados sobre a área de estudo, que é considerada Área de Proteção Ambiental (APA), e as correlações entre os dados foram estudadas através de coeficientes de correlação de Pearson. Assim, foram determinadas as características físicas básicas e derivadas da sub-bacia hidrográfica, e foram obtidos os mapas temáticos de geologia, geomorfologia e pedologia. A discretização espacial identificou 7 unidades de resposta hidrológica (HRU) de no mínimo 3ª ordem, com predominância de cursos d'água de 1ª e 2ª ordem, sendo a drenagem de padrão dendrítico e pouco desenvolvida. As características físicas da sub-bacia hidrográfica e a paisagem (geologia e geomorfologia) não possuem dependência linear. Entretanto, há forte correlação entre a pedologia e algumas características físicas (área, perímetro, elevação, densidade de drenagem e extensão média do escoamento superficial).

Palavras-chave: Caracterização morfométrica, discretização de bacias hidrográficas, padrão dendrítico, recursos hídricos.

ABSTRACT

Watersheds must be delineated and discretized to allow interpretation of the topographical features identified. In addition, geology, geomorphology and pedology are important landscape aspects that can be associated to morphometric characteristics of a territorial unit. In this respect, the present study evaluated the correlation between physical features and geological, geomorphological and pedological aspects in the Guariroba stream subwatershed, a 5th order watershed located in an Environmental Protection Area. The Geographic Information System (GIS) was used in data survey and integration, and the associations evaluated by Pearson's Correlation Coefficient. To that end, we determined the basic and derivate physical parameters of the watershed and obtained spatial data for geology, geomorphology and pedology. The spatial discretization identified 7 hydrologic response units (HRU) of at least the 3rd order in the Guariroba stream subwatershed, with predominance of 1st and 2nd order watercourses and dendritic, poorly developed drainage system. Physical features of the watershed and landscape (geology and geomorphology) did not exhibit linear dependence. However, a strong linear correlation was found between watershed pedology and a number of physical features (area, perimeter, elevation, drainage density and length of overland flow).

Keywords: Morphometric characterization, Watershed discretization, Dendritic pattern, Water resources

1. INTRODUÇÃO

A discretização espacial é importante para a caracterização e compreensão do sistema hidrológico de bacias hidrográficas, sendo que a obtenção e análise de suas características físicas, ou morfométricas, permitem estimar o seu comportamento hidrológico (Perucca e Angilieri, 2011). Para isso, são necessários dados topográficos que representem a área de drenagem a ser estudada, como carta topográfica, imagem de satélite, Modelo Digital de Elevação (MDE), entre outros.

O ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) permite a delimitação, discretização espacial e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas, auxiliando no planejamento e gestão dos recursos hídricos, sendo uma alternativa prática e viável para a modelagem hidrológica, uma vez que minimiza custos e tempo para a realização do estudo (Guedes e Silva, 2012). Além disso, a compilação de dados espaciais hidrológicos se torna mais fácil, com maior riqueza de detalhes e escalas de trabalho mais detalhadas (Berhanu *et al.*, 2013).

Logo, na gestão dos recursos hídricos, o levantamento de dados topográficos e de drenagem é essencial para auxiliar na elaboração de planos de desenvolvimento para a bacia hidrográfica (Sreedevi *et al.*, 2004). MDEs são grades regulares compostas por células que contém informações de altitude do terreno, podendo ser gerados a partir da interpolação de dados digitalizados de cartas topográficas ou por sensoriamento remoto. A partir do MDE, é possível delimitar automaticamente bacias hidrográficas, determinar a declividade de forma distribuída, mapear a rede de drenagem e, conseqüentemente, obter as características físicas (Cardoso *et al.*, 2006).

De acordo com Bloomfield *et al.* (2011), as influências nas características morfométricas de bacias hidrográficas pela geologia, geomorfologia e pedologia vêm sendo estudadas de forma qualitativa. Assim, é sugerido que as características mapeadas sejam utilizadas para se investigar a correlação entre variáveis hidrológicas e a paisagem de forma quantitativa, utilizando-se matriz de correlação de Pearson, na qual é possível verificar o grau, direção e significância da correlação.

A sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba, responsável por parte do abastecimento da água de Campo Grande, capital do Estado de Mato Grosso do Sul, é a área de estudo do presente trabalho, definida como Área de Proteção Ambiental (APA). A área integra duas unidades geológicas distintas (arenito e basalto), dois tipos geomorfológicos

(colinas muito amplas e planícies fluviais) e três classes de solos (Neossolo Quartzarênico óritico, Neossolo Quartzarênico hidromórfico e Latossolo Vermelho distrófico). Hipoteticamente, há interferência da paisagem nas características morfométricas obtidas topograficamente, porém, é necessário e possível estudar estatisticamente tais correlações.

Nesse contexto, as características físicas da área de drenagem foram computadas em ambiente SIG, onde também foram integrados os mapas temáticos de geologia, geomorfologia e solos, de modo a viabilizar a correlação entre as variáveis. Assim, este trabalho objetiva verificar a correlação das características físicas com os dados de geologia, geomorfologia e pedologia da área de estudo.

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1. Área de Estudo

A área de abrangência do estudo compreendeu a sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba, localizada entre os paralelos $20^{\circ} 28'$ e $20^{\circ} 43'$ de latitude sul e os meridianos $54^{\circ} 29'$ e $54^{\circ} 11'$ de longitude oeste, ocupando a área de 362 km^2 (Figura 1).

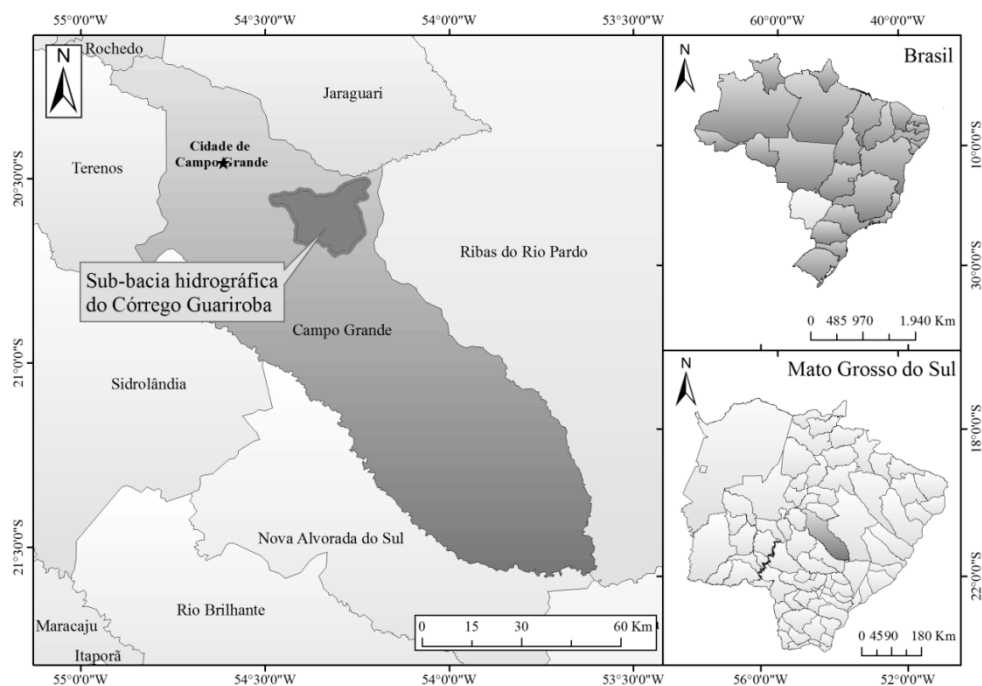


Figura 1. Localização da área de estudo.

2.2. Discretização espacial e caracterização física

A caracterização física, dados de elevação e declividade da sub-bacia hidrográfica em estudo e suas unidades de resposta hidrológica (HRUs) foram obtidos com base em carta topográfica 1:100.000 (D.S.G., 1979) e mapas de drenagem 1:5.000 (P.M.C.G., 2006). Estes dados foram georreferenciados na projeção transversa de mercator (UTM, fuso 21, SAD 69) em ambiente SIG. A malha hidrográfica digitalizada em SIG foi ordenada a partir da metodologia de Strahler (1964).

As características físicas foram divididas em parâmetros básicos: área, perímetro, comprimento dos cursos d'água, comprimento do eixo da bacia, declividade média e elevação média; e parâmetros derivados: extensão média do escoamento superficial, densidade de drenagem, coeficiente de compacidade, fator de forma e índice de circularidade. As fórmulas e metodologias para a obtenção das características estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas e seus métodos de obtenção.

Parâmetros	Fórmula	Referência	Descrição
Ordem dos cursos d'água (U)	Classificação hierárquica	Strahler (1964)	É a classificação que reflete o grau de ramificação ou bifurcação
Comprimento dos cursos d'água (Lt)	$Lt = \sum Ln$	Horton (1945)	É a soma do comprimento de todos os cursos d'água
Comprimento do eixo da bacia (L)	Linha reta entre o exutório e o ponto mais distante	Villela e Mattos (1975)	É o comprimento axial da bacia
Extensão média do escoamento superficial (l)	$l = A/4L$	Villela e Mattos (1975)	Distância média que a água teria que escoar para chegar ao rio
Densidade de drenagem (Dd)	$Dd = L/A$	Horton (1945)	É a relação entre o comprimento total dos rios e a área de drenagem da bacia
Coeficiente de compacidade (Kc)	$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	Miller (1953)	É a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de igual área da bacia
Fator de forma (F)	$F = A/L^2$	Horton (1945)	É a relação entre a largura média e o comprimento axial
Índice de circularidade (IC)	$IC = 12,57 A/P^2$	Strahler (1964)	É a relação entre a área da bacia e a circunferência de um círculo de igual área da bacia

Em ambiente SIG, foram calculados os valores médios de elevação e declividade da sub-bacia hidrográfica e suas HRUs a partir de MDE, gerado da interpolação (algoritmo *topo to raster*) de dados topográficos (curvas de nível e pontos cotados) extraídos de carta topográfica. O MDE consistiu em grade regular com dimensões de 30 metros, sendo que cada célula possui o valor médio da elevação naquele espaço. Os valores de declividade em porcentagem para cada célula foram calculados utilizando o algoritmo *slope*, produzindo a

carta de declividade. Também a partir do MDE foi realizada a discretização espacial da sub-bacia hidrográfica, o que delimitou sete unidades de resposta hidrológica (HRUs) de no mínimo 3ª ordem, utilizando as ferramentas hidrológicas (*hydrology tools*) disponíveis em SIG (Figura 2).

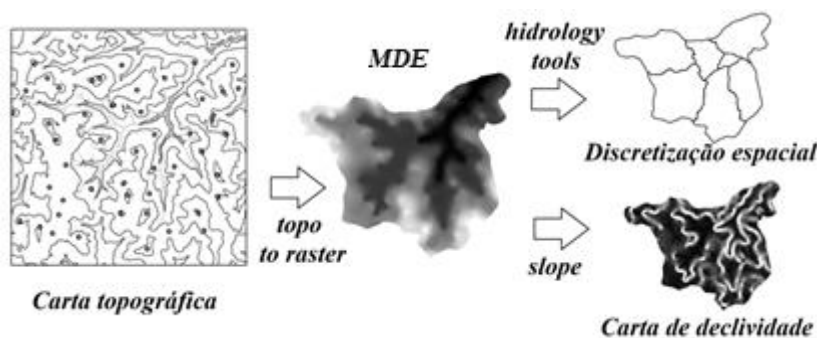


Figura 2. Etapas de obtenção de elevação, declividade e HRUs.

2.3. Levantamento de dados espaciais (mapas temáticos)

Para a confecção dos mapas temáticos e a obtenção da distribuição percentual desses dados espaciais em forma de matriz, para a sub-bacia hidrográfica e suas HRUs, foram utilizados dados vetoriais na escala 1:50.000 disponibilizados no Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental (APA) constituída pela sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba (P.M.C.G., 2006).

Geologia

Os dados de geologia foram obtidos com o auxílio de imagem de satélite de alta resolução espacial para detalhamento das formações geológicas com base na fotointerpretação das feições, utilizando como base, o mapa geológico disponibilizado pela C.P.R.M. (2004).

Geomorfologia

O mapa temático de geomorfologia foi confeccionado com o auxílio de imagem de satélite de alta resolução espacial para detalhamento das formas de relevo com base na fotointerpretação das formas identificadas, utilizando como base, o mapa de unidades de relevo do Brasil disponibilizado pelo I.B.G.E. (1993).

Pedologia

A partir do cruzamento (*overlay*) entre o mapa geológico previamente confeccionado e a fotointerpretação de imagem de satélite de alta resolução para a identificação de áreas úmidas, foram delimitados os polígonos de cada classe de solo encontrada na bacia

hidrográfica em estudo, sendo que foram realizadas análises de solo para a confirmação do tipo pedológico encontrado.

2.4. Correlação dos dados espaciais com as características físicas

A hipótese nula de que a distribuição espacial dos temas relativos à paisagem e as características físicas das HRUs da sub-bacia hidrográfica não apresentam distribuição normal não foi aceita com num nível de significância de 5%. Assim, para comparar os dados espaciais (geologia, geomorfologia e pedologia) com as características físicas da bacia de drenagem, foi construída matriz de correlação de Pearson, que mediu o grau de correlação (ρ) (Equação 1) e sua direção, se negativa ou positiva, entre duas variáveis, apresentando valores entre -1 e 1. Valor $\rho = 1$ significa correlação perfeita positiva entre variáveis, $\rho = -1$ significa correlação perfeita negativa entre variáveis e $\rho = 0$ externa que as duas variáveis analisadas não dependem linearmente uma da outra (Ghorbani Dashtaki *et al.*, 2009).

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X) \times var(Y)}} \quad (1)$$

Onde ρ é o coeficiente de correlação de Pearson, x_i e y_i são as variáveis analisadas e $\bar{x}$ e $\bar{y}$ representam as médias das variáveis analisadas. Após a construção da matriz, os valores dos coeficientes de correlação foram classificados e interpretados de acordo com a Tabela 2:

Tabela 2. Classificação dos coeficientes de correlação de Pearson.

Intervalos - Coeficiente de correlação de Pearson	Interpretação
$ \rho \geq 0,70$	Correlação forte
$0,30 \leq \rho \leq 0,70$	Correlação moderada
$ \rho \leq 0,30$	Correlação fraca

Deste modo, as correlações consideradas fortes para intervalo de confiança de 95%, foram discutidas com auxílio da literatura para testar a hipótese de que as características físicas da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba podem ser influenciadas pela geologia, geomorfologia e pedologia.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Discretização espacial e caracterização física

A discretização espacial a partir de dados topográficos representados em MDE possibilita a delimitação das HRUs que compõem a área de estudo. De acordo com Sanzana *et al.* (2013), cada HRU possui características homogêneas de acordo com o critério de delimitação utilizado e a sua delimitação é importante na constituição de modelos hidrológicamente distribuídos, que podem ser utilizados na gestão dos recursos hídricos.

A área de estudo (Figura 3) contém quatro principais cursos d'água tributários de 3ª ordem: Saltinho (HRU 1), Cabeceira do Guariroba (HRU 2), Tocos (HRU 3) e Cabeceira do Rondinha (HRU 4); dois afluentes de 4ª ordem: Guariroba (HRU 5) e Rondinha (HRU 6); e o curso d'água principal de 5ª ordem: Foz do Guariroba (HRU 7), aonde está localizado o reservatório para captação de água de abastecimento público da cidade de Campo Grande/MS.

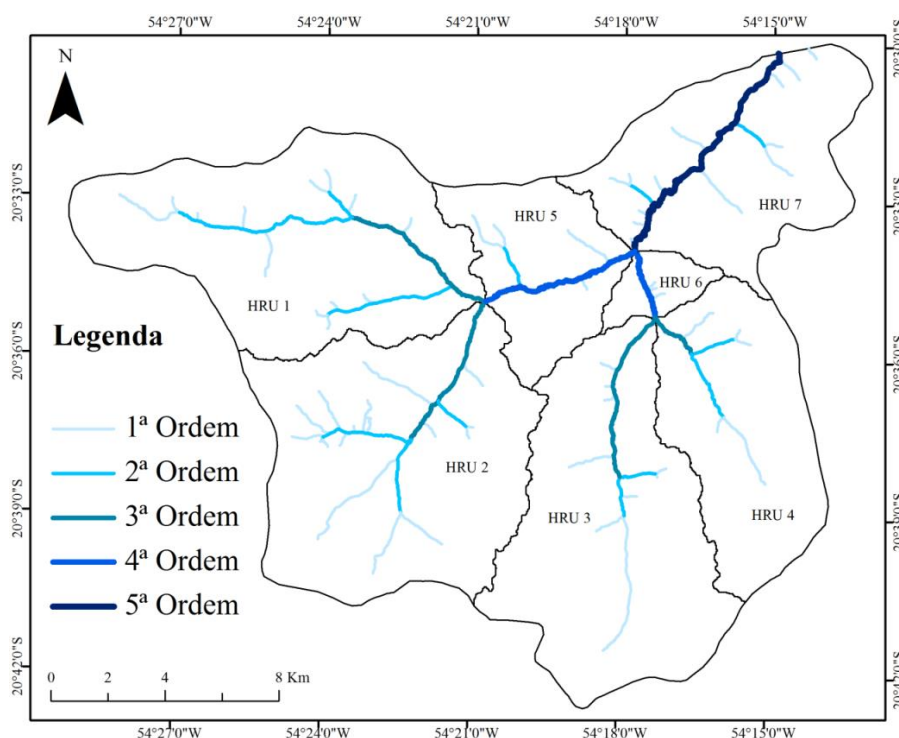


Figura 3. Sistema de drenagem da sub-bacia e suas HRUs.

A área total (A) drenada pela bacia é de 362 km², com perímetro (P) de 95 km e comprimento axial (L) de 32 km. O padrão de drenagem da bacia é dendrítico e a maioria dos cursos d'água são de baixa ordem (Tabela 3).

Tabela 3. Características físicas da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba e das HRUs.

