

Planejamento do Uso do Solo e Zoneamento da Ameaça de Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas pelo Uso de Métodos Probabilísticos Aplicado ao Setor Taquari (DF)

Silva Junior, Eleudo

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, eleudo@unb.br

Azevedo, George

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, gfernandesazevedo@yahoo.com

Wilk, Alexis

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, alexis.adc.wilk@gmail.com

Schmidt, Leonardo

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, eng.schmidt@gmail.com

Pimentel, Roberto

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, eng.robertopimentel@gmail.com

Carvajal, Hernán

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, carvajal@unb.br

RESUMO: Em 1960 a capital do Brasil foi transferida para o centro do país para abrigar Brasília. Como parte do planejamento da nova cidade algumas regiões foram preservadas para posterior desenvolvimento urbano, entretanto a ocupação desordenada atingiu essas áreas. Neste contexto, tomando como área de estudo o Setor Habitacional Taquari (DF), o presente trabalho tem por objetivo principal averiguar as condições voltadas para a aptidão à urbanização da referida região, bem como a determinar a situação quanto à estabilidade das encostas. A metodologia pautou-se na aquisição e manipulação de dados pedológicos e de topografia em um ambiente de sistemas de informação geográfica o que resultou na definição de uma carta de aptidão à urbanização pelo cruzamento destes dados espaciais. Em acréscimo, procedeu-se, também, a probabilidade de ruptura das encostas por meio da aplicação de um modelo de estabilidade de talude infinito conjugado ao método probabilístico FOSM (First Order Second Moment) para uma área menor, considerando-se, também, a ação da precipitação nesse cálculo. Como conclusão, observa-se que a área analisada é classificada, na sua maioria, como apta à urbanização, existindo, porém, pontos críticos quanto a condições de estabilidade de taludes, sendo estas áreas as que apresentam maiores concentrações de ocupação atualmente.

PALAVRAS-CHAVE: Uso do solo, Susceptibilidade, Escorregamentos Rasos, Distrito Federal.

1 INTRODUÇÃO

Os desastres naturais, particularmente os movimentos de massa, têm sido relatados em todo o mundo nas últimas décadas. Juntamente

com as inundações e terremotos, esses eventos causam prejuízos ambientais e socioeconômicos tais como perdas humanas, a destruição de edificações, rodovias e tudo o que estiver no caminho do movimento de massa.

Embora tais acontecimentos sejam fenômenos naturais, fatores externos relacionados à ocupação antrópica interferem diretamente na ocorrência ou agravamento destes movimentos (Sidler e Ochiai, 2006). Um dos principais fatores é a ocupação urbana desordenada de encostas e a degradação ambiental decorrente da retirada de vegetação natural comum ao processo de urbanização informal e descontrolada.

O Brasil, após os desastres naturais recentes, tais como da Região Serrana do Rio de Janeiro (RJ), compreendendo os municípios de Petrópolis, Teresópolis, Nova Friburgo, Sumidouro e São José do Vale do Rio Preto, ocorrido em janeiro de 2011, criou a Lei 12.608, de 10 de abril de 2012. Esta lei institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC, dispondo sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC, autorizando a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres (Brasil, 2012).

Brasília é uma cidade planejada, elaborada segundo preceitos urbanísticos modernos e, apesar disso, apresenta problemas de cidades tradicionais decorrentes da falta de planejamento e mau uso do solo. O entorno da cidade está sendo ocupado de forma irregular e descontrolada, ocasionando problemas socioambientais que poderiam ser evitados se houvesse um maior controle e orientação por parte do poder público.

