

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO E OCORRÊNCIA DE
ESCORREGAMENTOS NO PARQUE NACIONAL
VULCÃO TENORIO, COSTA RICA, COMO SUBSÍDIOS
PARA O MAPEAMENTO DE SUSCEPTIBILIDADE**

Gabriel Guimarães Facuri

Orientador: Prof. Dr. Jefferson de Lima Picanço
Co-orientadora: Profa. Dra. Maria José Maluf de Mesquita

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPINAS
2012

RESUMO

O escopo deste trabalho é gerar dados estatísticos dos movimentos de massa da área geral do Parque Nacional Vulcão Tenorio, na Costa Rica de forma a ser passível de futura utilização para o mapeamento de susceptibilidade a escorregamentos, como forma de planejamento. Através do processamento de Modelos Digitais de Elevação e de uma nova metodologia de fotointerpretação foram gerados dados do terreno e dos escorregamentos, além de um inventário de movimentos de massa. Após o cruzamento dos resultados primários do estudo, concluiu-se que de forma geral, as zonas onde ocorreram as maiores áreas com escorregamentos estão (1) assentadas sobre a unidade composta pelas lavas mais recentes do Parque, (2) muito próximas das drenagens, (3) entre distâncias de um a três quilômetros das falhas ativas, (4) entre 1.400 e 1.800 metros de altitude, (5) em encostas com faces expostas a SW, W e NW, (6) em encostas com qualquer curvatura e (7) entre 25 e 48° de declividade.

ABSTRACT

The scope of this paper is to generate statistics data of mass movements of the general area of the Tenorio Volcano National Park in Costa Rica in order to be capable of future use for mapping landslide susceptibility, as a form of planning. Terrain and landslides data, as well as an inventory of mass movements were generated using Digital Elevation Models and a new method of photointerpretation geoprocessing. After crossing the primary results of the study, we concluded that in general, largest landslides occurrence areas are (1) seated on the unit comprised of the most recent lavas of the Park, (2) very close to the drainage, (3) in distances between one to three Kilometers far from active faults, (4) between 1,400 and 1,800 meters of altitude, (5) on the slopes faced to SW, W and NW, (6) on slopes with any curvature and (7) between 25 and 48 ° of sloping.

SUMÁRIO

RESUMO.....	01
ABSTRACT.....	01
INTRODUÇÃO.....	03
Objetivos.....	05
Caracterização da área de estudos.....	05
MATERIAIS E MÉTODOS.....	09
Aquisição de dados.....	10
Trabalhos de fotointerpretação.....	11
Integração e análise dos dados.....	13
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	14
Introdução.....	14
Inventário de escorregamentos.....	16
Altitude.....	20
Direção das encostas.....	23
Cobertura.....	25
Curvatura.....	28
Declividade.....	30
Águas.....	34
<i>Águas subterrâneas.....</i>	34
<i>Drenagem e escoamento hídrico.....</i>	35
<i>Pluviosidade.....</i>	37
Estruturas.....	38
Litotipos.....	41
Sismicidade.....	43
USO DOS DADOS PARA O MAPEAMENTO DE SUSCEPTIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS.....	45
CONCLUSÕES.....	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	49
ANEXOS.....	51

INTRODUÇÃO

O Parque Nacional Vulcão Tenorio (PNVT), localizado nas províncias de Guanacaste e Alajuela na Costa Rica, tem uma grande importância turística regional, recebendo anualmente dezenas de milhares de turistas em busca de suas diversas atrações. Porém, para as localizar, há trilhas que nem sempre estão em locais seguros e longe de escorregamentos. Para auxiliar no planejamento do Parque, na construção de novas trilhas e implementação das existentes, um mapa de susceptibilidade a escorregamentos seria de grande valor.

Escorregamentos, isoladamente ou em associação com seus eventos desencadeadores, tais como os terremotos, erupções vulcânicas ou fortes tempestades são as maiores causas de perdas humanas e materiais em escala global, (Cruden e Fell, 1997) *apud* Duman *et al.*, 2005). Localmente, o Parque não está livre de nenhuma destas fontes causadoras de escorregamentos citadas, o que aumenta ainda mais a chance de que novos eventos venham a ocorrer.

Vahidnia (2010) relaciona os escorregamentos com a sociedade, descrevendo-os como os processos de erosão mais extremos e que representam um dos perigos geológicos mais importantes, sendo significativa fonte de perdas de vidas e propriedades. Além disso, os movimentos de massa são tão poderosos que podem modificar drasticamente paisagens inteiras em uma fração de tempo muito pequena.

Atualmente, o zoneamento e mapeamento do perigo e susceptibilidade a escorregamentos é uma ferramenta poderosa para melhorar o planejamento do uso do solo e para evitar o desenvolvimento de áreas ameaçadas de uma maneira mais eficiente e econômica, reduzindo futuras perdas de vidas e prejuízos materiais e ambientais. Por isso, houve um grande avanço nas últimas décadas nas ciências que tratam do inventário e zoneamento de perigo e susceptibilidade de escorregamentos (Ercanoglu e Gökceoglu, 2004; Oliveira e Augusto Filho, 2005; Cascini, 2008; Aksoy e Ercanoglu, 2012).

Porém há certa confusão terminológica entre pesquisadores, uma vez que os termos “mapeamento de susceptibilidade a escorregamentos” e “mapeamento de perigo a escorregamentos” são usados frequentemente invertidos. Segundo Kamp *et al.* (2008), um perigo natural, *sensu stricto*, envolve “uma ameaça à vida de pessoas ou animais, vítimas reais e/ou em potencial, e danos a propriedades (construções e terras)”. Portanto, áreas que são susceptíveis a escorregamentos, mas que não afetam seres humanos podem ainda ser consideradas perigosas (*hazardous*). Falando de maneira restrita, a maior parte dos mapas de perigo a escorregamento podem ser realmente considerados como mapas de

susceptibilidade, já que frequentemente não consideram totalmente a dimensão humana (Figura 1).

No presente trabalho serão usadas as terminologias segundo a União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS) que constam em Fell *et al.* (2008):

Susceptibilidade a escorregamentos (*landslide susceptibility*) é a avaliação quantitativa ou qualitativa de classificação, volume (ou área), e distribuição espacial de escorregamentos existentes ou que potencialmente podem ocorrer em uma área. A susceptibilidade pode também incluir uma descrição da velocidade e intensidade dos escorregamentos potenciais ou existentes. Embora seja esperado que escorregamentos possam ocorrer mais frequentemente em áreas mais susceptíveis, na análise de susceptibilidades, o período de tempo não é explicitamente levado em conta.

Perigo a escorregamentos (*landslide hazard*) é a condição com a qual há a possibilidade de ocorrência de uma consequência não desejada. A descrição de perigo a escorregamento pode incluir a localização, volume (ou área), classificação e velocidade de escorregamentos em potencial e qualquer material resultante avulso, e a probabilidade de ocorrência dentro de um dado período de tempo.

Vulnerabilidade a escorregamentos (*landslide vulnerability*) é o grau de perda de um dado elemento ou conjunto de elementos dentro da área afetada pelo escorregamento. Isto é expresso em uma escala de 0 (sem perdas) a 1 (perda total). Para propriedades, a perda será o valor do estrago relativo ao valor da propriedade. Para pessoas, ela será a probabilidade que se perda uma vida em particular (do elemento em risco), dado que a pessoa será afetada pelo escorregamento.

Risco a escorregamentos (*landslide risk*) é a medida entre a probabilidade e a severidade, incluindo um efeito adverso a saúde, propriedade ou ambiente. O risco é frequentemente estimado pelo produto da probabilidade de um fenômeno de uma dada magnitude vezes as consequências. Entretanto, uma interpretação mais geral do risco envolve uma comparação da probabilidade e das consequências de uma forma que não seja um produto.

De acordo com Vahidnia (2010), o mapa de susceptibilidade a escorregamentos tenta prever onde rupturas de encostas são mais propícias a ocorrer. Neste contexto, susceptibilidade é definida como a probabilidade de que um escorregamento ocorra se fatores temporais ou deflagradores como chuvas ou terremotos não são considerados.

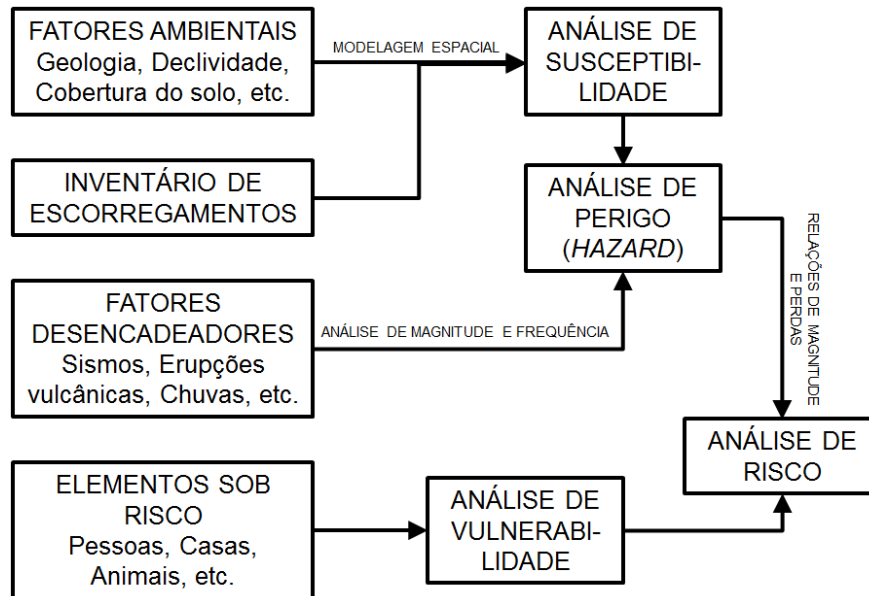


Figura 1 - Fluxograma genérico mostrando os dados necessários e etapas de cada fase da análise de riscos a escorregamentos. Baseado em Felpeto *et al.* (2007) e van Westen *et al.* (2008).

OBJETIVOS

A presente pesquisa procura correlacionar os escorregamentos com as características naturais do terreno, de maneira que os dados gerados possam mostrar situações e combinações mais ou menos propícias à ocorrência destes fenômenos no PNVT. Estas correlações podem ser futuramente usadas na produção de mapas de susceptibilidade a escorregamentos. A caracterização e espacialização desses eventos são a principal finalidade da pesquisa, porém secundariamente outros produtos foram gerados e que também são de grande importância, além de serem inéditos na região. Entre eles estão o inventário de deslizamentos e os diversos mapas temáticos produzidos.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

O Parque Nacional Vulcão Tenorio se estende em uma área de aproximadamente 129,3 Km², compreendendo grande parte do Complexo Vulcânico Tenorio-Montezuma (Figura 2), que está inserido na Cordilheira de Guanacaste, na Costa Rica, junto à fronteira com a Nicarágua, ambas na América Central, em uma zona de subducção das placas do Panamá e de Cocos (Chiesa *et al.*, 1994). O complexo está localizado a noroeste do país entre os vulcões Miravalles ao norte e Arenal ao sul (Figura 3).



Figura 2 - Vista panorâmica do Complexo Vulcânico Tenorio–Montezuma.

Na porção norte dos vulcões Tenorio-Montezuma existem poucos estudos geológicos realizados devido ao difícil acesso (por veículos e até mesmo caminhando), pela falta de bons afloramentos pelo alto grau de intemperismo e pela alteração hidrotermal das rochas. Além disso, a região é densamente vegetada, com índices de pluviosidade elevados e um relevo bem acidentado.

Por meio de dados sísmicos das redondezas, foi observado um aumento na concentração e menor profundidade dos sismos no período de 1994 a 2009, tidas como anomalias sísmicas (Taylor, 2009). Junto a elas, a presença de águas termais e de locais com escape de gases levam a crer que a área está geotermicamente e vulcanologicamente ativa.

A Cordilheira de Guanacaste é composta por uma sequência de antigos arcos vulcânicos que estão alinhados do extremo noroeste ao centro noroeste da Costa Rica. Dentre seus vulcões mais novos, há alguns em considerável grau de atividade como Orosí e Rincón de la Vieja, além do Arenal, que é atualmente o vulcão mais ativo do país (Alvarado, 1993).

A cronologia das erupções do Complexo Tenorio-Montezuma é pouco conhecida. Historicamente há registros orais de uma erupção em 1816, porém em 1864, observou-se que a cratera estava densamente vegetada, o que se opõe a tal evento do início do século (Alvarado, 1993). Outras histórias não confirmadas de moradores da região atestam que em 1999 houve ascensão de gases escuros da cratera do vulcão Tenorio. Porém, de forma geral, considera-se a última erupção como ocorrida no Holoceno (Kitchen, 2003). Alvarado *et al.* (2007) descrevem que os depósitos mais novos são pertencentes ao vulcão Tenorio e têm idades inferiores a 600.000 anos.

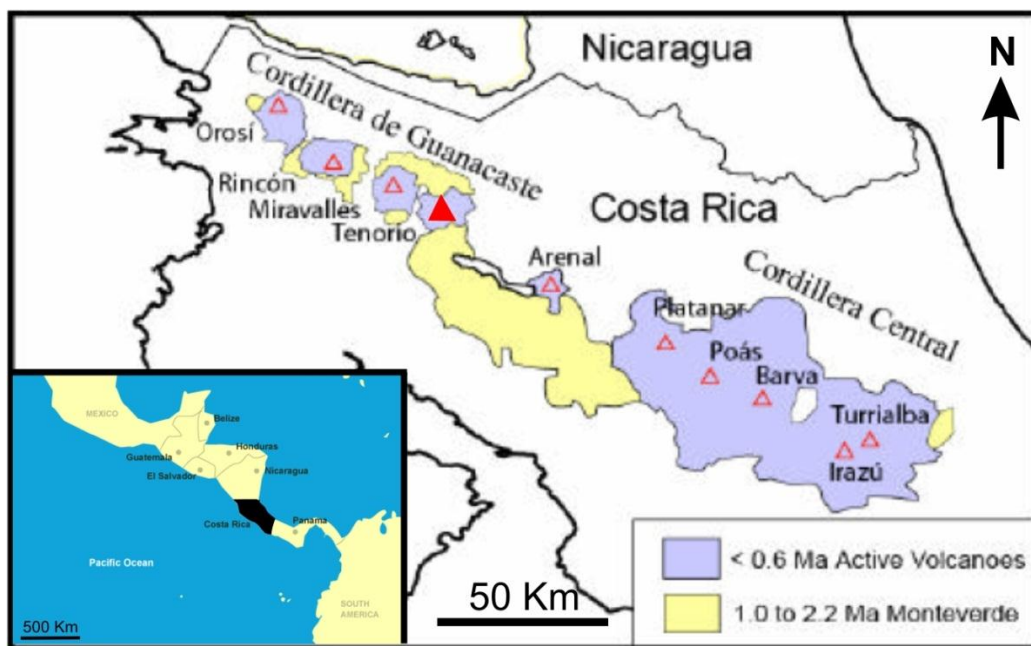


Figura 3 - Localização do vulcão Tenorio. A área de estudo se encontra no maior triângulo vermelho preenchido em destaque (modificado de Alvarado *et al.*, 2007).

