

ESTABELECIMENTO DE LIMITES PARA PROFUNDIDADE DO SOLO DE  
ENCOSTAS COM BASE NO FATOR DE SEGURANÇA.

**ESTABELECIMENTO DE LIMITES PARA PROFUNDIDADE DO SOLO DE  
ENCOSTAS COM BASE NO FATOR DE SEGURANÇA.**

Michel, G.P.<sup>1</sup>; Kobiyama, M.<sup>2</sup>;

<sup>1</sup>IPH-UFRGS *Email:geanpmichel@gmail.com*;

<sup>2</sup>IPH-UFRGS *Email:masato.kobiyama@ufrgs.br*;

**RESUMO:**

A estimativa da profundidade do solo é uma tarefa essencial para entendimentos dos fenômenos hidrogeomorfológicos. O presente trabalho propôs uma nova formulação para estimativa da profundidade através da inserção de um modelo hidrológico na equação do Fator de Segurança. A nova formulação foi aplicada e comparada com outras equações de embasamento similar. Os resultados mostraram que dentro de sua faixa de aplicabilidade a nova formulação descreve adequadamente o comportamento da profundidade.

**PALAVRAS CHAVES:**

*Profundidade do solo; Modelagem; Estabilidade de encosta*

**ABSTRACT:**

The soil depth estimate is an essential task for understanding hydrogeomorphic phenomena. The present study proposed a new formulation for estimating the soil depth through the insertion of a hydrological model in the Safety Factor equation. The proposed formulation was applied and compared with other two equations which have a similar approach. The results demonstrated that the proposed formulation adequately describes a behavior of the soil depth inside its application boundary.

**KEYWORDS:**

*Soil depth; Modeling; Slope stability*

**INTRODUÇÃO:**

A compreensão sobre a evolução e a distribuição espacial da profundidade do solo é de extrema importância para o estudo da evolução da paisagem (Willgoose et al., 1991), processos hidrológicos em encosta (Tromp-Van Meerveld e McDonnell, 2006) e erosão (Riggins et al., 2011). A profundidade do solo pode ser entendida como o resultado final da atual pedogênese. Conforme Addiscott (1994), a modelagem da pedogênese não é uma tarefa simples, pois esta é resultado da combinação de muitos processos. Mesmo que a formulação utilizada para cálculo da profundidade seja extremamente complexa, diversos métodos para sua estimativa vêm sendo propostos até hoje, por exemplo,

## ESTABELECIMENTO DE LIMITES PARA PROFUNDIDADE DO SOLO DE ENCOSTAS COM BASE NO FATOR DE SEGURANÇA.

Trustrum e De Rose (1988), Saulnier et al. (1997), D'Odorico (2000), Iida (1999), e Riggins et al. (2011). Entretanto, nenhum desses modelos é capaz de explicar a totalidade da distribuição da profundidade dos solos de uma bacia hidrográfica. Portanto, o objetivo do presente trabalho foi propor uma nova metodologia para estimar a profundidade do solo a partir da formulação do Fator de Segurança (FS) e discutir problemas existentes nesta formulação por meio de sua comparação com outras metodologias que se baseiam em princípios similares. No presente trabalho, inicia-se a dedução desta formulação a partir da equação do FS para um modelo de encosta infinita, discutida detalhadamente por Michel et al. (2014) que tiveram por base as equações apresentadas por Selby (1994).

### MATERIAL E MÉTODOS:

Segundo Michel et al. (2014), o FS é expresso pela Eq. (1). Veja todas as equações na Figura 1. Modificando a Eq. (1), obtêm-se a Eq. (2). Na Eq. (2), a razão entre a altura da camada d'água dentro do solo e a profundidade do solo representa o grau de saturação do solo da encosta. Através de seu modelo hidrológico de recarga uniforme, O'loughlin (1986) definiu que a umidade da encosta pode ser estimada através da Eq. (3). Caso a condutividade hidráulica saturada seja constante ao longo de todo o perfil do solo, a Eq. (3) se torna a Eq. (4). A Eq. (4), por se tratar de uma representação permanente do balanço hídrico da camada de solo, é capaz de estimar um comportamento médio do nível de saturação do solo ao longo do tempo. Substituindo a Eq. (4) na Eq. (2), obtêm-se a Eq. (5). Considerando que para uma encosta o limite de estabilidade ocorre quando o FS é igual a um, é possível estimar a profundidade máxima que o solo poderá alcançar, sem gerar instabilidade, embasado nas características de resistência do solo, nas características geomorfológicas da encosta e nas condições hidrológicas que se desenvolvem. Assim, igualando o FS a um na Eq. (5) e isolando a profundidade do solo, obtêm-se a Eq. (6). A Eq. (6) apresenta uma nova formulação para estimar a profundidade máxima alcançada pelo solo da encosta em determinada condição hidrológica. Considerando que a chuva média anual que incide sobre uma bacia não é capaz de deflagrar escorregamentos, um valor de taxa de recarga uniforme igual à precipitação média anual é um cenário aceitável para estimativa da profundidade máxima do solo de uma encosta. O presente trabalho realizou um cálculo com a Eq. (6). Para verificar seu desempenho duas fórmulas (Eqs. (7) e (8)) propostas por Iida (1999) também foram testadas. \

### RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A Figura 2 demonstra o resultado da estimativa da profundidade máxima do solo para diferentes declividades de encosta, através da aplicação de três diferentes equações. As Eqs. (7) e (8) foram desenvolvidas seguindo os pressupostos de solo completamente saturado e completamente seco, respectivamente (Iida, 1999). Entretanto, a formulação proposta (Eq. (6)) não possui, nenhum destes pressupostos, representando uma condição mais próxima da realidade. Além disso, ao incorporar parâmetros hidrológicos e geomorfológicos, a Eq. (6) adquire aptidão para representar a influência destes processos na estimativa da profundidade do solo. Tendo isto em vista, a aplicação da Eq. (6) pode ser mais adequada em relação às demais para encostas que não apresentam

## ESTABELECIMENTO DE LIMITES PARA PROFUNDIDADE DO SOLO DE ENCOSTAS COM BASE NO FATOR DE SEGURANÇA.

tendências de completa saturação ou ausência de água. Como a profundidade do solo é sempre positiva, a Figura 2 claramente demonstra que, ao mínimo, a aplicação das Eqs. (6) e (8) requer que a declividade da encosta seja maior que o ângulo de atrito interno do solo. Para aplicação da Eq. (7) é pelo menos necessário que a tangente da declividade da encosta seja maior que o produto entre a tangente do ângulo de atrito interno do solo e a diferença entre uma unidade e a razão entre o peso específico da água e do solo. Percebe-se que a faixa de valores de declividade para os quais o valor da profundidade do solo calculado é positivo é muito maior com a Eq. (7) que com as Eqs. (6) e (8). Para valores de declividade maiores que os descritos acima, a profundidade do solo assume valores positivos. Entretanto, quando o valor da declividade da encosta tende pela direita aos limites descritos, as equações tornam-se assíntotas verticais, ou seja, os valores da profundidade do solo tendem a valores infinitos, o que certamente não descreve uma situação real. Por isso, mesmo gerando valores de profundidade do solo positivos, alguns valores de declividade da encosta devem ser descartados da faixa de aplicabilidade de tais equações. Tais problemas encontrados nos resultados destas equações são gerados pela existência de diferença de dois termos no denominador das equações, assim, quando este é negativo, nulo ou está se aproximando de zero inviabiliza a aplicação das mesmas. Por outro lado, dentro das faixas de aplicabilidade dessas equações, a tendência de redução de profundidade do solo com o aumento da declividade encontra-se bastante satisfatória. Pode-se dizer que dentro das faixas de aplicabilidade, essas equações são válidas. Especialmente, a nova formulação apresenta considerável utilidade por causa de sua relação com as reais condições hidrológicas que se desenvolvem na camada do solo. Percebe-se uma grande coerência dos resultados encontrados com a aplicação da Eq. (6). Para qualquer que seja a declividade da encosta, a máxima profundidade possível sempre será maior ao considerar o solo completamente seco ao invés de considerá-lo completamente saturado. Ao considerar uma condição de saturação intermediária, os valores calculados de máxima profundidade também deverão ser intermediários, o que foi demonstrado com a aplicação da Eq. (6). Entretanto, a aplicação da Eq. (6) não exclui a utilidade das demais. Quando não existe nenhum tipo de aporte de água no solo e este se encontra completamente seco, alguns termos da Eq. (6) anulam-se, e esta passa a ser idêntica a Eq. (8). Quando há demasiado aporte de água e a camada de solo encontra-se completamente saturada, os resultados obtidos com a Eq. (6) não serão coerentes, pois o máximo valor de saturação possível é igual a uma unidade, e a elaboração da Eq. (6) desconsidera esta limitação. Portanto, para aplicação da Eq. (6), é necessário verificar que a camada do solo não estará completamente saturada através da Eq. (4). Entretanto, a resolução iterativa da Eq. (5), assumindo que o valor máximo da saturação se limita a uma unidade, é uma metodologia alternativa que não exige nenhum tipo de ressalva.