Neste artigo procurou-se avaliar as condições de tipos de solo e declividade de terreno para elaboração de cartas orientativas de aptidão à urbanização. Complementarmente, foram avaliadas as probabilidades de ruptura das encostas (PR) por meio da aplicação de um modelo de estabilidade de talude infinito conjugado com o método probabilístico FOSM em área de relevante interesse urbano, passível de ocupação descontrolada em Brasília, considerando-se, também, a ação da precipitação nesse cálculo. Por fim, este trabalho servirá para nortear a ocupação futura da área considerando a adequabilidade do uso do solo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudo está localizada no Distrito Federal brasileiro, na capital Brasília, próximo ao Lago Paranoá. Essa região está próxima das quadras residenciais da Asa Norte, bem como da área residencial do Setor Habitacional Individual Norte - Lago Norte e, a princípio, era uma das regiões reservadas para posterior expansão urbana.

Observa-se na Figura 1 a região de estudo deste trabalho, conhecida como Setor Habitacional Taquari-DF.



Figura 1. Área de estudo do Setor Taquari em destaque (Google Earth PRO, 2015).

O Setor Taquari está localizado entre o Lago Paranoá e a Torre de TV Digital e, devido à sua excelente localização, foi parcialmente ocupado por parcelamentos urbanos informais, predominantemente destinados à população de alta e média renda. Com a construção da Torre Digital, surge a tendência de valorização e demanda da área daquele setor habitacional.

2.2 Materiais

Os seguintes materiais foram utilizados neste trabalho:

- Software Spring.
- Software Google Earth PRO.
- Imagens da série Landsat 8.
- Software Risklab (Risk – Landslides - Laboratory).
- Base Cartográfica do Distrito Federal.

- Dados pluviométricos.

2.3. Métodos

A metodologia aplicada neste trabalho teve as seguintes etapas:

- Criação de banco de dados e projeto no software Spring para posterior importação de dados vetoriais, numéricos e de imagens necessárias, a partir da base cartográfica acima citada e do Projeto Landsat;
- Elaboração pelo software Spring de Carta de Declividade e Pedologia da referida área;
- Geração de Carta de Aptidão à Urbanização com base nos dados pedológicos e de declividade de terreno;
- Escolha de área classificada como baixa aptidão à urbanização com ocupação urbana informal existente para posterior verificação de PR das encostas utilizando o software Risklab;
- Processamento de dados, cálculo da PR no Risklab e exportação das matrizes numéricas resultantes;
- Importação das matrizes geradas e fatiamento dos dados numéricos para um plano de informação (PI) Temático no Spring;
- Geração de Carta de Ameaça de Escorregamentos.

Cabe destacar que o desenvolvimento da Carta de Aptidão Urbana ocorreu a partir da combinação de dados de Pedologia e Declividade da área de estudo escrevendo um programa na linguagem LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algorítmico) do programa Spring (Camara et al., 1996) desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) e distribuído gratuitamente na Web.

A análise da aptidão à urbanização baseou-se em critérios de declividade de terreno e tipologia de solo, segundo Tabela 1 e resultou em três classes de aptidão urbana, a saber:

- Alta – aptas à ocupação (regularizáveis).
- Média - podem ser ocupadas, segundo critérios (regularizáveis sob condições).
- Baixa - inaptas à ocupação (não

consolidáveis ou não regularizáveis).

Tabela 1. Critérios utilizados na elaboração da Carta de Aptidão Urbana.

ALTA	MÉDIA	BAIXA
Decliv. < 5° E solo = Latossolo	Decliv. < 5° E solo = Cambissolo	Decliv. > 15°
	15° > Decliv. > 5° E solo = Latossolo	15° > Decliv. > 5° E solo = Cambissolo

A análise para a obtenção do zoneamento da probabilidade de ruptura das encostas (PR) foi realizada utilizando-se a ferramenta computacional denominada Risklab desenvolvida por Azevedo (2015). Neste programa, encontram-se diferentes módulos para a análise das componentes de risco dos deslizamentos ocasionados por chuvas, de forma que aquele aqui utilizado refere-se à parte de ameaça. Especificamente, o cálculo da PR foi realizado mediante o emprego de um modelo preditivo para escorregamentos induzidos por chuvas, denominado SLIDE (Liao et al., 2010), devidamente alterado pela aplicação do método probabilístico FOSM (First Order Second Moment).