A geologia do parque é composta por seis unidades litológicas (Civelli *et al.*, 2005). A mais antiga delas é o embasamento de idade pré-Pleistocênica composto por lavas de composição variando entre basáltica e andesítica, com pervasiva alteração hidrotermal. Além de sequências de *lahars*, *debris-flows* e sedimentos continentais subordinadas. Estratigraficamente acima ocorrem rochas vulcânicas (*vulcanitas*) pré-Tenorio, representadas por rochas intermediárias a ácidas como andesitos, domos e fluxos de andesitos ácidos associados. Do Pleistoceno inferior, há as Brechas da Formação Monte Verde que são, em sua maioria, ignimbritos, fluxos piroclásticos consolidados em fácies de brecha frequentemente intercaladas com lavas andesíticas e andesítico-basálticas. As paleolavas do vulcão Tenorio e as lavas do Montezuma compõem depósitos de fluxos piroclásticos e, majoritariamente, fluxos lávicos de andesitos e andesitos-basálticos e escoriácios básicos, ambos do Pleistoceno inferior e intermediário (Facuri, Silva e Taylor, 2010a e 2010b). As Neolavas do vulcão Tenorio são as rochas vulcânicas mais recentes do PNVT. São fluxos de lava, *lahars*, depósitos de queda (de cinzas a *lapilli*), porém todas apresentam composição química intermediária a básica. A unidade estratigraficamente mais nova é composta por sedimentos não consolidados de origem aluvionar, coluvionar e depósitos de tálus de grandes dimensões e clastos grossos.

Segundo Taylor *et al.* (2002), a área de estudos é cortada por três principais sistemas de falhas (Figura 4). A falha Cote-Arenal é uma falha normal com o bloco sul soerguido, que se estende por mais de 20 km desde o setor leste do Vulcão Tenorio até o Vulcão Arenal em seu extremo sudeste. Está associada a um evento sísmico de Laguna de Cote em outubro de 1911 de magnitude de 6,5 na escala Richter.

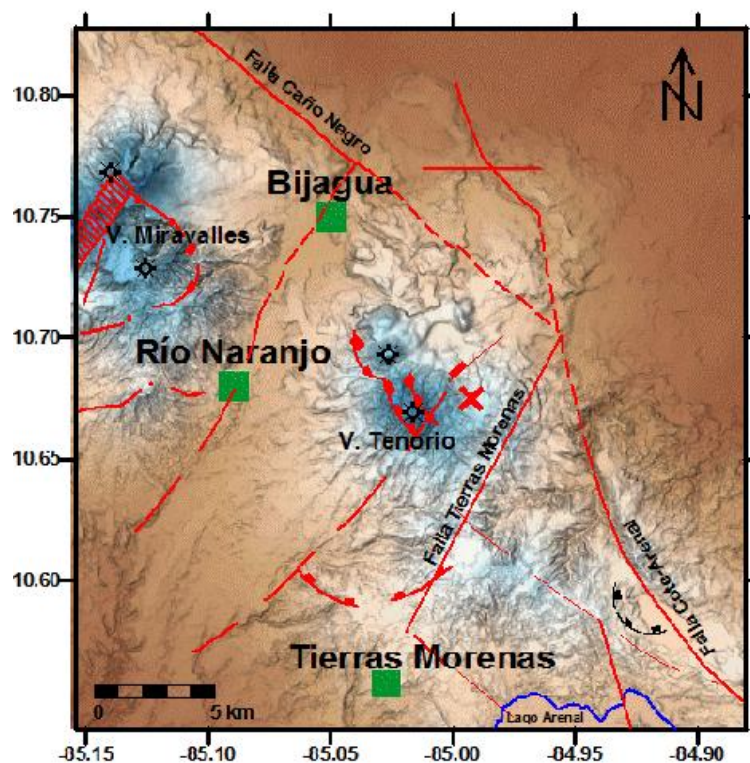


Figura 4 - Localização das falhas neotectônicas mais importantes dos arredores dos vulcões Tenorio, Montezuma e Miravalles, além das principais cidades da região (Bijagua, Río Naranjo e Tierras Morenas). Figura cedida por Waldo Taylor.

Segundo Taylor *et al.* (2002), a falha Caño Negro é considerada normal, podendo estar associada com atividades sísmicas do tipo enxame. Está localizada no setor noroeste dos maciços vulcânicos Rincón de la Vieja – Santa Maria e Miravalles terminando no Vulcão Tenorio. Seu rumo é N50W e é a falha mais extensa da região. Está caracterizada por uma escarpa bem retilínea em nível regional; mesmo com mudanças locais de rumo. Sua forma é retangular e triangular segundo NE, tendo altura máxima de escarpa entre 200 a 300 metros. Em alguns setores pode-se observar várias gerações de faces, o que indica vários pulsos de atividades tectônicas (Taylor *et al.*, 2002).

A Falha Tierras Morenas se estende da comunidade Tierras Morenas a sul até interceptar com as Falhas Cote-Arenal e Caño Negro a norte. Tem extensão de 15 km e é uma falha transcorrente sinistral com rumo NE-SW. Tem apresentado atividade sísmica do tipo enxame desde 1988. O maior sismo relacionado à falha foi de 3,8 de magnitude na escala Richter (Taylor *et al.*, 2002).

A área do PNVT é dominada pelos edifícios vulcânicos do Tenorio e do Montezuma, com 1.916 e 1.486 metros, respectivamente. Além destes, o que controla a geomorfologia local são seus diversos derrames de lava e algumas outras elevações locais, como o morro Carmela, as serras Chiquero e Vieja Dormida. As altitudes mínimas estão em torno dos 170 m, a NE.

Também em função das temperaturas amenas, alta pluviosidade e densa vegetação, os solos são espessos e contêm grande quantidade de argila oriunda do intemperismo do substrato rochoso. Não há nenhum estudo específico sobre os solos do Parque, mas em campo pôde-se perceber que a espessura passa dos 8 metros em áreas menos inclinadas.

Segundo a administração do Parque (Facuri, Silva e Taylor, 2010a), o complexo é um importante marco divisor dos climas típicos do Pacífico e do Caribe, sendo mais influenciado pelo segundo deles. O encontro destes climas e a densa vegetação proporcionam uma média pluviométrica anual muito alta, variando entre 3.500 e 6.000 mm (segundo a administração do PNVT), com média de 3.744 mm (entre 1976 e 1986), concentrados entre maio e janeiro. Os ventos predominantemente ocorrem de E para W na maior parte do ano. O Parque apresenta um clima ameno, devido à altitude, com temperaturas médias de 17,5°C, mínimas médias de 15°C e máximas médias em torno dos 24°C, de acordo com o Sistema Nacional de Áreas de Conservación (2009).

Por ter grande média pluviométrica, a rede de drenagem é bem densa e radial aos vulcões. O PNVT é o local de nascimento dos principais rios da região, como os rios Tenorio, Buenavista, Corobici, Samem e Frío. Muitos deles têm a forma de seu leito determinada pelos derrames de lava. Além disso, devido à alta declividade, estes não são meandrantés, mas sim rios entrelaçados e com barras laterais e centrais bem desenvolvidas e preenchidas por clastos de grandes dimensões, mostrando tamanha energia que podem possuir em períodos mais chuvosos.

A vegetação do Parque, em geral, é latifoliada e muito densa, exceto algumas áreas em seus limites e em partes dos cumes dos vulcões. Segundo o Sistema Nacional de Áreas de Conservación (2009), a flora é dividida em 5 tipos: floresta tropical muito úmida, floresta tropical de transição muito úmida pré-montanhosa, floresta pluvial pré-montanhosa (com maiores extensões), floresta pluvial de montanha baixa e floresta muito úmida pré-montanhosa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Estudos de susceptibilidade a escorregamentos são caracterizados por processos que estimam a probabilidade de novos escorregamentos, tomando como base as características físicas do terreno (Vahidnia *et al.*, 2010). De forma adicional, frequentemente são consideradas correlações entre escorregamentos já ocorridos, características importantes do terreno, bem como distribuição. Entretanto não há uma sequencia ou padrão de procedimentos a seguir. Por esta razão, muitas técnicas diferentes são utilizadas na determinação de probabilidades (Ercanoglu e Gökceoglu, 2004; Vahidnia *et al.*, 2010).

Todo trabalho estatístico ou probabilístico de mapeamento e/ou análise de susceptibilidade a escorregamentos deve, primeiramente, coletar a maior e melhor quantidade de dados disponíveis sobre a área de estudo (Ercanoglu e Gokceoglu, 2004; Nandi e Shakoor, 2009; Vahidnia *et al.*, 2010; Ilanloo, 2011). A confiabilidade e acurácia dos dados são de suma importância para um bom mapeamento. O grau de acurácia depende principalmente da quantidade e qualidade dos dados disponíveis, a escala do mapa em que está se trabalhando, metodologias de análise e modelagem (Vahidnia *et al.*, 2010).

O método de trabalho neste estudo foi dividido nas seguintes partes: (a) aquisição e organização de dados (características do terreno), (b) modificação e interpretação dos dados (fotointerpretação e trabalhos computacionais), (c) geração de novos dados (estatísticos) e (e) análise, importância e correlação com os escorregamentos da área. O processo desde a aquisição dos dados até a extração dos resultados e análise estatística final está compilado na Figura 5.

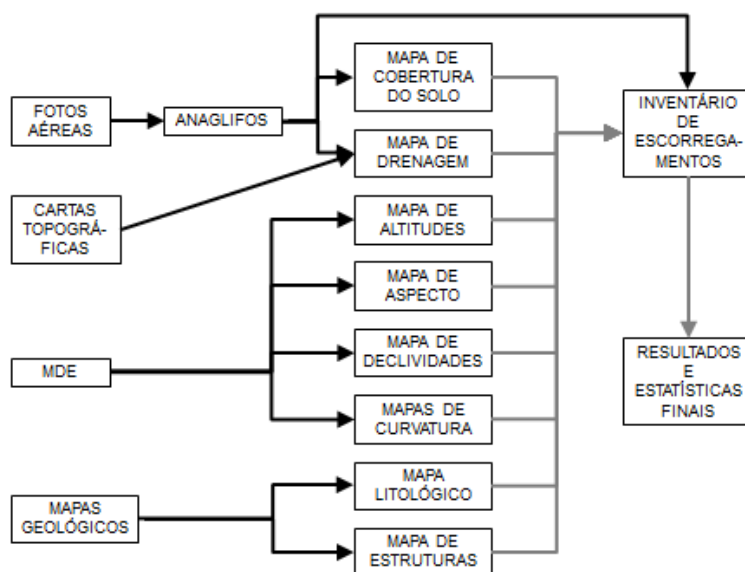


Figura 5 - Fluxograma da metodologia utilizada, desde a aquisição dos dados até os resultados finais.

Aquisição de dados

A fase da coleta de informações se fez por meio de uma pesquisa em dados que o autor já possuía sobre a área (fotografias aéreas, dados climáticos, mapas topográficos e geológicos, incidência e distribuição sísmica), observações de campo e Modelos Digitais de Elevação (MDE).

Os trabalhos de campo foram realizados entre janeiro e fevereiro de 2010, com duração total de um mês. O objetivo principal destes trabalhos foi reconhecer a região e

coletar amostras a fim de produzir um mapa vulcanoestratigráfico da região norte do PNVT e vizinhanças. Adicionalmente foram reconhecidas e assinaladas sete áreas de movimentos de massa, seis as quais dentro e uma fora do Parque. Os eventos dentro dos limites do PNVT são de menor escala do que o de fora, como quedas (*falls*) de matacões, rastejo (*creep*) de solo e pequenos escorregamentos planares ou translacionais (*translational slides*). Em um ponto as margens do córrego Achiote, próximo ao morro Olla de Carne, a menos de três quilômetros a norte dos limites do Parque, há um escorregamento rotacional ou circular (*rotational slides*), que foi o maior visto em campo (Figura 6).

Como dito antes, foram coletados Modelos Digitais de Elevação (MDEs) a partir do sensor ASTER (GDEM da NASA, retirado do website da Agência Espacial Norte-Americana, asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp). Ilanloo (2011) enfatiza em seu trabalho que muitas vezes esta fase de aquisição de dados pode ser a mais importante de todo um esforço para a mitigação do perigo de escorregamentos.

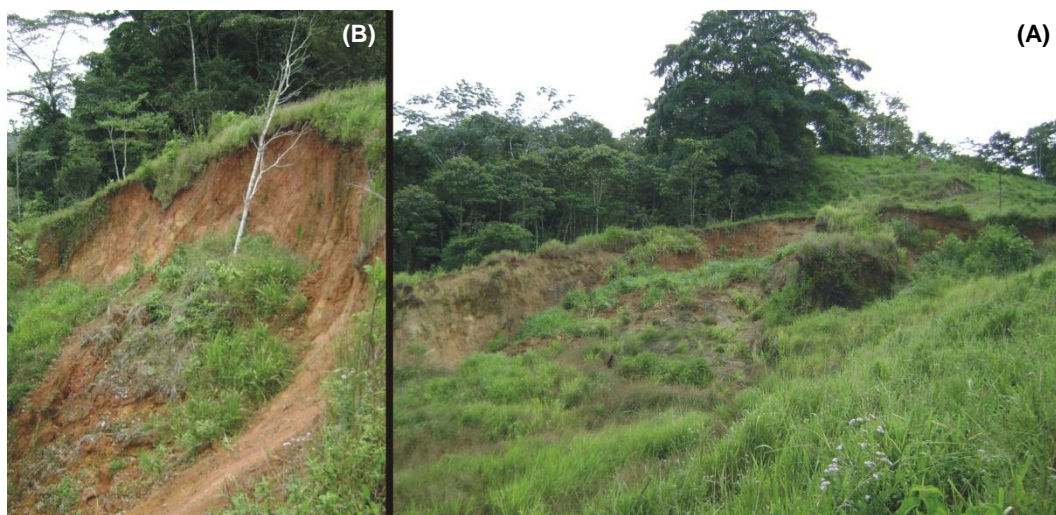


Figura 6 - Escorregamento recente ocorrido a norte do PNVT, próximo ao córrego Achiote. A Figura (A) mostra a visão geral de jusante para montante e a (B) detalha uma zona a montante do movimento de massa.

Trabalhos de fotointerpretação

A outra parte do tratamento de dados foi realizada com fotografias aéreas. Foram utilizadas 19 fotos sem datas de aquisição conhecidas, divididas em duas linhas de voo, em escala aproximada de 1:6.000. As fotografias cobrem cerca de 77% do Parque, sendo que partes da zona nordeste ficaram descobertas. A área em que pelo menos uma fotografia está coberta por nuvens é de 51%, principalmente a leste, onde pouco se pode ver. Quando as fotos aéreas se complementam, 75% de sua área total se torna visível em ao menos uma fotografia ou 57% da área do PNVT. Tomando-se os pares de fotos vizinhas, pouco menos

de 50% da área do Parque está coberta por ifotos que formam pares estereoscópicos passíveis de uma fotointerpretação de qualidade.

Para a fotointerpretação, normalmente, se utiliza um par de fotos sob um estereoscópio de espelhos, interpretando-as traçando suas características em folhas (*overlays*) ou papel vegetal que são colocados imediatamente acima das fotos. Depois são digitalizadas em um programa em SIG (Sistema de Informações Georreferenciadas). Porém neste trabalho, uma metodologia alternativa para fotointerpretação foi utilizada (Facuri e Silva, 2012). Esta consiste em criar anaglifos digitais e os interpretar diretamente em meio computacional.

Anaglifos são resultados da superposição de um par de imagens estereoscópicas em cores complementares que, juntas, dão a sensação de relevo ou terceira dimensão, como com a utilização de estereoscópios de espelhos (Figura 7). Aqui, eles foram criados no programa StereoPhoto Maker (versão 4.34) a partir da superposição das fotografias aéreas que foram digitalizadas ou que já foram inicialmente tomadas em formato digital. A superposição foi feita de acordo com parâmetros de correção e ajustes definidos pelo usuário. Basicamente se criou uma imagem que uniu duas seções das fotos que apresentavam superposição, porém cada foto aparece na imagem de uma cor diferente (ciano ou vermelho), o que cria a sensação de tridimensionalidade.