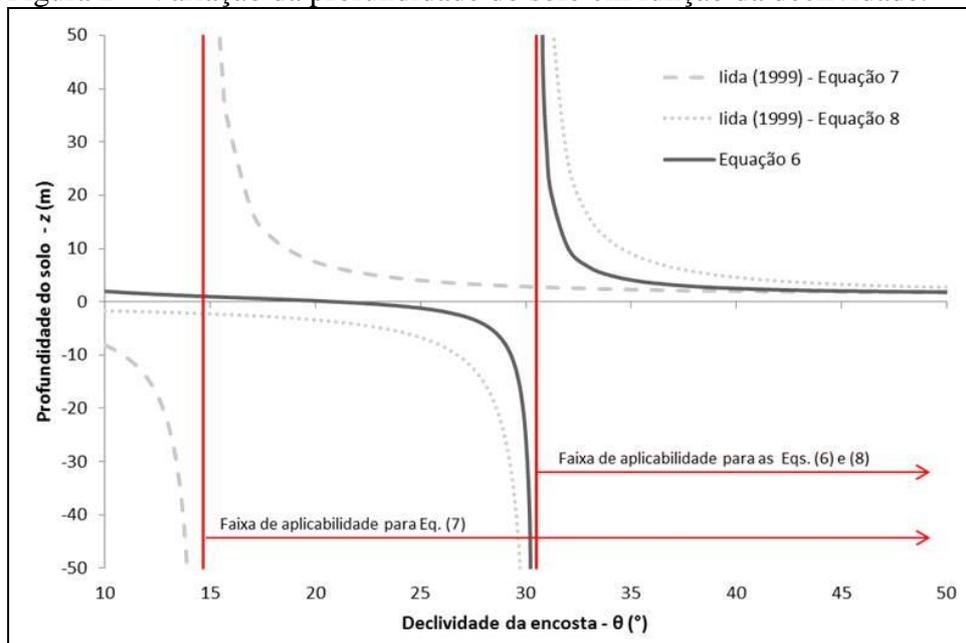
ESTABELECIMENTO DE LIMITES PARA PROFUNDIDADE DO SOLO DE ENCOSTAS COM BASE NO FATOR DE SEGURANÇA.

Figura 1 – Equações desenvolvidas para estimar a profundidade do solo.

$FS = \frac{c + \cos^2 \theta \cdot (\rho_s \cdot g \cdot z - \rho_w \cdot g \cdot h) \cdot \tan \phi}{\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad \text{Eq. (1)}$	<p><math>c</math> – Coesão do solo  <math>\theta</math> – Declividade da encosta  <math>\rho_s</math> – Peso específico do solo  <math>\rho_w</math> – Peso específico da água  <math>z</math> – Profundidade do solo  <math>h</math> – Altura da camada d'água no solo  <math>\phi</math> – Ângulo de atrito interno do solo  <math>g</math> – Aceleração gravitacional  <math>w</math> – Saturação do solo  <math>q</math> – Taxa de recarga uniforme  <math>a</math> – Área de contribuição  <math>b</math> – Comprimento do contorno  <math>t</math> – Transmissividade do solo  <math>k_s</math> – Condutividade hidráulica saturada</p>
$FS = \frac{\left( \frac{c}{\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos \theta} \right) + \cos \theta \cdot \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \frac{h}{z} \right) \cdot \tan \phi}{\sin \theta} \quad \text{Eq. (2)}$	
$w = \frac{h}{z} = \frac{q \cdot a}{b \cdot T \cdot \sin \theta} \quad \text{Eq. (3)}$	
$\frac{h}{z} = \frac{q \cdot a}{b \cdot k_s \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} \quad \text{Eq. (4)}$	
$FS = \frac{\left( \frac{c}{\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos \theta} \right) + \cos \theta \cdot \left( 1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \cdot \frac{q \cdot a}{b \cdot k_s \cdot z \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta} \right) \cdot \tan \phi}{\sin \theta} \quad \text{Eq. (5)}$	
$z < \frac{\frac{c}{\rho_s \cdot g \cdot \cos \theta} - \frac{\rho_w \cdot q \cdot a \cdot \tan \phi}{\rho_s \cdot b \cdot k_s \cdot \sin \theta}}{\sin \theta - \cos \theta \cdot \tan \phi} \quad \text{Eq. (6)}$	
$z < \frac{\left( \frac{c \cdot \sec^2 \theta}{\rho_s \cdot g} \right)}{\tan \theta - \left( \tan \phi \cdot \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \right) \right)} \quad \text{Eq. (7)}$	
$z < \frac{c \cdot \sec^2 \theta}{\rho_s \cdot g \cdot (\tan \theta - \tan \phi)} \quad \text{Eq. (8)}$	