O modelo de estabilidade de taludes considera a influência imposta à resistência ao cisalhamento dos solos tanto pela infiltração provocada pela chuva, quanto pela atuação da saturação parcial. Há a incorporação da ação da quantidade de chuva na estabilidade, fornecendo a relação entre esta variável e o valor do fator de segurança (FS) por meio da formulação expressa na equação abaixo:

$$FS = \frac{\cot \beta \cdot \tan \phi' \left[\Gamma + m \cdot (n_w - 1) \right] + C' \cdot \Omega}{\Gamma + m \cdot n_w} \quad (1)$$

onde β é o ângulo de inclinação do talude e ϕ' refere-se ao ângulo de atrito efetivo do solo, ambos em graus. As funções integrantes de FS encontram-se nas equações abaixo:

$$\Gamma = G_s \cdot (1 - n) + n \cdot S_r \quad (2)$$

$$n_w = n \cdot (1 - S_r) \quad (3)$$

$$\Omega = \frac{2}{\sin(2\beta) \cdot H \cdot \gamma_w} \quad (4)$$

Neste caso, G_s é o peso específico relativo dos sólidos do solo (adimensional), n relaciona-se à porosidade (em decimal), S_r é o grau de saturação (em decimal) e H é a espessura do solo considerada como instável (em metros). Já γ_w corresponde ao peso específico da água, igual a 9800 N/m³. Na equação seguinte, C' representa a coesão total:

$$C' = [c' + c_\phi] \Delta s = \left[c' + A \left(1 - \lambda \cdot m^\alpha \right) \right] \Delta s \quad (5)$$

onde c' corresponde à coesão efetiva (em Pa) e Δs é tomado como comprimento unitário do talude. O termo A representa um parâmetro dependente do tipo de solo e do pico da tensão cisalhante na ruptura, λ é um coeficiente de intensidade relacionado ao tipo de solo e α mostra-se como um parâmetro que retrata a tendência não linear da curva de coesão, sendo as três variáveis adimensionais. A grade composta pelo talude infinito atua como um tanque de equilíbrio hídrico onde o parâmetro m está ligado à espessura adimensional da parte saturada pertencente à camada (variando de 0 a 1) (Liao et al., 2010).

O cálculo do balanço hídrico em cada passo de tempo pode ser representado pelas funções abaixo.

$$\begin{cases} m_1 = 0 \\ O_t = K_t \cdot \sin \beta \cdot m_t \cdot H \cdot \cos \beta \cdot \Delta t \\ \Delta m_t = \frac{(I_t - O_t)}{n \cdot H \cdot (1 - S_r)} \\ m_{t+1} = m_t + \Delta m_t \end{cases} \quad (6)$$

Nestas equações, o índice t refere-se ao passo de tempo, Δt é o intervalo de tempo, em segundos, m_1 corresponde ao valor inicial de m e m_t relaciona-se ao valor calculado em cada iteração de tempo. O_t representa a saída de água de uma porção finita para um talude de comprimento finito L . A intensidade da chuva

por unidade de tempo é dada por I_t , em mm, sendo posteriormente transformada para metros, enquanto que capacidade global de drenagem (K_t) é dada em 1/s.

Por meio da conjugação do método probabilístico FOSM à formulação apresentada anteriormente, foi possível conectar cada encosta analisada a sua respectiva probabilidade de ruptura, de forma que esta medida passou a quantificar a ameaça. As variáveis independentes consideradas como randômicas nas análises correspondem a c' e ϕ' . Os passos de aplicação do método relacionam-se à avaliação da função do fator de segurança para os valores médios de todas as variáveis envolvidas, bem como a determinação da variância para o fator de segurança ($V[FS]$), pelo uso da equação seguinte.

$$V[FS] = \frac{\partial FS}{\partial c'} V(c') + \frac{\partial FS}{\partial \phi'} V(\phi') \quad (7)$$

Onde $\partial FS / \partial c'$ e $\partial FS / \partial \phi'$ referem-se às derivadas da função de FS em relação à coesão efetiva e ao ângulo de atrito efetivo, respectivamente. Para o cálculo das variâncias $V(c')$ e $V(\phi')$ das variáveis independentes, adotaram-se os coeficientes de variação fixados em 40% para c' e 10% para ϕ' (Assis et al., 2012). Considerou-se uma distribuição normal de probabilidade para o fator de segurança, a qual fica definida pelo seu valor médio e pelo seu desvio padrão (obtido a partir da raiz quadrada de $V[FS]$). A área desta curva situada à esquerda do valor unitário de FS, crítico para a estabilidade, define a probabilidade de ruptura.