Foram gerados 23 anaglifos, pois provavelmente por distorções nas fotografias ou nas linhas de voo, foi necessária mais de uma imagem por par estereoscópico. Em seguida, as imagens foram georreferenciadas no programa ArcMap (versão 10) e fotointerpretados em um esforço que durou algumas semanas. Segundo Galli *et al.* (2008), o tempo de interpretação por área é proporcional à qualidade do resultado. Os primeiros frutos foram a produção do inventário de escorregamentos, juntamente com os mapas de cobertura de solo e drenagem (complementando o mapa feito a partir da carta topográfica) como *shapefiles* de polígonos e linhas, respectivamente. O mapa de drenagem feito desta forma é uma complementação fotointerpretada das cartas topográficas que apresentam enormes áreas em branco com a representação de nuvens (*nubes*), juntamente com a análise de drenagens perenes.

O primeiro passo em qualquer avaliação e gerenciamento de danos por escorregamentos é um mapa inventário de eventos que dê as localizações e delineamentos de eventos já ocorridos (Kamp *et al.*, 2008). Muitos autores dizem que este é um dos parâmetros (ou passos) mais importantes e temporalmente custosos de todo um esforço para o zoneamento, análise e mitigação de escorregamentos (Guzzetti *et al.*, 2000 *apud* Ercanoglu e Gökceoglu, 2004; Duman *et al.*, 2005; Weirich e Blesius, 2007; Cascini, 2008; Galli *et al.*, 2008; van Westen *et al.*, 2008; Nandi e Shakoor, 2009; Harp *et al.*, 2011). Neste

trabalho foi desenvolvido um inventário de escorregamentos com três classes (*layers*) de eventos: deslizamentos muito antigos, antigos e recentes. Eles foram diferenciados pela cobertura vegetal (textura), pela feição morfológica e cor, sendo que cada corpo é representado por um polígono e posteriormente agrupados em um *shapefile*. O inventário não considerou a possibilidade de quedas (*falls*) ou arraste (*glide*) de blocos devido à resolução espacial das fotos relativamente baixa.

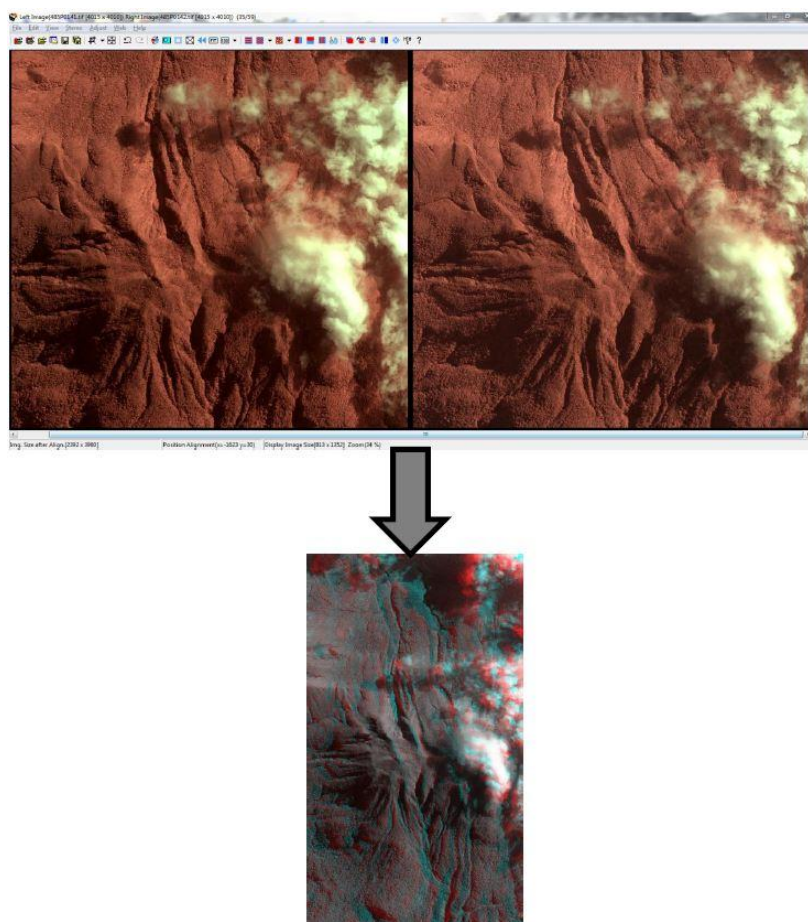


Figura 7 – Exemplo da criação de anaglifos a partir das fotos aéreas processadas no programa StereoPhoto Maker.

Integração e análise dos dados

Os SIGs (Sistema de Informações Georreferenciadas) são ferramentas analíticas básicas e importantes que integram alguns modelos convenientes para o mapeamento de perigo a escorregamentos; são muito eficientes para o gerenciamento e manipulação de dados espaciais muito necessários nesses casos (Lan *et al.*, 2004; Wang, Xie e Du, 2009). Por isso, a maior parte dos trabalhos de processamento de dados foi feita no ArcMap (versão 10). O primeiro deles consistiu em georreferenciar todos os mapas que já estavam

disponíveis (topográficos e geológicos), no qual as características mais importantes para o estudo foram vetorizadas, como a drenagem, limites do PNVT e pontos altimétricos cotados.

Para a compilação dos dados iniciais foram utilizados quatro mapas topográficos em escala 1:50.000 (Miravalles, Guatuso, Tierras Morenas e Arenal) e três mapas geológicos (de Civelli, 2005; Facuri, Silva e Taylor, 2010b, além de um mapa cuja origem e data são desconhecidos, fornecido por geólogos locais).

Posteriormente, o MDE foi trabalhado em SIG, com acurácia vertical de 20 metros e horizontal de 30 metros e pixels de 30 por 30 metros. A partir dele foram confeccionados os mapas de declividade, direção e curvatura das encostas e o de altimetria no formato RASTER. Adicionalmente, o fundo de todos os mapas é o relevo sombreado gerado pelo ArcMap através destes MDEs.

Partindo do inventário de escorregamentos, foi feita uma extensa análise estatística no ArcMap para se saber exatamente quais as características de terreno mais frequentes nos escorregamentos. O tratamento posterior, cálculo e manipulação destes dados foi feita usando o software Microsoft Excel© (versão 2010).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Introdução

A estrutura deste trabalho não é tradicional, ou seja, dividida em revisão bibliográfica, resultados e discussão. Para maior comodidade de leitura e melhora na apresentação geral do trabalho, os três principais tópicos do texto foram divididos dentro dos parâmetros do terreno considerados importantes para a ocorrência de escorregamentos.

Para um levantamento de susceptibilidade a escorregamentos, diversas camadas de dados espaciais (parâmetros, como declividade ou cobertura do solo) são necessárias para avaliar as zonas susceptíveis a escorregar. Quando aplicado a qualquer modelo, a definição dos critérios que controlam o grau de susceptibilidade é muito importante, pois definem e circunscrevem quantitativa e qualitativamente os parâmetros a serem analisados. Dessa forma, qualquer parâmetro pode ser importante com respeito à ocorrência de escorregamentos para uma região, porém os mesmos parâmetros podem não ter importância para as outras (Ilanloo, 2011). Caso afirmativo, eles podem não ser importantes da mesma forma ou com a mesma intensidade. Van Westen *et al.* (2008) dizem que numa análise de susceptibilidade a escorregamentos a seleção de parâmetros difere, dependendo

da escala da análise, em função das características da área de estudo, do tipo de deslizamento e dos mecanismos de rompimento das encostas.

Ainda de acordo com van Westen *et al.* (2008) os fatores envolvidos na análise de movimentos gravitacionais de massa podem ser divididos em quatro grupos: dados de inventários de eventos, feições ambientais (características locais), fatores desencadeadores (que dão início ao processo) e elementos em risco (sociedade e ambiente). Os dois primeiros agentes foram incluídos neste estudo, o que já possibilita a criação de mapas de susceptibilidade a escorregamentos. O terceiro agente tem relação temporal de probabilidade, sendo necessário para o mapeamento de perigo (*hazard*). O último agente é necessário para o mapeamento de risco a escorregamentos, pois além de levar em conta os elementos anteriormente citados, ainda considera as propriedades e sua infraestrutura, o meio ambiente e/ou pessoas sujeitas a este desastre.

Kawabata e Bandibas (2009) usaram três formas de comparar os dados com a intenção de avaliar sua importância frente a abundância de escorregamentos e à área total. A primeira forma mostra a porcentagem da área de trabalho coberta por cada classe de cada parâmetro analisado, chamada de Frequência de Distribuição (FD), ou seja, uma maneira de se conhecer a área de estudos como um todo, saber a divisão desta área nas diversas classes de cada parâmetro escolhido.

A segunda maneira foi chamada de Incidência Absoluta (IA), que é a porcentagem de cada classe com escorregamentos em relação às outras classes da área total dos movimentos de massa deste mesmo parâmetro. Ela é uma forma de se conhecer os escorregamentos, onde eles mais ocorrem comparados ao seu total.

A Incidência Relativa (IR) é a última forma de avaliação encontrada por estes autores. Ela é a porcentagem normalizada da área com escorregamentos em cada classe com movimentos de massa em cada parâmetro (o IA) com relação à área total de estudos dentro de cada uma dessas mesmas classes (o FD).

Neste estudo, as maneiras de avaliar e comparar a ocorrência e abundância dos escorregamentos seguiram os trabalhos de Kawabata e Bandibas (2009) e foram feitas segundo as seguintes equações:

$$FD = \frac{C_p}{A_p}; \quad IA = \frac{C_e}{A_e}; \quad IR = \frac{C_e}{C_p}$$

, onde C_p é a área de cada classe de um parâmetro para a total do PNVT, C_e é a área de cada classe de um parâmetro para a área total dos escorregamentos, A_p é a área total do Parque e A_e a área total dos movimentos de massa.

Foram gerados dois gráficos para cada característica do terreno baseados nos trabalhos destes autores. O primeiro deles mostra o FD e os IAs de cada idade de escorregamentos. Adicionalmente, é apresentada uma forma de comparação dos dados gerais do Parque com os dados dos eventos, ou seja, é uma maneira de se mostrar as abundâncias absolutas de cada grupo.

O segundo traz o FD do PNVT contra os IRs de cada grupo de movimentos de massa. Esta seria uma boa visão comparativa entre um *background* (que seria o FD) e os escorregamentos de forma proporcional. Possivelmente é uma forma de se estabelecer os pesos primordiais em um mapeamento de susceptibilidade a escorregamentos, pois quanto maior a discrepância entre o FD e o IR, mais significativa é essa classe para a ocorrência de rupturas nas encostas. A soma dos IRs não normalizados também pode mostrar um peso relativo de cada parâmetro, supostamente sendo os maiores valores os com maior peso, ou seja, esta soma mostra quantas vezes a concentração de todos os escorregamentos em todas as classes é maior do que a distribuição do Parque, também de cada classe.

Inventário de escorregamentos

Uma das principais razões para o preparo de inventários de escorregamentos é a determinação da susceptibilidade a escorregamentos, de modo que o perigo ao redor dos movimentos de massa já verificados se torne mais aparente. Muitos métodos são propostos para determinar a susceptibilidade e a maioria deles precisa de um inventário, o que deixa claro sua importância como base deste tipo de análise.

Inventários de escorregamentos são ferramentas importantes e devem ter informações nas atividades dos eventos e, portanto, precisam de dados multi-temporais sobre áreas maiores. Segundo van Westen *et al.* (2008), um bom inventário de escorregamentos, além de incluir informações espaciais, também deve incluir sua frequência temporal. Porém os altos custos de obtenção de imagens de muito alta resolução de áreas particulares em diversas datas, antes e depois da ocorrência de eventos desencadeadores de movimentos, continua sendo um entrave para as nações em desenvolvimento. Principalmente em regiões tropicais, a aquisição de tais imagens é frequentemente prejudicada pela presença persistente de uma grande cobertura de nuvens por um longo período e durante a maior parte do ano, como é o caso do PNVT. Além das nuvens, outra fonte de problemas foi a disponibilidade de fotografias de apenas uma data.

De acordo com Galli *et al.* (2008), devido às múltiplas técnicas utilizadas para compilar os inventários, estes acabam se tornando produtos subjetivos. Sua qualidade final é dependente da experiência e habilidade dos pesquisadores, da complexidade da área de

estudos e da plenitude e confiabilidade da informação disponível, aí incluindo as fotografias aéreas usadas. Os métodos usados influenciam muito a acurácia do inventário, pois dependem não só da resolução das fotos aéreas, mas também da escala, do tipo, da data, do número de fotografias aéreas usadas para cumprir os estudos, do total de trabalho de campo associada e do contraste relativo entre os elementos da imagem, no caso de fotos em preto e branco, e do contraste em cores, no caso de fotografias coloridas (Harp *et al.*, 2011).

Adicionalmente Galli *et al.* (2008) consideram que o tipo de estudo acerca dos inventários (reconhecimento, geomorfológico ou multitemporal, por exemplo), o qual é função do tempo disponível para a investigação, pode também afetar a acurácia do mapeamento. Seu experimento sugere que quanto maior o tempo disponível para a investigação, melhor o resultado do mapeamento. A técnica de fotointerpretação e a experiência do pesquisador melhoram com o tempo, o que é muito relevante quando o inventário de reconhecimento se baseia primordialmente na aparência morfológica dos escorregamentos, como foi utilizado parcialmente neste trabalho.

Os erros na produção dos inventários estão associados às (1) incertezas ligadas com a identificação dos escorregamentos, a (2) erros de elaboração e posicionamento introduzidos na transferência das informações das fotografias aéreas para o mapa base e aos (3) erros de digitalização e outros enganos introduzidos na construção da base de dados cartográficos digitais (Galli *et al.*, 2008). Os estudos de van Westen *et al.* (2008) mostraram que grandes diferenças entre inventários ilustram o alto grau de incerteza destes dados tão importantes. Sua confiabilidade tem um efeito muito grande em mapeamentos posteriores feitos a partir dele, principalmente quando o método estatístico é utilizado.

Van Westen *et al.* (2008) mostram que as incertezas são bem mais frequentes quando não há um banco de dados dos escorregamentos regionais, quando as imagens aéreas não são multitemporais ou são adquiridas em datas não muito adequadas.

A Figura 8 mostra uma frequência hipotética de escorregamentos e os principais eventos desencadeadores com seu período de retorno (onde as setas cinzas são terremotos e as pretas são chuvas). Para esta área, cinco conjuntos de imagens diferentes estão disponíveis (de A a E na figura). Para capturar os movimentos de massa relacionados com um evento desencadeador em particular, é importante mapear o mais breve possível depois da ocorrência desse evento. Por exemplo, as imagens adquiridas em C e E podem ser usadas para mapear escorregamentos gerados por eventos chuvosos com diferentes períodos de retorno. Entretanto as imagens B e D foram tomadas algum tempo depois que o mecanismo desencadeador ocorreu; portanto os movimentos de massa já foram cobertos por vegetação e são mais difíceis de serem interpretados, ou ocorreram após uma

sequência de diferentes eventos geradores, o que torna difícil a separação dos escorregamentos.