## ESTABELECIMENTO DE LIMITES PARA PROFUNDIDADE DO SOLO DE ENCOSTAS COM BASE NO FATOR DE SEGURANÇA.

Figura 2 – Variação da profundidade do solo em função da declividade.



$c = 11,9$  kPa; peso específico da água e solo =  $1.000$  e  $1.800$  kg/m<sup>3</sup>; ângulo de atrito =  $30,5^\circ$ ;  $q = 0,005$  m/dia;  $k_s = 0,38$  m/dia;  $a = 300$  m<sup>2</sup>;  $b = 5$  m.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS:

A estimativa da profundidade do solo é uma tarefa muito importante para qualquer tipo de modelagem hidrogeomorfológica, principalmente na avaliação da estabilidade de encostas. Embora muitos autores dediquem-se para fazê-la adequadamente, explicar a profundidade para todos os pontos de uma bacia é ainda uma meta a ser alcançada. Os resultados obtidos no presente trabalho mostraram que existem limitações de uso para todas as equações testadas. Entretanto, a nova formulação (Eq. (6)) demonstrou grande coerência dentro de sua faixa de aplicabilidade, podendo ser uma metodologia aplicável para o estudo de processos hidrológicos e geomorfológicos em encostas. Esta aplicabilidade deve-se principalmente ao embasamento dado a Eq. (6), onde, para sua obtenção, parâmetros hidrológicos e geomorfológicos foram inseridos na formulação do FS. Recomenda-se que estudos de estabilidade de encostas utilizem tais equações para minimização de erros por superestimar a profundidade do solo das encostas.

### AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem ao Prof. Ricardo Rigon, Universidade de Trento, por ter sempre disponibilizado seus pensamentos sobre a hidrologia e geomorfologia no seu site (blog) na internet e também aos membros do Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais (GPDEN) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela discussão cotidiana sobre a formação do solo associada ao escorregamento.

ESTABELECIMENTO DE LIMITES PARA PROFUNDIDADE DO SOLO DE  
ENCOSTAS COM BASE NO FATOR DE SEGURANÇA.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA:**

ADDISCOTT, T.M. Simulation, prediction, foretelling or prophecy? Some thoughts on pedogenetic modeling. In: BRYANT, R.B.; ARNOLD, R.W. (eds.) Quantitative modeling of soil forming processes, Madison: SSSA, 1994. p.1-5.

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

IIDA, T. A stochastic hydro-geomorphological model for shallow landsliding due to rainstorm. *Catena*, v.34, p.293–313, 1999.

MICHEL, G.P.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R.F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. *Journal of Soils and Sediments*, v.14, p.1266-1277, 2014.

O'LOUGHLIN, E.M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, v.22, p.794–804, 1986.

RIGGINS, S.G.; ANDERSON, R.S.; ANDERSON, S.P.; TYE, A.M. Solving a conundrum of a steady-state hilltop with variable soil depths and production rates, Bodmin Moor, UK. *Geomorphology*, v.128, p.73–84, 2011.

SAULNIER, G.M.; BEVEN, K.; OBLED, C. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. *Journal of Hydrology*, v.202, p.158-172, 1997.  
SELBY, M. *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press, Oxford, 1993. 289p.

TROMP-VAN MEERVELD, H.J.; McDONNELL, J.J. Threshold relations in subsurface stormflow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope. *Water Resources Research*, v.42, W02415, doi:10.1029/2004WR003778. 2006.

TRUSTRUM, N.A.; DE ROSE, R.C. Soil depth-age relationship of landslides on deforested hillslopes, Taranaki, New Zealand. *Geomorphology*, v.1, p.143-160, 1988.

WILLGOOSE, G.R.; BRAS, R.L., Rodriguez-Iturbe, I. Results from a new model of river basin evolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.16, p.237–254, 1991.