

Estimativa da profundidade do solo pelo uso de técnicas de geoprocessamento, estudo de caso: Setor Pajarito, Colômbia

George Fernandes Azevedo¹
Eduardo Montoya Botero¹
Hernán Eduardo Martínez Carvajal¹
Newton Moreira de Souza¹
Edwin Fabian Garcia Aristizabal²

¹Universidade de Brasília - UnB
CEP 70910-900 - Brasília - DF, Brasil
gfernandesazevedo@yahoo.com
embotero@gmail.com
{carvajal, nmouza}@unb.br
²Universidad de Antioquia - UdeA
Medellin, Colombia
garcia.udea@gmail.com

Abstract. This paper, three models for the estimation of the thickness of residual soil in mountainous regions are presented and applied. They are based on variables coming from the topographic relief. The first two models (Z and S models), are based on the expected relationship between soil depth with slope and altitude records, respectively. The third model takes into consideration that the flatter a given region, the greater the effect of sediment deposition, corroborating a greater accumulation of material in these areas. In contrast, as the angle of the slope increases, the lower the rate of accumulation and, consequently, soil depth will be smaller, tending to the outcrop of rock. The third method is presented as an input for slope stability analysis in tropical environments. In terms of generated maps, the results of the Z method diverge from the other models, because it does not consider the characteristics of the strands as a parameter that influences the definition of the soil layer. The classification provided by the methods, showed that Z model and the one that uses the distance of the strands together with the slope layers, provide higher percentages for layers up to 3 m, in comparison with the S model, which have most significant values above 2,5 m. In a general way, the latter model showed a better-defined arrangement, following well-defined criteria that aim at meeting geological and geomorphological conditions present in the evaluated sector.

Palavras-chave: geographic information system, soil thickness evaluation, modeling, sistema de informação geográfica, avaliação da camada de solo, modelagem.

1. Introdução

Um dos mais importantes parâmetros de entrada para modelos de caráter hidro-ecológicos refere-se à profundidade do solo (Tesfaet al., 2009). A avaliação da espessura da camada destefator torna-se essencial diante da análise de temas que envolvem processos hidrológicos desenvolvidos em encostas, assim como na própria estabilidade de taludes (Tromp-van MeerveldeMcDonnell, 2006; Lanniet al., 2011, 2012).

Conforme D'Odorico (2000), o exame da dinâmica que rege a evolução da profundidade do solo é de suma importância no entendimento dos processos do relevo que envolve o papel pedológico na formação das paisagens. Complexas relações estabelecidas entre variados fatores (como topográficos, climáticos, biológicos, químicos e decorrentes de material de origem e de processos físicos) determinam a distribuição espacial da profundidade do solo (Summerfield, 1997; Pelletier e Rasmussen, 2009; Nicotina et al., 2011).

Diante do exposto, este trabalho dedica-se em estimar a espessura de solo baseando-se em variáveis procedentes do relevo utilizando modelos de fácil implementação, de maneira que as técnicas aqui consideradas diferem entre si no foco abordado. Com isto, busca-se, também, confrontar os resultados gerados, procurando discernir pontos coincidentes dos aspectos que divergem entre os métodos explanados.

Destaca-se que estes resultados visam nortear a seleção dos melhores insumos a serem incorporados em pesquisas voltadas para o uso de modelos relacionados à estabilidade de encostas presentes em regiões tropicais montanhosas, especificamente, com a presença de áreas urbanas.

A área de estudo proposta para esta pesquisa corresponde a uma região conhecida como Pajarito, pertencente à localidade de La Ilusión e situada no setor rural denominado San Cristóbal, o qual pertence ao município de Medellín, Colômbia. A área avaliada está apresentada em destaque pela Figura 1.