Parâmetros	Característica física	Sub-bacia	Unidades de resposta hidrológica (HRU)						
			1	2	3	4	5	6	7
Básicos	A (km ²)	361,94	75,12	79,80	72,70	45,68	28,87	6,75	53,03
	P (km)	95,02	45,40	48,93	50,06	35,00	32,10	15,22	37,29
	Lt (km)	142,03	30,21	36,01	20,25	12,59	13,91	4,46	24,59
	L (km)	32,15	17,37	13,94	15,63	10,64	7,13	3,25	11,09
	S (%)	2,42	2,27	1,92	2,65	2,67	2,52	2,99	2,71
	E (m)	546,1	646,8	611,2	642,0	641,7	583,0	562,3	573,1
Comprimento (Lt) dos cursos d'água por ordem (km)	Lt - 1ª Ordem	66,89	11,14	21,84	10,64	5,98	5,22	1,21	10,86
	Lt - 2ª Ordem	31,89	12,80	7,73	2,80	4,36	1,56	0,00	2,64
	Lt - 3ª Ordem	21,79	6,28	6,44	6,81	2,25	0,00	0,00	0,00
	Lt - 4ª Ordem	10,38	0,00	0,00	0,00	0,00	7,13	3,25	0,00
	Lt - 5ª Ordem	11,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,09
Derivados	Dd (km km ⁻²)	0,39	0,40	0,45	0,28	0,28	0,48	0,66	0,46
	Kc	1,41	1,48	1,55	1,66	1,46	1,69	1,65	1,44
	F	0,35	0,25	0,41	0,30	0,40	0,57	0,64	0,43
	IC	0,50	0,46	0,42	0,36	0,47	0,35	0,37	0,48
	l (km)	2,81	1,08	1,43	1,16	1,07	1,01	0,52	1,20

Elevação e declividade são temas importantes em estudos de morfometria, pois a declividade tem papel fundamental na relação entre infiltração e escoamento superficial, que são inversamente proporcionais (Parveen, 2012). A elevação máxima é de 646,85 m nas cabeceiras dos cursos d'água e a mínima é de 461,40 m (Figura 4A). A declividade média é de $2,53 \pm 0,34\%$. Na região sudeste da sub-bacia hidrográfica (HRUs 3, 5 e 6) foram detectadas as maiores ocorrências de áreas de alta declividade (Figura 4B).

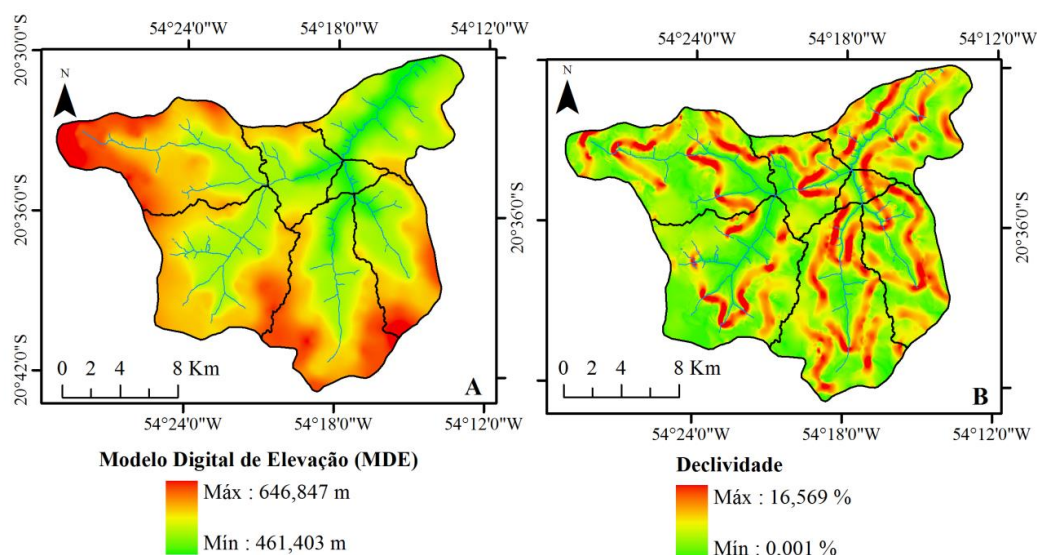


Figura 4. Modelo Digital de Elevação e carta de declividade da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba.

A densidade de drenagem (Dd) indica o grau do desenvolvimento do sistema de drenagem. A sub-bacia em estudo pode ser considerada de drenagem pobre, uma vez que sua densidade é de $0,39 \text{ km km}^{-2}$. Bacias hidrográficas consideradas de boa drenagem devem ter sua Dd maior que $3,5 \text{ km km}^{-2}$ e as de drenagem ruim são aquelas com Dd menor que $0,5 \text{ km km}^{-2}$ (Villela e Mattos, 1975; Horton, 1945). Dentre as HRUs, a HRU 6 possui a drenagem mais desenvolvida e a HRU 3 é a menos desenvolvida.

O coeficiente de compacidade (Kc) representa de forma adimensional a irregularidade da bacia hidrográfica em relação a circunferência de igual área. Quanto mais próximo da unidade, mais regular é a bacia hidrográfica e as enchentes são maiores (Villela e Mattos, 1975; Horton, 1945). Na sub-bacia estudada, temos que a HRU 5 é a mais irregular e a HRU 7 é a mais regular, ou seja, possui enchentes maiores, condizendo com a realidade, uma vez que é a HRU que recebe a drenagem de todas as outras.

O fator de forma (F) é a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia (Horton, 1945). Indica a tendência das enchentes em bacias hidrográficas. Quanto maior o fator de forma, maior a ocorrência de enchentes. A HRU 6 possui a forma mais susceptível a enchentes em relação as demais. Portanto, observamos que os coeficientes Kc e F indicaram HRUs distintas para serem mais sujeitas à enchentes.

O índice de circularidade (IC) é a relação entre a área da bacia hidrográfica e a área de um círculo de igual perímetro. Este parâmetro é influenciado pelo comprimento e frequência dos cursos d'água, estruturas geológicas, uso e cobertura do solo, clima, relevo e declividade da bacia (Parveen, 2012). O $IC = 0,51$ revela que a bacia possui nível moderado de escoamento. Valores maiores que 0,51 sugerem que a área de drenagem tende a ser mais circular e assim favorecer os processos de inundação, enquanto que valores menores que 0,51 revelam que a bacia hidrográfica tem forma que favorece processos de escoamento. A sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba e suas HRUs possuem formato que favorecem o processo de escoamento, pois todos os valores encontrados de IC estão entre 0,48 e 0,35 para as HRUs e 0,50 para toda a área.

A extensão média do escoamento superficial (l) representa em quilômetros a distância média que a água pluvial irá escoar pela superfície da bacia hidrográfica até chegar ao curso d'água. Embora os valores reais percorridos pelo escoamento superficial sejam diferentes dos valores calculados com o índice l, estes podem indicar a distância média. Na área de estudo, a HRU com maior distância percorrida pela água em processo de escoamento superficial é a

HRU 2, que é a nascente do principal curso d'água da área de drenagem: o Córrego Guariroba.

3.2. Mapas temáticos

A geologia da área de estudo é composta principalmente por arenitos, que ocupam 97,6 % da bacia hidrográfica, e por algumas ocorrências de basaltos, em 2,40% da superfície, localizadas em regiões de vale, com baixa elevação (Figura 5A). Na área em estudo a geomorfologia (Figura 5B) que predomina é a classe das colinas muito amplas (99,4%), seguida pelas planícies fluviais (0,6 %).

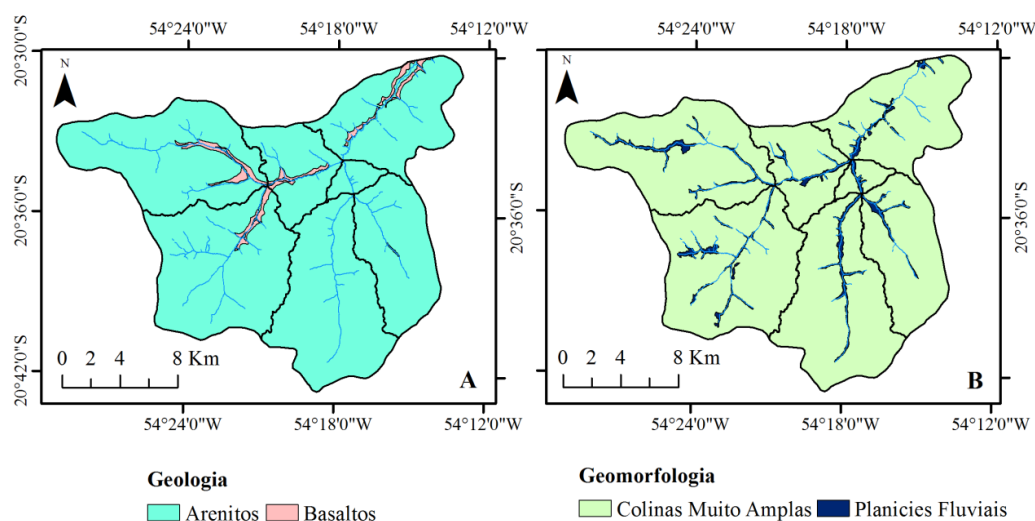


Figura 5. Mapas temáticos de geologia e geomorfologia da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba.

Em relação à pedologia (Figura 6), a área de drenagem possui o Neossolo Quartzarênico órtico (RQo) como classe de solo predominante (94,1%), com elevação média de $548,02 \pm 33,46$ m, seguido pelo Neossolo Quartzarênico hidromórfico (RQg) em áreas úmidas (3,5%), com altitude média de $511,20 \pm 28,44$ m, sendo ambos os solos com origem de rochas areníticas. Por fim, o Latossolo Vermelho distrófico (LVd), presente nas regiões de origem basáltica, sendo a classe de solo de menor ocorrência na área de estudo (2,4%), com elevação média de $502,21 \pm 19,26$ m.

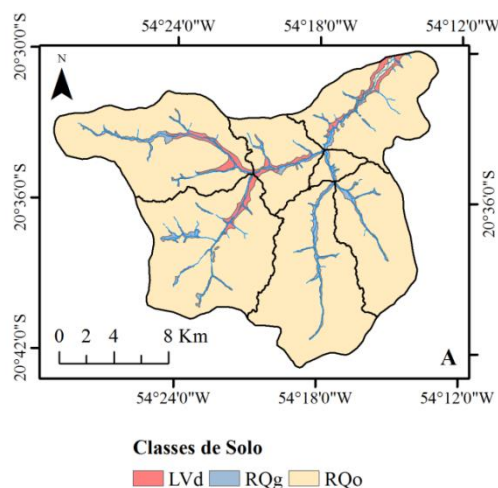


Figura 6. Mapa temático de pedologia da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba.

Os dados de geologia, geomorfologia e pedologia estão expressos em taxas de ocorrência em porcentagem para cada HRU, de modo que a comparação da distribuição de classes (Tabela 4) auxilie na discussão das características físicas da bacia de drenagem em estudo.

Tabela 4. Distribuição das classes temáticas na sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba e nas suas HRUs.

Tema	Classe	Sub-bacia	Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs)						
			1	2	3	4	5	6	7
Geologia	Arenitos	97,8%	96,3%	97,7%	100,0%	99,8%	94,8%	100,0%	97,0%
	Basaltos	2,2%	3,7%	2,3%	0,0%	0,2%	5,2%	0,0%	3,0%
Geomorfologia	Colinas muito amplas	99,4%	99,8%	99,1%	100,0%	99,7%	98,6%	100,0%	98,6%
	Planícies fluviais	0,6%	0,2%	0,9%	0,0%	0,3%	1,4%	0,0%	1,4%
Pedologia	LVd	2,4%	3,7%	2,3%	0,0%	0,2%	4,8%	0,0%	4,9%
	RQo	94,1%	92,6%	94,5%	96,6%	96,9%	90,5%	90,1%	92,4%
	RQg	3,5%	3,6%	3,3%	3,4%	2,9%	4,7%	9,9%	2,7%

3.3. Correlação dos dados espaciais com as características físicas

Os coeficientes de correlação de Pearson foram calculados para testar as correlações entre os pares de variáveis físicas e espaciais da bacia hidrográfica (Tabelas 3 e 4). Os valores encontrados para os coeficientes, que representam o grau e direção de correlação entre os dados espaciais e as características físicas, são mostrados na Tabela 5. Os valores entre parênteses abaixo de cada coeficiente são a probabilidade da correlação ser zero. Quanto

menor esse valor, maior é a confiança da ocorrência de correlação linear. Todos os pares aonde há correlação significativa com grau superior ao valor em módulo de 0,700 são destacados em negrito.

Tabela 5. Matriz de correlação entre as classes temáticas e as características físicas das sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba.

Características Físicas		Classes temáticas							
		Geologia		Geomorfologia		Pedologia			
		Arenitos	Basaltos	Colinas muito amplas	Planícies fluviais	LVd	RQo	RQg	
Básicas	A (km²)	-0,106 (0,821)	0,106 (0,821)	-0,006 (0,990)	0,006 (0,990)	0,130 (0,782)	0,616 (0,141)	-0,778 (0,039)	
	P (km)	-0,155 (0,740)	0,155 (0,740)	-0,071 (0,880)	0,071 (0,880)	0,152 (0,745)	0,641 (0,121)	-0,824 (0,023)	
	Lt (km)	-0,379 (0,402)	0,379 (0,402)	-0,299 (0,514)	0,299 (0,514)	0,422 (0,345)	0,273 (0,554)	-0,664 (0,104)	
	L (km)	-0,102 (0,828)	0,102 (0,828)	0,123 (0,793)	-0,123 (0,793)	0,113 (0,809)	0,602 (0,153)	-0,754 (0,050)	
	S (%)	0,442 (0,320)	-0,442 (0,320)	0,277 (0,547)	-0,277 (0,547)	-0,334 (0,464)	-0,222 (0,632)	0,528 (0,223)	
	E (m)	0,193 (0,679)	-0,193 (0,679)	0,482 (0,273)	-0,482 (0,273)	-0,296 (0,519)	0,779 (0,039)	-0,585 (0,168)	
	Lt - 1ª Ordem (km)	-0,182 (0,695)	0,182 (0,695)	-0,165 (0,552)	0,165 (0,552)	0,216 (0,642)	0,392 (0,385)	-0,603 (0,152)	
	Lt - 2ª Ordem (km)	-0,305 (0,507)	0,305 (0,507)	0,141 (0,796)	-0,141 (0,796)	0,239 (0,606)	0,227 (0,625)	-0,464 (0,294)	
	Lt - 3ª Ordem (km)	0,156 (0,739)	-0,156 (0,739)	-0,248 (0,355)	0,248 (0,355)	-0,249 (0,590)	0,603 (0,152)	-0,429 (0,336)	
	Lt - 4ª Ordem (km)	-0,460 (0,299)	0,460 (0,299)	-0,151 (0,463)	0,151 (0,463)	0,287 (0,533)	-0,686 (0,089)	0,487 (0,267)	
	Lt - 5ª Ordem (km)	-0,202 (0,664)	0,202 (0,664)	-0,436 (0,173)	0,436 (0,173)	0,519 (0,233)	-0,157 (0,737)	-0,289 (0,529)	
	Derivadas	Dd (km km-2)	-0,158 (0,735)	0,158 (0,735)	-0,274 (0,724)	0,274 (0,724)	0,167 (0,721)	-0,885 (0,008)	0,810 (0,027)
		Kc	0,034 (0,943)	-0,034 (0,943)	0,121 (0,763)	-0,121 (0,763)	-0,232 (0,617)	-0,309 (0,499)	0,543 (0,207)
		F	-0,018 (0,970)	0,018 (0,970)	0,414 (0,592)	-0,414 (0,592)	-0,013 (0,979)	-0,663 (0,104)	0,735 (0,060)
		IC	-0,052 (0,912)	0,052 (0,912)	-0,335 (0,747)	0,335 (0,747)	0,247 (0,594)	0,284 (0,538)	-0,529 (0,222)
		I (km)	-0,287 (0,532)	0,287 (0,532)	-0,579 (0,328)	0,579 (0,328)	0,339 (0,457)	0,559 (0,192)	-0,895 (0,007)
Coeficiente de correlação de Pearson (ρ)			ρ > 0,700		Correlação forte				
			ρ ≤ 0,700		Correlação moderada ou fraca				
Nível de significância (p valor)			(p valor≤ 0,05) significativo						

As correlações lineares são utilizadas neste estudo para embasar a discussão sobre a natureza e controle entre as características físicas e os temas geologia, geomorfologia e pedologia, no âmbito de bacia hidrográfica. A partir da suposição de que as correlações com nível de significância menor que 5% podem ser consideradas aceitáveis, destacam-se 6 correlações significativas, todas relacionadas à presença das classes pedológicas RQo e RQg.

Há significativa correlação negativa (-0,778) entre a área das HRUs e a presença da classe pedológica RQg. Seguindo a direção da correlação anterior, existe correlação (-0,824) entre o perímetro das HRUs e a ocorrência de RQg. A altitude do terreno é positivamente correlacionada (0,779) com a ocorrência da classe de solo RQo, uma vez que o referido solo é proveniente de rochas areníticas, que na bacia hidrográfica estudada, se encontram acima das rochas basálticas, incidindo em regiões com maior altitude que as de LVd e RQg, que estão localizados nos fundos de vale da área de drenagem.

A densidade de drenagem (Dd) está positivamente correlacionada (0,810) com a ocorrência de RQg. Porém, há correlação negativa (-0,885) com a presença de RQo. Tais afirmações condizem com a área de ocorrência de ambos os solos (RQo e RQg), pois nas regiões úmidas de fundo de vale, aonde não há afloramento de rochas basálticas, e sim de arenitos, temos a incidência de RQg ao longo dos cursos d'água. Já nas áreas mais elevadas, com solos também provenientes de arenito, porém, sem a presença de áreas úmidas, observa-se o RQo como classe pedológica predominante.

A última correlação significativa encontrada é negativa (-0,895), que relaciona a extensão média do escoamento superficial (l) com a ocorrência de RQg. A correlação evidencia que, quanto maior a área da HRU e menor o comprimento axial da mesma, maior será a extensão média do escoamento superficial e menor será a incidência da classe pedológica RQg.

As características morfométricas do padrão de drenagem e do relevo refletem algumas propriedades do terreno, como infiltração e deflúvio das águas das chuvas, e expressam estreita correlação com a litologia, estrutura geológica e formação superficial dos elementos que compõem a superfície terrestre (Pissarra *et al.*, 2004). Entretanto, as características geológicas não apresentam correlações significativas com as características físicas topográficas da bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica é dominada por arenito, que é permeável e pode ser a responsável pela drenagem pouco desenvolvida (Parveen, 2012), porém, a correlação esperada não é evidenciada como sendo linear. A presença de basalto também não está significativamente e linearmente correlacionada com as características

físicas da bacia hidrográfica, apesar de comumente os basaltos ocorrerem em regiões menos elevadas e de baixa declividade.