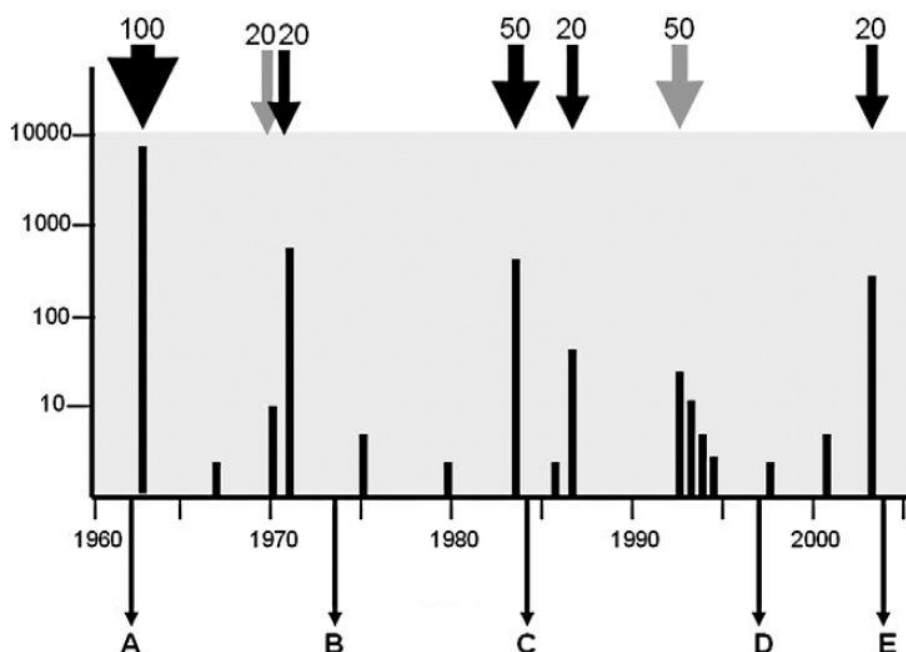


Figura 8 - Exemplo hipotético da importância de imagens multitemporais para a análise completa de movimentos de massa onde as setas pretas indicam grandes eventos chuvosos e as cinzas, terremotos. O número acima das setas é o tempo de recorrência de cada evento, em anos. Retirado de van Westen *et al.*, 2008.

Apresentação dos resultados

Como dito anteriormente, apenas 50% do PNVT pôde ser fotointerpretado com imagens tridimensionais devido à cobertura de nuvens, outros 7% foram interpretados com o uso de apenas uma fotografia, ou seja, sem estereoscopia. Mesmo assim um mapa com o inventário de movimentos de massa (Anexo 1) foi gerado contabilizando em sua espacialização desde a área fonte (“montante” dos eventos, onde se iniciaram os movimentos de massa) até onde terminam (“jusante” dos eventos, locais de deposição do material retirado a “montante”). Eles foram divididos em três classes de acordo com sua idade aparente: recentes, antigos ou muito antigos, como mostra a Figura 9 e a Tabela 1.

As três idades de escorregamentos foram diferenciadas pelo estágio de evolução natural de escorregamentos, onde há a tendência de estabilização e suavização de sua morfologia, bem como a certeza do pesquisador quanto à veracidade de tais formas serem eventos reais.

Foram contabilizados 58 movimentos de massa classificados como recentes, 114 como antigos e 76 como muito antigos, totalizando 248 eventos. Estes compreendem uma área de 2.625.095 m², sendo 317.277,1 m² classificados como recentes, 1.225.978 m² como

antigos e 1.081.839,5 m² como muito antigos, respectivamente 12,09%, 46,70% e 41,21% do total de escorregamentos.

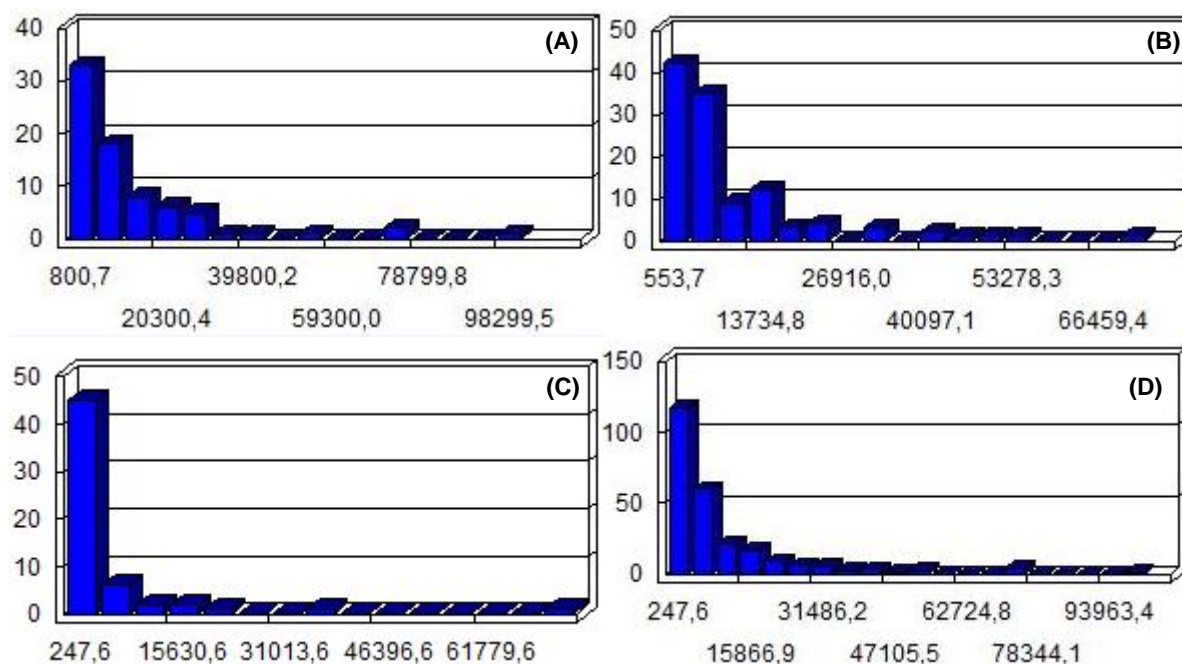


Figura 9 - Histogramas mostrando a frequência do número de eventos em relação à sua área (em m²) para escorregamentos muito antigos (A), antigos (B), recentes (C) e para o total (D).

O Parque tem uma área total de cerca de 129.315.510 m², sendo que 2,03% destes estão cobertos por movimentos de massa, onde 0,25% do total são recentes, 0,95% são antigos e 0,84% são classificados como muito antigos.

Tabela 1 - Características dos movimentos de massa identificados no inventário com relação ao seu tamanho (área) e quantidade.

ESCORREGAMENTOS	Recentes	Antigos	Muito Antigos	Total
Área (m ²)	317.277,1	1.225.978,6	1.081.839,5	2.625.095,2
Quantidade	58	114	76	248
Menor (m ²)	247,6	553,7	800,7	247,6
Maior (m ²)	74.541,3	74.076,6	100.813,0	100.813,0
Média (m ²)	5.519,9	10.756,5	14.234,7	10.597,7
Desvio padrão	11.089,4	12.278,3	17.941,5	14.380,4

Como mostra a Tabela 1, dentre os eventos recentes, a média de tamanho foi de 5.519,9 m², com o menor identificado medindo cerca de 247,6 m² e o maior, 74.541,3 m². O desvio padrão foi de 11.089,4. Os escorregamentos antigos têm 10.756,5 m² em média, com desvio padrão de 12.278,3. O maior deles possui 74.076,06 m² e o menor tem 553,7 m². Com relação aos escorregamentos muito antigos, a média foi de 14.234,7 m², com desvio padrão de 17.941,5, tamanho mínimo de 800,7 m² e máximo de 100.813 m².

Discussão

O inventário realizado no presente estudo mostra que os escorregamentos se concentram majoritariamente na parte NW do Parque, com alguns episódios a S e raros a SE devido à qualidade das fotografias aéreas. Nelas há muita cobertura de nuvens na região centro-oeste o que impediu a visão estereoscópica do terreno. A concentração pode se dever à ausência de nuvens no local com mais eventos descritos, o que pode ter aumentado a quantidade de movimentos interpretados, pois houve uma melhor visualização e análise deste local.

Além disso, como este passo do trabalho tem certo caráter subjetivo (segundo Galli *et al.*, 2008), há incerteza quanto à classificação dos eventos em relação à idade relativa e sua própria existência, também devido à pouca experiência do pesquisador. Outras hipóteses para esta concentração podem ser a maior altitude da região, os maiores índices de declividade e/ou a ocorrência de um litotipo específico.

Este estudo usou uma metodologia que procurou evitar este terceiro tipo de erro, uma vez que a fotointerpretação dos escorregamentos foi feita diretamente em meio digital. O primeiro tipo de erro, porém, não pode ser evitado em inventários feitos a partir de fotointerpretação, uma vez que esta forma de trabalho é, de certa forma, subjetiva, dependendo diretamente do julgamento de cada pesquisador. Incertezas com relação ao georreferenciamento dos anaglifos podem ter contribuído para o segundo tipo de erro citado. Ainda a respeito da qualidade dos inventários, Galli *et al.* (2008) completam dizendo que "inventários de escorregamentos são geralmente incompletos. As razões para isso são diversas, e determinar quão completos estão não é uma tarefa fácil".

Altitude

A importância e influência da altimetria nos escorregamentos não é bem clara na literatura consultada, porém muitos autores a utilizam como parâmetro em seus mapas de susceptibilidade a escorregamentos (Ercanoglu e Gökceoglu, 2004; Lan *et al.*, 2004; Demoulin e Chung, 2007; Kamp *et al.*, 2008; van Westen *et al.*, 2008; Kawabata e Bandibas, 2009; Wang, Xie e Du, 2009; Ilanloo, 2011). Não há unanimidade com relação às classes utilizadas, ou seja, cada autor utiliza um intervalo de altitudes, a depender de sua metodologia. A altitude não afeta a quantidade de eventos diretamente, mas pode controlar vários fatores que os controlam como a vegetação, drenagem, declividade e erosão do solo (Lan *et al.*, 2004). Este fator pode estar relacionado com fatores climáticos (diferenças nos ventos, chuvas e temperatura) e geológicos e, conseqüentemente, com a cobertura vegetal.

Apresentação dos resultados

O mapa altimétrico (Anexo 2) produzido a partir do MDE no programa ArcMap mostrou que, assim como as cartas topográficas, que as maiores altitudes são as dos vulcões Tenorio e Montezuma, respectivamente. Adicionalmente, há elevações consideráveis aos arredores dos edifícios vulcânicos, no centro e no sul do Parque. As menores altitudes se concentram a NE e no extremo E (até 180m de altitude mínima).

As altitudes foram agrupadas em 10 classes com intervalos de 200 metros cada (Tabela 2) para correlacionar os dados ao inventário de escorregamentos (Figura 10).

A Figura 10A mostra que os escorregamentos recentes e antigos não obedecem o padrão de altitudes do Parque, uma vez que a abundância deles ocorre de forma diferente da distribuição das altitudes totais. De outra forma, os eventos muito antigos apresentam certa discrepância do padrão do PNVT, mas são um tanto semelhantes. O que se pode notar com um olhar mais detalhado é um certo deslocamento da distribuição de movimentos de massa, ou seja, conforme sua idade relativa diminui, a altitude geral aumenta entre eles.

Tabela 2 - Divisões das áreas dos escorregamentos e do PNVT em classes de acordo com sua altitude. Os valores preenchidos em cinza representam os mais significativos de cada grupo.

ALTITUDES	<200 m	201-400 m	401-600 m	601-800 m	801-1000 m
Recentes	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	11,8%
Antigos	0,0%	0,0%	0,0%	3,0%	12,5%
Muito antigos	0,0%	0,0%	0,0%	7,9%	28,0%
PNVT	0,1%	7,1%	13,7%	21,7%	26,3%

ALTITUDES	1101-1200 m	1201-1400 m	1401-1600 m	1601-1800 m	1801-2000 m
Recentes	9,2%	15,9%	28,0%	33,2%	0,0%
Antigos	16,5%	12,5%	26,4%	29,2%	0,0%
Muito antigos	33,4%	16,5%	9,2%	5,0%	0,0%
PNVT	18,3%	7,5%	3,3%	1,7%	0,3%

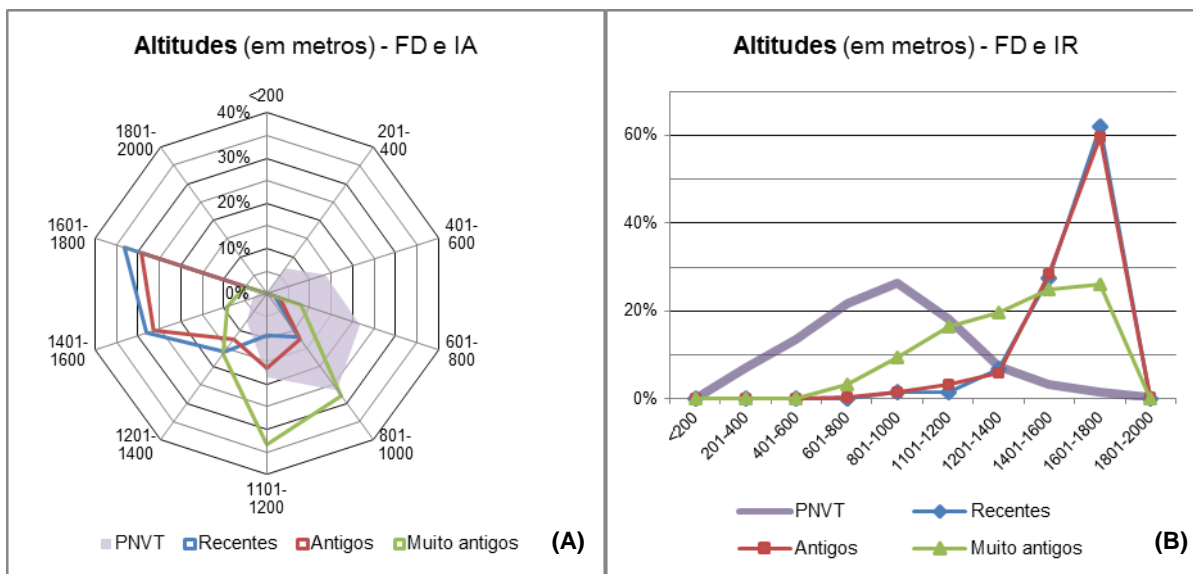


Figura 10 - Gráfico comparando a distribuição areal em classes altimétricas de cada grupo de escorregamentos com a mesma distribuição para a área total do PNVT (A). Gráfico comparativo proporcional entre o IR (valor normalizado da divisão da distribuição dos escorregamentos em classes de altitudes com a distribuição da área do Parque nas mesmas classes) e do FD (distribuição da área do PNVT em classes altimétricas) (B).

Discussão

A Figura 10B esclarece a componente desproporcional entre o Parque e a altitude dos escorregamentos. É possível perceber que as altitudes mais favoráveis aos escorregamentos recentes e antigos foram entre 1400 e 1800 metros, onde houve um aumento muito grande com relação à distribuição altimétrica total do PNVT. Se para estas idades de eventos o peso do fator altitude foi muito grande, sendo que a soma dos IRs foi de 30,63 para os recentes e 28,02 para os antigos, para os muito antigos ele não parece ter comportamento tão semelhante. A Figura 10B apresenta uma clara discrepância entre as classes altimétricas de ocorrência de movimentos de massa e as classes totais do Parque, porém de menor intensidade que as anteriores. O IR total para os eventos muito antigos é igual a 11,10, ou seja, a importância da altitude é quase três vezes menor do que para os outros grupos de idades.