Tal procedimento é realizado de forma automatizada para cada pixel da área de estudo a partir do uso do software Risklab.

Tratando-se das características físicas da área de estudo, os dados empregados foram os mesmos utilizados por Azevedo et al. (2013). Estes parâmetros encontram-se na Tabela 2, a seguir:

Tabela 2. Parâmetros utilizados nas análises pelos tipos de solo encontrados na área de estudo (Azevedo et al., 2013).

Solo	Parâmetros do solo								
	c'	ϕ'	H	Kt	Gs	n	Sr	A	λ
	KPa	°	m	1/s	-	%	%	-	-
Latossolo vermelho	10	20	3	10^{-6}	2,8	60	40	100	0,4
Latossolo vermelho amarelo	10	20	3	10^{-7}	2,8	50	60	100	0,4
Gleissolo háplico	20	10	4	10^{-9}	2,7	40	95	80	0,4
Cambissolo háplico	5	25	0,7	10^{-8}	2,7	30	60	100	0,4

Quanto aos dados de precipitação, utilizou-se a quantidade de chuva para as datas abaixo.

Tabela 3. Dados pluviométricos.

Data	Dados pluviométricos (mm/dia)
15/12/2014	12,3
16/12/2014	20,5
17/12/2014	84,5
18/12/2014	43,10
19/12/2014	12,20

A chuva do dia 17/12/2014 foi amplamente noticiada, pois causou vários transtornos e prejuízos à população do Distrito Federal. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) choveram 84,5 mm entre 10h do dia 16 e 10h do dia 17 de dezembro, porém quase toda a chuva ocorreu entre 20h do dia 16 e 0h do dia 17 de dezembro, conforme Figura 2.

De acordo com o INMET, foi a maior quantidade de chuva registrada em 24 horas no ano 2014 sobre Brasília. (INMET, 2016)

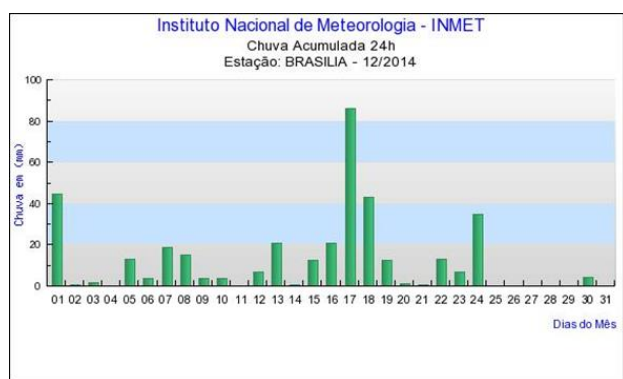


Figura 2. Chuva acumulada em 12/2014 (INMET, 2016).

Visando otimizar o processamento das matrizes de dados no Risklab, optou-se por delimitar uma área de estudo ainda menor segundo os seguintes preceitos: área de baixa

aptidão com ocupação urbana informal consolidada.

A área pode ser observada na Figura 3. Utilizaram-se pixels de 15x15m com matrizes da ordem de 71 linhas e 81 colunas.



Figura 3. Área para Zoneamento de Ameaça de Escorregamentos (Google Earth PRO, 2015).

Portanto, a área delimitada tem 1,3 km² e está localizada em região de maiores declividades e solo desfavorável à ocupação urbana, ou seja, baixa aptidão à urbanização. Cabe ressaltar a presença de ocupação urbana informal e desordenada nessa área.