Além disso, a correlação linear entre a geomorfologia e as características físicas (básicas e derivadas) da bacia hidrográfica também apresenta valores não significativos para intervalo de confiança de 95%. Embora, Ebisemiju (1988) tenha concluído que a extensão da rede drenagem de bacias hidrográficas está correlacionada com a forma do seu relevo.

4. CONCLUSÕES

A discretização espacial da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba pode delimitar sete unidades de resposta hidrológicas (HRUs) de no mínimo 3ª ordem, de acordo com a drenagem determinada pela topografia da região. Suas características físicas mostram que cursos d'água de 1ª e 2ª ordem dominam a bacia, sendo o sistema de drenagem dendrítico e pouco desenvolvido.

As HRUs com cursos d'água principais de 4ª e 5ª ordens estão mais susceptíveis a enchentes, a bacia hidrográfica possui nível moderado de escoamento e suas HRUs não têm formas que favorecem os processos de inundação. Além disso, a HRU 2 possui a maior distância média percorrida pelo escoamento superficial dentre todas as HRUs.

Não há dependência linear entre as características físicas da bacia hidrográfica e a paisagem (geologia e geomorfologia). Entretanto, há dependência linear forte entre a pedologia da bacia hidrográfica e algumas de suas características físicas (área, perímetro, elevação, densidade de drenagem e extensão média do escoamento superficial).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERHANU, B.; MELESSE, A. M.; SELESHI, Y. GIS-based hydrological zones and soil geo-database of Ethiopia. **Catena**, v. 104, p. 21-31, 2013. ISSN 03418162.

BLOOMFIELD, J. P.; BRICKER, S. H.; NEWELL, A. J. Some relationships between lithology, basin form and hydrology: a case study from the Thames basin, UK. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 16, p. 2518-2530, 2011. ISSN 08856087.

C.P.R.M. **Geologia, tectônica e recursos minerais: Folha Campo Grande**. Brasília, Rio de Janeiro: Serviço Geológico do Brasil 2004.

CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006.

D.S.G. **Carta Lagoa Rica – Folha SE. 21 -X-B- IV**. Região Centro-Oeste do Brasil: Diretoria do Serviço Geográfico - Ministério do Exército 1979.

EBISEMIJU, F. S. Canonical correlation analysis in geomorphology with particular reference to drainage basin characteristics. **Geomorphology**, v. 1, p. 11, 1988.

GHORBANI DASHTAKI, S.; HOMAEE, M.; MAHDIAN, M. H.; KOUCHAKZADEH, M. Site-Dependence Performance of Infiltration Models. **Water Resources Management**, v. 23, n. 13, p. 2777-2790, 2009. ISSN 0920-4741 1573-1650.

GUEDES, H. A. S.; SILVA, D. Comparison between hydrographically conditioned digital elevation models in the morphometric characterization of watersheds. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 5, p. 932-943, 2012.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins ;Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945. ISSN 0016-7606. Disponível em: <Go to ISI>://WOS:A1945UP71000003 >.

I.B.G.E. **Mapas de unidades de relevo do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 1993.

MILLER, V. C. **A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the clinch mountain area**. Department of Geology, Columbia University, 1953.

P.M.C.G. Plano de Manejo APA Guariroba. 2006. Disponível em: <http://www.capital.ms.gov.br/semadur/canaisTexto?id_can=3148>. Acesso em: 01/01/2013.

PARVEEN, R. Geomorphometric Characterization of Upper South Koel Basin, Jharkhand: A Remote Sensing & GIS Approach. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 04, n. 12, p. 1042-1050, 2012. ISSN 1945-3094 1945-3108.

PERUCCA, L. P.; ANGILIERI, Y. E. Morphometric characterization of del Molle Basin applied to the evaluation of flash floods hazard, Iglesia Department, San Juan, Argentina. **Quaternary International**, v. 233, n. 1, p. 81-86, 2011. ISSN 10406182.

PISSARRA, T. C. T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da Bacia Hidrográfica do Córrego Rico, Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 297-305, 2004. ISSN 0100-0683.

SANZANA, P.; JANKOWFSKY, S.; BRANGER, F.; BRAUD, I.; VARGAS, X.; HITSCHFELD, N.; GIRONÁS, J. Computer-assisted mesh generation based on Hydrological Response Units for distributed hydrological modeling. **Computers & Geosciences**, 2013. ISSN 00983004.

SREEDEVI, P. D.; SUBRAHMANYAM, K.; AHMED, S. The significance of morphometric analysis for obtaining groundwater potential zones in a structurally controlled terrain. **Environmental Geology**, v. 47, n. 3, p. 412-420, 2004. ISSN 0943-0105 1432-0495.

STRAHLER, A. N. Quantitative Geomorphology of Basin and Channel Networks. In: (Ed.). **Handbook of Applied Hydrology**. New York: McgrawHill, v.v. 76, 1964.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo, SP: McGrawHill, 1975.

CAPÍTULO 2: AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA ERODIBILIDADE DOS SOLOS NA MODELAGEM DA PERDA DE SOLOS

RESUMO

A determinação direta da erodibilidade dos solos (fator K) é dispendiosa, levando os pesquisadores a recorrerem aos métodos de estimativa indireta da erodibilidade dos solos. Entretanto, a aplicação destes modelos não deve ser feita de forma indiscriminada. Deve-se observar se os resultados apresentam coerência com a área de estudo, pois as equações foram elaboradas a partir de medições diretas do fator K em solos que podem apresentar comportamentos diferentes daqueles de onde se pretende estimar indiretamente. Portanto, são objetivos deste trabalho: estimar a erodibilidade do solo através de métodos indiretos e avaliar a coerência dos modelos de erodibilidade utilizados para a área de estudo, que é considerada área com problemas associados à erosão do solo. O solo na sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba é em sua maioria arenoso (Neossolo Quartzarênico órtico). Porém, texturas franco-arenosa (Neossolo Quartzarênico hidromórfico) e argilosa (Latosolo Vermelho distrófico) também são encontradas na área. Assim, após avaliação de cinco modelos de predição da erosão, através de análises estatísticas, conclui-se que a equação de Sharpley e Williams (1990) é o modelo mais adequado dentre os avaliados para a área de estudo.

Palavras-chave: Fator K, USLE, atributos do solo, predição da erosão.

ABSTRACT

Indirect methods are frequently used to determine soil erodibility (K-factor) because its direct assessment in the field is expensive. Predictive models, however, cannot be applied indiscriminately. The coherence between model outputs and soil features of specific localities must be checked since the models were developed for reference areas with specific features that may not correspond to those in the study area. Accordingly, the present study applied indirect methods to estimate soil erodibility in an area exhibiting soil erosion and evaluated the results obtained for soil characteristics and bibliographic data. The soil in the Guariroba stream subwatershed is mostly loamy sand (Neossolo Quartzarênico órtico, an entisol). However, loam (Neossolo Quartzarênico hidromórfico, an entisol) and clay (Latosolo Vermelho distrófico, an oxisol) soils are also found in the area. The statistical evaluation of the models for K-factor estimation showed that the Sharpley and Williams (1990) model was the most suitable for the study area.

Keywords: K-Factor, USLE, soil features, erosion prediction.

1. INTRODUÇÃO

A erosão solo é o processo onde materiais são removidos, transportados e depositados de alguma parte da superfície da Terra. Pode acontecer devido ao intemperismo e ao transporte de sólidos (sedimentos, solos, rochas e outras partículas) no ambiente, levando a deposição destes materiais em local diferente da origem. Embora seja natural, as políticas de uso e ocupação do solo afetam a taxa de ocorrência do fenômeno, especialmente o desmatamento, a atividade agropecuária e a urbanização.

A modelagem da erosão em países em desenvolvimento como o Brasil é dificultada pela baixa disponibilidade de dados, faltando principalmente informações sobre os solos. Logo, dificulta-se a obtenção de parâmetros como a erodibilidade dos solos, necessário como parâmetro chave em grande parte de modelos preditivos de erosão, expresso normalmente como fator K (Panagos *et al.*, 2012). Portanto, é necessário recorrer aos métodos de estimativa indireta deste parâmetro para viabilizar os estudos que o envolvem (Bonilla e Johnson, 2012).

Ao longo dos anos, pesquisas foram realizadas em várias partes do mundo, em especial nos Estados Unidos, com o objetivo de estabelecer relações entre características mensuráveis do solo e a sua erodibilidade (K), que é o fator definido como a perda média de solo (A) por unidade de erosividade da chuva (R), em parcela padrão de solo descoberto com 22,1 m de comprimento (L) e 9% de declividade (S) (Olson e Wischmeier, 1963), conforme demonstra a Equação 1:

$$K = \frac{A}{RLSCP} = \frac{A}{R} \quad (1)$$

Onde os fatores LS (topográfico), C (uso e manejo do solo) e P (práticas conservacionistas) são iguais a 1 e adimensionais, quando utiliza-se a parcela experimental padrão com solo exposto e sem práticas conservacionistas para a determinação da erodibilidade do solo nela contido.

Bouyoucos (1935) em sua tentativa pioneira de estabelecer relações entre atributos do solo e sua erodibilidade, concluiu que a relação entre a soma dos teores de areia e silte e o teor de argila está correlacionada com a susceptibilidade dos solos à erosão, podendo ser considerado como um índice de erodibilidade, pois o método se mostrou eficiente quando teve seus resultados comparados com dados observados.

Mais tarde, com o desenvolvimento da Equação Universal de Perdas de Solos (USLE), parcelas experimentais para a determinação da erodibilidade dos solos foram distribuídas em diversas unidades taxonômicas de solo nos Estados Unidos, com o objetivo de elaborar

método indireto para o cálculo do fator K a partir de características do solo facilmente mensuráveis, como textura e matéria orgânica, pois a utilização das parcelas necessita de altos investimentos. Assim, a partir da relação de dados observados de erodibilidade e características do solo, foi elaborado o nomograma, que estima a erodibilidade dos solos a partir de análise textural, teor de matéria orgânica, estrutura e permeabilidade (Wischmeier e Smith, 1978).

Apesar do grande levantamento realizado na elaboração da USLE, o fator K estimado pelo nomograma se tornou limitante para a aplicação do modelo fora dos Estados Unidos, como no Brasil, uma vez que o comportamento, as propriedades e as características dos solos são diferentes, resultando em estimativas incoerentes para este fator. Portanto, Denardin (1990) realizou observações de erodibilidade em parcelas padrão de solos brasileiros com o objetivo de construir modelo de estimativa de fator K a partir de dados de características do solo, com os mesmos princípios do nomograma originalmente proposto por Wischmeier e Smith (1978).

Com o surgimento da Equação Universal de Perdas de Solos Revisada (RUSLE), houve a preocupação em disponibilizar método de estimativa indireta do fator K baseado em dados globais, para aplicação em qualquer parte do mundo. Sendo assim foram agrupados todos os dados observados de erodibilidade dos solos em parcelas padrão no mundo (225 unidades taxonômicas de solo) e elaborou-se equação que relaciona o diâmetro geométrico dos solos, obtido a partir de análises texturais, com o fator K (Renard *et al.*, 1997).

O impacto gerado pela erosão do solo motivou a elaboração do modelo EPIC (Sharpley e Williams, 1990), que calcula o impacto na produtividade agrícola causada pela erosão dos solos, sendo utilizado por organismos internacionais como as Nações Unidas. O modelo possui duas interfaces: física e econômica. O modelo de predição da erosão é considerado físico, diferindo da USLE, que é empírico. Entretanto, o fator K é componente do modelo, que também possui equação de estimativa indireta do referido fator.

Sendo assim, diversos trabalhos comparam resultados estimados de fator K pelos modelos apresentados com dados observados em experimentos em parcela padrão (Zhang *et al.*, 2004; Hussein *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2013) e a principal conclusão que se estabelece é que a equação de estimativa indireta do fator K é mais bem ajustada quando os dados de validação do modelo pertencem a solos submetidos a condições semelhantes aos daquele que se deseja estimar a erodibilidade indiretamente.

A área de estudo deste trabalho é a área de proteção ambiental delimitada pela sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba, onde existem três classes de solos tipicamente brasileiros, que em sua maioria apresentam textura areno-argilosa, submetidos às condições de clima tropical, com altos índices pluviométricos (aproximadamente 1400 mm ano⁻¹) e elevadas temperaturas. São encontrados Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Neossolo Quartzarênico hidromórfico (RQg) e Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), sendo estes mais susceptíveis a erosão do que aquele (Oliveira *et al.*, 2010).

Sendo assim, necessita-se estimar a erodibilidade destes solos de forma coerente através de modelos que utilizam dados secundários, pois a medição direta é cara e dispendiosa. Entretanto, deve-se observar que o Brasil possui solos com características e propriedade que diferem de solos de onde a maioria dos modelos de estimativa indireta do fator K foi criada.

Portanto, é necessário avaliar modelos de obtenção indireta da erodibilidade dos solos e verificar a sua coerência nos resultados que apresentam para a área de estudo proposta, diante da hipótese de que é possível obter resultados satisfatórios ou não a partir das metodologias a serem discutidas. Logo, foram objetivos deste trabalho: (I) estimar a erodibilidade do solo através de métodos indiretos; e (II) avaliar a coerência dos modelos de erodibilidade utilizados para a área de estudo.

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1. Área de estudo

A área de estudo compreendeu a sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba, localizada entre os paralelos 20° 28' e 20° 43' de latitude sul e os meridianos 54° 29' e 54° 11' de longitude oeste, ocupando a área de 362 km² (Figura 1). Foram identificadas três classes de solo na área de estudo (Figura 1A): Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Neossolo Quartzarênico hidromórfico (RQg) e Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), ocupando 2,4%; 3,5%; e 94,1% da área de estudo, respectivamente. Os atributos do solo (textura e matéria orgânica) dos solos foram obtidos para os horizontes superficiais e subsuperficiais em pontos ao longo da área de estudo para calcular o fator K indiretamente (Figura 1B) em novembro de 2012.

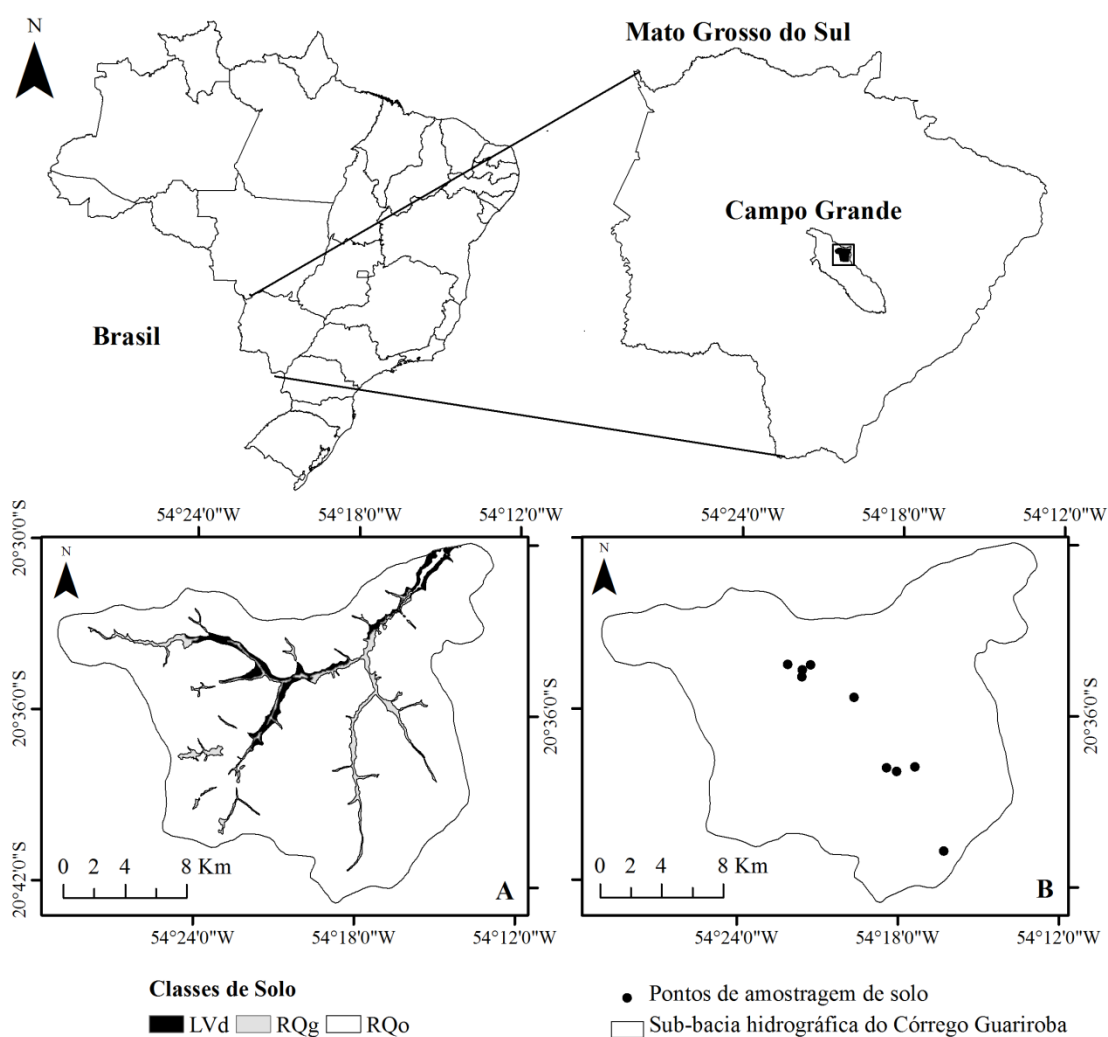


Figura 1. Localização da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba (acima), distribuição das classes de solo na área de estudo (A) e pontos de amostragem de solo (B). Obs.: As classes de solo seguem o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos.

2.2. Amostragem e análise dos solos

Amostras de solo dos horizontes superficiais (10 cm de profundidade) e subsuperficiais (40 cm de profundidade) foram coletadas em 9 pontos distribuídos na área de estudo, sendo 2 pontos na classe LVd, 2 pontos na classe RQg e 5 pontos na classe RQo. As análises texturais foram realizadas através do método da pipeta após dispersão química (NaOH , 1 mol L^{-1}) e física (agitador mecânico, 14000 rpm). Os teores de matéria orgânica foram determinados por queima a 440°C (A.B.N.T., 1996).