A partir do mapa altimétrico é possível ver as direções preferenciais dos fluxos de lava dos vulcões e as depressões cavadas pelos maiores rios, além de outras feições como pequenas cadeias montanhosas que, como a maioria dos lineamentos na América Central, têm direção NW-SE.

Levando-se em conta a idade dos três grupos de escorregamentos, no PNVT as altitudes proporcionalmente mais atingidas por escorregamentos foram entre 1200 e 1800 metros, ou seja, praticamente as zonas mais elevadas, concordando com os resultados de Ilanloo (2011). Porém nos estudos de Ercanoglu e Gökceoglu (2004) e Kamp *et al.* (2008) as áreas mais atingidas proporcionalmente foram as mais baixas em relação ao total.

Direção das encostas (aspecto)

O aspecto ou direção da encosta se refere à orientação a qual a face da encosta está virada, ou seja, a direção angular (em relação ao Norte) para a qual uma seção da superfície está apontando. Neste trabalho o mapa de direções de encosta foi gerado no ArcMap, que calcula a direção do declive de uma célula do DEM em relação aos seus vizinhos. O resultado é um mapa com sua tabela de valores onde cada célula tem um valor entre 0 e 360 graus, onde 0 e 360 graus representam um segmento da encosta orientado para Norte, por exemplo.

Para Kamp *et al.* (2008) a direção da encosta tem um efeito importante na ocorrência de escorregamentos porque está relacionado com fatores como insolação (intemperismo), condições do tempo (precipitação, neve), cobertura do solo (floresta, gramíneas, arbustos, agricultura), e condições do solo (capacidade de infiltração). Porém, para Ilanloo (2011), o mapa de aspectos é majoritariamente relacionado com a tendência fisiográfica e/ou com a precipitação recebida do que com a direção ventos predominantes. De outra forma, para Lan *et al.* (2004), a exposição ao sol é o fator que dá importância à direção, uma vez que encostas que recebiam menos luz do sol apresentavam maior número de eventos em sua área de estudos. Estes autores ainda concluíram que isso se deve a menor temperatura, mais alta umidade, espessura de solo e vegetação maiores e menor erosão causada pela água em locais mais sombreados.

Apresentação dos resultados

O mapa de aspecto ou direção classificou as encostas de acordo com sua orientação geográfica (Anexo 3). Ele mostrou que a W e S do Parque as direções preferenciais são SW, W e NW, as seções N e NE majoritariamente estão orientadas para N, NE, E e SE.

Em linhas gerais, a Figura 11A mostra que as encostas do PNVT são relativamente bem distribuídas, com relação à orientação geográfica, com algum destaque para concentrações um pouco maiores para NE e E e menores para NW (Tabela 3). Também foi possível destacar três grandes divisores de encostas alinhados a NW-SE e um a NE-SW.

Tabela 3 - Divisões das áreas dos escorregamentos e do PNVT em classes de acordo com sua direção. Os valores preenchidos em cinza representam os mais significativos de cada grupo.

DIREÇÃO	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Recentes	15,3%	17,9%	20,3%	6,1%	14,5%	9,9%	6,6%	9,4%
Antigos	18,0%	10,7%	6,3%	5,6%	4,8%	17,4%	18,2%	19,0%
Muito antigos	7,4%	8,2%	9,0%	4,2%	4,5%	13,5%	26,1%	27,2%
PNVT	13,6%	18,3%	16,7%	12,1%	10,1%	10,3%	10,4%	8,5%

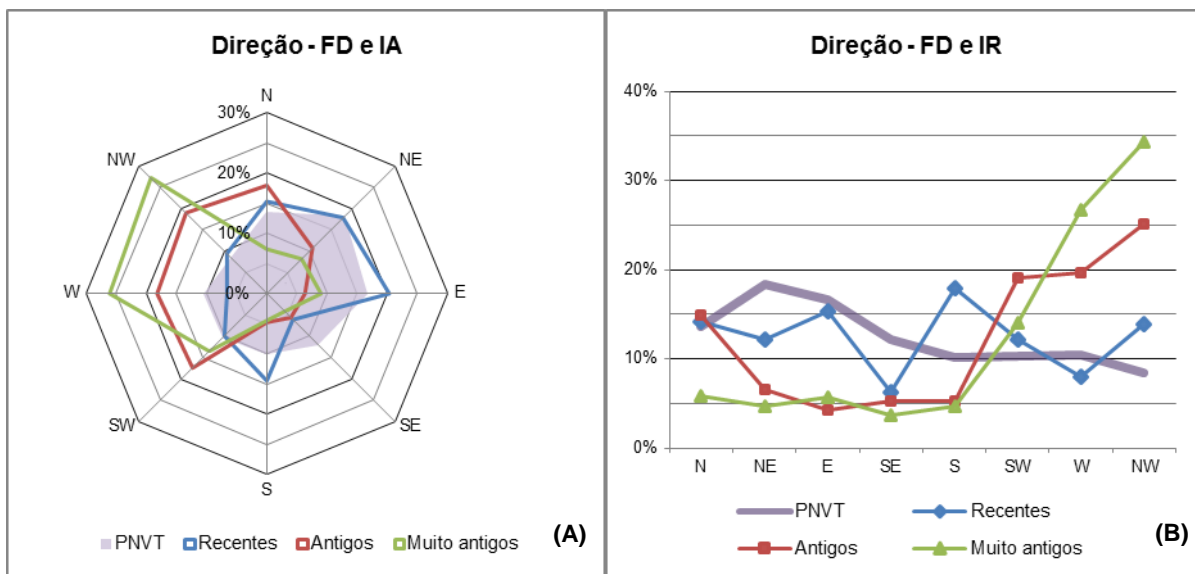


Figura 11 - Gráfico comparando a distribuição areal em classes de direção de encosta de cada grupo de escorregamentos com a mesma distribuição para a área total do PNVT (A). Gráfico comparativo proporcional entre o IR (valor normalizado da divisão da distribuição dos escorregamentos em classes de direções com a distribuição da área do Parque nas mesmas classes) e do FD (distribuição da área do PNVT em classes de direção) (B).

A análise dos escorregamentos mostrou concentrações diferentes para eventos de idades relativas distintas (Figura 11 e Tabela 3). Para os muito antigos houve predomínio dos setores NW, W e SW; os movimentos de massa antigos estão concentrados nas encostas a N, NW, W e SW, parecido com os muito antigos; já os eventos recentes estão mais igualmente distribuídos, com algum destaque para o quadrante E e NE.

Discussão

A Figura 11A mostra que quanto mais recentes os escorregamentos, mais discordantes da distribuição areal do PNVT eles estão. Os eventos muito antigos se concentram em encostas diferentes do padrão do Parque, enquanto os eventos recentes estão muito mais próximos desse padrão. Nota-se certa “rotação” da concentração dos movimentos de massa com relação à idade. Os escorregamentos estão passando de forma gradual de um padrão W e NW no sentido horário até um padrão NE e E, sendo que também há uma menor concentração entre os setores conforme observou-se dos mais antigos aos mais novos.

A Figura 11B apresenta uma certa semelhança entre as três idades de grupos de escorregamentos, onde os antigos e muito antigos estão mais próximos. Ainda é possível observar que, de forma genérica, os setores orientais foram menos favoráveis a escorregamentos, enquanto os ocidentais foram bem mais favoráveis, principalmente a NW. Além disso, de maneira mais detalhada, mais uma vez fica claro que os movimentos de massa antigos e muito antigos apresentam um comportamento similar entre si e diferente

comparado aos eventos recentes. Porém a disparidade é reduzida quando se observa o peso que o fator aspecto tem para cada um dos grupos, quando comparados com o FD do Parque. As somas dos IRs são relativamente parecidas, ou seja, 7,96; 8,90 e 9,34 para os recentes, antigos e muito antigos, respectivamente.

De forma geral, os escorregamentos mais antigos se concentram mais nas faces NW, W e SW, os antigos estão em encostas a N, NW, W e SW e os mais recentes em N, NE, E e S. Enquanto isso, os escorregamentos identificados por Lan *et al.* se concentram em encostas a S, N e NW. Já os de Gökceoglu e Aksoy (1996) foram identificados majoritariamente a N e W. Os eventos estudados por Kamp *et al.* (2008) estavam em encostas a E, SE, S e SW. Os movimentos de massa de Ilanloo (2011) se orientam para S e E enquanto os de Kawabata e Bandibas (2009) se concentraram a W, SW, S, SE e E.

Cobertura do solo

A literatura não é unânime com relação ao papel da vegetação nos escorregamentos. De acordo com Greenway (1987) *apud* Gökceoglu e Aksoy (1996) as raízes da vegetação que penetra no solo ajudam a aumentar a força de cisalhamento, diminuindo a chance de escorregamentos rasos. Outros autores (Ercanoglu e Gökceoglu, 2004; Ilanloo, 2011 e Kamp *et al.*, 2008) mostraram que a maioria dos grandes escorregamentos em suas áreas de estudo ocorreram em áreas onde a vegetação era mais esparsa.

A cobertura vegetal pode contribuir na estabilidade de encostas íngremes pela redução da erosão do solo, reduzindo a infiltração direta da chuva e aumentando a coesão e resistência próxima à superfície do solo. A vegetação mais densa intercepta a chuva direta antes que a gota caia na superfície, reduzindo ou eliminando sua capacidade erosão. Com uma cobertura vegetal densa e uma espessa camada de matéria orgânica depositada no solo, o fluxo hídrico superficial é reduzido em intensidade e velocidade, também contribuindo para a redução velocidade da erosão superficial. Juntamente com estes fatores, os solos orgânicos retêm a umidade da precipitação direta e evaporam a água de volta para a atmosfera (van Westen *et al.*, 2008). O trabalho de Nandi e Shakoore (2009) indicou que a atividade dos escorregamentos diminui com a redução do nível de erodibilidade do solo.

A vegetação nativa é a que melhor protege o solo contra movimentos de massa, pois alguns tipos de vegetação podem ter um efeito adverso na estabilidade de encostas. Árvores instáveis podem iniciar um escorregamento se elas forem tombadas durante condições de ventos fortes (Kazmierczak e Carter, 2010).

Apresentação dos resultados

O mapa de cobertura do solo pode ser comparado com um mapa de cobertura vegetal, uma vez que há pouca contribuição humana dentro dos limites do Parque (Anexo 4). Foi obtido a partir da fotointerpretação dos anaglifos, com a subdivisão da área em quatro classes, a saber: densamente vegetada, vegetada, pouco vegetada e solo ou rocha expostos. Os critérios para dividi-las foram meramente a comparação entre as diversas áreas do PNVT e sua abundância vegetal.

A análise deste mapa (Figura 12) mostra, como já era esperado, que a maior parte do Parque é composta por áreas densamente vegetadas (92,2%), além de 4,8% serem consideradas como vegetadas, 1,7% como pouco vegetadas e 1,4% como tendo solo ou rocha expostos. A Tabela 4 ilustra estes dados em detalhe.

A maior parte das áreas que não são densamente vegetadas está localizada próxima aos limites oeste e sul do Parque, além das encostas mais próximas ao topo dos vulcões com vastas partes medianamente vegetadas.

Com relação aos escorregamentos, sua idade apresenta grande variação com relação à cobertura do solo sobreposta a eles (Figura 12 e Tabela 4). Os eventos recentes e antigos são mais frequentes em associação com zonas pouco vegetadas e solo ou rocha expostos (32,1% e 35,4%, respectivamente), escorregamentos antigos e muito antigos estão em regiões majoritariamente com densa vegetação (58,2% e 94,8%, respectivamente).

Tabela 4 - Divisões das áreas dos escorregamentos e do PNVT em classes de acordo com sua cobertura. Os valores preenchidos em cinza representam os mais significativos de cada grupo.

COBERTURA	Dens. Vegetada	Vegetada	Pouco Vegetada	Solo/Rocha expostos
Recentes	12,4%	20,0%	32,1%	35,4%
Antigos	58,2%	23,8%	12,4%	5,6%
Muito antigos	94,8%	3,2%	1,6%	0,4%
PNVT	92,2%	4,8%	1,7%	1,4%

Discussão

A Figura 12A demonstra os diferentes comportamentos dos grupos de escorregamentos frente à cobertura do solo. Os eventos muito antigos estão aparentemente seguindo o padrão de distribuição do Parque, enquanto os antigos tem o mesmo *trend*, mas com intensidade diferente. Os movimentos de massa recentes apresentam comportamento inverso dos grupos anteriores, já que são menos abundantes em áreas mais vegetadas e mais presentes em áreas de solo ou rocha expostos.

Segundo a Figura 12B mostra que a diferença nos valores de cada grupo de escorregamentos comparado com o FD do PNVT é maior nas áreas densamente vegetadas

e com solo ou rocha expostos. Como foi observado na Figura 12A, as diferenças com relação ao padrão do Parque também se destacam quando se observa a soma dos IRs. Com maior diferença, os eventos recentes somam 49,15 de IRs, os antigos 16,95 e os muito antigos somaram 2,91, mostrando sua semelhança com o padrão normal da área total do PNVT.

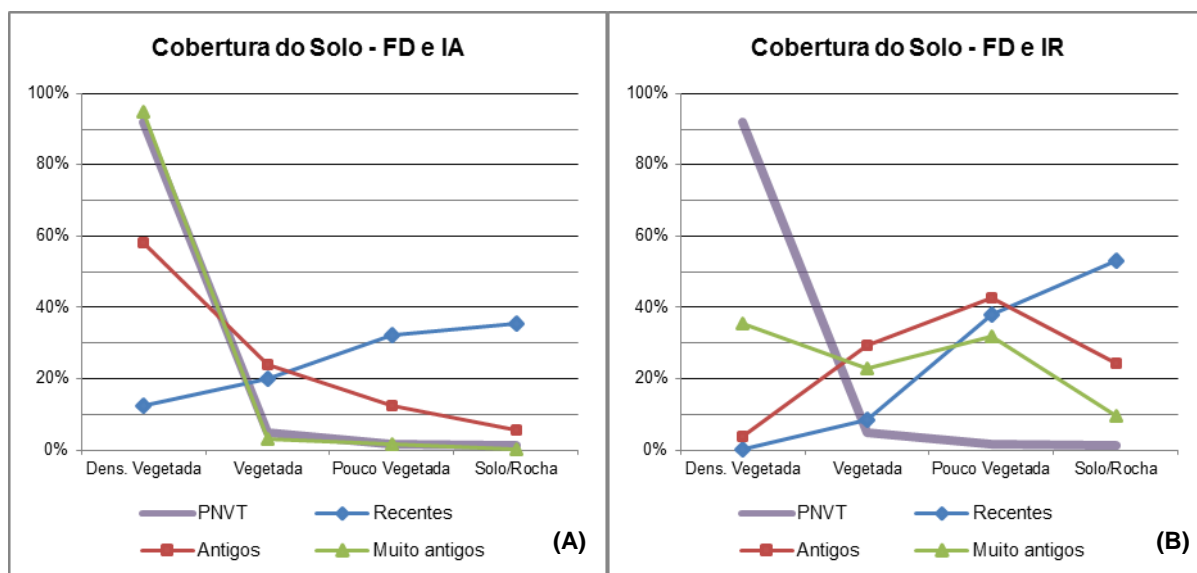


Figura 12 - Gráfico comparando a distribuição areal em classes de cobertura do solo de cada grupo de escorregamentos com a mesma distribuição para a área total do PNVT (A). Gráfico comparativo proporcional entre o IR (valor normalizado da divisão da distribuição dos escorregamentos em classes de coberturas com a distribuição da área do Parque nas mesmas classes) e do FD (distribuição da área do PNVT em classes de coberturas) (B).