Os resultados de PR associadas a encostas obtidos no Risklab foram exportados e posteriormente processados em ambiente SIG, tal como o Spring, categorizando em variadas classes por meio da ferramenta de fatiamento e classificação, resultando em cartas de zoneamento de ameaça de escorregamentos.

3 RESULTADOS

Caracterizando a área de estudo geologicamente, ela encontra-se na Província Estrutural do Tocantins e possui rochas metassedimentares do Grupo Paranoá contendo faixas de dobramentos, falhas e cavalgamentos. No tocante à declividade, apresentada na Figura 4, observa-se a ocupação urbana informal nas

regiões de maior declividade nas proximidades da DF-005. Unido a isso, a Figura 5 apresenta a Carta de Pedologia, onde as regiões de maior inclinação também são as regiões de cambissolos, de menor resistência se comparados aos latossolos vermelhos e latossolos vermelho-amarelos.

Dos 31,26 Km² analisados do ponto de vista

de aptidão urbana, apenas 15% estão ocupados, porém essa ocupação se concentra nos locais de geologia e declividade menos favorável. Isto ocorre porque esta área desfavorável está mais próxima da via de acesso DF-005 (Estrada Parque Paranoá) e oferece uma vista privilegiada da cidade de Brasília.

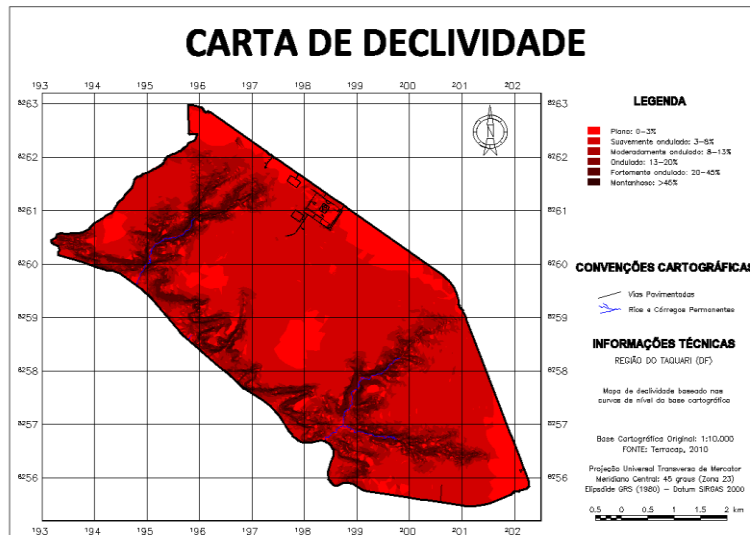


Figura 4. Carta de declividade.

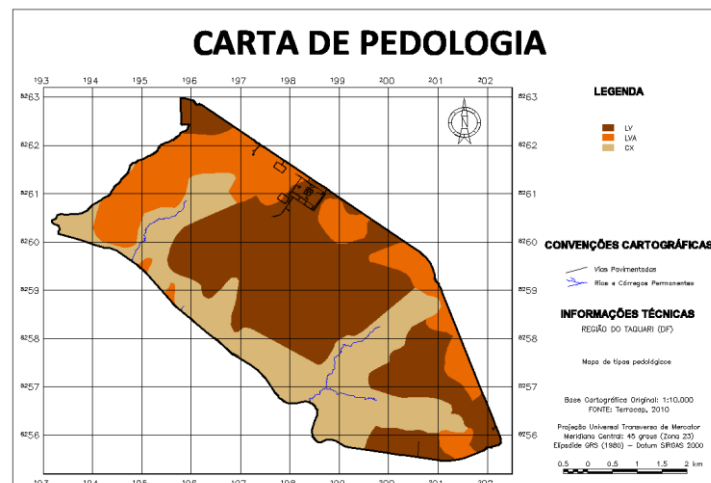


Figura 5. Carta de pedologia.

