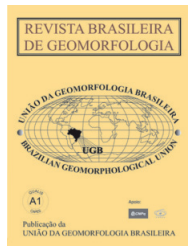


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 16, n° 3 (2015)



USO DE ATRIBUTOS TOPOGRÁFICOS PARA PREDIÇÃO DE ÁREAS PROPENSAS A PERDA E A DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DO PLANALTO DO RIO GRANDE DO SUL

USE OF TOPOGRAPHIC ATTRIBUTES TO PREDICT AREAS PRONE TO LOSS AND DEPOSITION OF SEDIMENT IN A WATERSHED OF THE RIO GRANDE DO SUL PLATEAU

Viviane Capoane

*Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, n° 1000, Santa Maria, Rio Grande do Sul, CEP: 97105-900, Brasil
Email: capoane@gmail.com*

Leonardo José Cordeiro Santos

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná
Av. Cel Francisco H dos Santos, Curitiba, Paraná, CEP: 81531-980, Brasil
Email: santos.ufpr@gmail.com*

Danilo Rheinheimer do Santos

*Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, n° 1000, Santa Maria, Rio Grande do Sul, CEP: 97105-900, Brasil
Email: danilonesaf@gmail.com*

Tales Tiecher

*Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
Av. Assis Brasil, 709, Frederico Westphalen, Rio Grande do Sul, CEP: 98400-000, Brasil
Email: tales.t@hotmail.com*

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
16/04/2015
Data de Aprovação:
19/06/2015

Palavras-chave:

Relevo; Escala; Atributos do Solo.

Keywords:

Relief; Scale; Soil Attributes.

Resumo:

O papel do relevo em relação à distribuição espacial de sedimentos é de grande interesse em termos de gestão da paisagem. Neste trabalho foram extraídos atributos topográficos de modelos digitais de elevação (MDEs) gerados com dados de uma carta topográfica (CT) na escala 1:50.000 e, de um levantamento planialtimétrico utilizando um receptor GPS/GNSS Real Time Kinematic (RTK). Posteriormente, a base de dados que melhor representou as feições do terreno foi utilizada na tabulação cruzada de mapas para a predição dos locais propensos a perda e a deposição de sedimento em uma bacia hidrográfica do planalto do Rio Grande do Sul. A qualidade do mapa gerado foi testada utilizando atributos químicos do solo de amostras coletadas em 57 pontos da bacia hidrográfica. A utilização de atributos topográficos derivados do modelo digital-CT mostrou-se inadequada para avaliar áreas propensas a perda e deposição de sedimentos, pois

a imagem matricial não descreveu os divisores da bacia hidrográfica, talwegues, elementos côncavos e convexos e os caminhos de fluxo. A utilização de atributos topográficos derivados do modelo digital-RTK discretizou satisfatoriamente às áreas propensas à perda e a deposição de sedimento por álgebra de mapas, apresentando correlação estatisticamente significativa com os atributos químicos do solo.

Abstract:

The role of relief regarding the spatial distribution of sediments is of great interest in terms of landscape management. In this study, topographic attributes were extracted from digital elevation models (DEMs) generated with data from the topographic map (TM) at the 1:50.000 scale and from the planialtimetric survey using GPS/GNSS receiver Real Time Kinematic (RTK). Later, the database that best represented the terrain features was used in the cross-tabulation of maps for the prediction of the most likely spots liable to loss and deposition of sediment in a agricultural watershed from Rio Grande do Sul plateau. The quality of the generated map was tested using soil chemical properties of 57 soil samples collected over the watershed area. The use of derivatives topographic attributes of digital model-TM proved inadequate to assess areas prone to loss and deposition of sediments because the matrix image did not describe the divisors of the watershed, thalwegs, concave and convex elements, and the flow paths. The use of derivatives topographic attributes of digital model-RTK discriminate satisfactorily the areas prone to loss and deposition of sediment by map algebra, showing statistically significant correlation with soil chemical attributes.

Introdução

O aumento das atividades antrópicas tem desencadeado e acelerado os processos de erosão do solo em todo o mundo. No caso da agricultura a situação é bastante crítica, pois o mau uso acelera o processo erosivo afetando negativamente a qualidade e produtividade do solo, reduzindo a infiltração, capacidade de retenção de água, nutrientes, matéria orgânica, biota do solo e profundidade do solo (EL-SWAIFY *et al.*, 1985; TROEH *et al.*, 1991), além de impactos na qualidade da água (CARPENTER *et al.*, 1998; SHARPLEY *et al.*, 2003; SEITZINGER *et al.*, 2010) e, aceleração da sedimentação natural de rios, lagos e reservatórios (WETZEL, 2001; PANDEY *et al.*, 2007).

Estudos sobre os impactos da erosão do solo são antigos e reconhecidos há várias décadas. No entanto, acredita-se que as avaliações das perdas de sedimento e nutrientes resultantes da erosão são tendenciosas, pois a maioria dos estudos realizados refere-se a manipulações experimentais em parcelas (SIX *et al.*, 2002). Nesses estudos, as perdas de sedimento e nutrientes por erosão hídrica são dominantes (STEEGEN e GOVERS, 2001), porém, na escala de paisagem, tanto erosão quanto deposição ocorrem e, a maioria dos nutrientes apenas são translocados dentro de bacias hidrográficas, logo, não são perdidos (BEUSELINCK *et al.*, 2000). Assim,

conforme Van Oost *et al.* (2002), a omissão da escala de paisagem em estudos de erosão limita severamente todas as tentativas de estimativa das perdas líquidas de solo e nutrientes. Como agravante, quando são feitas estimativas de perda de solo em bacias hidrográficas, as informações de relevo normalmente utilizadas são de baixa resolução espacial, o que compromete ainda mais a precisão dos resultados.

Nos últimos anos, com a crescente disponibilidade de modelos digitais de elevação (MDEs) e o advento de ferramentas de análise computadorizada do terreno como os sistemas de informações geográficas (SIGs), houve um grande avanço no desenvolvimento de pesquisas ligadas às ciências ambientais como a agricultura, hidrologia, biologia, geografia e engenharias, as quais utilizam variáveis dependentes da topografia (RUHOFF *et al.*, 2011) e, cada vez mais, atributos topográficos primários e secundários derivados de MDEs têm sido utilizados (MOORE *et al.*, 1991; GRUBER e PECKHAM, 2008). No entanto, diferentemente de alguns países, não existe no Brasil um órgão responsável pela elaboração e normatização dos procedimentos utilizados na criação de MDEs os quais, normalmente, são produzidos pelos próprios usuários e pouca atenção é dada às suas limitações como fonte de informação espacial (CHAGAS *et al.*, 2009).

A fonte de dados altimétricos mais comumente

utilizada no Brasil são curvas de nível, pontos cotados e, de forma complementar, a rede hidrográfica, obtidas em cartas topográficas (CTs), principalmente aquelas elaboradas pela Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) do Exército na década de 70. No caso do Rio Grande do Sul, cartas topográficas na escala 1:50.000 cobrem todo o Estado e podem ser facilmente adquiridas, já escalas de maior detalhe restringem-se a pequenas áreas, como as de interesse militar e centros urbanos. Por isso, os dados altimétricos mais utilizados para geração de MDEs e extração de atributos topográficos ainda são os de cartas topográficas na escala 1:50.000 e, mais recentemente *Shuttle Radar Topography Mission-SRTM* (90 m) e *TOPODATA* (30 m). Porém, esta resolução espacial não é adequada para estudos mais detalhados, como a análise da erosão do solo e perda de sedimentos, pois não serão capazes de discretizar as formas de relevo que influenciam o escoamento da água em diferentes trajetórias sobre o terreno, que são fundamentais para o entendimento e quantificação da erosão hídrica.

Visando a obtenção de resoluções mais finas, uma prática comum utilizada por pesquisadores é a interpolação a partir de MDEs grosseiros, todavia, isto tem sido criticado por diversos autores como Zhang e Montgomery (1994), Desmet Govers (1997) e Van Remortel *et al.* (2001). Conforme estes autores, quando MDEs de baixa resolução espacial forem utilizados para calcular perdas de solo, por exemplo, em modelos hidrológicos distribuídos, os erros podem se propagar através do modelo comprometendo a precisão das simulações com subestimação ou superestimação das taxas de erosão do solo e produção de sedimentos.