Os escorregamentos recentes se mostraram proporcionalmente mais presentes em terrenos com pouca ou nenhuma vegetação. Este resultado se assemelha com o de Ilanloo (2011) e Kamp *et al.* (2008), além de parcialmente com o de Ercanoglu e Gökceoglu (2004) que concluíram que as áreas com maiores índices proporcionais de eventos estava em zonas agrícolas e com média a pouca vegetação.

Os movimentos antigos estão distribuídos de forma semelhante entre áreas vegetadas e sem vegetação, com a maior porcentagem em regiões de vegetação media. Os resultados de Ercanoglu e Gökceoglu (2004) também combinam parcialmente com esta idade de movimentos do Parque.

O trabalho de Nandi e Shakoore (2009) conclui que os escorregamentos em sua área de estudos ocorrem mais em regiões cobertas por florestas do que em outras como com vegetação espaçada, urbana ou agrícola para eventos muito antigos. Escorregamentos nessa faixa estão sob coberturas muito e pouco vegetadas, respectivamente.

O presente trabalho não contou com fotografias aéreas de datas diferentes, portanto os resultados de cobertura do solo podem não corresponder necessariamente a cobertura

na época de ruptura, mas sim a uma cobertura posterior à passagem do evento. Assim como o inventário de escorregamentos, a fotointerpretação da cobertura do solo pode ter sido prejudicada pela abundância de nuvens nos setores central e W do Parque. Para tal, as zonas onde havia problemas como este, foram inferidas como sendo densamente vegetadas, como na maior parte da área vista em campo e nas imagens aéreas mais limpas.

Curvatura

A curvatura do terreno captura variações morfológicas locais, sendo ainda mais útil para identificar áreas de repentina mudança na inclinação ou direção da encosta. Exemplos geológicos de tais variações podem ser explicadas pela variação estrutural ou deposicional de diferentes tipos de rochas, solos e sedimentos na encosta, levando a uma taxa de erosão superficial variável.

Neste trabalho foram gerados dois mapas diferentes de curvaturas com o ArcMap indicando se a encosta é plana, côncava ou convexa. Lee *et al.* (2004) indicaram em seu trabalho que, de forma geral, encostas côncavas têm maior probabilidade de iniciar escorregamentos do que convexas, onde após fortes tempestades, encostas côncavas têm maior quantidade de água acumulada e a consegue reter por mais tempo. Foi notado que este comportamento somente se aplica a áreas pequenas, não à topografia como um todo.

Apresentação dos resultados

Foram feitos dois mapas de curvatura: o de curvatura *planform* ou em seção vertical (Anexo 5) e o de curvatura *profile* ou de "formas planas" (Anexo 6). O primeiro tipo é um mapa que analisa a curvatura do terreno perpendicularmente à direção do fluxo de água e paralela à declividade principal (Figuras 13 A, B e C). Ele pode ser usado como uma medida da aceleração ou desaceleração do fluxo sobre a superfície, e pode ainda medir secundariamente a erosão e deposição de material. O segundo analisa a morfologia do terreno paralelamente à direção do fluxo e perpendicularmente à declividade principal (Figura 13 D, E e F). Ele pode ser usado como medida da convergência ou divergência do fluxo em superfície. Ambos foram realizados no ArcMap a partir do DEM.

O programa poderia mostrar os resultados em diferentes escalas de concavidade e convexidade, porém para simplificar os resultados, preferiu-se sumarizar os índices descrevendo as encostas somente como côncavas ou convexas. Seus dados mostram que as encostas são quase igualmente distribuídas entre as duas morfologias. Como na Tabela

5, o mapa de curvaturas *planform* mostra que 51% das encostas do Parque são côncavas e 49% são convexas. No mapa de curvatura *profile* a distribuição é de 50% cada.

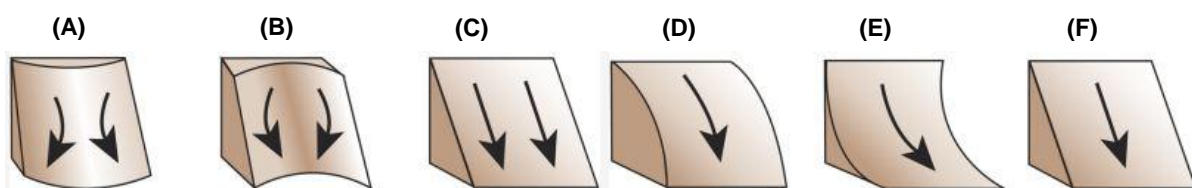


Figura 13 – Morfologia das encostas da curvatura do tipo *planform*: convexa (A), côncava (B) e plana (C). Morfologia das encostas da curvatura do tipo *profile*: convexa (D), côncava (E) e plana (F). Retirado de Kimerling *et al.*, 2011.

A distribuição dos movimentos de massa com relação à morfologia do terreno praticamente seguiu sua distribuição no PNVT. Como mostra a Figura 14 e a Tabela 5, as disparidades foram bem discretas, sendo que a maior delas relaciona a curvatura do tipo *planform* aos eventos recentes, com 54,2% ocorrendo em terrenos côncavos e 45,8% em convexas. A menor diferença é observada quando os escorregamentos muito antigos são comparados com a curvatura do tipo *profile*, onde 51,4% estão em encostas côncavas e 48,6% em convexas.

Os quatro gráficos a seguir denotam a boa distribuição dos escorregamentos de todas as idades entre as classes de morfologias do terreno. Por isso, os gráficos de FD e IAs e os de FD e IRs ficaram tão parecidos.

Tabela 5 - Divisões das áreas dos escorregamentos e do PNVT em classes de acordo com suas curvaturas *planform* e *profile*, respectivamente.

CURVATURA PLANFORM	Côncavo	Convexo
Recentes	54,2%	45,8%
Antigos	47,6%	52,4%
Muito antigos	48,4%	51,6%
PNVT	51,0%	49,0%

CURVATURA PROFILE	Côncavo	Convexo
Recentes	48,5%	51,5%
Antigos	47,0%	53,0%
Muito antigos	51,4%	48,6%
PNVT	50,0%	50,0%

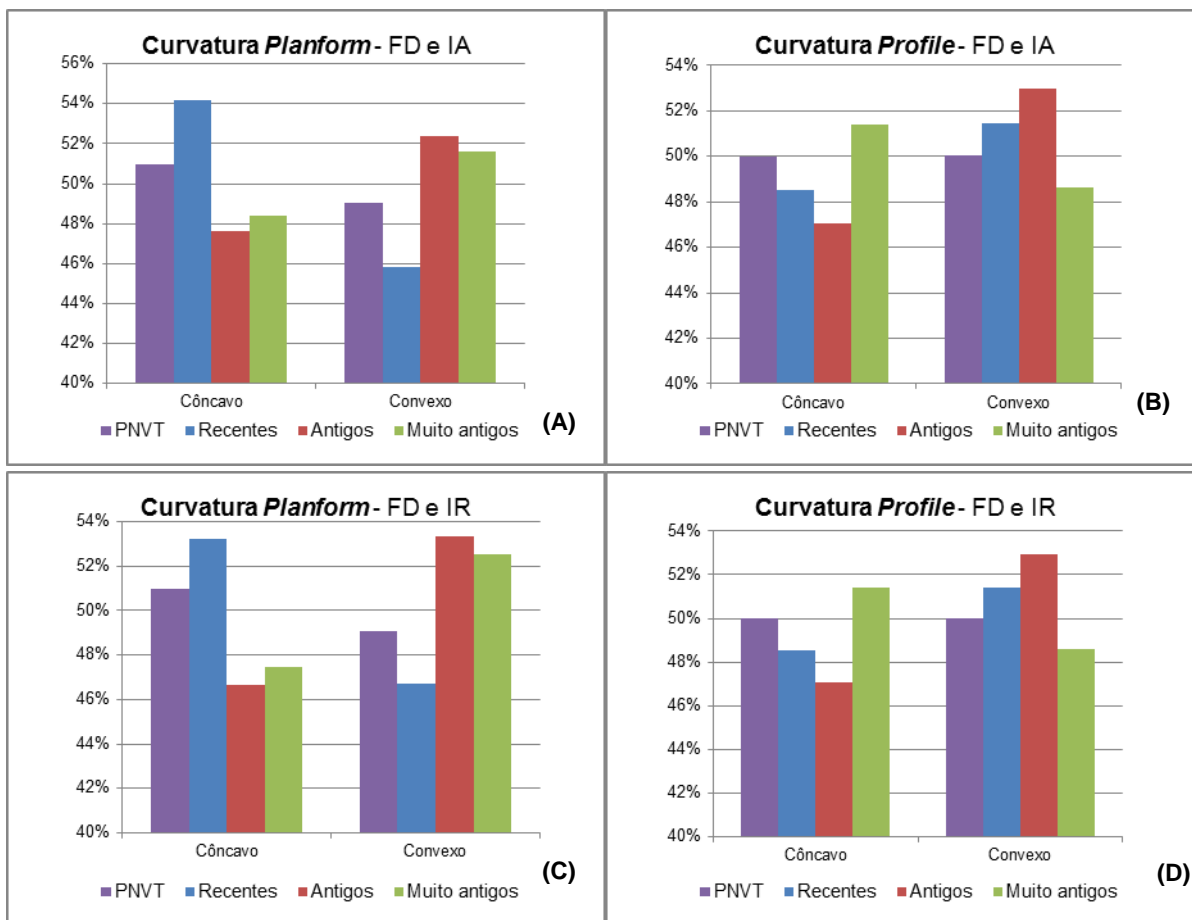


Figura 14 - Gráfico comparando a distribuição areal em classes de curvaturas das encostas de cada grupo de escorregamentos com a mesma distribuição para a área total do PNVT (A e B). Gráfico comparativo proporcional entre o IR (valor normalizado da divisão da distribuição dos escorregamentos em classes de curvaturas com a distribuição da área do Parque nas mesmas classes) e do FD (distribuição da área do PNVT em classes de curvaturas) (C e D).

Discussão

Devido à grande igualdade na distribuição não representar diferenças ou influências reais nos escorregamentos, Ercanoglu e Gökceoglu (2004) mesmo com uma diferença muito pequena entre as morfologias ainda perceberam que as encostas convexas apresentaram mais eventos do que as côncavas. Esta foi uma conclusão oposta à que Lee *et al.* (2004) chegaram em sua região de estudos, sendo que as encostas côncavas apresentaram até três vezes mais eventos do que as convexas.

Declividade

Declividade é a inclinação de uma superfície ou parte dela. Por ser tipicamente aplicada à topografia, a declividade pode ser útil ao analisar outros tipos de superfícies. O

mapa de declividade foi produzido a partir do MDE no ArcMap, no qual a declividade é calculada como a taxa máxima de alteração em valores entre cada célula e seus vizinhos.

A declividade é um dos fatores mais importantes em movimentos de massa, como amplamente divulgado e utilizado por pesquisadores. Kamp *et al.* (2008) relacionam o aumento da instabilidade das encostas (e conseqüente aumento da susceptibilidade a escorregamentos) com o ângulo de repouso do substrato. Os autores dizem que há chances muito maiores de que escorregamentos ocorram quando as encostas são mais inclinadas que o ângulo natural de repouso do substrato e não há coesão suficiente para coibir o movimento. Para materiais inconsolidados este ângulo varia tipicamente entre 25 a 40°.

Os resultados das pesquisas de Oliveira e Augusto Filho (2005) em Campos do Jordão (SP) mostram que os fatores de segurança (FS) tendem a reduzir exponencialmente com o aumento da declividade da encosta. Este decréscimo é mais acentuado até 30°, reduzindo-se nos valores de maior declividade. A condição mais favorável de ruptura (FS=1) acontece com declividades próximas a 30°, enquanto a condição menos favorável ocorre em aproximadamente 45°. Enquanto isso, para declividades muito acentuadas, em torno de 60°, os valores de FS ficam em torno de 0,5.

Esses pesquisadores explicam que o motivo para isso é que se por um lado os maiores declives favorecem a ruptura, por outro lado não favorecem a infiltração, decisiva para o avanço da saturação e da mobilização do solo. Assim, destacaram em seu trabalho que quando a declividade das encostas começa a aumentar (em torno de 30°), há um maior favorecimento a instabilidade, porém, por não ser ainda muito íngreme, importante parcela de água infiltra no solo. Esta porção é justamente o trecho da encosta em que se verifica a ocorrência da feição morfológica conhecida por ruptura de declive. Seus resultados indicam que o FS tende a ser mais crítico (menor valor) próximo à ruptura de declive. A jusante da ruptura, os FS tendem a sofrer um leve acréscimo.

Desta forma Oliveira e Augusto Filho (2005) concluem que a aplicação de tais indicadores em estudos de estabilidade de encostas, por meio da elaboração de um mapa de declividades e do traçado das linhas de concentração do escoamento superficial poderia ser considerado um primeiro passo, relativamente simples, mas suficiente para uma primeira identificação de áreas de risco de forma quase que imediata.

Apresentação dos resultados

O mapa de declividades mostra quão íngremes são as encostas do PNVT (Anexo 7). Na literatura não há um consenso sobre quais intervalos devem ser considerados, cada autor consultado apresenta classes de declividades diferentes, tanto em intervalos como no

número de classes. Este estudo adotou um intervalo de 6°, sendo que o mínimo de declividade foi 0° e o máximo foi de 60°, com média de 14,5° e desvio padrão de 7,5 (Figura 15). O mapa foi produzido também no programa ArcMap a partir dos dados do MDE.

A Figura 16 e a Tabela 6 resumem os dados da análise do mapa de declividades confeccionado. Eles mostram que a maior parte da área do Parque está dentro do intervalo de 7° a 18° de declividade. Os maiores valores de declividade estão nos entornos e encostas dos Vulcões Tenorio e Montezuma, dos morros Carmela e Jilguero, nas serras Vieja Dormida e Chiquero.

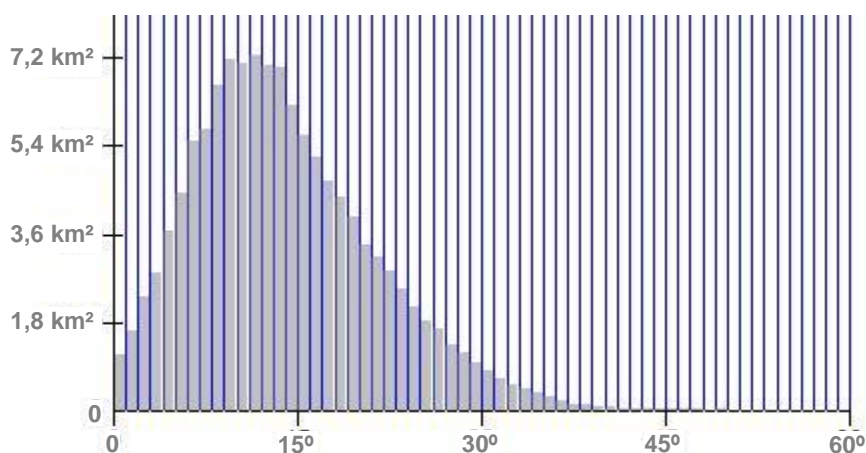


Figura 15 – Histograma de distribuição da declividade na área total do PNVT.

A Figura 16 e a Tabela 6 resumem os dados da análise do mapa de declividades confeccionado, mostrando que a maioria da área do Parque está dentro do intervalo de 7 a 18° de declividade. Os maiores valores de declividade estão nos entornos e encostas dos Vulcões Tenorio e Montezuma, dos morros Carmela e Jilguero, nas serras Vieja Dormida e Chiquero.