As figuras a seguir apresentam os resultados alcançados para a Carta de Aptidão Urbana e Zoneamento de Ameaça de Escorregamentos.

Observa-se que a aptidão à urbanização da área estudada mostra um predomínio da classe alta, seguida de áreas classificadas como média e baixa aptidão. Entretanto, cabe ressaltar a

existência de ocupações urbanas informais nas áreas de baixa aptidão. Esse fato pode ser explicado pela proximidade dessas áreas com a via de acesso DF-005 – Estrada Parque Paranoá.

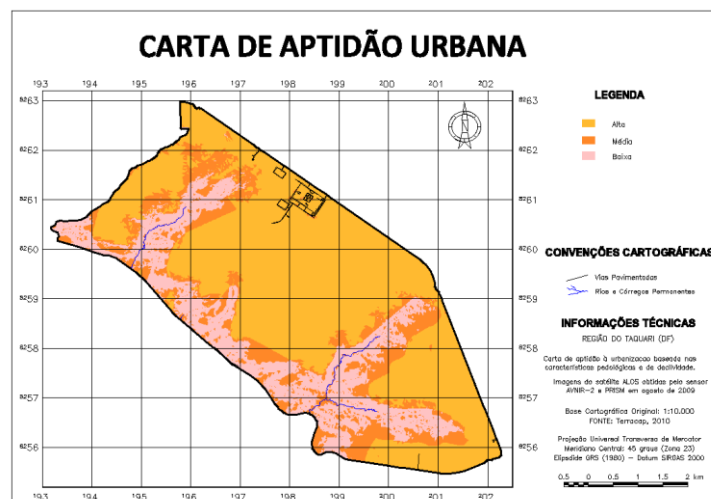


Figura 6. Carta de aptidão urbana.

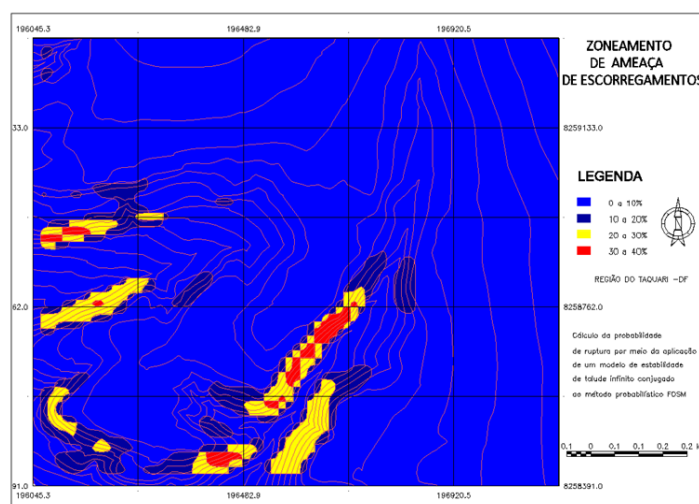


Figura 7. Carta de zoneamento de ameaça de escorregamentos.

É importante relatar que os loteamentos informais não apresentam uma ocupação ordenada do território, visto que as vias de acesso às edificações são precárias e muitas vezes não levam em consideração questões relativas à drenagem de águas pluviais. Após exportar as matrizes de dados obtidas no Risklab e importá-las para o software Spring, prosseguiu-se com o fatiamento e classificação dos dados numéricos de PR e os resultados obtidos podem ser analisados na Figura 7.

Classificaram-se as probabilidades de ruptura em quatro classes variando desde valores nulos até regiões com estimativas que ultrapassaram 30%.

Observa-se na Figura 7 que as probabilidades de ruptura resultantes do processamento no

Risklab demonstram o predomínio da classe de 0 a 10%, com cerca de 90% da área analisada nessa classe inferior. O valor máximo de PR atingido foi de 37% no cenário analisado com base na sequência de chuvas da Tabela 3, cujo valor máximo foi de 84,5 mm/dia na data 17/12/2014 e as maiores probabilidades coincidem com as maiores declividades.