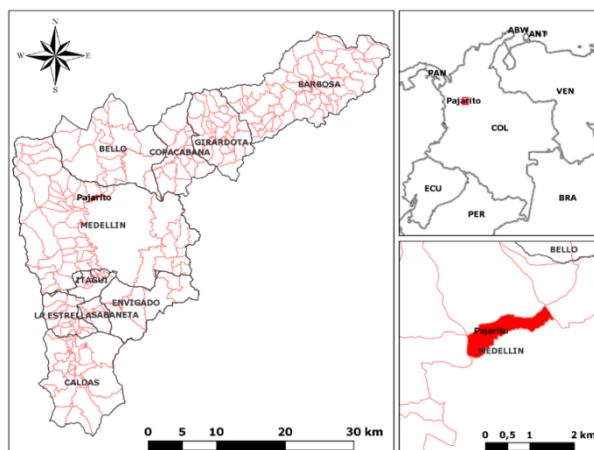


Figura 1 – Localização da área de estudo vinculada à pesquisa.

2. Metodologia de Trabalho

A metodologia prevista para o presente trabalho baseia-se na comparação entre três métodos utilizados na estimativa da distribuição espacial da espessura do solo. Ressalta-se que, para o desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados os softwares SPRING 5.2 (Cámara et al., 1996), referente a um sistema de informação geográfica (SIG), e Matlab (Matrix Laboratory) no que compreende a implementação das técnicas aplicadas.

As duas primeiras abordagens são frequentemente utilizadas em avaliações regionais de larga escala. Denominados por Catani et al. (2010) como modelo Z e modelo S, estes métodos tem como base a relação prevista entre profundidade do solo com registros de altimetria e declividade, respectivamente.

O modelo Z, que leva em consideração a elevação local (z_i), pode ser representado pela Equação 1.

$$h_i = h_{max} - \frac{z_i - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} (h_{max} - h_{min}) \quad (1)$$

O ângulo local de inclinação das vertentes em um pixel i (θ_i) está presente no método S demonstrado pela Equação 2.

$$h_i = h_{max} \left[1 - \frac{\tan \theta_i - \tan \theta_{min}}{\tan \theta_{max} - \tan \theta_{min}} \cdot \left(1 - \frac{h_{min}}{h_{max}} \right) \right] \quad (2)$$

Nas equações citadas, h_i corresponde ao valor da espessura de solo computada em um dado pixel i , h_{min} e h_{max} são as profundidades previstas mínima e máxima de solo, enquanto z_{max} e z_{min} (ou, alternativamente, θ_{max} ou θ_{min}) referem-se a altimetria máxima e mínima (ou declividades máxima e mínima) encontradas na área.

Propostos por Saulnier et al. (1997), estes dois modelos são empregados em variados casos no intuito de estimar a distribuição espacial da profundidade do solo em casos onde uma rápida e fácil abordagem é requerida, como em modelagens em nível de escala de bacias,

apesar de dependerem de simplificações de caráter geomorfológico. As distribuições espaciais dos principais insumos usados nestes modelos estão representadas nas Figuras 2 e 3.

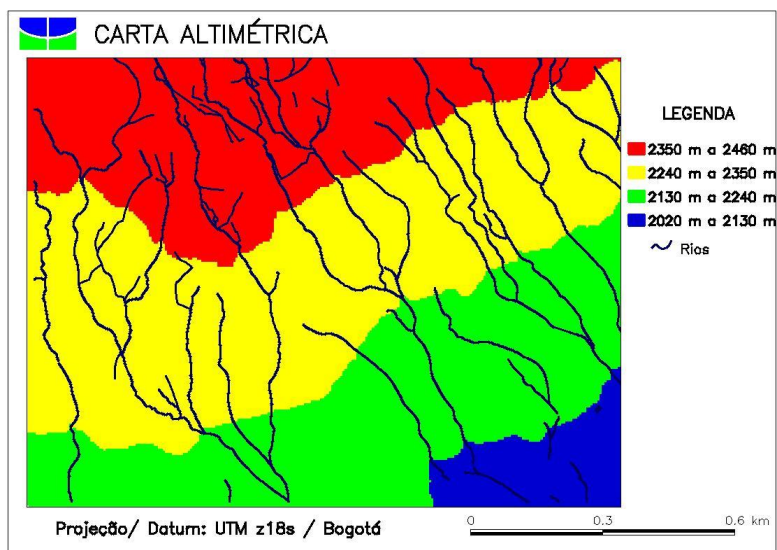


Figura 2 – Cartas de altimetria para a área de estudo.