2.3. Cálculo indireto da erodibilidade dos solos

Foram aplicados métodos de estimativa indireta da erodibilidade dos solos através de equações que utilizam parâmetros físicos do solo (textura e teor de matéria orgânica) como dados de entrada.

Wischmeier e Smith (1978)

$$K = [2,1 \times 10^{-4} M^{1,14} (12 - a) + 3,25(b - 2) + 2,5(c - 3)] \times (0,1317/100) \quad (2)$$

Onde: M é a soma das porcentagens de silte e areia muito fina multiplicada por 100 menos o teor de argila; a é o teor de matéria orgânica; b é o código adimensional referente à estrutura do solo; c é o código adimensional referente à permeabilidade do solo.

Renard et al. (1997)

$$K = 0,0034 + 0,0405 \times \exp \left[-0,5 \left(\frac{\log D_g + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$D_g = \exp(0,01 \sum f_i \ln m_i) \quad (4)$$

Onde: f_i a fração da classe textural; e m_i a média aritmética do diâmetro da classe textural.

Bouyoucos (1935)

$$K = \frac{SAN + SIL}{CLA} \times \frac{1}{100} \quad (5)$$

Onde: SAN é a porcentagem de areia; SIL é a porcentagem de silte; CLA é a porcentagem de argila.

Denardin (1990)

$$K = 0,00000748(M) + 0,00448059(b) - 0,0631175(DMP) + 0,010396(REL) \quad (6)$$

Onde: M é a soma das porcentagens de silte e areia muito fina multiplicada por 100 menos o teor de argila; b é o código adimensional referente à estrutura do solo; c é o código adimensional referente à permeabilidade do solo; DMP é o diâmetro médio ponderado das partículas menores que 2,0 mm; REL é o produto do teor de matéria orgânica pelo teor de partículas entre 0,1 e 2,0 mm;

Sharpley e Williams (1990)

$$K = \left[0,2 + 0,3 \exp(-0,0256 SAN (1 - \frac{SIL}{100})) \right] \times \left[\frac{SIL}{CLA + SIL} \right]^{0,3} \times \left[1,0 - \frac{0,25 C}{C + \exp(3,72 - 2,95 C)} \right] \times \left[1,0 - \frac{0,70 SN1}{SN1 + \exp(-5,41 + 22,9 SN1)} \right] \times 0,1317 \quad (7)$$

Onde: SAN é a porcentagem de areia; SIL é a porcentagem de silte; CLA é a porcentagem de argila; C é o teor de carbono orgânico; $SN1$ é 1,0 menos o teor de areia dividido por 100.

2.4. Análise estatística

Aceitou-se a hipótese nula de que os dados de textura, matéria orgânica e erodibilidade dos solos analisados não tenham distribuição normal, num intervalo de probabilidade de 95%. Deste modo, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis foi utilizado para testar a hipótese nula de que todos os grupos (Classe/ Horizonte dos solos) possuem funções de distribuição iguais contra a hipótese alternativa de que ao menos dois grupos possuem funções de distribuição diferentes.

Além da avaliação das funções de distribuição, foram comparadas as respostas de erodibilidade obtidas para cada método com as características físicas do solo (textura e matéria orgânica), através do método do coeficiente de correlação de Spearman. Foi medido o grau de correlação (ρ) (Equação 8) e sua direção, se negativa ou positiva, entre duas variáveis, apresentando valores entre -1 e 1. Valor $\rho = 1$ significa correlação perfeita positiva entre variáveis; $\rho = -1$ significa correlação perfeita negativa entre variáveis e $\rho = 0$ externa que as duas variáveis analisadas não dependem linearmente uma da outra.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X,Y)}{\sqrt{var(X) \times var(Y)}} \quad (8)$$

Onde ρ é o coeficiente de correlação de Spearman, x_i e y_i são as variáveis analisadas e $\bar{x}$ e $\bar{y}$ representam as médias das variáveis analisadas. Deste modo, as correlações consideradas significativas num intervalo de confiança de 95% foram consideradas para serem discutidas na avaliação dos métodos de estimativa da erodibilidade dos solos na área de estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Atributos do solo na área de estudo

As funções de distribuição dos teores de matéria orgânica, areia, silte e argila possuem pelo menos dois grupos com médias diferentes num intervalo de confiança de 95% (Tabela 1). Os grupos com maiores teores de matéria orgânica pertencem as classes de solo LVd (horizontes A e B) e RQg (horizonte H). Quanto a textura do solo dos grupos analisados, observa-se que os solos RQo (horizontes A e C) são arenosos, os solos RQg (horizontes H e

C) são franco-arenosos e os solos LVd (horizontes A e B) são argilosos. De acordo com Miqueloni e Bueno (2011), a textura predominantemente arenosa pode ser responsável pela baixa resistência da superfície à erosão, favorecendo a ocorrência de intensos processos de perda de solo com maior produção de sedimentos.

Tabela 1. Média ($\pm$ desvio padrão) da matéria orgânica e da textura do solo para diferentes classes de solo (em porcentagem).

Classe/Horizonte	N	Matéria orgânica(%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
LVd/A	8	6.37 $\pm$ 0.84 ^{abc}	27.61 $\pm$ 7.80 ^{abc}	30.30 $\pm$ 8.24 ^{abc}	42.08 $\pm$ 2.41 ^{ab}
LVd/B	8	5.80 $\pm$ 0.97 ^{ade}	19.23 $\pm$ 5.73 ^{ad}	31.93 $\pm$ 5.75 ^{ade}	48.84 $\pm$ 2.13 ^a
RQg/H	8	7.06 $\pm$ 0.91 ^{bd}	49.18 $\pm$ 6.38 ^{cdeh}	42.24 $\pm$ 5.36 ^{cef}	8.57 $\pm$ 2.81 ^{fg}
RQg/C	8	0.57 $\pm$ 0.29 ^{fg}	77.54 $\pm$ 8.31 ^{befg}	17.05 $\pm$ 9.51 ^{bdfg}	5.41 $\pm$ 1.66 ^{cde}
RQo/A	12	1.19 $\pm$ 0.21 ^{cefh}	86.16 $\pm$ 1.40 ^{fi}	4.29 $\pm$ 0.62 ^h	9.55 $\pm$ 1.18 ^{bh}
RQo/C	20	0.91 $\pm$ 0.26 ^{gh}	83.45 $\pm$ 2.75 ^{ghi}	7.55 $\pm$ 2.42 ^{gh}	9.00 $\pm$ 2.29 ^h

Médias seguidas por letras sobrescritas diferentes possuem diferenças significativas (teste de Kruskal-Wallis, $P \leq 0.05$). N é o número de amostras.

3.2.Erodibilidade dos solos na área de estudo quanto à pedologia

As respostas estimadas para o fator K estão avaliadas de acordo com a taxonomia e horizonte dos solos analisados, formando grupos. As variáveis de entrada dos modelos estão relacionadas na Tabela 2 e os resultados dessa avaliação estão expressos na Tabela 3. Para que o método de estimativa da erodibilidade dos solos expresse a realidade da área de estudo, é importante que os resultados para cada grupo taxonômico seja condizente com as propriedades daquela classe em relação às outras, e sendo solos com propriedades distintas, espera-se que os valores de erodibilidade sejam diferentes.

Tabela 2. Médias das variáveis de entrada das equações de estimativa do fator K: M (adimensional), a (em porcentagem), b (adimensional), c (adimensional), Dg (mm), DMP (mm), REL (adimensional), C (em porcentagem), SN1 (adimensional).

Classe/Horizonte	M	a	b	c	Dg	DMP	REL	C	SN1
LVd/A	2098.505	6.371	1	5	0.0278	0.028	0.341	0.037	0.007
LVd/B	1873.122	5.796	1	5	0.0171	0.017	0.454	0.034	0.008
RQg/H	4448.831	7.061	2	1	0.1471	0.147	0.174	0.041	0.005
RQg/C	2154.871	0.568	3	1	0.4214	0.421	0.008	0.003	0.002
RQo/A	1419.458	1.194	3	2	0.4942	0.494	0.016	0.007	0.001
Rqo/C	1621.705	0.912	3	2	0.4602	0.460	0.013	0.005	0.002

Tabela 3. Média ($\pm$ desvio padrão) da erodibilidade do solo para diferentes classes de solo.

Classe / Horizonte	N	Fator K ($t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$)				
		Wischmeier e Smith (1978)	Renard (1997)	Bouyoucos (1935)	Denardin (1990)	Sharpley e Williams (1990)
LVd/A	8	0.010^a ($\pm$ 0.003)	0.043^{ab} ($\pm$ 0.001)	0.014^{ab} ($\pm$ 0.001)	0.039^{ab} ($\pm$ 0.008)	0.028^{abc} ($\pm$ 0.001)
LVd/B	8	0.011 ^a ($\pm$ 0.002)	0.043 ^{ac} ($\pm$ 0.001)	0.011 ^a ($\pm$ 0.001)	0.041 ^{ac} ($\pm$ 0.004)	0.027 ^{ad} ($\pm$ 0.001)
RQg/H	8	0.013^a ($\pm$ 0.004)	0.025^{bcdg} ($\pm$ 0.004)	0.119^{cfg} ($\pm$ 0.042)	0.040^{bc} ($\pm$ 0.005)	0.039^{bdehi} ($\pm$ 0.002)
RQg/C	8	0.018 ^a ($\pm$ 0.010)	0.012 ^{def} ($\pm$ 0.003)	0.190 ^{cde} ($\pm$ 0.057)	0.021 ^{de} ($\pm$ 0.007)	0.045 ^{efg} ($\pm$ 0.003)
RQo/A	12	0.013^a ($\pm$ 0.005)	0.010^{eh} ($\pm$ 0.001)	0.096^{bdfh} ($\pm$ 0.013)	0.020^{df} ($\pm$ 0.004)	0.039^{ch} ($\pm$ 0.002)
RQo/C	20	0.013 ^a ($\pm$ 0.004)	0.011 ^{fgh} ($\pm$ 0.001)	0.109 ^{egh} ($\pm$ 0.032)	0.019 ^{ef} ($\pm$ 0.003)	0.042 ^{gi} ($\pm$ 0.004)

Médias seguidas por letras sobrescritas diferentes possuem diferenças significativas (teste de Kruskal-Wallis, $P \leq 0.05$). N é o número de amostras. Linhas em negrito indicam a erodibilidade nos horizontes superficiais.

Observa-se que o método do nomograma (Wischmeier e Smith, 1978) é o único que apresenta respostas de erodibilidade com funções de distribuição iguais no intervalo de confiança de 95%, se mostrando inadequado para a estimativa da erodibilidade na área de estudo. O método não distingue as respostas do método de acordo com a ordem taxonômica dos solos. Na área de estudo são encontradas três classes que possuem características e propriedades distintas e segundo Bonilla e Johnson (2012), os valores de K devem ser próprios e correlatos com a análise textural e teor de matéria orgânica.

Estudos que utilizam dados sobre a erodibilidade em Neossolo Quartzarênico (RQ) e Latossolo Vermelho (LV) mostram que os Neossolos possuem maior erodibilidade, nas mesmas condições de declividade, cobertura e intensidade da chuva (Silva e Alvares, 2005; Oliveira *et al.*, 2010). Além disso, Nunes e Cassol (2008) observam que solos mais argilosos tendem a ter menor erodibilidade. Logo, os métodos indiretos que apresentam a erodibilidade maior em RQo e RQg e menor em LVd foram Bouyoucos (1935) e Sharpley e Williams (1990) (Figura 2). Porém, as ordens de grandeza das respostas obtidas com o método de Bouyoucos (1935) não condizem com os demais métodos e valores de referência (Silva e Alvares, 2005).

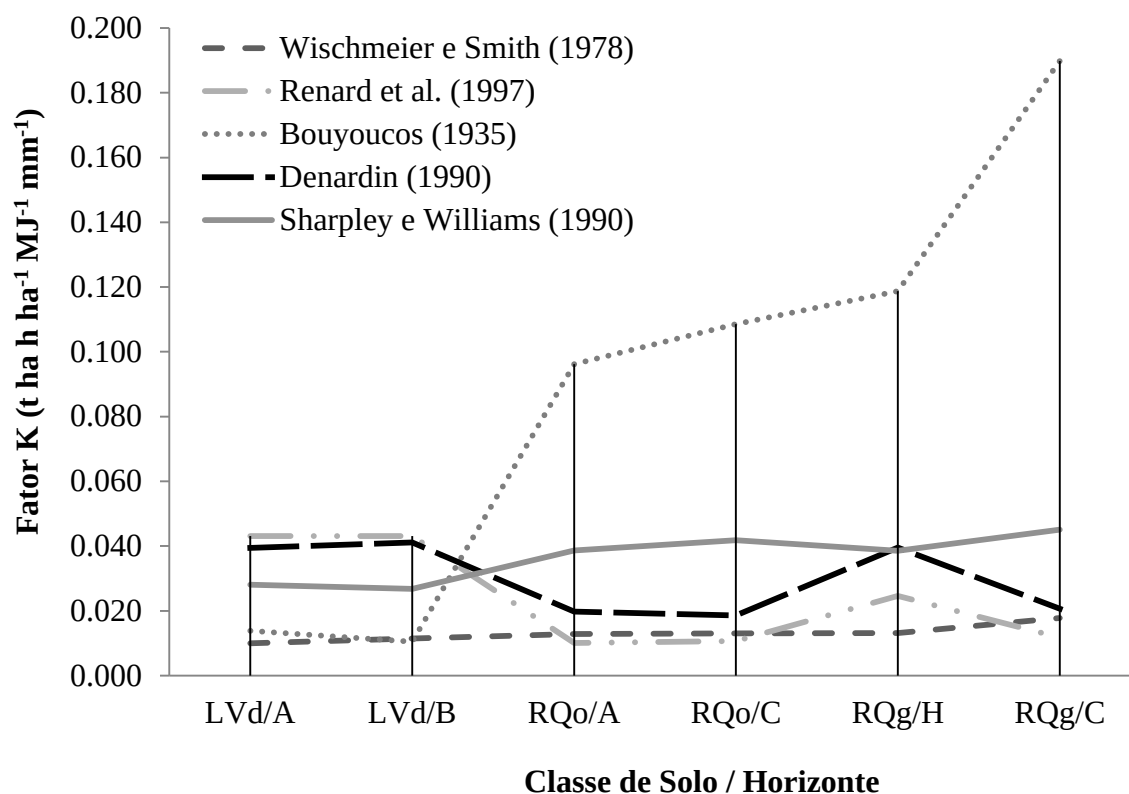


Figura 2. Gráfico de efeitos de fator K da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba obtidos por métodos indiretos.

Observa-se que não há funções de distribuição de médias diferentes entre os métodos de Bouyoucos (1935) e Sharpley e Williams (1990); e entre Renard *et al.* (1997) e Wischmeier e Smith (1978), num nível de significância de 5%. Logo, todos os outros métodos indiretos de estimativa da erodibilidade dos solos mostram respostas diferentes entre si, evidenciando que os modelos foram elaborados a partir de conjuntos de observações de fator K distintos (Wang *et al.*, 2013).

É importante salientar que na modelagem da erosão, deve-se considerar a erodibilidade dos solos pertencentes aos horizontes superficiais, uma vez que são estes que estão sujeitos à erosividade da chuva e às ações inerentes ao uso e manejo do solo e práticas conservacionistas (Baskan *et al.*, 2009; Bonilla e Johnson, 2012; Wang *et al.*, 2013). Na área de estudo, constata-se em campo que os horizontes A das classes LVd e RQo e o horizonte H da classe RQg são considerados superficiais.

3.3. Relação entre a erodibilidade e os atributos do solo

O método Wischmeier e Smith (1978) não possui correlações lineares significativas ($P \leq 0,05$) com a textura e teor de matéria orgânica dos solos. Entretanto, todos os outros métodos analisados apresentam pelo menos uma correlação significativa com alguma característica do solo. Os métodos de Denardin (1990) e Renard *et al.* (1997) possuem correlações significativas positivas com os teores de silte, argila e matéria orgânica e negativas com os teores de areia. O método de Bouyoucos (1935) está linearmente e negativamente correlacionado com o teor de argila. Já o método de Sharpley e Williams (1990) possui correlações significativas positiva com o teor de areia e negativas com os teores de matéria orgânica, silte e argila (Tabela 4).

Tabela 4. Matriz de correlação entre as características do solo e os valores estimados de fator K obtidos pelos modelos avaliados (valores em negrito apresentam forte correlação).

Fator K	Matéria Orgânica (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Wischmeier e Smith (1978)	-0.15	0.14	0.18	-0.19
Renard et al. (1997)	0.68*	-0.96*	0.79*	0.64*
Bouyoucos (1935)	-0.50*	0.56*	-0.19	-1.00*
Denardin (1990)	0.75*	-0.87*	0.78*	0.57*
Sharpley e Williams (1990)	-0.60*	0.60*	-0.28*	-0.93*

* Correlações linearmente significativas num intervalo de confiança de 95%.

De acordo com Nunes e Cassol (2008), os teores de matéria orgânica e argila dos solos são inversamente proporcionais ao fator K, uma vez que a presença do carbono orgânico auxilia a manter a estabilidade dos agregados do solo, bem como a argila. Assim, confirma-se, mais uma vez, a incoerência dos modelos de Renard *et al.* (1997) e Denardin (1990) para a estimativa da erodibilidade dos solos na área em estudo.

A presença de solos arenosos em climas tropicais está associada à ocorrência de processos erosivos, sendo o fator erodibilidade dos solos nas condições da área de estudo diretamente proporcional ao teor de areia (Miqueloni e Bueno, 2011). Portanto, o modelo de Sharpley e Williams (1990), que apresenta correlação positiva com o teor de areia e negativas com os teores de argila e matéria orgânica, se mostrou o mais adequado para se estimar o fator K na condição estudada.

4. CONCLUSÕES

A sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba possui solo predominantemente arenoso (RQo). Entretanto, também ocorrem solos com textura franco-arenosa (RQg) e argilosa (LVd). A erodibilidade calculada indiretamente apresenta valores distintos para cada classe de solo avaliada nos métodos utilizados, exceto para o método de Wischmeier e Smith (1978), que resulta em valores de fator K com igual função de distribuição para cada grupo avaliado, num intervalo de confiança de 95%.