Com relação aos escorregamentos, notou-se que pouco mais de 70% dos escorregamentos recentes e antigos estão concentrados entre 13 e 30°. Esta mesma faixa de declividade também se destacou para os eventos muito antigos, com 75,6% de ocorrência neste mesmo intervalo. A área de estudos não apresentou escorregamentos em declividades superiores a 44° para nenhuma idade de eventos, porém há áreas com escorregamentos que apresentam declividades próximas a 1°, em regiões planas. Por isso, a declividade se mostrou importante concentradora de eventos.

O mapa de declividades (Anexo 7) mostra que nos divisores de encostas NW-SE, apresenta encostas a W e SW com maiores valores de declividade do que as orientadas a E e NE.

Tabela 6 - Divisões das áreas dos escorregamentos e do PNVT em classes de acordo com sua declividade. Os valores preenchidos em cinza representam os mais significativos de cada grupo.

DECLIVIDADE	0-06°	07-12°	13-18°	19-24°	25-30°
Recentes	3,5%	9,8%	22,5%	22,7%	25,4%
Antigos	3,9%	10,1%	17,5%	27,2%	25,6%
Muito Antigos	5,2%	8,6%	19,7%	33,1%	22,8%
PNVT	12,9%	31,7%	28,8%	16,2%	7,3%

DECLIVIDADE	31-36°	37-42°	43-48°	49-54°	55-60°
Recentes	13,0%	2,3%	0,9%	0,00%	0,00%
Antigos	11,2%	3,9%	0,5%	0,00%	0,00%
Muito Antigos	8,9%	1,4%	0,2%	0,00%	0,00%
PNVT	2,4%	0,5%	0,2%	0,05%	0,01%

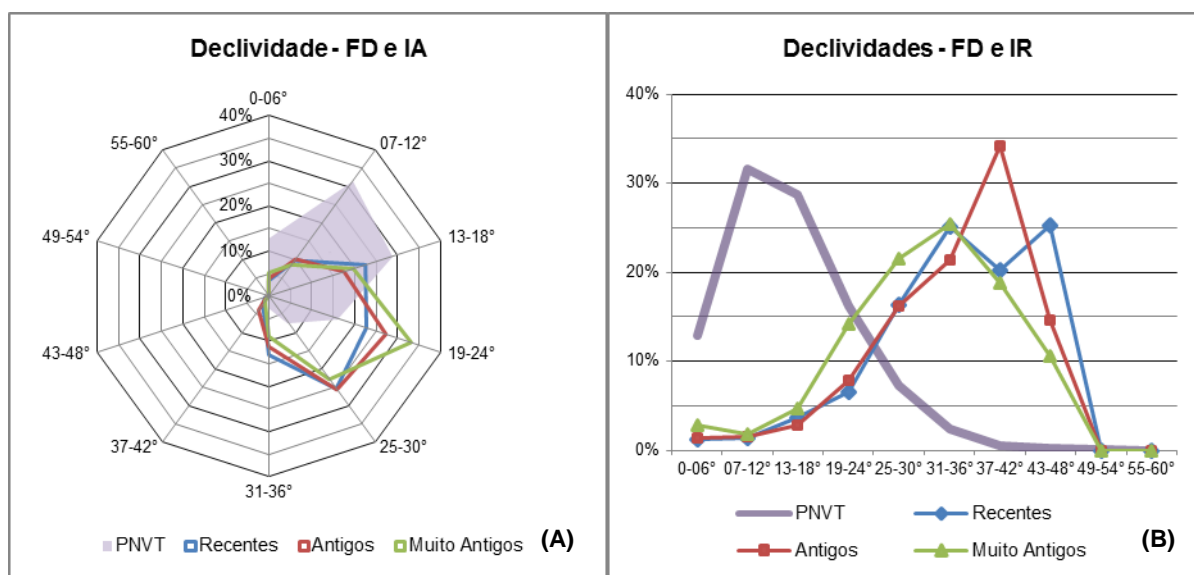


Figura 16 - Gráfico comparando a distribuição areal em classes de declividade de cada grupo de escorregamentos com a mesma distribuição para a área total do PNVT (A). Gráfico comparativo proporcional entre o IR (valor normalizado da divisão da distribuição dos escorregamentos em classes de inclinações do terreno com a distribuição da área do Parque nas mesmas classes) e do FD (distribuição da área do PNVT em classes de declividades) (B).

Discussão

A Figura 16A destaca a concentração dos escorregamentos das três idades relativas com valores bem parecidos. Esta distribuição está bem diferente da média ou do padrão do PNVT, ou seja, os movimentos de massa ocorrem em declividades maiores do que as médias do Parque. Olhando-se mais detalhadamente é possível perceber que a dispersão dos eventos em valores mais diversos aumenta com a diminuição da idade, ou seja, quanto mais novos são nas faixas de idade, menor é sua distribuição.

A partir de cálculos que levam em consideração a proporcionalidade de eventos com relação ao total de cada classe de idades, a Figura 16B traz relações entre os grupos de escorregamentos e a distribuição do PNVT nas dez classes de declividade. Ele mostra que quando a média do Parque começa a diminuir, a concentração dos movimentos de massa

começa a aumentar, por volta dos 13° de inclinação. Os escorregamentos recentes e antigos apresentam distribuições relativas muito parecidas, com valores do total de IRs de 21,26 e 21,52, respectivamente. Já os eventos muito antigos apresentam-se mais dispersados, com valor de 14,41.

Os escorregamentos apresentaram maior abundância proporcionalmente ao total da área do PNVN entre aproximadamente 25 e 45° com uma pequena queda entre 37 e 42° para os recentes, entre 28 e 45° com um pico entre 37 e 42° para os eventos antigos e 24 e 42° para os muito antigos. Os resultados da literatura parecem convergir nos valores deste parâmetro (incluindo os deste estudo) na maior parte dos casos (Ercanoglu e Gökceoglu, 2004; Lan *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2004; Oliveira e Augusto Filho, 2005; Kamp *et al.*, 2008; Nandi e Shakoor, 2009; Ilanloo, 2011). Estes valores estão entre 15 e 45° ou de 20 a 40° de inclinação.

Águas

A influência do fator água pode ser considerada segundo seu papel como causa mais conhecida da ruptura, ou seja, como fator condicionante e desencadeador (ou disparador), em função do aumento do grau de saturação do solo, aumento do peso específico, redução da coesão e aumento do empuxo em trincas (Oliveira e Augusto Filho, 2005). Além disso, seus resultados indicam que os Fatores de Segurança (FSs) tendem a reduzir linearmente com a redução da coesão e aumento do grau de saturação, mas é pouco influente no peso específico e tampouco no empuxo em eventuais trincas, que, aliás, já denunciariam uma ruptura em progressão, devida, portanto a causas anteriores.

Águas Subterrâneas

A pressão exercida pela água subterrânea e a presente nos poros do solo diminuem a pressão normal ao longo da superfície de cisalhamento e contribuem para as forças motrizes, afetando adversamente a estabilidade de uma encosta. Pressões das águas dos poros desenvolvidas em solos argilosos como os do PNVN podem ser liberadas por um longo processo de drenagem e, de forma relativa, podem tender a estabilizá-los, diminuindo a eficácia do cisalhamento no solo. Esta pressão desenvolvida em solos argilosos pode ser lançada por um grande processo de drenagem e pode tender a se estabilizar, diminuindo a efetividade da força de cisalhamento do solo (Ercanoglu e Gökceoglu, 2004).

Drenagem e escoamento hídrico

Além da influência da declividade e da cobertura do solo, a da drenagem também é praticamente unânime na literatura. Cursos d'água podem afetar negativamente a estabilidade devido à erosão causada no sopé da encosta, bem como à sua saturação, ou ainda, ambos. Além disso, Gökceoglu e Aksoy (1996) dizem que um dos importantes fatores que controlam a estabilidade das encostas é o grau de saturação que é diretamente influenciado pela rede de drenagem. Os estudos de Oliveira e Augusto Filho (2005) mostram que como diversos outros eventos, os escorregamentos seguiram linhas de concentração de escoamento superficial, preferencialmente em eixos de drenagem natural, em concavidades de encostas, ou linhas de drenagem estabelecidas pela própria ocupação em sua área de estudos.

Demoulin e Chung (2007) usaram em seu trabalho a proximidade com relação às linhas de drenagem e ao fundo do vale, além da declividade em substituição à falta de dados de água subterrânea. Os autores fizeram uma relação entre estes fatores, afirmando que quanto mais íngreme a encosta e mais longe de canais de drenagem e do fundo dos vales, maiores são as chances de que o nível d'água esteja profundo.

Assim como os elementos estruturais e proximidade a rodovias, não há consenso sobre a distância a ser considerada para a drenagem com relação à susceptibilidade a escorregamentos (Ercanoglu e Gökceoglu, 2004; Ilanloo, 2011).

Apresentação dos resultados

Como dito anteriormente, o mapa de drenagem foi feito a partir da vetorização da drenagem das cartas topográficas e da fotointerpretação dos anaglifos (Anexo 8). Considerou-se como drenagem, além de rios e córregos, também locais de grande concentração do fluxo d'água durante grandes eventos pluviais. Após sua produção, realizou-se a criação de *buffers* ao redor das drenagens. Na literatura não há consenso com relação às classes a serem usadas neste processo. Neste estudo foram usadas cinco classes diferentes de acordo com a abundância de escorregamentos em diferentes faixas de proximidade da drenagem.

De acordo com a Tabela 7 e a Figura 17, 11,5% da área do PNVT está a menos de 25 metros da rede de drenagem, 10,5% está entre 25 e 50 m, 16,7% está entre 50 e 100 m, 21,3% entre 100 e 200 m e 40,0% está a mais de 200 m de distância.

A rede de drenagem também se destacou como outro fator concentrador de eventos. Foram identificados somente 0,8% dos escorregamentos muito antigos a mais de 200 metros. Além disso, 81,4% dos movimentos recentes estão a menos de 25 m de canais de drenagem, 92,3% dos antigos e 94,3% dos muito antigos.

Tabela 7 - Divisões das áreas dos escorregamentos e do PNVT em classes de acordo com a distância da drenagem. Os valores preenchidos em cinza representam os mais significativos de cada grupo.

DRENAGEM	<25 m	25-50 m	50-100 m	100-200 m	>200 m
Recentes	81,4%	2,5%	8,6%	7,5%	0,0%
Antigos	92,3%	3,5%	3,5%	0,6%	0,0%
Muito antigos	94,3%	3,2%	1,7%	0,0%	0,8%
PNVT	11,5%	10,5%	16,7%	21,3%	40,0%

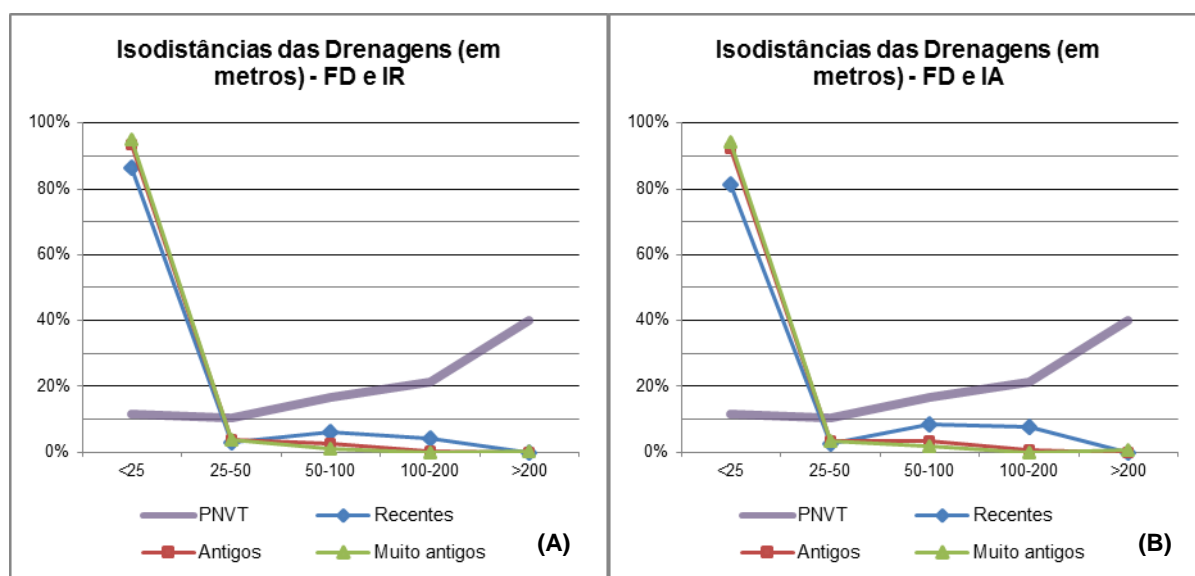


Figura 17 - Gráfico comparando a distribuição areal em classes de distâncias de cada grupo de escorregamentos com a mesma distribuição para a área total do PNVT (A). Gráfico comparativo proporcional entre o IR (valor normalizado da divisão da distribuição dos escorregamentos em classes de distâncias das drenagens com a distribuição da área do Parque nas mesmas classes) e do FD (distribuição da área do PNVT em classes de distâncias) (B).

Discussão

As Figuras 17A e 17B destacam o comportamento inverso entre a distribuição dos escorregamentos em suas faixas de idades relativas e a distribuição padrão da área do PNVT. A concentração dos movimentos de massa diminui conforme aumenta a distância do canal de drenagem, porém as áreas mais distantes a córregos d'água são mais abundantes no Parque. Além disso, os gráficos também mostram o comportamento bem semelhante dos grupos de idades relativas dos eventos frente ao fator atual.

Novamente as fotos aéreas prejudicaram um mapeamento mais completo e acurado da região devido à grande cobertura de nuvens. O setor centro-oeste acabou por apresentar

menor concentração da rede de drenagem que, muitas vezes, nem constava nas cartas topográficas pelo mesmo problema das nuvens.

A esmagadora maioria dos escorregamentos está muito próxima à rede de drenagem (menos de 25 metros), condizendo com os estudos de Ilanloo (2011), onde a maioria está até 200 metros da drenagem. Os resultados de Nandi e Shakoor (2009) mostraram que a grande maioria dos eventos que estudava ocorreu em até 800 metros de distância da drenagem, em uma escala que ia até 4.000 metros.

Pluviosidade

A chuva pode ser considerada, assim como os sismos, um fator desencadeador, podendo iniciar um escorregamento, a depender das características do terreno. Ela está muito mais ligada a uma questão temporal do que espacial.

Seguindo os trabalhos de Oliveira e Augusto Filho (2005), a chuva ao se precipitar sobre as superfícies dos terrenos, reparte-se em dois caminhos principais: a água do escoamento superficial e a água de infiltração, cujas parcelas dependem de uma série de fatores, destacando-se a permeabilidade do solo e a declividade. No evento analisado por eles, a declividade atua de forma inversamente proporcional à infiltração. Quanto maior mais induz ao escorregamento superficial, reduzindo a possibilidade de a água se infiltrar.

A percolação de águas superficiais no solo pode amolecer o material especialmente durante períodos de chuvas torrenciais e, portanto, pode causar uma diminuição na efetividade da resistência do cisalhamento do solo, aumentando a chance de que ocorram escorregamentos (Gökceoglu e Aksoy, 1996).