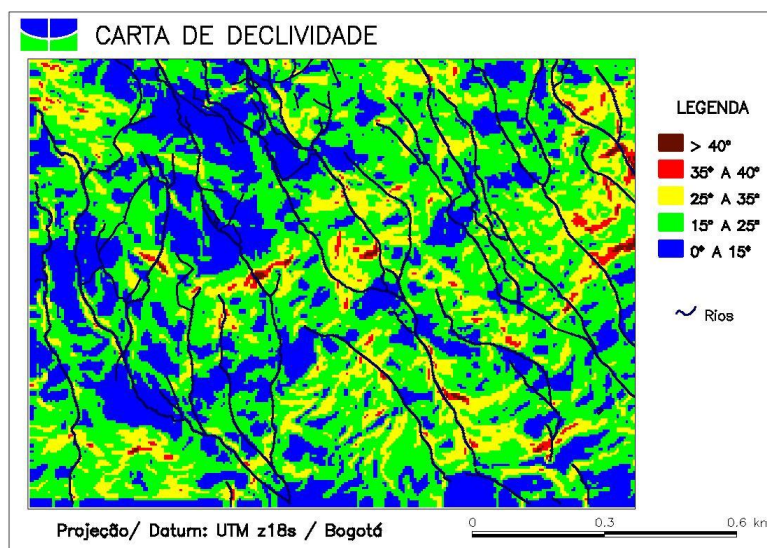


Figura 3 – Cartas de declividades para a área de estudo.

Propõe-se aqui um procedimento para o cálculo aproximado da capa de solo em regiões montanhosas pautando-se em relações geomorfológicas aprimoradas do terreno. Tais características referem-se a fatores definidos pela distância de um dado ponto às drenagens e da distribuição das declividades.

Este método tem por finalidade fornecer uma ferramenta capaz de estabelecer de maneira rápida uma previsão deste insumo para fins de análise de estabilidade de encostas em ambientes tropicais montanhosos. Em variados modelos de análise que avaliam as condições de segurança dos taludes, quer em termos de susceptibilidade ou de perigo de deslizamentos, a espessura do material inconsolidado apresenta-se como um dado de entrada requisitado por estes elementos.

A proposta se baseia no comportamento da distribuição do solo frente às inclinações do terreno. Considera-se que quanto mais plana uma dada região, maior será a ação da deposição de sedimentos, corroborando para um maior acúmulo de material nestas áreas. Em contrapartida, à medida que o ângulo da vertente aumenta, menor será a taxa de acumulação

e, conseqüentemente, a profundidade do solo será menor, tendendo ao afloramento da rocha. Estas condições se refletem na Equação 3.

$$h_{decl} = (h_{max} - h_{min}) \cdot [1 - 1/\tan(\theta_{lim}) \cdot \tan \theta] + h_{min} \quad (3)$$

Onde:

h_{decl} = espessura do solo decorrente da influência da declividade, em metros;

h_{max} = espessura máxima prevista na área de estudo, em metros;

h_{min} = espessura mínima observada na área de estudo, em metros;

θ = valor da declividade em uma dada célula, em graus;

θ_{lim} = valor de declividade estipulado como limite de influência para a alteração da camada de solo.

O valor limite acima mencionadodefine a inclinação a partir da qual a atuação deste fator não irá mais interferir na variação da espessura do solo. Isto representa que valores de declividade iguais ou superiores ao patamar estabelecido irão proporcionar a profundidade mínima fixada. Este limite corresponde a uma informação que deverá ser conseguida por meio da observação, em campo, de locais onde se constata a constância da camada de solo.