Neste trabalho foram utilizados dados altimétricos oriundos de duas fontes para a geração de modelos digitais de elevação: carta topográfica na escala 1:50.000 (baixa resolução espacial), que é a base de dados gratuita de maior detalhe mais facilmente obtida no RS e, de um levantamento planialtimétrico utilizando um receptor GPS/GNSS *Real Time Kinematic* (RTK) (alta resolução espacial). O objetivo foi avaliar qual base de dados melhor representa as feições do terreno e que pode ser utilizada na tabulação cruzada de mapas para a predição dos locais mais propensos a perda e a deposição de sedimento, conseqüentemente nutrientes, em uma bacia hidrográfica agrícola do planalto do Rio Grande do Sul. Também, foi avaliada a qualidade do

mapa gerado por álgebra de mapas utilizando atributos químicos do solo da bacia hidrográfica.

Material e Métodos

Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo do presente trabalho está inserida em um assentamento de reforma agrária localizado na região central do Estado do Rio Grande do Sul (RS), no Município de Júlio de Castilhos, possuindo 80,2 ha (Figura 1). A bacia hidrográfica foi selecionada para o estudo, pois a mesma é representativa das feições de relevo da Formação Tupanciretã, que abrange parte do planalto do Rio Grande do Sul e que apresenta sérios problemas de erosão do solo.

A geologia da área é composta pela Formação Tupanciretã, um conjunto litológico bastante heterogêneo em que predominam conglomerados, arenitos e intercalações de delgadas camadas de argila. São via de regra, de cor avermelhada, às vezes amarelo esverdeados, com granulação variável, de fina a média, mal classificados, eventualmente conglomeráticos e constituídos essencialmente de quartzo e, subordinadamente feldspato alterado a caulinita (MENEGOTTO *et al.*, 1968). Esta Formação ocorre nas partes mais elevadas da topografia, compondo elevações em estágio adiantado de dissecação. Sua espessura média é de 60 m atingindo no máximo, cerca de 80 m e sua origem é continental fluvial, pertencente ao terciário inferior (IBGE, 1986), estando estratigraficamente acima da Formação Serra Geral. Na área estudada, observa-se uma tendência de formação de voçorocas, especialmente devido às práticas agrícolas que não levam em conta a fragilidade dos solos e processos de *piping* são frequentes (CAPOANE e RHEINHEIMER, 2012).

As características do relevo em si estão grandemente relacionadas à litologia do local, de modo geral, constituído por colina suave ondulada, bem arredondada, regionalmente conhecida por coxilhas. A área de estudo está inserida na Região Geomorfológica Planalto das Missões, sobre a Unidade Geomorfológica do Planalto de Santo Ângelo (IBGE, 1986). A classe de solo predominante na área estudada é Argissolo Vermelho localizado no topo de coxilhas, Argissolo Bruno no terço médio e inferior das encostas e Gleissolo Háptico nas baixadas e, a textura do solo é franco-argilo-arenosa (ALVAREZ, 2014).

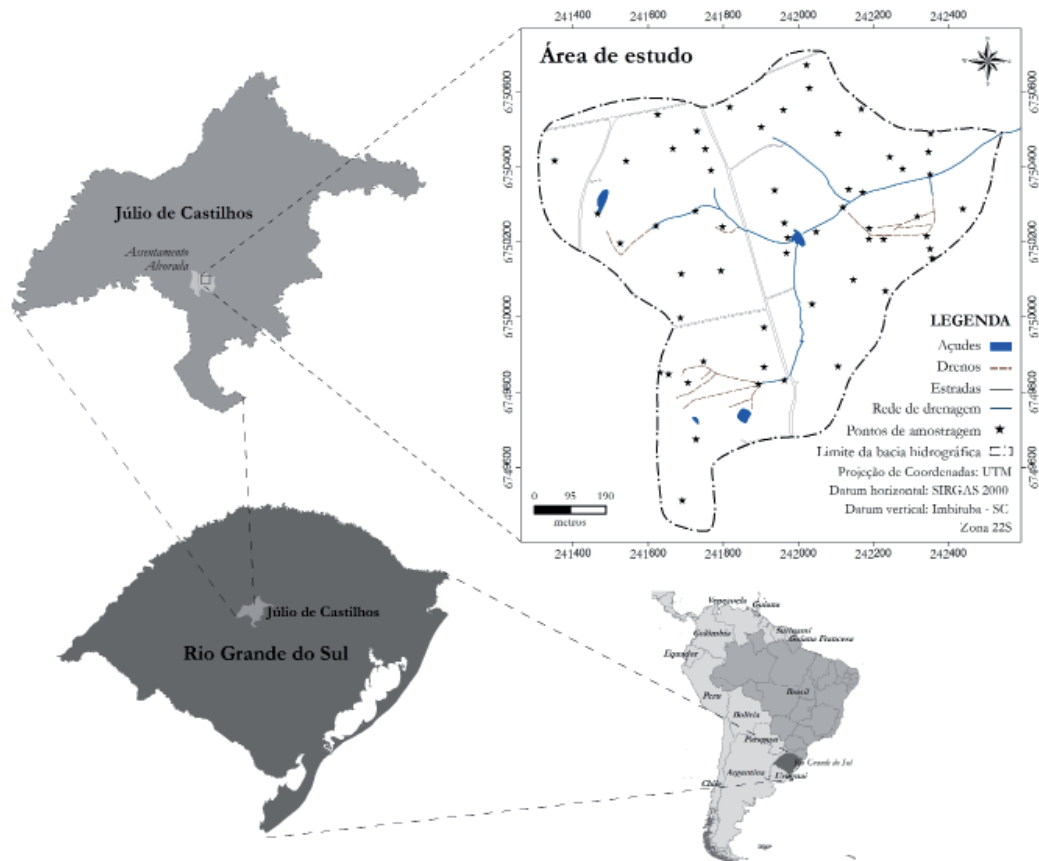


Figura 1 – Mapa com a localização da área estudada e dos pontos de amostragem de solo.

O clima da região é o subtropical medianamente úmido com variação longitudinal das temperaturas médias e a temperatura média anual varia entre 17–20°C. A temperatura média do mês mais frio oscila entre 11–14°C e a temperatura média do mês mais quente varia entre 23–26°C e a precipitação fica entre 1500–1700mm ao ano em 90–110 dias de chuva (ROSSATO, 2011).

Geração dos Modelos Digitais de Elevação e Extração dos Atributos Topográficos Primários e Secundários

O relevo exerce influência significativa nos processos hidrológicos e hidrossedimentológicos superficiais e sub-superficiais, logo, pode ser utilizado para avaliar locais propensos a perda e a deposição de material, conseqüentemente, a distribuição espacial de sedimento e nutrientes em bacias hidrográficas agrícolas. Nesse trabalho foram utilizados modelos digitais do terreno e elevação (MDT, MDE) gerados a partir de duas fontes de dados: carta topográfica da Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (1976) na escala 1:50.000, Folha Val de Serra - SH.22.V.C.I-4, que é a

base de dados gratuita mais facilmente obtida e, pontos cotados obtidos a partir de um levantamento planialtimétrico utilizando um receptor GPS/GNSS *Real Time Kinematic* (RTK) base e rover no ano de 2012.

A partir da altimetria vetorial (curvas de nível com equidistância de 20 m), pontos cotados e, rede de drenagem, obtidas da carta topográfica na escala 1:50.000, foi gerado o MDT. A resolução de pixel escolhida foi 20 m, considerando-se a máxima precisão possível para essa escala (2 décimos de milímetro no mapa) (Figura 2a).