Nas condições da área de estudo, os métodos de Renard *et al.* (1997) e Denardin (1990) não são adequados, pois estimam valores de fator K maiores em solos menos susceptíveis a erosão (LVd) do que em solos mais frágeis (RQg e RQo).

Os métodos de Bouyoucos (1935) e Sharpley e Williams (1990) respeitam as condições de que os solos RQo e RQg estão mais sujeitos a sofrer processos erosivos do que os solos LVd, sendo coerentes com as condições da área de estudo. Entretanto, as ordens de grandeza das respostas obtidas com o método de Bouyoucos (1935) não são compatíveis com valores observados na literatura. Logo, a equação proposta por Sharpley e Williams (1990) é a mais adequada para estimar indiretamente o fator K na área de estudo.

A equação de Sharpley e Williams (1990) é o modelo mais adequado dentre os avaliados para a área de estudo, tem-se as respostas para a erodibilidade dos solos para cada ordem taxonômica: $0,028 \pm 0,001 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (LVd) e $0,039 \pm 0,002 \text{ t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (RQg e RQo).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.B.N.T. **NBR 13600: Solo - Determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C**. Rio de Janeiro 1996.

BASKAN, O.; CEBEL, H.; AKGUL, S.; ERPUL, G. Conditional simulation of USLE/RUSLE soil erodibility factor by geostatistics in a Mediterranean Catchment, Turkey. **Environmental Earth Sciences**, v. 60, n. 6, p. 1179-1187, 2009. ISSN 1866-6280 1866-6299.

BONILLA, C. A.; JOHNSON, O. I. Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile. **Geoderma**, v. 189-190, p. 116-123, 2012. ISSN 00167061.

BOUYOUCOS, G. J. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. **Journal of the American Society of Agronomy**, v. 27, p. 738-741, 1935.

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade de solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. (Tese de doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

HUSSEIN, M. H.; KARIEM, T. H.; OTHMAN, A. K. Predicting soil erodibility in northern Iraq using natural runoff plot data. **Soil and Tillage Research**, v. 94, n. 1, p. 220-228, 2007. ISSN 01671987.

MIQUELONI, D. P.; BUENO, C. R. P. Análise multivariada e variabilidade espacial na estimativa da erodibilidade de um argissolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2175-2182, 2011. ISSN 0100-0683.

NUNES, M. C. M.; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de latossolos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. spe, p. 2839-2845, 2008. ISSN 0100-0683.

OLIVEIRA, P. T. S.; ALVES SOBRINHO, T.; RODRIGUES, D. B. B.; PANACHUKI, E. Erosion Risk Mapping Applied to Environmental Zoning. **Water Resources Management**, v. 25, n. 3, p. 1021-1036, 2010. ISSN 0920-4741 1573-1650.

OLSON, T. C.; WISCHMEIER, W. H. Soil-Erodibility Evaluations for Soils on the Runoff and Erosion Stations1. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 27, n. 5, p. 590-592, 1963 1963. Disponível em: < <https://www.crops.org/publications/sssaj/abstracts/27/5/590> >.

PANAGOS, P.; MEUSBURGER, K.; ALEWELL, C.; MONTANARELLA, L. Soil erodibility estimation using LUCAS point survey data of Europe. **Environmental Modelling & Software**, v. 30, p. 143-145, 2012. ISSN 13648152.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **USDA Agriculture Handbook**, p. 251 pp., 1997.

SHARPLEY, A. N.; WILLIAMS, J. R. EPIC - Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. **U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin**, v. 1768, p. 235 pp., 1990.

SILVA, A. M.; ALVARES, C. A. Levantamento de informações e estruturação de um banco de dados sobre erodibilidade de classes de solo no Estado de São Paulo. **Geociências (UNESP)**, v. 24, n. 1, p. 33-41, 2005.

WANG, B.; ZHENG, F.; RÖMKENS, M. J. M. Comparison of soil erodibility factors in USLE, RUSLE2, EPIC and Dg models based on a Chinese soil erodibility database. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science**, v. 63, n. 1, p. 69-79, 2013. ISSN 0906-4710 1651-1913.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. **USDA Agriculture Handbook**, v. 537, p. 58, 1978.

ZHANG, K.; LI, S.; PENG, W.; YU, B. Erodibility of agricultural soils on the Loess Plateau of China. **Soil and Tillage Research**, v. 76, n. 2, p. 157-165, 2004. ISSN 01671987.

ZHANG, K. L.; SHU, A. P.; XU, X. L.; YANG, Q. K.; YU, B. Soil erodibility and its estimation for agricultural soils in China. **Journal of Arid Environments**, v. 72, n. 6, p. 1002-1011, 2008. ISSN 01401963.

CAPÍTULO 3: MODELAGEM DO FATOR C DA (R)USLE EM PASTAGEM BASEADA NO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA

RESUMO

O fator uso e cobertura do solo (C) da (R)USLE evidencia os efeitos das práticas de uso e manejo do solo na predição da erosão. Na elaboração de mapeamentos de perdas de solo, o fator C geralmente é obtido na literatura, que determinou os valores para cada classe de uso e manejo do solo de forma experimental. No entanto, este método pode suavizar o efeito da variabilidade espacial dos processos erosivos, havendo a necessidade de se mapear a heterogeneidade da cobertura do solo como determinante na obtenção do fator C. Logo, foram desenvolvidos ao longo dos anos métodos de estimativa do fator C que relacionam este com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) obtido por sensoriamento remoto. Porém, a aplicabilidade destes métodos no Brasil deve ser avaliada comparando-se com valores de fator C obtidos em parcelas experimentais no campo. No entanto, esta observação é cara e dispendiosa quando feita tradicionalmente. Logo, a utilização de simulador de chuvas torna-se alternativa viável. Neste trabalho apresenta-se o modelo que melhor se ajustou em estimar o fator C em pastagem, que é a cobertura do solo predominante na área de estudo, utilizando dados observados a partir de chuva simulada. Dessa forma, o objetivo deste estudo consiste na avaliação de três modelos que relacionam o fator C da (R)USLE e o NDVI obtido por sensoriamento remoto.

Palavras-chave: Uso e cobertura do solo; erosão do solo; sensoriamento remoto; NDVI.

ABSTRACT

In erosion prediction, the soil cover and management factor (C-factor) of (R)USLE represents the effects of land use. C-factor values based on experimental studies of different classes of soil use and management are available in the literature, and although they are used to produce soil erosion maps, they can underestimate the effects of spatial variability on erosive processes. Therefore, C-factor maps should represent soil cover heterogeneity. To that end, methods that estimate C-factor on the basis of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) obtained by remote sensing have been developed over the years, and their applicability in Brazil must be evaluated by contrasting model outputs with C-factor values obtained experimentally in field plots. Given that conventional field tests are costly and time-consuming, the use of a rainfall simulator is a feasible alternative to carry out these tests. The present study evaluated 3 models for C-factor determination based on NDVI data. Model outputs were contrasted with field tests carried out with a rainfall simulator, in order to determine which is the best for estimating the C-factor in pasture areas, the predominant soil cover in the study area.

Keywords: Soil use and management, soil erosion, remote sensing, NDVI

1. INTRODUÇÃO

A cobertura e o manejo do solo são fatores determinantes na ocorrência de processos erosivos. No geral, quanto maior a densidade da cobertura vegetal, menores são as taxas de perdas de solos. Desta forma, a cobertura do solo promove proteção contra a ação erosiva da precipitação pluviométrica, aumenta a infiltração da água no solo, reduz a velocidade do escoamento superficial, mantém a rugosidade do solo e melhora as condições físicas, químicas e biológicas do solo (De Asis e Omasa, 2007).

O fator cobertura e manejo do solo (C) é utilizado tanto na Equação Universal de Perdas de Solos (USLE) e na USLE revisada (RUSLE) com o objetivo de evidenciar o efeito das práticas de uso e manejo do solo nos valores de perdas de solos, sendo fator frequentemente utilizado na comparação dos impactos das opções de sistemas de manejo em planos de conservação do solo. Assim, o fator C indica, com valores que variam entre 0 e 1, como o manejo e a cobertura do solo influenciam a taxa anual de perda de solos e como a potencial taxa de erosão é distribuída ao longo do tempo durante a execução dos sistemas de manejo do solo (Wischmeier e Smith, 1978; Renard *et al.*, 1997).

Nos mapeamentos de erosão utilizando os modelos (R)USLE, o fator C é geralmente extraído a partir de dados experimentais disponíveis na literatura e para cada classe da carta de uso e ocupação do solo, da área de estudo, são atribuídos os respectivos valores encontrados (Beskow *et al.*, 2009; Oliveira *et al.*, 2010; Jebari *et al.*, 2012). Entretanto, Wang *et al.* (2002) e De Asis e Omasa (2007) afirmam que a atribuição de um valor médio de C para cada classe de uso e ocupação do solo pode suavizar as estimativas de perda de solo e causar o desaparecimento da variabilidade e heterogeneidade espacial dos processos erosivos, não refletindo, de forma adequada, as variações que ocorrem na vegetação em grandes áreas como bacias hidrográficas.

Deste modo, houve a necessidade do desenvolvimento de metodologias para aprimorar o mapeamento do fator C utilizando dados de sensoriamento remoto. Diversos modelos utilizando regressões lineares e não lineares foram construídos baseados na correlação entre os valores de fator C e índices de vegetação calculados a partir de imagens de satélite para sua posterior aplicação no mapeamento da erosão dos solos (Van Der Knijff *et al.*, 1999; Lin *et al.*, 2002; De Asis e Omasa, 2007; Corrêa e Pinto, 2011).

A forma de obtenção do fator C utilizando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) já foi utilizado em mapeamentos de processos erosivos em bacias

hidrográficas (Zhou e Wu, 2008; Chou, 2009; Prasannakumar *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2011; Prasannakumar *et al.*, 2012). Entretanto, os modelos podem não apresentar acurácia na estimativa dos valores de C, logo, recomenda-se que a sua aplicação seja para avaliações qualitativas de perda de solo de forma distribuída em bacias hidrográficas (De Asis e Omasa, 2007).

No entanto, o Brasil carece de estudos que envolvam a modelagem distribuída da erosão dos solos em bacias hidrográficas utilizando mapas de fator C obtidos através de índices de vegetação como o NDVI, devido ao fato de que os modelos disponíveis foram desenvolvidos em outros países. Logo, para a aplicação destes modelos em bacias hidrográficas no Brasil é necessário saber qual é o mais adequado e coerente.

Assim, é necessário verificar se valores modelados de fator C utilizando NDVI são coerentes com valores observados. Nesse sentido, a observação em campo do fator C requer a utilização de parcelas experimentais, tornando a tarefa cara e dispendiosa. Porém, a utilização de simuladores de chuvas portáteis é alternativa viável para observação em campo do referido fator, uma vez que o mesmo permite alto número de repetições e uma abordagem sistemática para caracterizar os fatores que influenciam na erosão dos solos em áreas remotas, de difícil acesso e que não possuem padrão regular de precipitação (Iserloh *et al.*, 2013).

A área de estudo deste trabalho é a Área de Proteção Ambiental (APA) delimitada pela sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba, onde são observados fortes indícios de problemas associados aos processos erosivos e ocorrem diversas classes de cobertura do solo como pastagens em vários níveis de conservação, vegetação nativa (Cerrado, Cerradão, mata de galeria, campo, pradaria e vegetação arbustiva), solo exposto, áreas úmidas, reservatórios artificiais e cultivo de eucaliptos.

Neste trabalho busca-se o modelo que melhor se ajuste em estimar o fator C em pastagem, que é a cobertura do solo predominante na área de estudo, utilizando dados observados a partir de chuva simulada. Logo, o objetivo deste estudo é a avaliação de três modelos que relacionam o fator C da (R)USLE e o NDVI obtido por sensoriamento remoto (Van Der Knijff *et al.*, 1999; Lin *et al.*, 2002; Corrêa e Pinto, 2011).

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1. Área de Estudo

A área de estudo foi a sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba, localizada entre os paralelos 20° 28' e 20° 43' de latitude sul e os meridianos 54° 29' e 54° 11' de longitude oeste, ocupando a área de 362 km² (Figura 1). O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, clima subtropical com verão quente. A sub-bacia encontra-se no bioma Cerrado, com maior parte de sua área ocupada por pastagens, havendo áreas com vegetação nativa, matas de galeria e eucalipto.

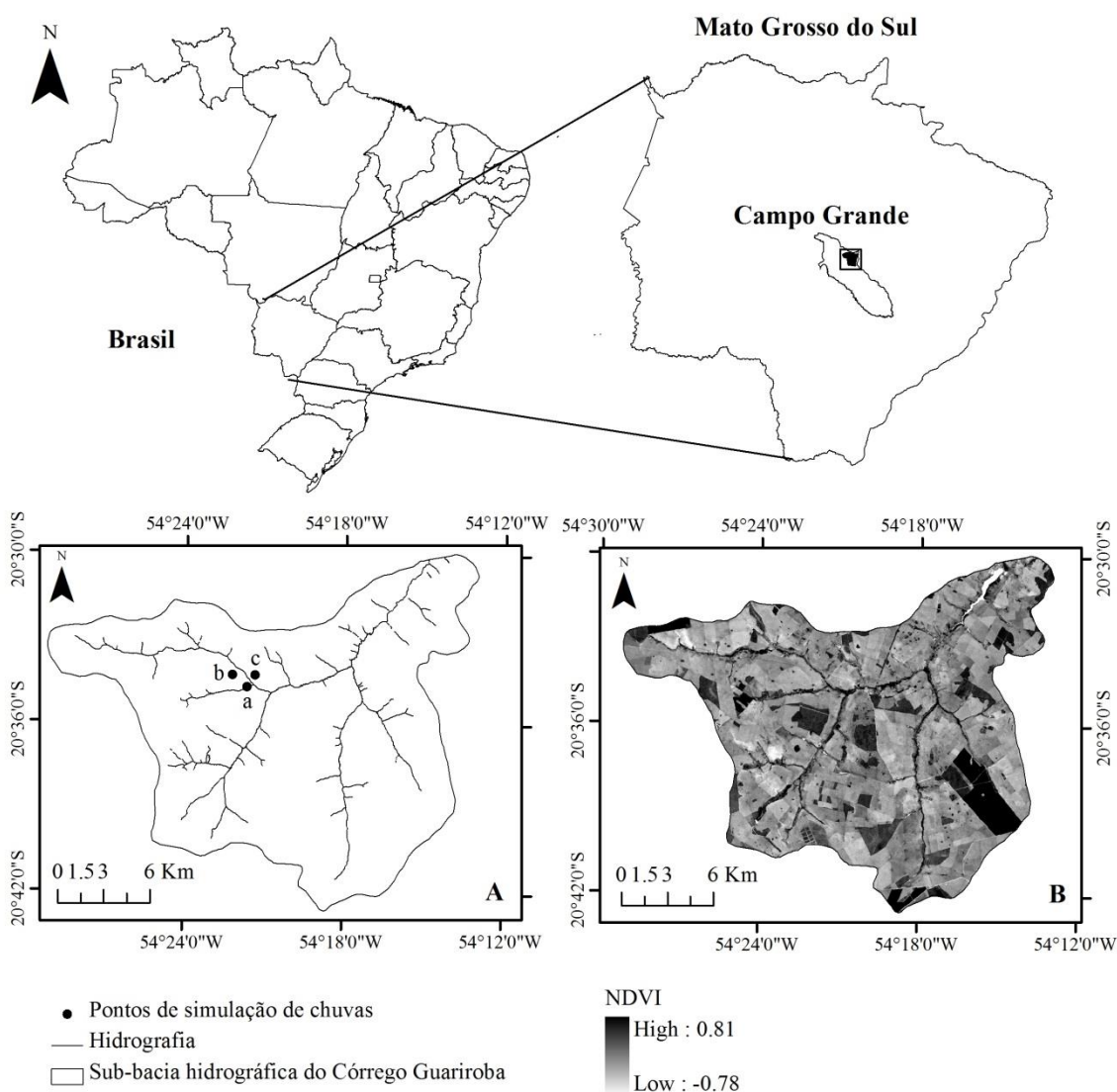


Figura 1. Localização da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba (acima), pontos de simulação de chuva para determinação do fator C (A) e mapeamento do NDVI (B).

2.2. Obtenção do fator C

O fator C da (R)USLE foi obtido através da relação entre as perdas de solos com cobertura e sem cobertura. Assim, as perdas de solo foram determinadas experimentalmente em julho de 2011 no esquema fatorial completo, considerando três repetições em três pontos (Figura 1A), sob pastagem, com e sem cobertura vegetal, através de chuva simulada pelo simulador de chuvas portátil (Figura 2) desenvolvido por Alves Sobrinho *et al.* (2008).

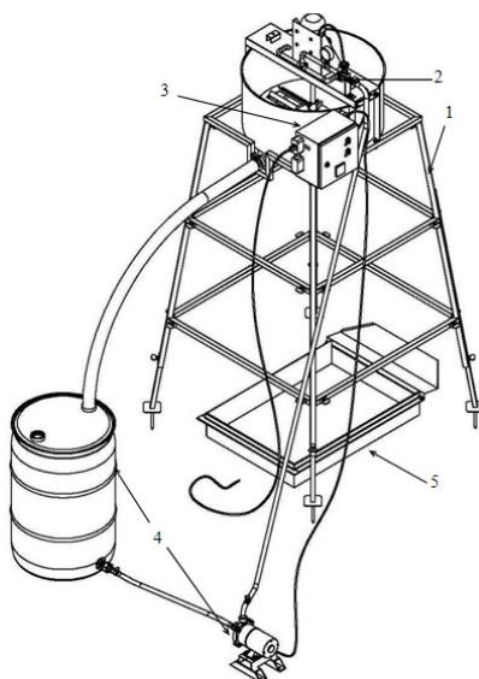


Figura 2. Simulador de Chuvas InfiAsper. (1) estrutura; (2) unidade de aplicação de água; (3) sistema elétrico; (4) bomba d'água; (5) coletor de escoamento (Alves Sobrinho *et al.*, 2008).

O equipamento produziu chuva com diâmetro médio volumétrico de gotas correspondente a 2,0 mm, por meio de dois bicos Veejet 80.150, posicionados a 2,30 m de altura do solo. A relação entre a energia cinética da chuva produzida pelo simulador e a energia cinética da chuva natural correspondeu a valores acima de 90%. A área da parcela experimental, que recebe a precipitação do simulador, foi contornada por um delimitador de parcelas de formato retangular (0,70 m de largura por 1,0 m de comprimento). Tal dispositivo, que permite a coleta do volume de água e solo desagregado escoado superficialmente, foi instalado no campo com o comprimento maior a favor do declive.