A Figura 4 representa as configurações geradas da Equação 3 pelo uso de distintos valores estipulados como limite de declividade.

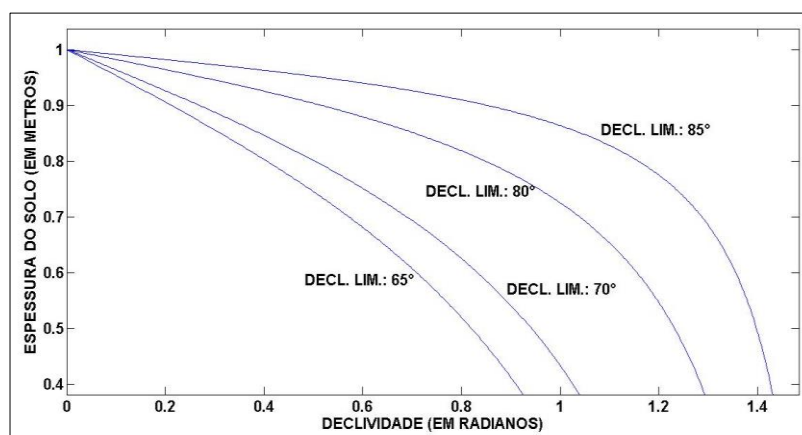


Figura 4—Curvas de estimativa de profundidade para valores limites de declividade distintos.

Nestas representações, a espessura considerada variou de zero a um. Quatro valores limites para a inclinação foram utilizados na plotagem das funções: 65°, 70°, 80° e 85°. O que se observa neste gráfico, é que a lei de variação da profundidade do perfil de solo, da forma como foi definida, estabelece que quanto maior o teto de declividade fixado, maior será a medida prevista pelo método, para um mesmo valor de inclinação de talude.

A transição entre as medidas máxima e mínima pré-estabelecidas de profundidade é processada de forma mais suave para as curvas que consideram um patamar mais baixo no que tange ao limite de inclinação das vertentes que não influencia na definição do perfil pedológico da região em estudo.

Agrega-se a esta hipótese, a consideração da interferência da distância das vertentes na definição da capa de solo. Esta característica é adicionada ao modelo segundo a Equação 4.

$$h_{dist} = h_{max} \cdot \tanh(a \cdot x) \quad (4)$$

Onde:

h_{dist} = espessura do solo decorrente da influência da distância horizontal das vertentes, em metros;

h_{max} = espessura máxima prevista na área de estudo, em metros;

a = parâmetro que controla a curvatura;

x = distância horizontal do ponto considerado a drenagem mais próxima.

O termo \tanh corresponde ao cálculo da tangente hiperbólica do produto ax . Esta interação atua de forma que quanto maior o afastamento horizontal de determinado ponto à drenagem mais próxima, maior será a tendência de crescimento da camada de solo.

A integração dos dois aspectos explicitados anteriormente constitui o modelo proposto para a espessura final seguindo a Equação 5.

$$h = (h_{max} - h_{min}) \cdot \left\{ \left[1 - \frac{1}{\tan \theta_{lim}} \cdot \tan \theta \right] \cdot [\tanh(a \cdot x)] \right\} + h_{min} \quad (5)$$

Nesta equação, h é a espessura prevista total e os demais termos já foram apresentados anteriormente. A escolha da inclinação limite neste trabalho se deu após efetuar a análise de estatística descritiva sobre o plano de informação desta variável. Observa-se que a média está situada em $18,96^\circ$, enquanto que o desvio padrão é igual a $7,49^\circ$. Desta forma, optou-se por considerar um valor crítico para a declividade de 42° , ligeiramente acima da medida que compreende a média acrescentada de três desvios padrões. O valor da variável a foi fixado em $0,04$, enquanto as espessuras máximas e mínimas previstas correspondem aos valores 4 m e 1 m.