Para a geração do MDE com dados do levantamento planialtimétrico foram utilizados pontos cotados e a resolução de pixel escolhida foi 5 metros (Figura 2b). A escolha desta resolução espacial baseou-se nos trabalhos desenvolvidos por Hancock *et al.* (2002) que consideraram um MDE de 10 m de resolução de pixel de boa qualidade para avaliações geomorfológicas em escala de bacia hidrográfica e, Hancock *et al.* (2007), onde os autores compararam atributos do terreno com atributos químicos do solo e chegaram a conclusão que MDEs de alta resolução espacial (5 m) podem ser

utilizados para avaliações biogeoquímicas, como a estimativa dos teores de carbono e nitrogênio no solo.

No levantamento topográfico com GPS/GNSS operando no modo RTK foram obtidos 4.039 pontos cotados com distribuição irregular (densidade de 50 pontos/hectare). O caminhamento foi feito ao longo das principais feições topográficas e, os lugares que apresentaram relevo mais acidentado como taludes de estradas, taipa de açudes e borda de lavouras, o adensamento dos pontos foi maior a fim de representar corretamente a morfologia do terreno. Nas áreas planas e nos locais em que não se verificou modificações drásticas na morfologia do terreno, o adensamento de pontos fez-se desnecessário. Nos interflúvios a retirada dos pontos

foi além dos mesmos, para que houvesse informação suficiente para delimitar os divisores de água da bacia hidrográfica. O modelo de receptor utilizado no trabalho foi *HiperLite* da Topcon, o qual rastreia observações GPS nas duas frequências (L1 e L2).

O software utilizado para a interpolação dos dados e geração do MDT e MDE foi o ArcGIS 10 utilizando o módulo *Spatial Analyst Tools* → *Interpolation* → *Topo to Raster*, que resulta em melhor consistência hidrológica (HUTCHINSON, 1989). Não foi utilizada a extensão *fill* para preenchimento das depressões, pois isso resultaria em erros, uma vez que a microtopografia estaria sendo desconsiderada. A partir dos modelos gerados foram extraídos os atributos topográficos primários e secundários.

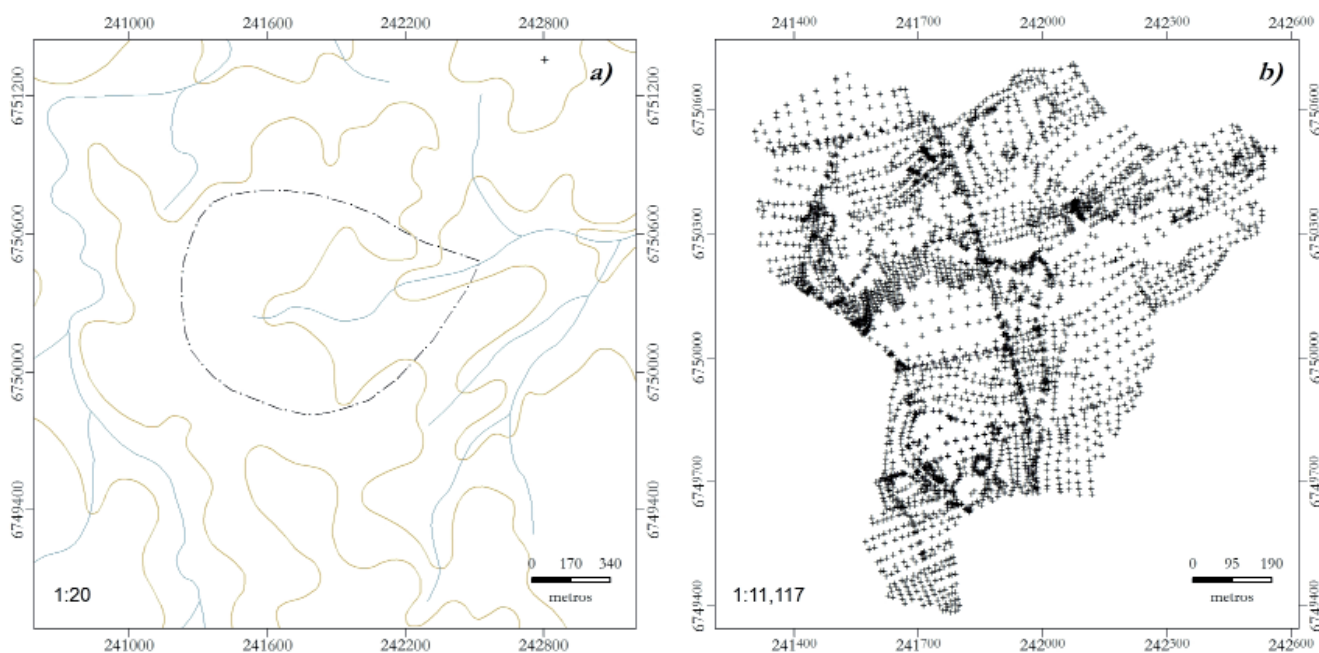


Figura 2 – (a) Informações retiradas da carta topográfica (curvas de nível, rede de drenagem e pontos cotados) e, (b) levantamento planialtimétrico com RTK (pontos cotados), utilizadas para a geração dos modelos digitais de elevação.

Álgebra de Mapas

Os atributos topográficos selecionados na etapa de álgebra de mapas para a predição dos locais mais propensos a perda e a deposição de sedimento foram: declividade (β), curvatura, índices topográficos de umidade (ITU) e capacidade de transporte de sedimento (ITCTS).

O atributo primário declividade pode ser definido como um plano tangente à superfície, expresso como a mudança de elevação sobre certa distância, representada no formato digital na resolução de uma grade regular

(BURROUGH, 1986). Ele influencia diretamente na velocidade do fluxo de água superficial e sub-superficial, logo, influencia no teor da água do solo e no potencial dos processos erosivos e deposicionais (GALLANT e WILSON, 2000).

O plano de curvatura é referente à forma da vertente em plano, podendo ser convergente, divergente ou planar. Tem influência na acumulação da umidade e do fluxo da água superficial e sub-superficial do terreno e, através dele é possível medir a propensão da água convergir ou divergir à medida que atravessa o terreno

(GALLANT e WILSON, 2000). O perfil de curvatura refere-se à forma da vertente, analisada em perfil, podendo ser convexa, côncava ou retilínea (SIRTOLI, 2008). Tem importância na aceleração ou desaceleração do fluxo de água em uma encosta, logo, tem influência direta nos processos denudacionais e agradacionais (ZEVENBERGEN e THORNE, 1987).

O índice topográfico de umidade ($\ln(A_s/\tan\beta)$) é uma medida relativa da disponibilidade em longo prazo da umidade do solo em um determinado local na paisagem (BEVEN e KIRKBY, 1979). Em bacias hidrográficas, áreas saturadas ou quase saturadas estão associadas às regiões de linha de fluxo convergente e baixas declividades (DUNNE *et al.*, 1975; BEVEN, 1978; ANDERSON e KNEALE, 1980; O'LOUGHLIN, 1981).

O índice topográfico de capacidade de transporte de sedimentos ($((A_s/22,13)^m (\sin\beta/0,0896)^n)$) reflete o efeito da topografia na erosão do solo. Este índice é baseado no fator topográfico (LS) da *Universal Soil Loss Equation* (USLE). No fator LS há uma interação da declividade e comprimento de rampa que aumenta a influência destes sobre as perdas de solo. O comprimento do declive (L) é genericamente definido como a distância do ponto de origem do fluxo superficial até o ponto onde cada gradiente de declive (S) diminui o suficiente para o início da deposição ou, o fluxo passa a se concentrar num canal definido (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

Os mapas de declividade e curvatura foram gerados no *software* ArcGIS 10 e os índices topográficos de umidade e capacidade de transporte de sedimento no *software* SAGA GIS 2.0.8. A migração do *software* ArcGIS para o SAGA GIS deu-se, pois o ArcGIS considera o fluxo unidimensional, utilizando um único algoritmo de distribuição fluxo o *Deterministic 8* (D8) (O'CALLAGHAN e MARK, 1984), já o *software* SAGA GIS é muito mais evoluído neste aspecto, pois considera o fluxo bidimensional, apresentando inúmeras opções de algoritmos de distribuição de fluxo. O módulo utilizado para a geração do ITU e ITCTS foi o *Terrain Analysis – Compound Analyses* (SAGA GIS, 2013). A partir dos mapas gerados no ArcGIS e no SAGA GIS foi efetuada a tabulação cruzada de mapas para a predição das áreas mais propensas a perda e a deposição de sedimento, consequentemente nutrientes adsorvidos a ele.