As parcelas receberam pré-molhamento, antes do início dos testes com o simulador de chuvas, com objetivo de oferecer condições de umidade uniformes a todas as parcelas, constituindo-se um pré-requisito antes da aplicação da chuva artificial.

O equipamento foi ajustado para aplicar chuva com intensidade de 60 mm h⁻¹. O ensaio de simulação de chuva foi de 60 minutos a partir do início do escoamento, sendo que era medido o volume do escoamento a cada 2 minutos e o material escoado (água e solo desagregado) eram amostrados a cada 6 minutos de experimento. Deste modo, determinaram-se as perdas de solos multiplicando-se os volumes escoados pelas concentrações de sólidos nas amostras de escoamento superficial coletadas, que foram determinadas em laboratório por evaporação a 60° C e posterior pesagem. Pela relação entre a massa de solo perdida e a área da parcela experimental (de 0,70 m²), foram obtidos os valores de perda de solo em kg m⁻².

2.3. Modelagem do fator C

NDVI

Para a determinação do NDVI, utilizou-se imagem de satélite Landsat 5 (órbita/ponto 224/074) do dia 27/06/2011 (I.N.P.E., 2013) obtida na mesma época da realização dos ensaios com o simulador de chuvas para a observação do fator C. A imagem foi georreferenciada na projeção transversa de mercator (UTM, fuso 21, datum SAD 69) em ambiente SIG e através da álgebra de mapas, calculou-se o NDVI (Equação 1).

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (1)$$

Onde: NIR é o canal do infravermelho próximo e VIS é o canal do vermelho visível. A partir da localização geográfica dos pontos de observação da perda de solos com e sem cobertura vegetal, obtiveram-se os valores de NDVI para cada ponto de parcelas experimentais (Figura 1B).

Estimativa do fator C

Foram avaliados três modelos de estimativa do fator C a partir do NDVI. Van Der Knijff *et al.* (1999) elaborou modelo que foi largamente utilizado na Europa (Equação 2); Lin *et al.* (2002) propôs modelo que foi aplicado em países asiáticos (Equação 3); e Corrêa e Pinto (2011), único modelo brasileiro analisado por este trabalho, construiu modelo a partir de regressão linear simples (Equação 4).

$$C1 = \exp \left[-2 \times \left(\frac{NDVI}{1-NDVI} \right) \right] \quad (2)$$

$$C2 = \left(\frac{1-NDVI}{2} \right)^{1+NDVI} \quad (3)$$

$$C3 = 0,5 - (0,5 \times NDVI) \quad (4)$$

2.4. Análise estatística e avaliação dos modelos

Rejeitou-se a hipótese de normalidade para os valores determinados do fator C através de chuva simulada num intervalo de confiança de 95%. Logo, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis foi utilizado para testar a hipótese nula de que todos os grupos, ou pontos de simulação de chuvas, possuem funções de distribuição iguais contra a hipótese alternativa de que ao menos dois grupos possuem funções de distribuição diferentes.

Para a avaliação dos modelos de estimativa do fator C através do NDVI foi importante analisar os erros residuais, a diferença entre os valores modelados e observados e caracterizar a predição entre superestimativa e subestimativa. Logo, foram utilizados parâmetros estatísticos adotados por Loague e Green (1991), descritos pelas seguintes expressões matemáticas:

Erro-padrão da estimativa normalizado (RMSE)

$$RMSE = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (5)$$

Coeficiente de determinação (CD)

$$CD = \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 / \sum_{i=1}^n (P_i - O)^2 \quad (6)$$

Eficiência do modelo (EF)

$$EF = [\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O)^2] / \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 \quad (7)$$

Coeficiente de massa residual (CRM)

$$CRM = (\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i) / \sum_{i=1}^n O_i \quad (8)$$

Erro máximo (ME)

$$ME = \text{Max } |P_i - O_i| \quad (9)$$

Diferença média (MD)

$$MD = \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) / n \quad (10)$$

Onde: P_i – valor predito; O_i – valor observado; i – índice amostral; O – média dos valores observados; e n é o número de amostras. O limite inferior para os parâmetros ME, RMSE e CD é igual a zero. O valor máximo para EF é igual a um. O CD determina a proporção da variância total dos dados observados estimados pelos dados preditos. Os testes foram

realizados com os dados não agrupados e espera-se que os valores de RMSE, CD, EF, CRM e ME sejam o mais próximo possível de 0,0; 1,0; 1,0; 0,0 e 0,0; respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis pode-se aceitar a hipótese nula de que os valores de perdas de solo e fator C (observados e modelados), listados na Tabela 1, possuem funções de distribuição iguais em nível de significância de 5%. Observa-se que os valores de C modelados são iguais para as repetições do mesmo ponto uma vez que o NDVI, parâmetro de entrada dos modelos, é constante na célula que possui resolução espacial de 30 m, onde estão inseridas todas as parcelas experimentais de cada ponto.

Tabela 1. Valores de perdas de solo com cobertura (CC) e sem cobertura (SC) em kg m⁻², fator C (observados e modelados) e NDVI obtido por sensoriamento remoto.

Ponto/Repetição	a/1	a/2	a/3	b/1	b/2	b/3	c/1	c/2	c/3	Médias
Perda de solo CC	12,31	6,13	3,71	22,01	6,14	6,68	43,75	135,17	18,79	28,30
Perda de solo SC	87,90	50,96	59,35	164,91	65,36	37,98	99,18	196,28	171,35	103,69
C observado	0,14	0,12	0,06	0,13	0,09	0,18	0,44	0,69	0,11	0,23
NDVI	0,26	0,26	0,26	0,20	0,20	0,20	0,22	0,22	0,22	0,23
C1	0,49	0,49	0,49	0,61	0,61	0,61	0,56	0,56	0,56	0,55
C estimado	C2	0,28	0,28	0,28	0,33	0,33	0,33	0,31	0,31	0,31
C3	0,37	0,37	0,37	0,40	0,40	0,40	0,39	0,39	0,39	0,38

(C1) Van Der Knijff *et al.* (1999); (C2) Lin *et al.* (2002); (C3) Corrêa e Pinto (2011).

A avaliação do desempenho dos modelos que estimam o fator C da (R)USLE através do NDVI foi realizada através da comparação entre os valores estimados pelas equações de Van Der Knijff *et al.* (1999); Lin *et al.* (2002) e Corrêa e Pinto (2011) e os valores observados por simulação de chuvas, pela utilização de parâmetros estatísticos calculados e relacionados na Tabela 2.

Tabela 2. Ajuste estatístico dos modelos avaliados.

Identificação	Modelo de estimativa do Fator C	RMSE	CD	EF	CRM	ME	MD
C1	Van Der Knijff <i>et al.</i> (1999)	0,39	2,94	-1,94	-1,53	0,51	0,36
C2	Lin <i>et al.</i> (2002)	0,21	0,23	0,77	-0,42	0,37	0,20
C3	Corrêa e Pinto (2011)	0,26	0,73	0,27	-0,76	0,31	0,25

(C1) Van Der Knijff *et al.* (1999); (C2) Lin *et al.* (2002); (C3) Corrêa e Pinto (2011).

O parâmetro estatístico RMSE mostra que o fator C estimado pelo modelo C2 (Lin *et al.*, 2002) é o mais acurado. De acordo com o CD, também denominado R^2 , observa-se que o modelo que melhor se ajusta ao conjunto amostral é o C3 (Corrêa e Pinto, 2011). Entretanto, o modelo mais eficiente para estimativa do fator C é o C2 (Lin *et al.*, 2002), conforme o parâmetro EF. Analisando coeficiente CRM, todos os modelos avaliados superestimam os valores do fator C. O modelo C1 (Van Der Knijff *et al.*, 1999) apresenta os maiores valores de erro médio (ME) e diferença média (MD). Assim, o modelo que apresenta o melhor ajuste para a estimativa do fator C utilizando o NDVI é a equação de Lin *et al.* (2002).

Entretanto, apesar de o modelo de Van Der Knijff *et al.* (1999) não ter obtido ajuste satisfatório para as condições locais, o mesmo já foi empregado em bacia hidrográfica com condições climáticas semelhantes às da área de estudo (Prasannakumar *et al.*, 2011). Já o modelo que apresenta o melhor ajuste (Lin *et al.*, 2002) foi desenvolvido para fins científicos (Lim *et al.*, 2005), objetivando a modelagem da perda de solos para a predição da produção de sedimentos em escala de bacia, como demonstrado no trabalho de Chou (2009).

O modelo C3 (Corrêa e Pinto, 2011), que obteve o pior ajuste, não foi calibrado utilizando parcelas experimentais como nos modelos C1 e C2 (Van Der Knijff *et al.*, 1999; Lin *et al.*, 2002). No referido modelo (C3) assumiu-se que quando o NDVI fosse igual a 1, o valor de C seria 0 e quando o NDVI fosse igual a -1, o valor de C seria 1. Portanto, justifica-se o ajuste não satisfatório para a equação.

A sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba possui outras classes de uso e ocupação do solo além da pastagem, como vegetação nativa (Cerrado, Cerradão, mata de galeria, campo, pradaria e vegetação arbustiva), solo exposto, áreas úmidas, reservatórios artificiais e cultivo de eucaliptos. Assim, Chou (2009), Gertner *et al.* (2002) e Wang *et al.* (2002) recomendam que se faça o ajuste estatístico dos modelos avaliados com dados observados considerando também estes tipos de cobertura do solo, de modo a aprimorar a avaliar de forma mais acurada os modelos de estimativa do fator C da (R)USLE.

4. CONCLUSÕES

O modelo que apresenta melhor ajuste na estimativa do fator uso e manejo do solo (C) em pastagem a partir da relação entre o NDVI e o referido fator, é o proposto por Lin *et al.* (2002).

A chuva simulada é alternativa para observação das perdas de solo com e sem cobertura na determinação do fator C, viabilizando, através de ajustes estatísticos, a avaliação da aplicabilidade, em diferentes condições ambientais, de modelos que relacionam o NDVI e o fator uso e manejo do solo (C).

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES SOBRINHO, T.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; GÓMEZ, J. A. A portable integrated rainfall and overland flow simulator. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 2, p. 163-170, 2008. ISSN 0266-0032 1475-2743.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009. ISSN 03418162.
- CHOU, W.-C. Modelling Watershed Scale Soil Loss Prediction and Sediment Yield Estimation. **Water Resources Management**, v. 24, n. 10, p. 2075-2090, 2009. ISSN 0920-4741 1573-1650.
- CORRÊA, E. A.; PINTO, S. A. P. **Estimativa do fator C da Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) utilizando Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada (NDVI) na Bacia Hidrográfica do Córrego Monjolo Grande/Ipeúna/SP. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Curitiba, PR: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais 2011.
- DE ASIS, A. M.; OMASA, K. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 62, n. 4, p. 309-324, 2007. ISSN 09242716.
- GERTNER, G.; GUANGXING, W.; SHOUFAN, F.; ANDERSON, A. B. Mapping and uncertainty of predictions based on multiple primary variables from joint co-simulation with Landsat TM image and polynomial regression. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 498-510, 2002.

I.N.P.E. **Imagem LANDSAT 5 Thematic Mapper (TM), canais 1, 2 ,3 ,4, 5, 6, 7, órbita 224, ponto 74, de 27 junho 2011.** São José dos Campos, SP 2013.

ISERLOH, T.; RIES, J. B.; ARNÁEZ, J.; BOIX-FAYOS, C.; BUTZEN, V.; CERDÀ, A.; ECHEVERRÍA, M. T.; FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J.; FISTER, W.; GEIßLER, C.; GÓMEZ, J. A.; GÓMEZ-MACPHERSON, H.; KUHN, N. J.; LÁZARO, R.; LEÓN, F. J.; MARTÍNEZ-MENA, M.; MARTÍNEZ-MURILLO, J. F.; MARZEN, M.; MINGORANCE, M. D.; ORTIGOSA, L.; PETERS, P.; REGÜÉS, D.; RUIZ-SINOGA, J. D.; SCHOLTEN, T.; SEEGER, M.; SOLÉ-BENET, A.; WENGEL, R.; WIRTZ, S. European small portable rainfall simulators: A comparison of rainfall characteristics. **Catena**, 2013. ISSN 03418162.

JEBARI, S.; BERNDTSSON, R.; OLSSON, J.; BAHRI, A. Soil erosion estimation based on rainfall disaggregation. **Journal of Hydrology**, v. 436-437, p. 102-110, 2012. ISSN 00221694.

LIM, K. J.; SAGONG, M.; ENGEL, B. A.; TANG, Z.; CHOI, J.; KIM, K.-S. GIS-based sediment assessment tool. **Catena**, v. 64, n. 1, p. 61-80, 2005. ISSN 03418162.

LIN, C. Y.; LIN, W. T.; CHOU, W. C. Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. **Soil and Tillage Research**, v. 68, p. 143-152, 2002.

LOAGUE, K.; GREEN, R. E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 7, p. 51-73, 1991.

OLIVEIRA, P. T. S.; ALVES SOBRINHO, T.; RODRIGUES, D. B. B.; PANACHUKI, E. Erosion Risk Mapping Applied to Environmental Zoning. **Water Resources Management**, v. 25, n. 3, p. 1021-1036, 2010. ISSN 0920-4741 1573-1650.

PRASANNAKUMAR, V.; VIJITH, H.; ABINOD, S.; GEETHA, N. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. **Geoscience Frontiers**, v. 3, n. 2, p. 209-215, 2012. ISSN 16749871.

PRASANNAKUMAR, V.; VIJITH, H.; GEETHA, N.; SHINY, R. Regional Scale Erosion Assessment of a Sub-tropical Highland Segment in the Western Ghats of Kerala, South India. **Water Resources Management**, v. 25, n. 14, p. 3715-3727, 2011. ISSN 0920-4741 1573-1650.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **USDA Agriculture Handbook**, p. 251 pp., 1997.

VAN DER KNIJFF, J. M.; JONES, R. J. A.; MONTANARELLA, L. **Soil Erosion Risk Assessment in Italy**. EUROPEAN SOIL BUREAU, J. R. C., EUROPEAN COMMISSION: 58 p. 1999.

WANG, G.; WENTE, S.; GERTNER, G. Z.; ANDERSON, A. Improvement in mapping vegetation cover factor for the universal soil loss equation by geostatistical methods with

Landsat Thematic Mapper images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 18, p. 3649-3667, 2002. ISSN 0143-1161 1366-5901.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. **USDA Agriculture Handbook**, v. 537, p. 58, 1978.

WU, L.; LONG, T.-Y.; LIU, X.; MMEREKI, D. Simulation of soil loss processes based on rainfall runoff and the time factor of governance in the Jialing River Watershed, China. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 6, p. 3731-3748, 2011. ISSN 0167-6369 1573-2959.

ZHOU, W.; WU, B. Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio using remote sensing and GIS: a case study of upstream Chaobaihe River catchment, north China. **International Journal of Sediment Research**, v. 23, 2008.

CAPÍTULO 4: PERDAS DE SOLOS E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA HIDROGRÁFICA: UMA ABORDAGEM DISTRIBUÍDA

RESUMO

A estimativa da quantidade de sedimentos que é transportada aos cursos de água de determinada bacia hidrográfica pode ser calculada a partir de modelo baseado na relação de aporte de sedimentos (SDR), definida como a fração entre o aporte de sedimentos no exutório da bacia hidrográfica e a erosão total ocorrida dentro da área de drenagem. O modelo para o cálculo do SDR requer como variável de entrada alguns dados fisiográficos da bacia hidrográfica como a direção e comprimento de fluxo da drenagem. Sendo assim, a partir de abordagens distribuídas da predição da erosão da bacia com o modelo da Equação Universal de Perdas de Solos Revisada (RUSLE) e do cálculo da relação aporte de sedimentos (SDR), foi possível determinar a distribuição espacial da quantidade de sedimentos na sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba. Estes dados, integrados em Sistema de Informações Geográficas (SIG), possibilitam a identificação de áreas com altos índices de erosão e produção de sedimentos no contexto da bacia hidrográfica, amparando as tomadas de decisão envolvendo o uso e o manejo do solo.

Palavras-chave: Relação de Aporte de Sedimentos, predição da erosão, modelagem distribuída.

ABSTRACT

The estimative of the sediment yield of a watershed can be calculated using a model based on the sediment delivery ratio (SDR), which is defined as the fraction between the sediment yield and the total soil loss of the drainage area. The model to calculate the SDR uses some physical data of the river basin as the flow length and direction. Thus, using a distributed approach of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and the SDR, it was possible to show the spatial distribution of the sediment yield in the Guariroba stream subwatershed. These data were processed using Geographic Information System (GIS) and helps in the identification of the areas with high levels of soil erosion and sediment production in the context of the study area, creating subsidies to the decision making involving the land use and management.

Keywords: Sediment delivery ratio, erosion prediction, distributed modelling.

1. INTRODUÇÃO

O controle efetivo da produção de sedimentos em bacia hidrográfica é componente crítico na gestão dos recursos naturais. Dados espaciais da distribuição da produção de sedimentos são úteis na identificação da sua origem, pois auxilia na elaboração de estratégias de controle da erosão, no planejamento conservacionista e na produção sustentável. A modelagem do aporte de sedimentos é considerada como abordagem eficaz na obtenção de informações espaciais para auxiliar nas tomadas de decisão relacionadas à gestão ambiental (Lu *et al.*, 2006).

De acordo com Chaves (2010), a obtenção de variáveis fisiográficas é relativamente fácil. Essas variáveis são utilizadas na estimativa da relação de aporte de sedimentos para bacias hidrográficas, mais conhecida como SDR (acrônimo de *Sediment Delivery Ratio*).

É possível que o fluxo de sedimentos modelado a partir de equações SDR em associação com modelos de erosão seja próximo a realidade. Porém, para que os valores não sejam superestimados, a estimativa da erosão na bacia deve ser realizada com muito critério. Para tanto, a ferramenta deve ser implementada de forma condizente com o uso e ocupação do solo e as práticas conservacionistas (Ricker *et al.*, 2008).