Por meio da organização dos dados espaciais da região de estudo na plataforma SPRING 5.2 e da programação das equações que representam os modelos expostos na linguagem LEGAL, própria da plataforma SIG, e no Matlab, foram conseguidas as grades numéricas resultantes, as quais sujeitas ao processo de fatiamento culminaram nas cartas temáticas para espessura do solo, alvo das discussões inclusas na próxima seção.

3. Resultados e Discussão

Como resultados imediatos da pesquisa, as cartas geradas demonstram a nítida distinção trazida pelos enfoques específicos de cada modelo, sendo que a estrutura dos métodos traduzem bem as medidas quantificadas em cada situação. O método Z, que classifica o terreno mediante somente suas características de altimetria, não considerando maiores critérios geomorfológicos, estabelece um cenário gradativo apresentando uma transição entre as maiores altitudes, que preveem uma menor camada de solo, e os pontos mais baixos, localizados na porção sudeste da área, com solos mais espessos.

Destacam-se as cartas de espessura do solo alcançadas pela aplicação dos modelos, as quais se encontram devidamente registradas nas Figuras 5, 6 e 7. De forma complementar, a Tabela 1 retrata a porcentagem de cada classe na composição da área de estudo em relação aos modelos presentes na pesquisa.

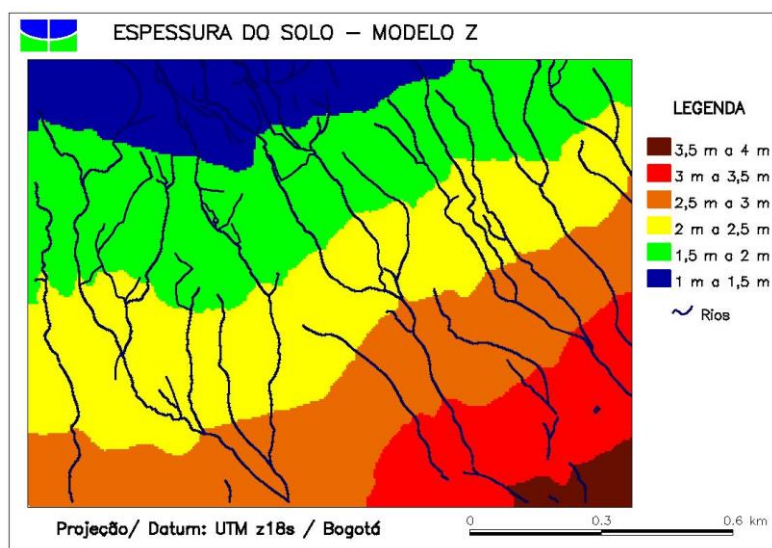


Figura 5-Carta de espessura do solo segundo o método Z.

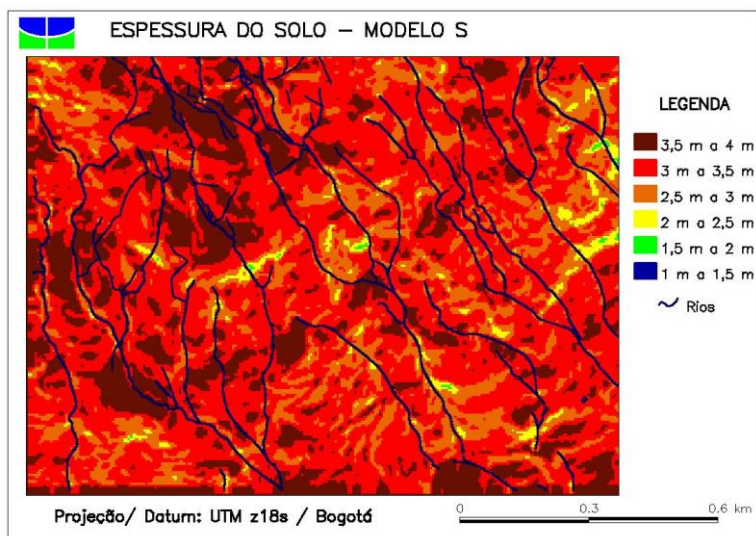


Figura 6 - Carta de espessura do solo segundo o método S.