O método de tabulação cruzada consiste na in-

tegração das variáveis por superposição de mapas ou álgebra de mapas, constituindo na sobreposição das classes dos atributos topográficos na forma de matrizes, nas quais são executadas operações de cálculo dentro de um ambiente do SIG (TOMLIN, 1983). Este método considera pesos atribuídos (SILVEIRA, 2010), no caso, atributos topográficos primários e secundários. A discretização em classes é necessária para que a partir dessas classes seja realizada a sobreposição das variáveis.

A declividade foi separada em classes de acordo com os critérios da Embrapa (2006) cujas classes são: 0 a 3% relevo plano, entre 3 a 8% relevo suave ondulado, 8 a 20% ondulado, 20 a 45% relevo forte ondulado, entre 45 a 75% relevo montanhoso e > 75% relevo escarpado. Na área de estudo ocorreram às quatro primeiras classes.

Para o atributo ITCTS foram feitos testes com número de intervalos variáveis, analisando-se sempre os histogramas de acordo com a distribuição dos pixels, bem como sempre foi observado às respostas das divisões das classes em relação as curvas de nível extraídas do modelo, a fim de que se pudesse chegar a uma representação confiável para a área estudada, considerando o potencial de atuação da erosão hídrica. O ITCTS foi dividido em quatro classes sendo elas: 0; 0-3; 3-15 e; >15.

O ITU foi discretizado em quatro intervalos, cujas classes são: <5; 5-8; 8-10; >10. O critério adotado para a separação das classes foi a utilização de uma imagem pancromática do satélite *Quick Bird* de 60 cm de resolução de pixel onde era possível visualizar as áreas úmidas e, o conhecimento da área pelos trabalhos de campo. Dessa forma foi possível fazer testes com diferentes intervalos até se chegar a valores próximos à realidade de campo.

Para a discretização do perfil de curvatura foram utilizados valores superiores a 0,05, para representar segmentos côncavos de vertentes, inferior a -0,05 para convexos e entre -0,05 a 0,05 segmentos retilíneos. Para o plano de curvatura repetiu-se o procedimento do atributo perfil de curvatura. Os intervalos entre as classes foram atribuídos de modo semelhante aos critérios adotados por Valeriano e Carvalho Júnior (2003) e Silveira (2010). Para a tabulação cruzada foi utilizado somente o mapa com as vertentes côncavas convergentes.

A etapa de integração de atributos topográficos foi realizado no *software* ArcGIS 10 com o módulo *Spatial Analyst Tools* → *Map Algebra* → *Raster Calculator*

(ESRI, 2011). As combinações realizadas visaram à representação das unidades da paisagem mais propensas a perda e à deposição de sedimento.

Amostragem de Solo na Bacia Hidrográfica

Amostras de solo foram coletadas em ambientes propensos a perda (predomínio de processos denudacionais) e a deposição de sedimento (predomínio de processos agradacionais), partindo do pressuposto de que em ambiente propenso a perda, a concentração de elementos químicos será menor e, em ambientes propensos a deposição, a concentração de elementos químicos será maior servindo como dreno de nutrientes/poluentes. As coletas foram realizadas nos meses de julho e agosto de 2013 em 57 pontos de amostragem (Figura 1). Em cada ponto foram coletadas amostras de solo em cinco profundidades 0–5, 5–10, 10–20, 20–40, 40–60 cm, perfazendo um total de 285 amostras de solo (57x5). Após a coleta, as amostras foram colocadas em sacos plásticos, acondicionadas em caixas e transportadas até o laboratório, onde foram secas em estufa de circulação forçada de ar à $\pm 50^{\circ}\text{C}$, peneiradas em malha de 2 mm (fração terra fina) e, armazenadas em potes plásticos até o momento das análises físicas e químicas.

Análises Físicas e Químicas das Amostras de Solo

Nas amostras de solo coletadas nos 57 pontos e nas diferentes profundidades, foram avaliados os parâmetros: fósforo orgânico total (P_{OT}), fósforo disponível (P_D), carbono orgânico total (C_{OT}), estoque de carbono e densidade do solo.

Os teores de P_{OT} foram determinados pelo método de ignição do solo a 550°C , com posterior extração com ácido sulfúrico ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$), sendo a quantidade de P orgânico obtido pela diferença entre o P extraído da amostra ignificada e a não ignificada (OLSEN e SOMMERS, 1982). O P_D foi extraído conforme o método descrito por Tedesco *et al.* (1995), utilizando resina de troca aniônica. O fósforo dos extratos foi quantificado pela metodologia de Murphy e Riley (1962) utilizando um espectrofotocolorímetro UV-visível.

O teor de C_{OT} foi estimado pelo método de oxidação úmida com dicromato de potássio e ácido sulfúrico (WALKLEY e BLACK, 1934, modificado por RHEINHEIMER *et al.*, 2008). O estoque de carbono no solo foi calculado conforme metodologia proposta por

Fernandes e Fernandes (2008), para solos sob diferentes condições de manejo, corrigindo os estoques de carbono para uma mesma massa de solo.

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico conforme Embrapa (1997), o qual se fundamenta no uso de um anel de bordas cortantes com capacidade interna conhecida.

Análise dos Dados

Os pontos de amostragem de solo foram separados de acordo com as classes de propensão a perda e a deposição de sedimento gerada por álgebra de mapas e, as médias das concentrações de P_{OT} , P_D , C_{OT} e estoque de C foram apresentadas de forma gráfica. Também, foi realizada análise de correlação linear entre as concentrações dos atributos químicos do solo com os valores dos atributos do terreno ITU, ITCTS e β .

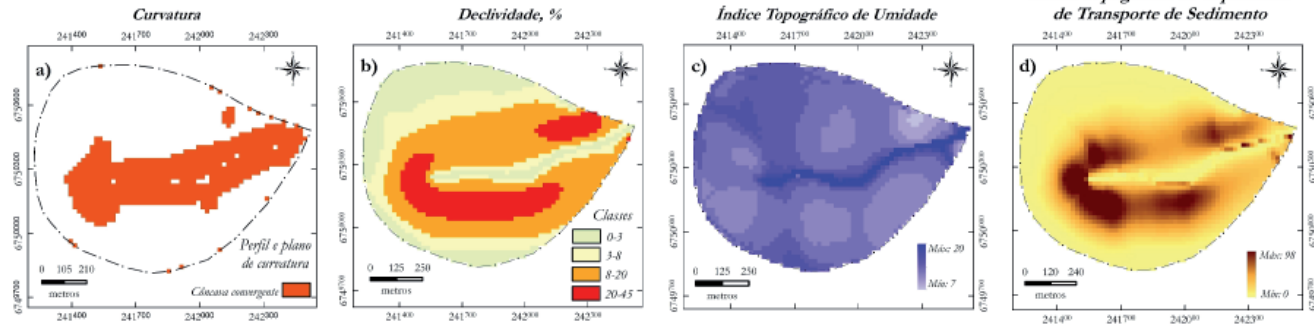
Resultados e Discussões

Os atributos topográficos primários e secundários extraídos do MDT gerado a partir de informações da carta topográfica na escala 1:50.000 não representaram fidedignamente às feições do relevo da bacia hidrográfica estudada, ou seja, os dados altimétricos nessa escala, além de desatualizados, não tem consistência geomorfológica e hidrológica, pois a imagem matricial gerada não descreveu os divisores da bacia hidrográfica, talvez, elementos côncavos e convexos e os caminhos do fluxo (Figura 3a,b,c,d). Logo, essa base de dados não pode ser utilizada para a finalidade que se destina o presente trabalho.

Considerando a falta de consistência geomorfológica e hidrológica, para a etapa de álgebra de mapas optou-se pela base de dados que melhor representou as feições do terreno da bacia hidrográfica, que foi o MDE gerado com dados do levantamento planialtimétrico com GPS/GNSS *Real Time Kinematic* no ano de 2012 (Figura 3e,f,g,h). Os atributos topográficos primários e secundários gerados utilizando as duas fontes de informação – carta topográfica e levantamento planialtimétrico – podem ser visualizados na Figura 3.