A magnitude do SDR para bacias hidrográficas pode ser influenciada por diversos fatores geomorfológicos e ambientais, como a natureza, extensão e localização das fontes de sedimentos, características de relevo e declividade, padrões de drenagem e canais, cobertura vegetal, uso do solo e textura do solo. Além disso, o cálculo do SDR é motivado pelo fato de que a estimativa confiável para a relação de aporte de sedimentos proporcionaria um método viável e menos oneroso de se calcular a produção de sedimentos em determinada bacia hidrográfica a partir de dados simulados de perda de solos, estimados a partir de procedimentos estabelecidos pela literatura (Walling, 1983).

Neste estudo, o uso de sistema de informações geográficas (SIG) é fundamental, uma vez que diversos parâmetros necessários para os modelos a serem aplicados são facilmente determinados por esta ferramenta. Além disso, de acordo com Zhou e Wu (2008), a vantagem do uso do SIG está na quantificação do impacto de cada fator envolvido nos modelos no resultado final e os temas envolvidos podem ser facilmente modificados e atualizados.

A partir da modelagem da produção de sedimentos, na sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba, foram gerados dados espaciais que servirão de suporte à gestão dos recursos hídricos, uma vez que, de acordo com a Política Nacional de Recursos Hídricos

(Brasil, 1997), é necessária a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental e a articulação da gestão de recursos hídricos com a do uso do solo, além de outras diretrizes gerais de implementação da referida lei. Deste modo, são objetivos deste trabalho calcular as perdas de solos através de modelo preditivo de erosão do solo e estimar a produção de sedimentos de forma distribuída em bacia hidrográfica.

2. MATERIAL E MÉTODO

2.1. Área de Estudo

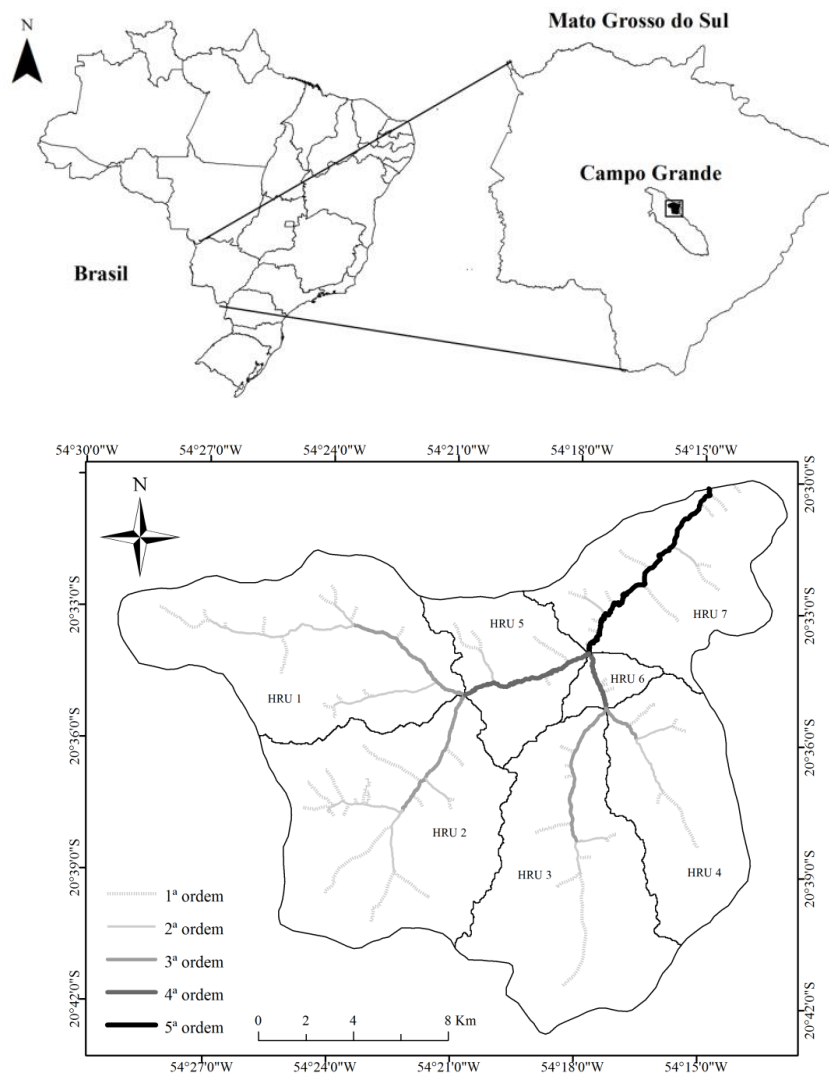


Figura 1. Localização da sub-bacia hidrográfica do Córrego Guarairoba e subdivisões em unidades de resposta hidrológica (HRU).

A área de estudo consistiu na sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba, composta por 7 unidades de resposta hidrológica (HRUs), está localizada entre os paralelos 20° 28' e 20° 43' de latitude sul e os meridianos 54° 29' e 54° 11' de longitude oeste, ocupa a área de 362 km² e contém quatro principais cursos d'água tributários de 3ª ordem: Saltinho (HRU 1), Cabeceira do Guariroba (HRU 2), Tocos (HRU 3) e Cabeceira do Rondinha (HRU 4); dois afluentes de 4ª ordem: Guariroba (HRU 5) e Rondinha (HRU 6); e o curso d'água principal de 5ª ordem: Foz do Guariroba (HRU 7), aonde está localizado o reservatório para captação de água de abastecimento público da cidade de Campo Grande/MS (Figura 1).

2.2. Estimativa da perda de solos (A)

A estimativa da perda de solo por erosão hídrica foi calculada utilizando a Equação Universal de Perdas de Solos Revisada (Equação 1), conhecida popularmente como RUSLE (acrônimo de Revised Universal Soil Loss Equation), criada originalmente por Wischmeier e Smith (1978) e aperfeiçoada por Renard *et al.* (1997), sendo um modelo de erosão elaborado para aferir a média de perda de solo considerando padrões de chuva, classes de solo, uso e ocupação do solo e topografia (Equação 1).

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Onde: R: fator erosividade da chuva e do escoamento superficial (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹); K: fator erodibilidade do solo (t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹); LS: fator topográfico (adimensional); C: fator de uso e manejo do solo (adimensional); P: fator de práticas conservacionistas (adimensional).

Fator erosividade da chuva e do escoamento superficial (R)

A erosividade da chuva e do escoamento superficial foi calculada baseada na energia cinética E (MJ ha⁻¹) e na intensidade máxima de precipitação em 30 minutos (I30), expressa em mm h⁻¹. O fator R foi avaliado para eventos chuvosos que excedam 12,7 mm ou o mínimo de 6,35 mm em 15 minutos. Apesar de a metodologia original da RUSLE prever séries de dados de chuva com maiores períodos observados para estimar a média anual do fator R, o referido fator foi calculado para os eventos erosivos observados entre os anos de 2011 e 2013, conforme já realizado por Jebari *et al.* (2012) em sua aplicação da RUSLE em escala de bacia hidrográfica, que não possuía dados históricos como é o caso do presente trabalho. A Equação 1 que calcula a energia cinética unitária (e_r) é baseada na intensidade do evento erosivo (i_r).

$$e_r = 0,29[1 - 0,72\exp(-0,05 \times i_r)] \quad (2)$$

Na área de estudo, os dados foram coletados através de pluviógrafos de báscula, que por sua vez foram analisados e os eventos de precipitação foram separados para serem analisados e classificados entre erosivos e não erosivos. Deste modo, os eventos erosivos observados foram caracterizados quanto à altura de precipitação, duração, intensidade e intensidade máxima em 30 minutos (I_{30}). Posteriormente, a energia cinética (E) foi calculada (Equação 3) para os eventos erosivos observados e a média anual do produto entre a energia cinética e a intensidade máxima em 30 minutos compõe o índice de erosividade (R) dado pela Equação 4.

$$E = \sum_{i=1}^j (e_r \times \Delta V_r) \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^j (EI_{30})_i}{N} \quad (4)$$

Onde: ΔV_r é a altura de chuva do incremento no qual i_r é constante (h) e EI_{30} é a energia cinética para o evento i , j é o número total de eventos erosivos e N é o período em anos de monitoramento.

Fator erodibilidade do solo (K)

O fator erodibilidade representa a suscetibilidade do solo a erosão em condições de parcela padrão. Na ausência de valores determinados experimentalmente, é possível estimar com dados de amostras de solo coletados na área de estudo, uma vez que o fator está intimamente relacionado com características físicas do solo como textura e matéria orgânica. Pode ser calculado a partir da Equação 5 (Sharpley e Williams, 1990), aplicada com sucesso em trabalhos como de Xu *et al.* (2013) pois explicita, no cálculo da erodibilidade dos solos, as diferenças de suas características, que são fortemente relacionadas com o fator K.

$$K = \left[0,2 + 0,3 \exp(-0,0256 \text{ SAN} (1 - \frac{\text{SIL}}{100})) \right] \times \left[\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right]^{0,3} \times \left[1,0 - \frac{0,25 \text{ C}}{\text{C} + \exp(3,72 - 2,95 \text{ C})} \right] \times \left[1,0 - \frac{0,70 \text{ SN1}}{\text{SN1} + \exp(-5,41 + 22,9 \text{ SN1})} \right] \times 0,1317 \quad (5)$$

Onde: SAN é a porcentagem de areia; SIL é a porcentagem de silte; CLA é a porcentagem de argila; C é o teor de carbono orgânico; SN1 é 1,0 menos o teor de areia dividido por 100.

As amostras de solo dos horizontes superficiais foram coletadas em 9 pontos distribuídos na área de estudo, sendo 2 pontos na classe LVd (Latossolo Vermelho distrófico), 2 pontos na classe RQg (Neossolo Quartzarênico hidromórfico) e 5 pontos na classe RQo (Neossolo Quartzarênico órtico). As análises texturais foram realizadas através do método da pipeta após dispersão química (NaOH, 1 mol.L⁻¹) e física (agitador mecânico, 14000 rpm). Os teores de matéria orgânica foram determinados por queima a 440°C (A.B.N.T., 1996).

Fator topográfico (LS)

A partir da digitalização de carta topográfica 1:100.000 (D.S.G., 1979), foi gerado modelo digital de elevação (MDE) com resolução espacial de 30 metros, que foi utilizado como dado de entrada na obtenção do fator topográfico (LS) através do programa *LS tool* desenvolvido por Zhang *et al.* (2013). Sendo assim, o cálculo do fator LS foi baseado nas expressões teóricas desenvolvidas por McCool *et al.* (1989) que são utilizadas na RUSLE (Renard *et al.*, 1997):

$$LS = L \times S \quad (6)$$

$$L = (\lambda/22,13)^m \quad (7)$$

$$m = \beta/(1 + \beta) \quad (8)$$

$$\beta = (\sin \theta)/[3 \times (\sin \theta)^{0,8} + 0,56] \quad (9)$$

$$S = 10,8 \times \sin \theta + 0,03 \quad \theta < 9\% \quad (10)$$

$$S = 16,8 \times \sin \theta - 0,5 \quad \theta \geq 9\% \quad (11)$$

Onde: λ é o comprimento do declive; m é a variável expoente do comprimento do declive; β é o fator que varia com a declividade; θ é o ângulo do declive.

Fator uso e manejo do solo (C)

O fator uso e manejo do solo foi calculado a partir da Equação 12 (Lin *et al.*, 2002), que foi desenvolvida para fins científicos (Lim *et al.*, 2005), objetivando a modelagem da perda de solos para a predição da produção de sedimentos em escala de bacia, como demonstrado por Chou (2009).

$$C = \left(\frac{1-NDVI}{2} \right)^{1+NDVI} \quad (12)$$

Onde: NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada. P

Para a determinação do NDVI, utilizou-se imagem de satélite Landsat 5 (órbita/ponto 224/074) do dia 27/06/2011 (I.N.P.E., 2013). A imagem foi georreferenciada na projeção transversa de mercator (UTM, fuso 21, SAD 69).

Fator práticas conservacionistas (P)

A avaliação da existência de práticas conservacionistas consiste em levantamentos em campo que são caros e dispendiosos. Além disso, existem propriedades inseridas na área de estudos que não são acessíveis. Logo, foi adotado o valor de 1,00 para o fator P em toda a bacia hidrográfica. Assim, o modelo a ser aplicado irá avaliar somente a influencia do uso e manejo do solo na perda de solos e na produção de sedimentos, omitindo a influencia das práticas conservacionistas.

2.3. Estimativa da produção de sedimentos (SY)

O conceito da relação aporte de sedimentos é definida comumente como a relação entre a produção de sedimentos e a perda de solos (Equação 13).

$$SDR = \frac{SY}{A} \quad (13)$$

Onde SY é a produção de sedimentos ($t \text{ ano}^{-1}$) e A é a perda total de solo ($t \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e;

$$SY_i = \sum A_i \times SDR_i \times (D^2 \times 10^{-4}) \quad (14)$$

Onde SY_i é a produção de sedimentos pela célula i ($t \text{ ano}^{-1}$), SDR_i é a relação de aporte de sedimentos para a célula i (adimensional) e; D é a resolução espacial do MDE (m) a ser utilizado na modelagem do SDR_i e;

$$SDR_i = \frac{FL_{up}}{FL_{up} + FL_{down}} \quad (15)$$

Onde FL_{up} é o comprimento do fluxo a montante da célula i (m) e FL_{down} (m) é o comprimento de fluxo a jusante da célula i.

O somatório dos comprimentos FL_{up} e FL_{down} caracteriza o comprimento total da drenagem que passa pela célula i.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estimativa da perda de solos (A)

A perda de solo média calculada para a sub-bacia hidrográfica em estudo para o período modelado (07/2011-12/2013), foi de $67,12 \pm 84,43 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Observa-se maior erosão do solo nas áreas de maior declividade do terreno e com vegetação menos robusta ($A > 50 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), que totaliza 43% da área da bacia hidrográfica e evidencia a necessidade da adoção de práticas conservacionistas nestas áreas. Nas áreas com perda de solo entre 0 e 1 ton/ha.ano observa-se a presença de vegetação densa, como matas de galeria e cerrado. Assim, o fator C evidencia a heterogeneidade da cobertura do solo e o fator LS exerce maior influencia no mapa de perda de solos (Figura 2).

Fator erosividade da chuva e do escoamento superficial (R)

Os 109 eventos chuvosos considerados erosivos durante o período de monitoramento (07/2011-12/2013) somaram a altura aproximada de 3157 mm, sendo a precipitação total registrada pelos pluviógrafos de 3541 mm. Isto representou 35% em número e 89% em volume do total de eventos de precipitação ocorridos durante o período observado na área de drenagem estudada, sendo valores próximos aos encontrados por Bazzano *et al.* (2007), que estudou a erosividade das chuvas em condições similares.

O índice de erosividade da chuva e do escoamento superficial observado durante o período de monitoramento para a sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba foi de 8932 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ (Figura 2), sendo equivalentes aos valores de referência para a região do estudo (Mello *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2013), apesar da curta série de dados utilizada para os cálculos.

Fator erodibilidade do solo (K)

Na modelagem da erosão deve-se considerar a erodibilidade dos horizontes superficiais. A partir da equação de Sharpley e Williams (1990) temos as respostas para a erodibilidade dos solos para cada ordem taxonômica: 0,028±0,001 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ (LVd) e 0,039±0,002 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ (RQg e RQo) (Figura 3).

Fator topográfico (LS)

O fator LS, que corresponde ao produto do fator comprimento de rampa (L) com o fator declividade (S), tem sua distribuição no espaço caracterizada na Figura 3. O fator topográfico na sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba variou entre 0,01 e 8,63, sendo que a média encontrada para a área de estudo foi de 0,73±0,87, considerada baixa, pois está abaixo da unidade. Entretanto, o relevo que favorece a ocorrência de processos erosivos é evidenciado nas encostas, onde o fator LS apresenta valores maiores que a unidade pelo aumento da declividade e do comprimento de rampa.

Fator uso e manejo do solo (C) e práticas conservacionistas (P)

O fator C tem a sua distribuição espacial caracterizada na Figura 2, com valores entre 0,97 e 0,01, sendo a média de 0,26±0,08. Observa-se que os maiores valores para o referido fator encontram-se nas áreas de solo exposto e de pastagem, enquanto que os valores menores aparecem em áreas com vegetação mais densa (mata, cerrado, reflorestamento, entre outros). O fator P foi considerado como sendo 1,00 para toda a área de estudo, uma vez que o levantamento do referido fator é caro e dispendioso.

3.2. Estimativa da produção de sedimentos (SY)

Os resultados da modelagem para a área de estudo estão resumidos na Figura 3, que indicam a distribuição espacial da relação de aporte de sedimentos (SDR), obtido a partir do MDE, e a produção de sedimentos (SY) na área de drenagem. A média anual aproximada da produção de sedimentos no período monitorado (07/2011-12/2013) foi de $5,8 \times 10^5$ ton ano⁻¹ para a área de drenagem que possui 362 km².

Observa-se que a maior parte da bacia hidrográfica (69%) contribui com menos de 1 ton.ano⁻¹ de sedimentos para os corpos de água e as áreas de maior contribuição encontram-se na região central da área de drenagem e em algumas cabeceiras da rede de drenagem. Estas áreas possuem declividade acentuada e estão mais próximas aos corpos aquosos, conforme também encontraram Chou (2009) e Lin *et al.* (2002) em estudos semelhantes.

Além disso, foi possível evidenciar na sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba qual HRU produz mais sedimentos (Figura 4) e assim possibilitar tomadas de decisão para eleger as áreas prioritárias na adoção de práticas conservacionistas (Silva *et al.*, 2012). Sendo assim, observa-se que a HRU 3 é a que possui maior contribuição no aporte total de sedimentos da bacia (24%) e a HRU 5 é que contribui em menor quantidade (4%).

Entretanto, para quantificação da produção de sedimentos através de modelos é necessário realizar anteriormente avaliação estatística utilizando dados observados e assim calibrar o modelo de erosão e produção de sedimentos para a área de estudo (Shi *et al.*, 2012; Vigiak *et al.*, 2012). Além disso, Ebisemiju (1990) sugere que para a avaliação de modelos que calculam produção de sedimentos devem haver dados observados de longos períodos de observação.

Logo, quando não existe a possibilidade de calibrar e ajustar o modelo preditivo de erosão e produção de sedimentos, ainda é possível utiliza-lo para avaliações qualitativas dessas variáveis. Bhattarai e Dutta (2006) obtiveram resultados modelados incompatíveis com as observações realizadas na bacia hidrográfica estudada, uma vez que alguns fatores que compõem a RUSLE foram estimados. No entanto, neste trabalho é possível identificar as fontes de sedimento na área de estudo, como evidenciaram as Figuras 4 e 5.