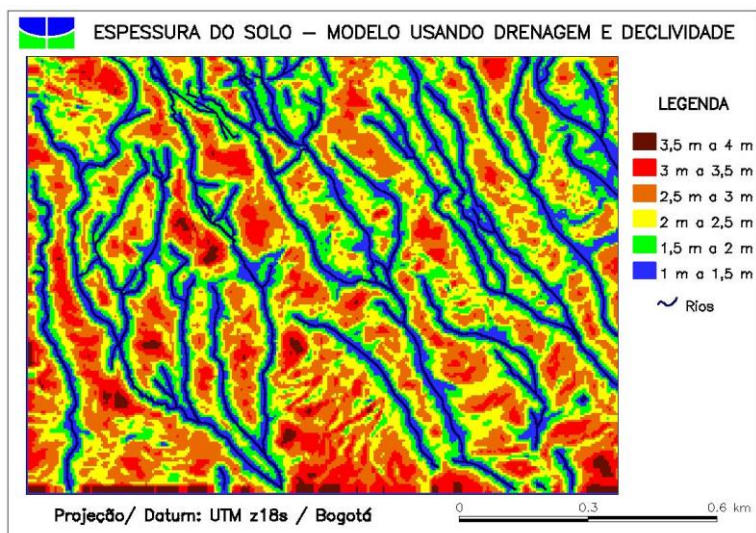


Figura 7 - Carta de espessura do solo obtida pelos fatores de declividade e distância das drenagens.

Tabela 1 - Distribuição da área de estudo pelas categorias de espessura de solo.

Classes	Porcentagem da área de estudo		
	Modelo Z	Modelo S	Distância e declividade
1 m a 1,5 m	11,71%	0,05%	22,08%
1,5 m a 2 m	24,78%	0,16%	19,20%
2 m a 2,5 m	25,93%	2,14%	24,92%
2,5 m a 3 m	20,94%	19,85%	22,82%
3 m a 3,5 m	12,14%	56,05%	9,42%
3,5 m a 4 m	4,51%	21,75%	1,56%

Como se pode observar, a interferência da forma do relevo, em termos das inclinações das encostas, não se revela na abordagem relativa ao modelo Z, não fazendo distinção, em termos preditivos, entre regiões planas e colinas íngremes, desconsiderando a variação intrínseca do solo decorrente dos processos dominantes que dependem da declividade, como a deposição de sedimentos e erosão. Isto se reflete na distribuição encontrada na Tabela 1. A classe menos expressiva refere-se a medidas que variam de 3,5 m a 4 m, exatamente onde a altimetria é mais baixa. A espessura variando de 1 m a 2,5 m abrange 62,42% da região de Pajarito.

Já o modelo S traz uma proposta diferente, proporcionando uma distribuição distinta da camada de solo, onde predominam as classes de espessura definidas pelos intervalos de 3 m a 3,5 m e de 3,5 m a 4 m, comportando 56,05% e 21,75% da área avaliada, respectivamente. Isto ocorre em função da classificação de grande parte da região estudada em declividades com categorias que não superam 25°, de maneira que o resultado explicitado na carta de espessura do solo segue o delineamento imposto pela configuração das declividades. Profundidades de até 2,5 m somaram apenas 2,35%. Além disso, não foi possível notar claramente uma tendência influenciada camada de solo prevista pelo uso dos modelos Z e S onde as drenagens se localizam.

Ao se considerar o papel da distância às drenagens, as categorias utilizadas na descrição da profundidade do solo mostram-se com uma participação mais equilibrada nos resultados do terceiro modelo proposto. Este modelo representa bem o que ocorre em regiões acidentadas de clima tropical, como a Colômbia. Nestas localizações, nos cursos dos rios, a capa de material inconsolidado é mínima em decorrência das condições geológicas e geomorfológicas do terreno, havendo, em muitos pontos, afloramento rochoso, que determina uma profundidade nula de solo, condição não considerada aqui.