A Figura 4 ilustra o resultado da tabulação cruzada entre os mapas de declividade, índice topográfico de umidade, índice topográfico de capacidade de transporte de sedimento e vertentes côncavas convergentes, gerados utilizando o MDE-RTK. A combinação das classes

CARTA TOPOGRÁFICA (1976) - 20 metros



REAL TIME KINEMATIC (RTK) (2012) - 5 metros

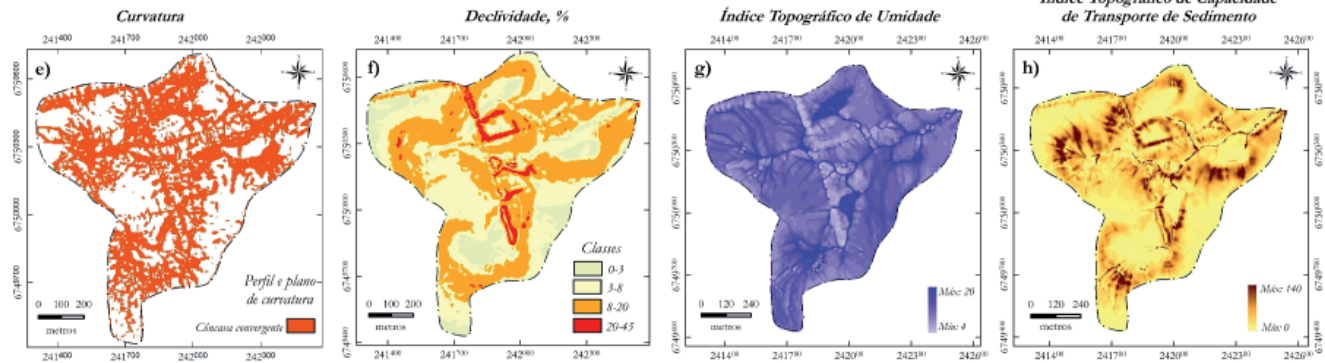


Figura 3 – Atributos topográficos primários e secundários gerados com dados da carta topográfica na escala 1:50.000 (1976) (a, b, c, d) e, levantamento altimétrico com GPS/GNSS Real Time Kinematic (2012) (e, f, g, h).

desses atributos topográficos culminou em ambientes com baixa, média, alta e muito alta energia de transporte de sedimento. A classe baixa corresponde a 10,5% da área da bacia hidrográfica, a classe média 58,0%, alta 28,1% e muito alta 3,4%, respectivamente.

A classe “baixa” combina valores elevados do ITU, ITCTS igual a zero, declividade inferior a 3% e vertentes convergentes. Nesses locais há grande concentração de umidade que se caracterizam pela predominância de processos deposicionais complementado pelo relevo plano. Nas baixadas/fundo de vale, há grande concentração de umidade, típico de solos hidromórficos e semi hidromórficos. Nos interflúvios estão associados à espessura dos solos, grau estrutural e permeabilidade.

A classe “média” combina valores intermediários do ITU e ITCTS, β entre 3 a 8% e presença de vertentes côncavas convergentes. Nesses locais os solos são bem drenados e embora ocorram processos erosivos, ainda não há energia suficiente para o transporte de material a longas distâncias.

A classe “alta” combina valores baixos do ITU, altos do ITCTS e declividade entre 8 e 20%. Nesses

locais há a predominância de processos erosivos e esta relação é linear, conforme também foi demonstrado por McKenzie e Gallant (2007). Estas zonas estão localizadas principalmente na meia encosta e trechos dos canais fluviais.

A classe “muito alta” combina os menores valores do ITU, altos valores do ITCTS e declividade superior a 20%. Esses locais estão presentes em cortes de estradas, canais de drenagem e pontos da bacia onde há focos de erosão acelerada.

As áreas classificadas como de baixa susceptibilidade a perda de sedimento são áreas deposicionais como nas baixadas, onde estão localizadas a maior parte das áreas úmidas e, topo de coxilhas onde a energia de escoamento é menor logo, nesses locais espera-se que os teores de elementos químicos sejam maiores. Nos locais classificados como “alta” e “muita alta”, a susceptibilidade de erosão hídrica é maior, então, espera-se menores concentrações de nutrientes no solo, pois os mesmos podem ser mais rasos e ter menor capacidade de retenção de água e nutrientes.

Nos ambientes aeróbios da classe “baixa” os solos

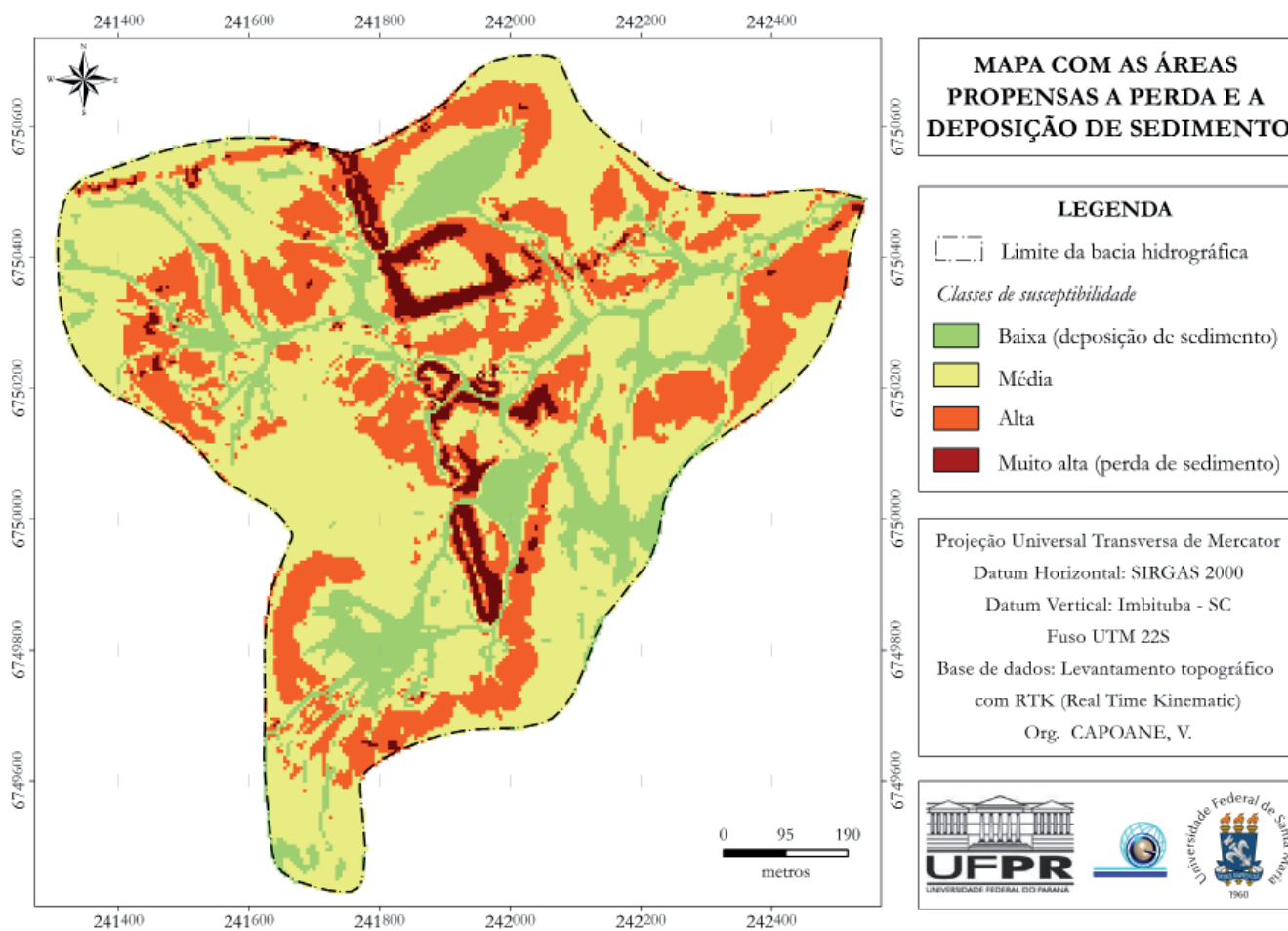


Figura 4 – Mapa com as áreas propensas a perda e a deposição de material gerado por álgebra de mapas a partir de um modelo digital de elevação de alta resolução espacial.

serão mais profundos com a capacidade de apoiar o aumento da biomassa em função da menor energia de escoamento e, nos ambientes anaeróbios são esperadas maiores concentrações de carbono, em função do regime hídrico do solo que diminui a velocidade decomposição da matéria orgânica possibilitando o acúmulo de carbono, bem como de sedimento e nutrientes, pois esses locais estão inseridos na interface entre o ecossistema terrestre e o aquático, servindo de filtros, impedindo que grande parte do material que é erodido das encostas atinja os cursos d'água.