Portanto, do total de 1,3 km² da área analisada na fase de susceptibilidade e ameaça de escorregamentos, cerca de 10% da área, ou seja, 0,12 km², apresentam as probabilidades de ruptura no intervalo de classes superiores a 10% de PR (10 a 20%, 20 a 30% e 30% a 40%). Cabe destacar que nessas áreas observa-se a presença de edificações decorrentes de ocupação urbana informal.

Como conclusões, analisou-se, através da carta de aptidão urbana, que a área estudada de 31,26 km² contém regiões que possuem aptidão à urbanização classificadas como alta, média e baixa. Predomina a classe de alta aptidão à urbanização, porém, há uma preferência pela população na ocupação informal das áreas de baixa aptidão, tendo em vista a facilidade de acesso às vias de transporte e menor controle por parte dos órgãos públicos competentes, pois boa parte das áreas localizadas na classe de alta aptidão à urbanização pertence ao governo e são fiscalizadas. Tal fato levou as pessoas a ocuparem as regiões com susceptibilidade alta a ocorrência de deslizamentos, próximas à rodovia e aos rios e córregos.

Dos 31,26 km² da região analisada, apenas 15% estão ocupados como classe urbana, porém, essas áreas se concentram principalmente na região de pedologia e declividade mais desfavorável, em detrimento de um platô quase plano e de solo favorável.

No segundo momento do presente trabalho, analisou-se a susceptibilidade e ameaça de escorregamentos de uma área de baixa aptidão à urbanização com ocupação urbana informal, tendo em vista a PR das encostas. Os resultados alcançados apresentam valores de PR de até 37% em cenários de chuva já ocorrentes (84,5 mm/dia em 17/12/2014). Da área total analisada (1,3 km²) cerca de 10%, ou seja, 0,12 km² apresentam PR no intervalo de classes superiores a 10%.

O fato de existirem edificações habitadas nessa região oferece risco à população local e demanda o monitoramento e controle por parte do GDF, especialmente da Subsecretaria de Proteção e Defesa Civil.

Por fim, destaca-se que o presente artigo oferece a possibilidade de trabalhos futuros especialmente no cálculo e análise das probabilidades de ruptura de encostas dos 31,26 km² analisados do ponto de vista da aptidão urbana, bem como de outras áreas ocupadas informalmente no DF, seguindo a mesma metodologia aplicada.

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia e ao Decanato de Pesquisa e Pós-graduação (DPP) da Universidade de Brasília pelo apoio recebido e ao INPE pelo software Spring.

REFERÊNCIAS

- Assis, A.P., Espósito, T.J., Gardoni, M.G., Silva, P.D.E.A. e Maia, J.A. (2012). Métodos estatísticos aplicados a geotecnia, 1ª edição, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 278 p.
- Azevedo, G.F. (2015). *Sistema de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais*. Tese de Doutorado, Publicação G.TD - 107/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 254 p.
- Azevedo, G.F., Carvajal, H.E.M., Souza, N.M. (2013). Uso do Método FOSM para Quantificação do Perigo Associado a Deslizamentos Deflagrados por Chuvas no Distrito Federal. In: *VI Conferência Brasileira de Encostas*, 2013, Angra dos Reis. COBRAE 2013 - Volume de Conferências e Artigos. Rio de Janeiro: ABMS, v. 1.
- Brasil (2012). Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres. Diário Oficial República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 12 p.
- Camara G, Souza RCM, Freitas UM, Garrido J. (1996). Spring: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, 20: (3) 395-403.
- INMET (2016). Gráficos - INMET. http://www.inmet.gov.br/sim/gera_graficos.php, acessado em 01/02/2016.
- Liao, Z., Hong, Y., Wang, J., Fukuoka, H., Sassa, K. Karnawati, D. e Fathani, F. (2010). Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets, *Landslides*, SPRINGER, Vol. 7, p. 317-324.
- Sidler, R.C. e Ochiai, H. (2006). Landslides - processes, prediction, and land use, 1st ed., *American Geophysical Union*, Washington, USA, 312 p.