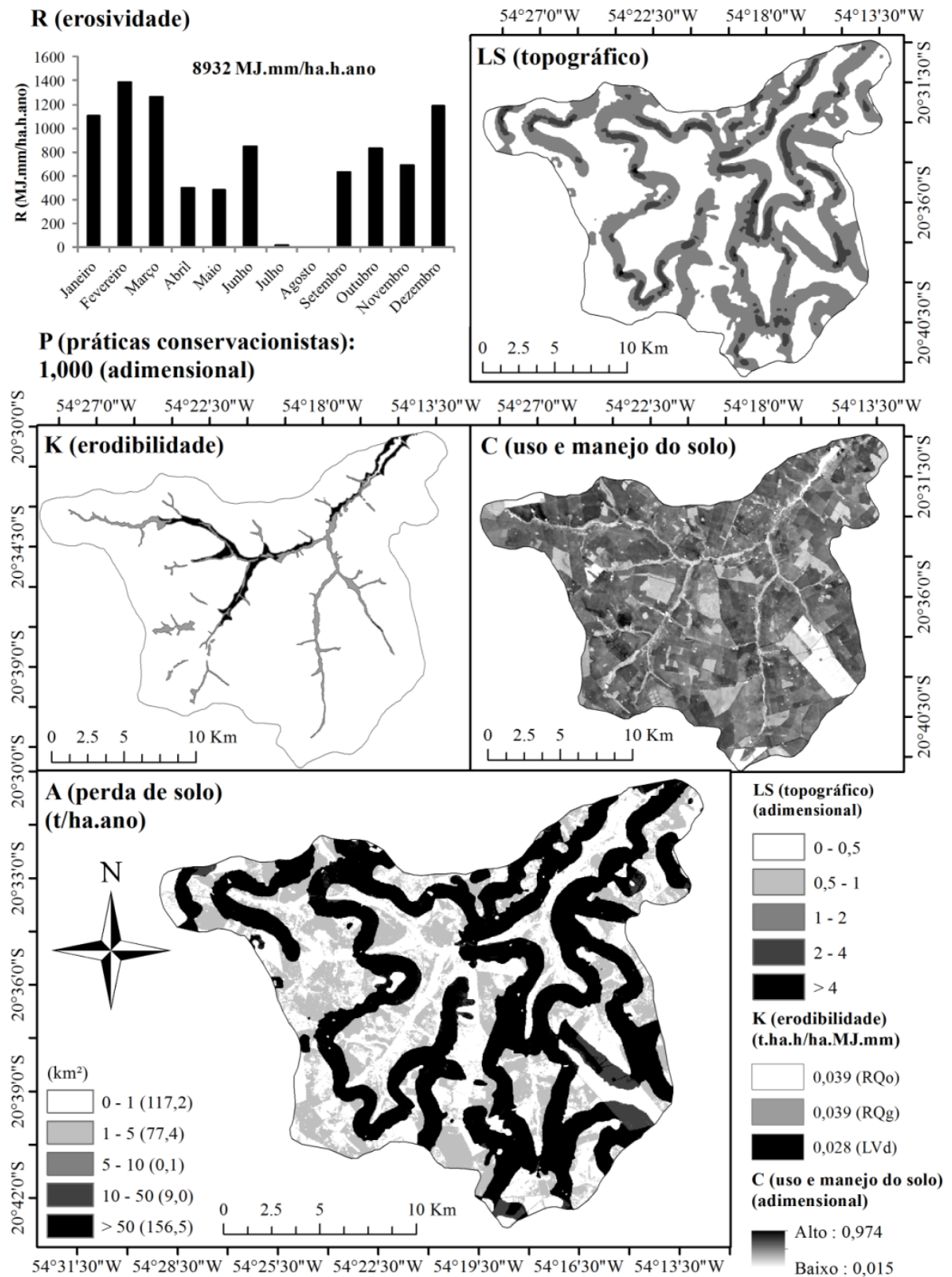


Figura 2. Fatores componentes do modelo RUSLE (R, K, LS, C, P) e o resultado da integração caracterizado no mapa A (perda de solos).

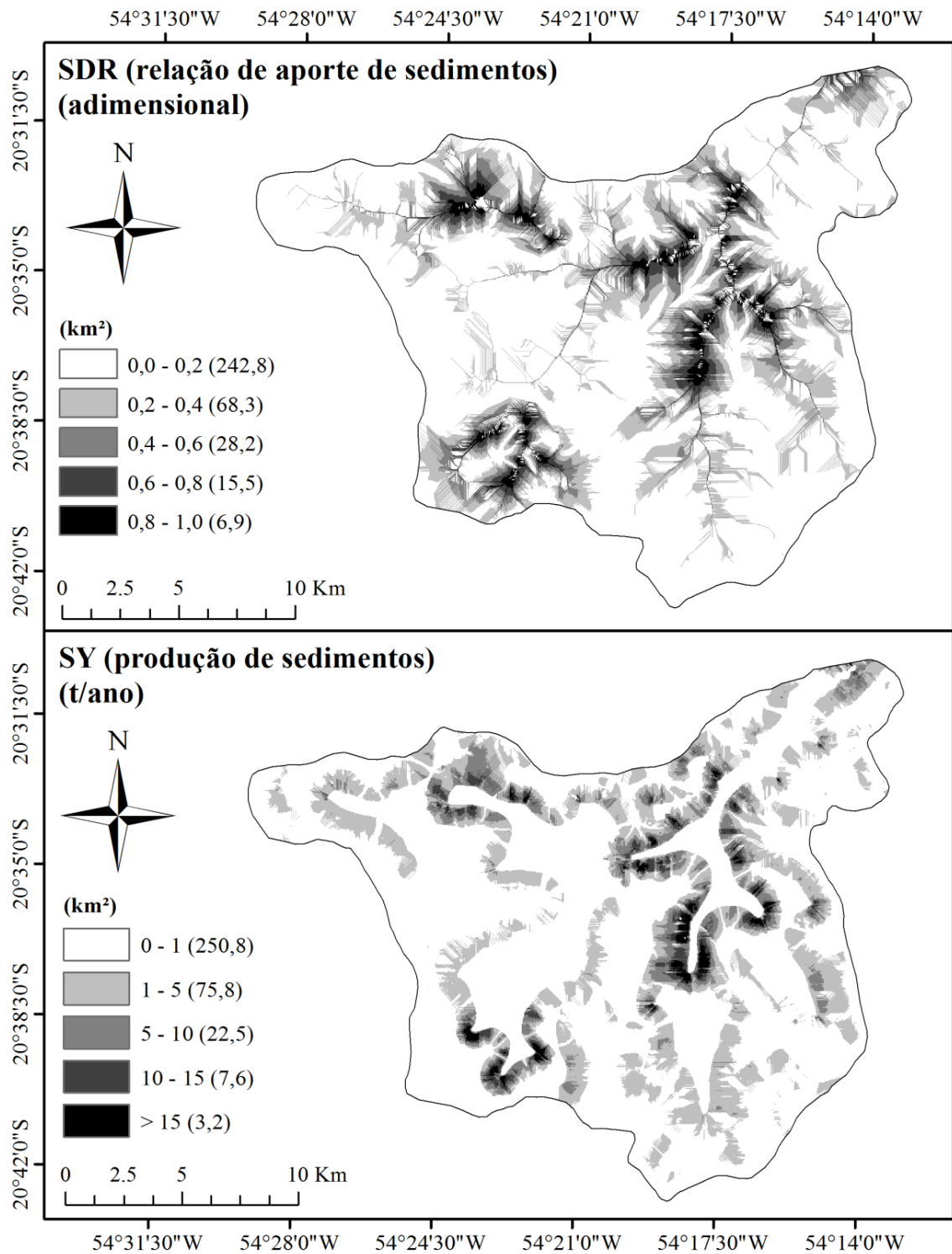


Figura 3. SDR (relação de aporte de sedimentos) expressa de forma distribuída e SY (produção de sedimentos) ao longo da área de estudo.

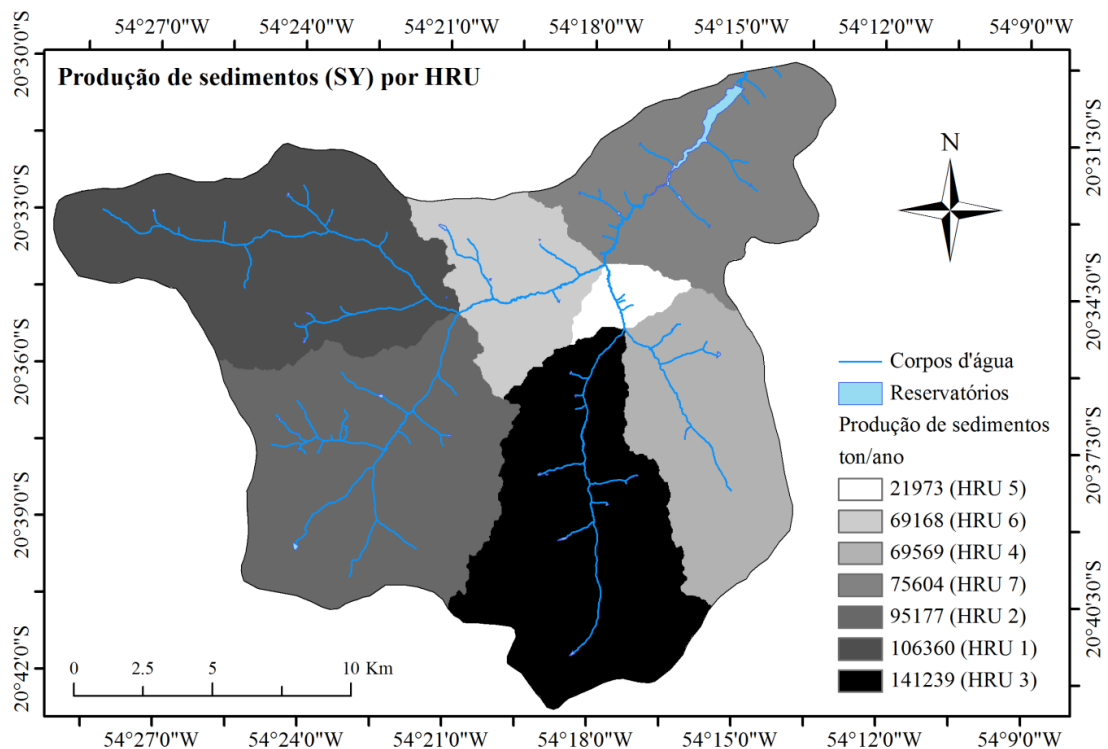


Figura 4. Produção de sedimentos nas HRUs da área de estudo.

4. CONCLUSÕES

A espacialização das perdas de solos e da produção de sedimentos na sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba é de caráter qualitativo e serve como ferramenta de suporte a gestão inovadora dos recursos hídricos, auxiliando no planejamento ambiental, sendo importante fonte de dados em processos de tomada de decisão.

Por fim, em termos quantitativos, o sucesso na estimativa da produção de sedimentos e da perda de solos em bacia hidrográfica depende de ajustes dos modelos com dados de campo utilizando técnicas de análise estatística. Para isso, séries históricas de dados observados são necessárias, e em países como o Brasil, eles são escassos.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZZANO, M. G. P.; ELTZ, L. F.; CASSOL, E. A. Erosividade, coeficiente de chuva, padrões e período de retorno das chuvas de Quaraí, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1205-1217, 2007.

BHATTARAI, R.; DUTTA, D. Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield Using GIS at Catchment Scale. **Water Resources Management**, v. 21, n. 10, p. 1635-1647, 2006. ISSN 0920-4741
1573-1650.

BRASIL. **LEI Nº 9.433, DE 8 DE JANEIRO DE 1997** 1997.

CHAVES, H. M. L. Relações de Aporte de Sedimento e Implicações de sua Utilização no Pagamento por Serviço Ambiental em Bacias Hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, 2010.

CHOU, W.-C. Modelling Watershed Scale Soil Loss Prediction and Sediment Yield Estimation. **Water Resources Management**, v. 24, n. 10, p. 2075-2090, 2009. ISSN 0920-4741
1573-1650.

D.S.G. **Carta Lagoa Rica – Folha SE. 21 -X-B- IV**. Região Centro-Oeste do Brasil: Diretoria do Serviço Geográfico - Ministério do Exército 1979.

EBISEMIJU, F. S. Sediment delivery ratio prediction equations for short catchment slopes in a humid tropical environment. **Journal of Hydrology**, v. 114, p. 191-208, 1990.

I.N.P.E. **Imagem LANDSAT 5 Thematic Mapper (TM), canais 1, 2 ,3 ,4, 5, 6, 7, órbita 224, ponto 74, de 27 junho 2011**. São José dos Campos, SP 2013.

JEBARI, S.; BERNDTSSON, R.; OLSSON, J.; BAHRI, A. Soil erosion estimation based on rainfall disaggregation. **Journal of Hydrology**, v. 436-437, p. 102-110, 2012. ISSN 00221694.

LIM, K. J.; SAGONG, M.; ENGEL, B. A.; TANG, Z.; CHOI, J.; KIM, K.-S. GIS-based sediment assessment tool. **Catena**, v. 64, n. 1, p. 61-80, 2005. ISSN 03418162.

LIN, C. Y.; LIN, W. T.; CHOU, W. C. Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan experience. **Soil and Tillage Research**, v. 68, p. 143-152, 2002.

LU, H.; MORAN, C. J.; PROSSER, I. P. Modelling sediment delivery ratio over the Murray Darling Basin. **Environmental Modeling & Software**, v. 21, p. 1297-1308, 2006.

MCCOOL, D. K.; BROWN, L. C.; MUTCHLER, C. K.; MEYER, L.; D.S.G. Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. **Transactions of the ASABE**, v. 32, 1989.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S.; NORTON, L. D. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, v. 202-203, p. 88-102, 2013. ISSN 00167061.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E.; NEARING, M. A. Rainfall erosivity in Brazil: A review. **Catena**, v. 100, p. 139-147, 2013. ISSN 03418162.

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). **USDA Agriculture Handbook**, p. 251 pp., 1997.

RICKER, M. C.; ODHIAMBO, B. K.; CHURCH, J. M. Spatial analysis of soil erosion and sediment fluxes: a paired watershed study of two Rappahannock River tributaries, Stafford County, Virginia. **Environ Manage**, v. 41, n. 5, p. 766-78, May 2008. ISSN 0364-152X (Print) 0364-152X (Linking). Disponível em: < <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18320265> >.

SHARPLEY, A. N.; WILLIAMS, J. R. EPIC - Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. **U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin**, v. 1768, p. 235 pp., 1990.

SHI, Z. H.; AI, L.; FANG, N. F.; ZHU, H. D. Modeling the impacts of integrated small watershed management on soil erosion and sediment delivery: A case study in the Three Gorges Area, China. **Journal of Hydrology**, v. 438-439, p. 12, 2012.

SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub-catchments: a case study of Tapacurá catchment. **Natural Hazards**, v. 62, p. 17, 2012.

VIGIAK, O.; BORSELLI, L.; NEWHAM, L. T. H.; MCINNES, J.; ROBERTS, A. M. Comparison of conceptual landscape metrics to define hillslope-scale sediment delivery ratio. **Geomorphology**, v. 138, p. 74-88, 2012.

WALLING, D. E. The Sediment Delivery Problem. **Journal of Hydrology**, v. 65, 1983.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. **USDA Agriculture Handbook**, v. 537, p. 58, 1978.

XU, L.; XU, X.; MENG, X. Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with Information Diffusion Model: A case study of Bohai Rim, China. **Catena**, v. 100, p. 74-82, 2013. ISSN 03418162.

ZHANG, H.; YANG, Q.; LI, R.; LIU, Q.; MOORE, D.; HE, P.; RITSEMA, C. J.; GEISSEN, V. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. **Computers & Geosciences**, v. 52, p. 177-188, 2013. ISSN 00983004.

ZHOU, W.; WU, B. Assessment of soil erosion and sediment delivery ratio using remote sensing and GIS: a case study of upstream Chaobaihe River catchment, north China. **International Journal of Sediment Research**, v. 23, 2008.

CONCLUSÕES GERAIS

A sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba possui sete unidades de resposta hidrológicas (HRUs) de no mínimo 3ª ordem. Suas características físicas mostram que cursos d'água de 1ª e 2ª ordem dominam a bacia, sendo o sistema de drenagem dendrítico e pouco desenvolvido. Além disso, não há dependência linear entre as características físicas da bacia hidrográfica e a paisagem (geologia e geomorfologia). Entretanto, há dependência linear forte entre a pedologia da bacia hidrográfica e algumas de suas características físicas (área, perímetro, elevação, densidade de drenagem e extensão média do escoamento superficial).

A sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba possui solo predominantemente arenoso (RQo), com algumas ocorrências de solos franco-arenoso (RQg) e argiloso (LVd). Assim, é possível estimar a erodibilidade dos solos indiretamente através de métodos que utilizam características de textura e matéria orgânica como dados de entrada, sendo a equação proposta por Sharpley e Williams (1990) a mais adequada para estimar indiretamente o fator K na área de estudo, pois respeita a condição de que os solos RQo e RQg estão mais sujeitos a sofrer processos erosivos do que os solos LVd, sendo coerente com as condições da área de estudo.

A estimativa do fator uso e manejo do solo (C) em pastagem a partir da relação entre este e o NDVI é possível por meio de modelos matemáticos, sendo a chuva simulada alternativa para observação das perdas de solo com e sem cobertura na determinação do fator C, viabilizando, através de ajustes estatísticos, a avaliação da aplicabilidade destes modelos em diferentes condições ambientais.

Este estudo aplica método simples para a extração da distribuição espacial do SDR em conjunto com a RUSLE para estimativas de perda de solo e produção de sedimentos na escala de bacia hidrográfica. Em termos quantitativos, a precisão destes cálculos depende de ajustes dos modelos com dados de campo utilizando técnicas de análise estatística. Para isso, dados observados por longos períodos de tempo são necessários, pois geralmente eles são escassos, o que evidencia a necessidade de estudos experimentais em futuras pesquisas. Logo, a espacialização da perda de solos e da produção de sedimentos na sub-bacia hidrográfica do Córrego Guariroba é de caráter qualitativo e classifica o espaço de acordo com a contribuição no aporte de sedimentos da bacia.