No intuito de testar a qualidade do mapa gerado, bem como a capacidade de MDEs de alta resolução espacial para avaliações biogeoquímicas, os parâmetros químicos avaliados nas amostras de solo dos 57 pontos de amostragem, foram separados de acordo com as classes de propensão a perda e deposição de sedimento gerada por álgebra de mapas. Como pode ser visuali-

zado nas Figuras 5 e 6 (a e b) onde são apresentados os teores de carbono orgânico total, estoque de carbono, fósforo orgânico total e disponível, observa-se que as médias das concentrações obtidas em laboratório relacionaram-se com as classes geradas. Na classe “baixa” foram encontrados os maiores teores de fósforo e carbono. Na classe “média” foram encontrados valores intermediários. Na classe “alta” foram encontrados os menores valores de P e C. Na classe “muita alta”, não foram efetuadas amostragens de solo, uma vez que esses locais encontram-se, na maior parte em estradas.

Embora não tenham sido efetuadas amostragens de solo nas estradas, classe “muito alta”, em trabalho desenvolvido por Tiecher *et al.* (2014) na mesma BH, os autores concluíram que as estradas apresentam alta porcentagem de contribuição na transferência de sedimentos para os cursos d'água durante eventos pluviométricos, tendo contribuição relativa de 42,7 a 69,2 %

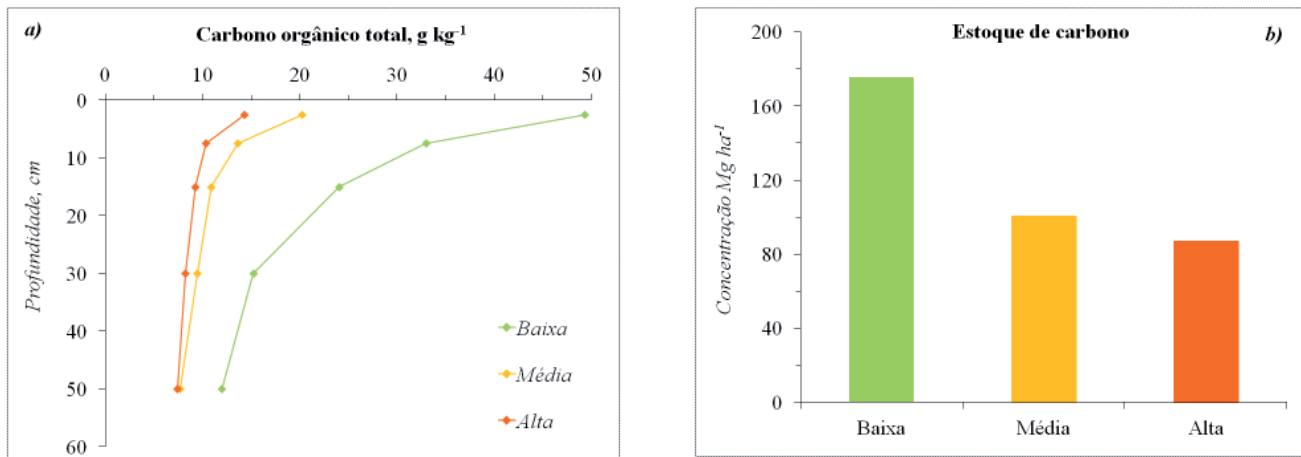


Figura 5 – Média dos teores de carbono orgânico total (a) e estoque de carbono de 0–60 cm (b) dos 57 pontos de amostragem de solo, de acordo com as classes de propensão a perda e deposição de sedimento geradas por álgebra de mapas.

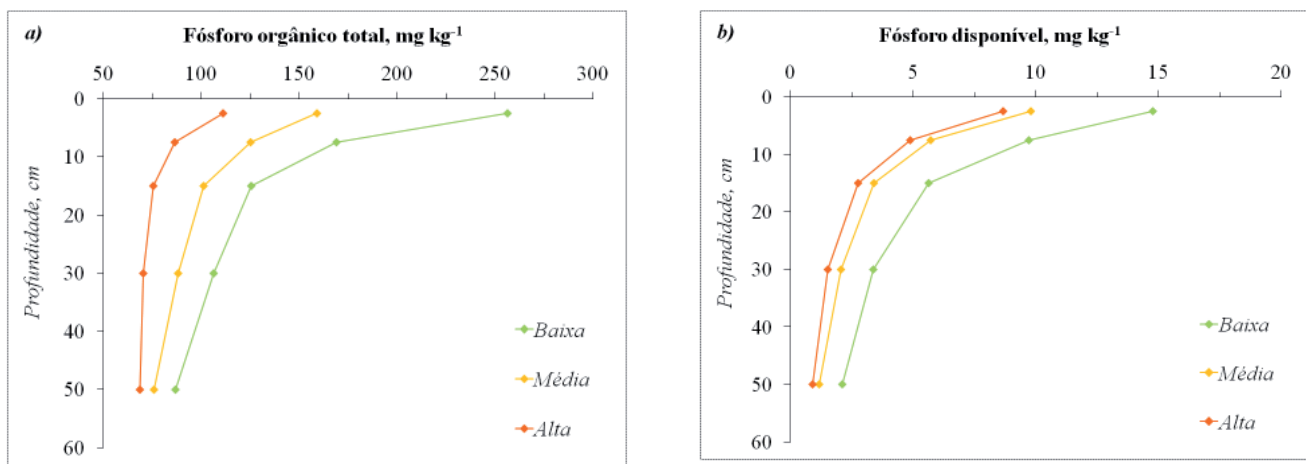


Figura 6 – Média dos teores de fósforo orgânico total (a) e fósforo disponível (b) dos 57 pontos de amostragem de solo, de acordo com as classes de propensão a perda e deposição de sedimento geradas por álgebra de mapas.

para os eventos avaliados.

Além da separação dos pontos de amostragem de solo de acordo com a classe de propensão à perda e deposição de sedimento, os valores dos atributos do solo avaliados nos diferentes pontos de amostragem e profundidades foram submetidos à análise de correlação linear, com os valores dos atributos do terreno índice topográfico de umidade, índice topográfico de capacidade de transporte de sedimentos e declividade.

A análise de correlação linear entre os atributos químicos do solo avaliados nas 285 amostras (57 pontos de amostragem em 5 profundidades) com os atributos do terreno (MDE-RTK) é apresentada na Tabela 1. Percebe-se que todas as variáveis apresentaram resultados estatisticamente significativos e isto demonstra

que o relevo desempenha um papel importante nos ciclos bioquímicos do P e C em bacias hidrográficas e que a utilização de MDEs refinados pode auxiliar na predição não só das áreas mais sensíveis à perda de solo, mas também os locais que podem estar servindo como sumidouros de sedimento e nutrientes associados, contribuindo assim para a gestão ambiental de bacias hidrográficas agrícolas.