A conjugação destas duas variáveis fixa um cenário, em termos gerais, que minimiza as regiões com espessuras superiores a 3 m, aumentando a parcela de área onde se tem solos rasos. As categorias englobando a espessura de 1 m a 3 m correspondem juntas a 89,02% da região. Agora, é interessante notar que mesmo quando se tem declividades baixas isso não é sinônimo para a previsão de uma espessa camada, que depende, no atual contexto, da posição relativa do pixel analisado em relação à linha de drenagem mais próxima.

4. Conclusões

Os resultados encontrados permitem gerar algumas sentenças a cerca dos modelos aqui empregados. Os três modelos utilizados mostram vertentes distintas que se refletem nas previsões alcançadas. Em termos dos mapas gerados, o método Z aparta-se significativamente dos demais modelos utilizados, no sentido que não considera as características das vertentes como influência na definição da camada de solo.

A classificação fornecida pelas metodologias retratou que os modelos Z e aquele que usa a distância das vertentes em conjunto com a declividade preveem maiores porcentagens para camadas de até 3 m, em comparação com o modelo S, o qual tem valores mais expressivos acima de 2,5 m. De forma geral, o último modelo se mostrou com uma disposição mais bem delineada, seguindo critérios bem definidos que visam atender condições geológicas e geomorfológicas presentes no setor avaliado.

Novos elementos condizentes a aspectos geomorfológicos ou hidrológicos do terreno podem ser incorporados em abordagens futuras na tentativa de conduzir a uma representação mais aprimorada da proposta aqui mostrada.

Pesquisas desta natureza mostram-se de extrema importância no sentido que proporcionam a geração de elementos voltados para a caracterização ambiental, o que é pertinente a estudos de diversas naturezas, servindo de insumo para análises voltadas desde temas amplos a ramos específicos, como estabilidade de encostas.

Referências Bibliográficas

Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas, U.M.; Garrido, J. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS by Object-oriented Data Modelling. *Computers & Graphics*, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

Catani, F.; Segoni, S.; Falorni, G. An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*, v. 46, n. W05508, p. 1-15, 2010.

D'Odorico, P. A possible bistable evolution of soil thickness. *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, n. B11, p. 25,927-25,935, 2000.

Lanni, C.; McDonnell, J.J.; Rigon, R. On the relative role of upslope and downslope topography for describing water flow path and storage dynamics: a theoretical analysis. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 25, 2011.

Lanni, C.; McDonnell, J.; Hopp, L.; Rigon, R. Simulated effect of soil depth and bedrock topography on near-surface hydrologic response and slope stability. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 2, p. 146-159, 2012.

Nicótina, L.; Tarboton, D.G.; Tesfa, T. K.; Rinaldo, A. Hydrologic control on equilibrium soil depths. **Water Resources Research**, v. 47, n. W04517, p. 1-11, 2011.

Pelletier, J.D.; Rasmussen, C. Geomorphically based predictive mapping of soil thickness. **Water Resources Research**, v. 45, n. W09417, p. 1-15, 2009.

Saulnier, G. M.; Beven, K.; Obed, C. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. **J. Hydrol.**, vol. 202, n. 1, p. 158-172, 1997.

Summerfield, M. A. **Global Geomorphology**. New York: Longman, 1997. 537 p.

Tesfa, T.K.; Tarboton, D.G.; Chandler, D.G.; McNamara, J.P. Modeling soil depth from topographic and land cover attributes. **Water Resources Research**, v. 45, n. 1, p. 1-16, 2009.

Tromp-van Meerveld, H.J.; McDonnell, J.J. Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. **Water Resources Research**, v. 42, n. W02411, p. 1-11, 2006.