O ITU apresentou maior correlação positiva com o C_{OT} estoque de carbono, P_{OT} e P_D o que sugere que a erosão hídrica e a dinâmica da água no perfil na escala de campo desempenham um papel importante na distribuição espacial e vertical desses elementos, principalmente o carbono (Tabela 1). Resultados semelhantes foram encontrados por Kitchen *et al.* (2003)

para a variável carbono orgânico. Zonas com valores mais elevados de ITU são susceptíveis de terem maior produção de biomassa, menor mineralização carbono e maior deposição de sedimentos em comparação com as zonas com baixos valores de ITU (TERRA *et al.*, 2004).

Para o atributo declividade os teores de P e C correlacionaram-se negativamente (Tabela 1). Em áreas sob plantio direto, existe acúmulo de P e C na camada superficial do solo (TIECHER *et al.* 2012a,b). Na presente BH é possível verificar que em áreas declivosas é frequente a erosão laminar do solo, que remove justamente o solo superficial mais rico em P e C. Nas porções mais baixas onde a declividade é menor, existe deposição desse material que resulta em maior teor de P e C. Isso explica relação inversa entre a concentração desses elementos e a declividade. O mesmo foi observado em trabalhos desenvolvidos por

Moore *et al.* (1993); Gessler *et al.* (2000) e Florinsky *et al.* (2002) para a variável carbono orgânico. Ou seja, as concentrações de P e C diminuem à medida que o gradiente de inclinação para o fluxo mais próximo aumenta, isso é atribuído a condições mais secas do solo em encostas mais íngremes, devido à remoção mais rápida pela água, consequentemente, nesses locais os solos serão mais rasos e terão menor capacidade de retenção de água e nutrientes.

Dada a forte influência do relevo na redistribuição de solo na paisagem, a utilização de atributos primários (declividade) e secundários (índices topográficos de capacidade de transporte de sedimento e umidade), derivados de modelos digitais de elevação gerados com dados de alta resolução espacial e posicional, mostraram-se bons preditores do teor de C e P para a bacia hidrográfica estudada.

Tabela 1: Relação entre os atributos do solo com os atributos topográficos secundários: índice topográfico de umidade (ITU), índice topográfico de capacidade de transporte de sedimento (ITCTS) e primário declividade (β), gerados a partir do MDE-RTK.

Parâmetro	Profundidade cm	ITU	ITCTS	β
		r	r	r
Carbono orgânico total (g kg ⁻¹)	0-5	*0,70	** -0,37	* -0,54
	5-10	*0,70	*** -0,34	* -0,52
	10-20	*0,52	-0,25	** -0,44
	20-40	*0,59	*** -0,32	* -0,49
	40-60	***0,31	*** -0,27	** -0,36
Estoque C (Mg ha ⁻¹)	0-60	*0,66	** -0,38	* -0,57
Fósforo orgânico total (mg kg ⁻¹)	0-5	*0,69	** -0,41	* -0,62
	5-10	*0,55	** -0,35	* -0,56
	10-20	**0,40	** -0,35	* -0,49
	20-40	**0,37	*** -0,33	** -0,41
	40-60	0,11	-0,12	-0,14
Fósforo disponível (mg kg ⁻¹)	0-5	***0,31	-0,19	-0,25
	5-10	***0,26	-0,21	-0,23
	10-20	**0,38	-0,24	** -0,40
	20-40	**0,37	*** -0,30	* -0,45
	40-60	***0,29	*** -0,33	** -0,44

significativo a * p<0.001; significativo a ** p<0.01; significativo a *** p<0.05

No que se refere a gestão ambiental da bacia hidrográfica, as zonas classificadas como “baixa”, “alta” e “muito alta” são as que devem ser prioritárias. A classe “baixa” é prioritária devido a presença de áreas

úmidas ribeirinhas, que são bons filtros de poluentes que vem das áreas a montante. Então, recomenda-se para a proteção desses locais a reumidificação das mesmas, restrição do acesso do gado e abandono das áreas que

foram incorporadas na agricultura. Na classe “alta” e “muito alta” a susceptibilidade a erosão hídrica é maior e isso significa não só a perda de solo, mas também de insumos agrícolas quando essas áreas estão inseridas em lavouras. Uma alternativa para a gestão desses locais seria a implantação de terraços e o plantio em nível, já que em muitas propriedades o plantio ainda é feito no sentido do declive. Nas estradas deve ser feita manutenção periódica e, nos canais de drenagem, o acesso do gado deve ser restringido a fim de evitar a aceleração do processo erosivo devido o tráfego de animais que acelera o desbarrancamento das margens.

Conclusões

O papel da geomorfologia em relação à distribuição espacial de fósforo e carbono do solo é de grande interesse em termos de gestão da paisagem e sequestro de sedimento e nutrientes/poluentes. Neste trabalho foi demonstrado que os atributos topográficos extraídos do MDT - carta topográfica são impróprios para avaliar locais propensos a perda e a deposição de material por algebra de mapas, pois informações na base 1:50.000 não são capazes de detalhar a topografia de encostas, ou seja, há generalização das formas de relevo, consequentemente, são impróprios também para o entendimento de como os ciclos bioquímicos do fósforo e carbono atuam na paisagem.

A utilização de atributos topográficos derivados de um modelo digital de elevação refinado (MDE - RTK) e atualizado (2012), discretizou satisfatoriamente às áreas propensas à perda e a deposição de material por álgebra de mapas, o que foi demonstrado pela análise de correlação entre os valores dos atributos químicos do solo avaliados nas 285 amostras de solo da BH com os valores dos atributos do terreno, que apresentaram resultados estatisticamente significativos. Estes resultados comprovam que MDEs refinados (alta resolução espacial) podem ser utilizados para estimativas das concentrações de P e C no solo, o que é um grande avanço considerando que a amostragem intensiva de solo para a quantificação de atributos químicos é demorada e cara. Também, para a definição das áreas prioritárias para a gestão ambiental de bacias hidrográficas agrícolas.

Com relação aos atributos topográficos selecionados para a tabulação cruzada de mapas, a declividade e a curvatura poderiam não ter sido utilizados sem com isso comprometer o resultado final, pois esses dois atributos

já são considerados no cálculo do índice topográfico de umidade e índice topográfico de capacidade de transporte de sedimento.

Referências Bibliográficas

ALVAREZ, J. W. R. **Transferência de fósforo em pequenas bacias hidrográficas com predomínio de sistema plantio direto precário**. 2014. 198 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

ANDERSON, M. G.; KNEALE, P. E. Topography and hill slope soil water relationships in a catchment of low relief. **Journal of Hydrology**, v.47, p.115–128, 1980.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v.24, p.43–69, 1979.

BEVEN, K. J. The hydrological response of headwater and side slope areas. **Hydrological Sciences Bulletin**, v.23, p.419–437, 1978.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. 2 ed. New York: Oxford University Press, 2005. 356 p.

BEUSELINCK, L.; STEEGEN, A.; GOVERS, G.; NACHTERGAELE, J.; TAKKEN, I.; POESEN, J. Characteristics of sediment deposits formed by major rainfall events in small agricultural catchments in the Belgian Loam Belt. **Geomorphology**, v.32, p.69–82, 2000.

CAPOANE, V.; RHEINHEIMER, D. S. Análise qualitativa do uso e ocupação da terra no assentamento Alvorada, Júlio de Castilhos – Rio Grande do Sul. **Revista NERA**, v.15, n.20, p.193–205, 2012.

CARPENTER, S. R.; CARACO, N. F.; CORRELL, D. L.; HOWARTH, R. W.; SHARPLEY, A. N.; SMITH, V. H. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. **Ecological Applications**, v.8, n.3, p.559–568, 1998.

CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; ROCHA, M. F.; CARVALHO JÚNIOR, W.; SOUZA NETO, N. C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.2, p.218–226, 2010.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. Comment on ‘Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS’. **International Journal of Geographical Information Systems**,

v.11, p.603–610, 1997.

DUNNE, T.; MOORE, T. R.; TAYLOR, C. H. Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. **Hydrological Sciences Bulletin**, v.20, p.305–327, 1975.

EL-SWAIFY, S. A.; MOLDENHAUER, W. C.; LO, A. **Soil erosion and conservation**. Soil Conservation Society of America, Ankeny, IA. 1985. 793 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2. Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2 ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, p. 212, 1997.

ESRI, 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. **A quick tour of using Map Algebra**. Disponível em: http://help.arcgis.com/en/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/A_quick_tour_of_using_map_algebra/00p600000003000000/. Acesso em: 20/01/2014.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo. Corumbá: Embrapa Pantanal, dez. 2008. (Embrapa Pantanal. Comunicado Técnico, 69). Disponível em: http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/download.php?arq_pdf=COT69. Acesso em: 27 nov. 2014.

FLORINSKY, I. V.; EILERS, R. G.; MANNING, G. R.; FULLER, L. G. Prediction of soil properties by digital terrain modeling. **Environmental Modelling & Software**, v.17, p.295–311, 2002.

GALLANT, J. C.; WILSON, J. P. Primary topographic attributes. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Eds.). **Terrain Analysis: Principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, 2000. p. 51–85.

GESSELER, P. E.; CHADWICK, O. A.; CHAMRAN, F.; ALTHOUSE, L. D.; HOLMES, K. W. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.2046–2056, 2000.

GRUBER, S.; PECKHAM, S. Land-surface parameters and objects in hydrology. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Amsterdam: Elsevier, 2008, p.171–194.

HANCOCK, G. R.; WILLGOOSE, G. R.; EVANS, K. G. Testing of the SIBERIA landscape evolution model using the Tin Camp

Creek, Northern Territory, Australia, field catchment. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.27, n.2, p.125-143, 2002.

HANCOCK, G. R.; MARTINEZ, C.; WELLS, T. Modelling and Assessment of Soil Carbon Variability at the Point and Hillslope Scale. In Oxley, L.; Kulasiri, D. (Eds), **MODSIM 2007. International Congress on Modelling and Simulation**. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, p.1743-1748, 2007.

HANCOCK, G. R.; MURPHY, D.; EVANS, K. G. Hillslope and catchment scale soil organic carbon concentration: An assessment of the role of geomorphology and soil erosion in an undisturbed environment. **Geoderma**, v.155, n.36–45, 2010.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v.106, p.211–232, 1989.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento de recursos naturais do projeto Radam Brasil**. Folha SH.22. Porto Alegre e parte das folhas SH. 21 Uruguaiana e SI. 22 Lagoa Mirim. Rio de Janeiro, 1986. 796 p.

KITCHEN, N. R.; DRUMMOND, S. T.; LUND, E. D.; SUDDUTH, K. A.; BUCHLEITER, G. W. Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil–crop systems. **Agronomy Journal**, v.95, p.483–495, 2003.

MENEGOTTO, E.; SARTORI, P. L. P.; MACIEL FILHO, C. L. **Nova sequência sedimentar sobre a Serra Geral no Rio Grande do Sul**. Publicação Especial do Instituto de Solos e Culturas, Seção Geologia e Mineralogia, Santa Maria, v.1, p.1–19, 1968.

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society American Journal**, v.57, p.443–452, 1993.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrologic Processes**, v.5, n.1, p.3–30, 1991.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v.27, p.31–36, 1962.

O'LOUGHLIN, E. M. Saturation regions in catchments and their relations to soil and topographic properties. **Journal of Hydrology**, v.53, p.229–246, 1981.

OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E. Phosphorus. Methods of Soil Analysis, Part 2. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, Q. R. (Eds). **Chemical and Microbiological Properties**. ed. 1.

- Soil Science Society of America. Madison, 1982. p.403–430.
- PEI, T.; QIN, C-Z.; ZHU, A-X; YANG, L.; LUO, M.; LI, B.; ZHOU, C. Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different flow-direction algorithms and kriging methods. **Ecological Indicators**, v.10, p.610–619, 2010.
- PANDEY, A.; CHOWDARY, V. M.; MAL, B. C. Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing. **Water Resources Management**, Amsterdam, v.21, n.4, p.729–746, 2007.
- RHEINHEIMER, D. S.; CAMPOS, B. C.; GIACOMINI, S. J.; CONCEIÇÃO, P. C.; BORTOLUZZI, E. C. Comparação de métodos de determinação de carbono orgânico total no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.435–440, 2008.
- ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia**. 2011. 240 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- RUHOFF, A. L.; CASTRO, N. M. R.; RISSO, A. Numerical modelling of the topographic wetness index: an analysis at different scales. **International Journal of Geosciences**, v.2, n.4, p.476–483, 2011.
- SEITZINGER, S. P.; MAYORGA, E.; BOUWMAN, A. F.; KROEZE, C.; BEUSEN, A. H. W.; BILLEN, G.; VAN DRECHT, G.; DUMONT, E.; FEKETE, B. M.; GARNIER, J.; HARRISON, J. Global river nutrient export: A scenario analysis of past and future trends. **Global Biogeochemical Cycles**, v.24, p.1–16, 2010.
- SAGA, **System for Automated Geoscientific Analyses**. SAGA Graphical User Interface Version: 2.0.8. SAGA Application Programming Interface, 2013.
- SHARPLEY, A. N.; DANIEL, T.; SIMS, T.; LEMUNYON, J.; STEVENS, R.; PARRY, R. **Agricultural Phosphorus and Eutrophication**. 2 ed. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS 149. 2003.
- SILVEIRA, C. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: Integração de atributos topográficos em Sistemas de Informações Geográficas e redes neurais artificiais**. 2010. 153 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- SIRTOLI, A. E. **Mapeamento de solos com auxílio de atributos do terreno, índices espectrais e geologia integrados por redes neurais artificiais**. 2008. 102 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- SIX, J.; FELLER, C.; DENEK, K.; OGLE, S. M.; SA, M. J. C.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils — Effects of no-tillage. **Agronomie**, v.22, n.7-8, p.755–775, 2002.
- STEEGEN, A.; GOVERS, G. Correction factors for estimating suspended sediment export from Loess catchments. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.26, n.4, p.441–449, 2001.
- TERRA, J. A.; SHAW, J. N.; REEVES, D. W.; RAPER, R. L.; VAN SANTEN, E.; MASK, P. L. Soil carbon relationships with terrain attributes, electrical conductivity and soil survey in a coastal plain landscape. **Soil Science**, v.169, n.12, p.819–831, 2004.
- TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil Tillage Research**, v.124, p.57–67, 2012a.
- TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J.; CALEGARI, A. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.1, p.271–282, 2012b.
- TIECHER, T.; MINELLA, J. P. G.; MIGUEL, P.; ALVAREZ, J. W. R.; PELLEGRINI, A.; CAPOANE, V.; CIOTTI, L. H.; SCHAEFER, G. L.; SANTOS, D. R. Contribuição das fontes de sedimentos em uma bacia hidrográfica agrícola sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.2, p.639–649, 2014.
- TOMLIN, C. D. A Map Algebra. In: **Proceedings of Harvard Computer Graphics Conference**, at Cambridge, Mass, 1983.
- TROEH, F. R.; HOBBS, J. A.; DONAHUE, R. L. Predicting Soil Loss. In **Soil and Water Conservation**, 2ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 1991.
- VALERIANO, M. M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.4, p.17–29, 2003.
- VAN OOST, K.; GOVERS, G.; DESMET, P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. **Landscape Ecology**, v.15, p.577–589, 2000.
- VAN REMORTEL, R. D.; HAMILTON, M. E.; HICKEY, R. J. Estimating the LS for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data within ArcInfo Grid. **Cartography**, v.30, n.1, p.27–35, 2001.

- WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v.37, p.29–38, 1934.
- WETZEL, R. G. **Limnology: Lake and River Ecosystems**. 3 Ed. Academic Press, San Diego. 2001. 1006 p.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning. US Department of Agriculture, Science and Education Administration. Agriculture handbook 537. Washington. 1978.
- ZEVENBERGEN, L.; THORNE, C. Quantitative analysis of land surface topography. **Earth surface processes and landforms**, v.12, p.47–56, 1987.
- ZHANG, W. H.; MONTGOMERY, D. R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water Resources Research**, v.30, p.1019–1028, 1994.
- ZHANG, S.; HUANG, Y.; SHEN, C.; YE, H.; DU, Y. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information. **Geoderma**, v.171–172, p.35–43, 2012.