Lan *et al.* (2004) dizem que há dois caminhos para a previsão de escorregamentos desencadeados pelas chuvas: (1) seria o uso de correlações estatísticas e técnicas de previsão para estabelecer relações empíricas entre a pluviosidade e os movimentos de massa, ou (2) usar um modelo determinístico ligando um modelo mecânico de estabilidade de encosta com um modelo hidrológico para moldar mudanças na recarga da água subterrânea e na pressão da água nos poros do solo, causadas pelas chuvas.

Em seu estudo, eles ainda fizeram mapas de perigo a escorregamentos (*hazard*) ligados a diferentes índices pluviométricos. Foi concluído que as áreas consideradas como instáveis se tornavam muito mais abundantes com o aumento dos valores de precipitação, enquanto as estáveis diminuían.

Estruturas geológicas

Assim como a declividade, as estruturas geológicas têm muita importância na literatura (Guzzetti *et al.*, 2000 *apud* Ercanoglu e Gökceoglu, 2004; Duman *et al.*, 2005; Weirich e Blesius, 2007; Cascini, 2008; Galli *et al.*, 2008; van Westen *et al.*, 2008; Nandi e Shakoor, 2009; Harp *et al.*, 2011) como fator condicionante e indiretamente desencadeador (gerando sismos em áreas onde há falhas ativas), sendo amplamente utilizado em zoneamentos e análises relacionadas a movimentos de massa, portanto.

Para Ercanoglu e Gökceoglu (2004), os elementos estruturais geológicos, como falhas, dobras ou juntas fazem com que os materiais onde os escorregamentos ocorrem sejam mais susceptíveis a escorregar devido a: (1) fraqueza do material, (2) a acumulação de tensão ou (3) atividade tectônica em diferentes distâncias das estruturas. Porém como enfrentado neste trabalho, não há um consenso entre os estudiosos acerca das distâncias dos elementos que devem ser consideradas (Ilanloo, 2011). Como resultado, os pesquisadores usam diferentes distâncias com respeito aos elementos estruturais.

Demoulin e Chung (2007) consideram que há uma grande simplificação ao se tratar todas as falhas ativas de uma área da mesma forma. Segundo os autores, elas deveriam ganhar pesos diferentes segundo sua atividade e importância sísmica, o que, para regiões onde a atividade sísmica é fraca a moderada, é totalmente impraticável. Eles ainda criticam a utilização das falhas como uma camada de parâmetros, uma vez que estas estruturas não seriam fatores condicionantes a escorregamentos, mas sim elementos desencadeadores, que os inicia (gerando os sismos), assim como chuvas ou a atividade humana. Portanto ele não poderia ser considerado para o mapeamento de susceptibilidade, uma vez que os elementos desencadeadores estão envolvidos com a questão de tempo, não estando incluído neste tipo de mapeamento.

Apresentação dos resultados

O mapa de estruturas geológicas considerou apenas falhas descritas nos mapas geológicos como ativas e, portanto, causadoras de sismos (Anexo 9), porém não foi feita a análise de lineamentos na região. Bem como a drenagem, a literatura não apresenta um ou alguns valores a serem tomados como base para a criação de *buffers* em torno das estruturas. No presente trabalho foram criados quatro classes de intervalos iguais.

Considerando a área total do PNVT, 36,3% dela está a menos de 1.000 m de uma falha ativa, 30,5% entre 1.000 e 2.000 m, 15,3% entre 2.000 e 3.000 e 17,8% a mais de 3.000 m de distância (Tabela 8).

As regiões sul, leste e extremo norte são as mais distantes de falhas ativas. Há pelo menos duas delas que estão nos vulcões e mais duas que cruzam a zona central do Parque.

Tabela 8 - Divisões das áreas dos escorregamentos e do PNVT em classes de acordo com a distância das falhas. Os valores preenchidos em cinza representam os mais significativos de cada grupo.

ESTRUTURAS	<1000 m	1000-2000 m	2000-3000 m	>3000 m
Recentes	27,3%	43,5%	16,4%	12,8%
Antigos	34,3%	35,6%	22,4%	7,7%
Muito antigos	28,6%	32,1%	38,9%	0,4%
PNVT	36,3%	30,5%	15,3%	17,8%

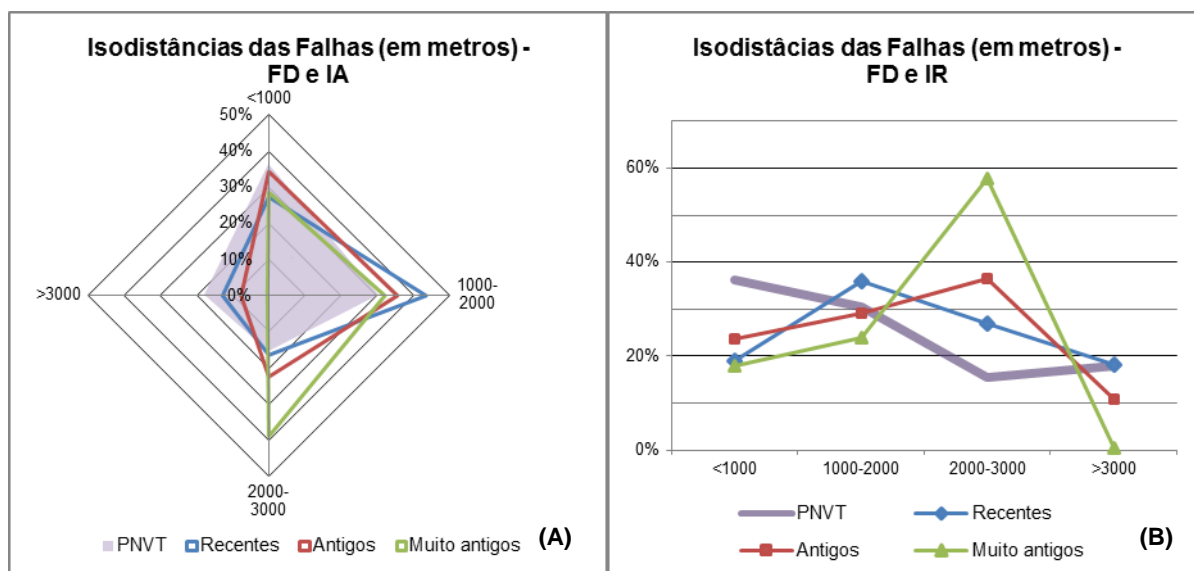


Figura 18 - Gráfico comparando a distribuição areal em classes de distâncias de cada grupo de escorregamentos com a mesma distribuição para a área total do PNVT (A). Gráfico comparativo proporcional entre o IR (valor normalizado da divisão da distribuição dos escorregamentos em classes de distâncias das falhas ativas com a distribuição da área do Parque nas mesmas classes) e do FD (distribuição da área do PNVT em classes de distâncias) (B).

As estruturas geológicas não despontaram como uma característica de grande distinção de escorregamentos. Dentre os eventos muito antigos, houve certa igualdade na concentração de eventos entre as classes de distância adotadas, com menos de 10% de diferença entre eles, com exceção aos superiores a 3.000 metros, onde somente havia 0,4% dos movimentos. Os antigos tiveram uma diferença de 1,3% entre a área dos escorregamentos a menos de 1.000 metros e entre 1.000 e 2.000 metros das falhas. Os escorregamentos recentes mostraram maiores abundâncias entre 1.000 e 2.000 metros de

distância e boa distribuição entre os eventos nas classes 2.000-3.000 m e superior a 3.000 m.

Discussão

Segundo a Figura 18A e a Tabela 8, as áreas com escorregamentos são maiores quando perto de falhas, porém isto não ocorre de forma plenamente concordante com o aumento da distância. As regiões até 3.000 metros concentram as maiores áreas com movimentos de massa, porém o intervalo que eles mais aparecem não é a mais próxima às falhas, mas sim a segunda ou terceira mais próxima. Além disso, há um grande decréscimo em zonas mais distantes, com exceção dos eventos mais recentes.

A Figura 18B destaca uma grande concentração relativa dos escorregamentos muito antigos na faixa entre 2.000 e 3.000 metros de distância das falhas, pois 38,9% dos eventos dessa idade estão na mesma classe em que somente há 15,3% do PNVT. Nesta mesma classe estão concentrados os movimentos de massa antigos, porém com menor valor. Os eventos recentes estão proporcionalmente mais concentrados no segundo intervalo de distância.

Neste trabalho, a proximidade foi relacionada como fator condicionante porque se considerou que, além de desencadear sismos, as falhas ativas aumentam a fragilidade das rochas na zona de influência, favorecendo o aumento de seu intemperismo porque esta é uma região de cisalhamento ativo.

Para os escorregamentos recentes, proporcionalmente ao total da área do PNVT, a região entre 1.000 e 2.000 metros de distância das falhas teve a maior porcentagem, com a classe anterior e posteriores com menor distribuição dos eventos. Este resultado se associa de certa forma ao de Ercanoglu e Gökceoglu (2004), pois sua proporção de movimentos de massa em relação a área total de seus estudo não variava conforme a distância das estruturas, há uma certa variação independente deste fator.

Com relação aos antigos e muito antigos, há um aumento da incidência proporcional até a classe de 2.000-3.000 m, pois na próxima há uma boa queda no valor, chegando perto de zero quando se trata dos muito antigos. Tal comportamento se assemelha ao de Kamp *et al.* (2008), onde o aumento do número de escorregamentos ocorria conforme aumentava a distância das falhas ativas.

Os resultados de Ilanloo (2011) mostraram uma íntima relação de seus escorregamentos com a distância das falhas da sua área, pois aparentemente havia mais movimentos de massa quando a proximidade a tais estruturas era menor.

Litotipos

A litologia também é um fator de suma relevância na análise de movimentos gravitacionais por que a estrutura interna das rochas (estruturas primárias e texturas, como fraturas, xistosidade, modo de deposição, etc.) pode ser mais ou menos favorável à ruptura da encosta. Além disso, o tipo de rocha influencia o solo que o sobrepõe, controlando sua espessura, granulometria, mineralogia e composição química. Seu uso é onipresente na literatura sobre o zoneamento de susceptibilidade a movimentos de massa. Como mostrado em Lan *et al.* (2004), a litologia é presumida como o fator de maior controle sobre os escorregamentos, refletindo muitas diferenças topográficas em cada litotipo, assim como a distribuição das estruturas, forças e deformação.

Apresentação dos resultados

O mapa litológico foi feito baseado nos mapas geológicos previamente descritos (Anexo 10), mantendo-se os nomes das unidades dados pelos autores. As rochas de cada mapa dentro dos limites do PNVT foram agrupados em 6 tipos. Mesmo que com nomes ou algumas características regionalmente diferentes, litotipos semelhantes foram reunidos a partir de seus atributos gerais. Este esquema foi adotado para simplificar o mapa e reduzir o número de classes a fim de facilitar o tratamento estatístico.

Litologicamente, a área do Parque está coberta por 17,3% de rochas do embasamento, 18,8% de rochas vulcânicas anteriores a dos vulcões do PNVT, 6,7% de brechas e lavas da formação Monteverde, 16,9% de rochas vulcânicas mais antigas dos Vulcões Tenorio e Montezuma (paleolavas), 38,9% de rochas vulcânicas mais novas destes vulcões (neolavas) e 1,4% de sedimentos inconsolidados. Estes dados estão mais detalhadamente demonstrados na Tabela 9 e na Figura 19.

A maior parte dos sedimentos recentes está a norte, principalmente ao longo do rio Buenavista. As neolavas dos vulcões Tenorio e Montezuma ocupam a zona centro-NW do PNVT. As paleolavas estão em áreas do centro-sul do Parque. As brechas da Fm. Monteverde estão também no centro e extremo sul. As rochas ígneas anteriores às dos vulcões circundam de centro a norte as Neolavas. Já o embasamento pré-pleistocênico que domina o E do Parque foi trazida pela falha normal Cote-Arenal.

Tabela 9 - Divisões das áreas dos escorregamentos e do PNVT em classes de acordo com seu litotipo. Os valores preenchidos em cinza representam os mais significativos de cada grupo.

LITOLOGIA	Paleolavas	Neolavas	Vulcanitas	Brechas	Embasamento	Sedimentos
Recentes	12,8%	86,3%	0,0%	0,9%	0,0%	0,0%
Antigos	7,2%	90,6%	0,04%	1,5%	0,0%	0,7%
Muito antigos	0,4%	91,0%	7,8%	0,0%	0,8%	0,0%
PNVT	16,9%	38,9%	18,8%	6,7%	17,3%	1,4%

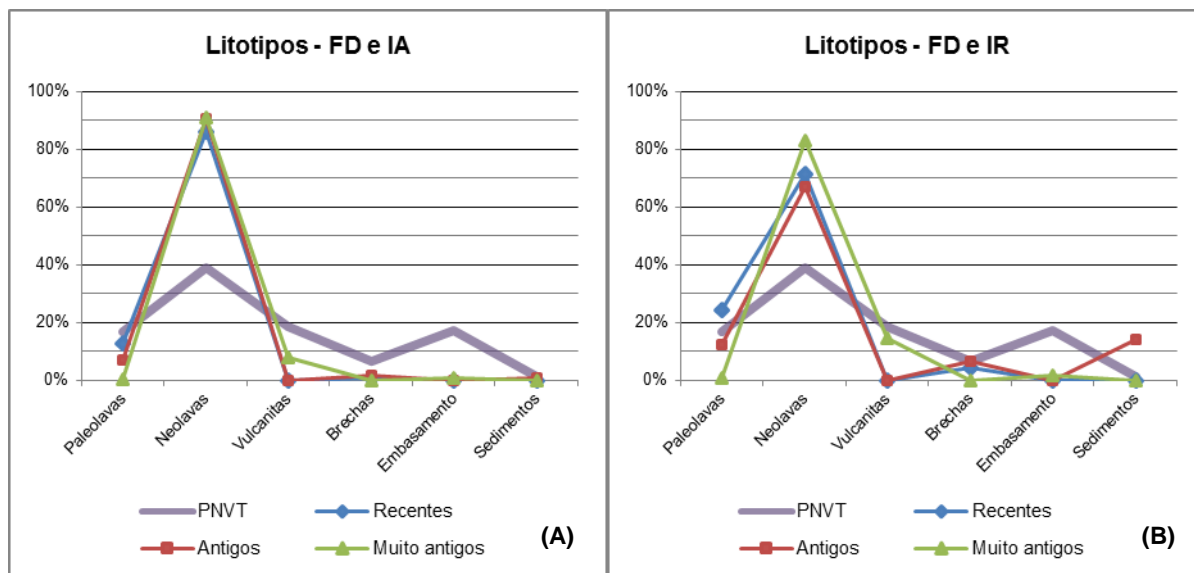


Figura 19 - Gráfico comparando a distribuição areal em classes de litotipos de cada grupo de escorregamentos com a mesma distribuição para a área total do PNVT (A). Gráfico comparativo proporcional entre o IR (valor normalizado da divisão da distribuição dos escorregamentos em classes de tipos de rochas com a distribuição da área do Parque nas mesmas classes) e do FD (distribuição da área do PNVT em classes de litotipos) (B).

Discussão

A Tabela 9 e o Figura 19A mostram a enorme concentração das três classes de escorregamentos nas neolavas, nos depósitos mais recentes dos vulcões Tenorio e Montezuma. Por outro lado, o litotipo que se mostrou mais estável foi a unidade de embasamento e os sedimentos recentes, quase sem movimentos de massa. Mesmo com algumas divergências nas distribuições de eventos principalmente nas paleolavas e nas vulcanitas, os três grupos de idades seguem a mesma tendência.

Os estudos de campo mostraram que, mesmo que os dados indiquem a pouca ocorrência de eventos nos sedimentos recentes, seus depósitos são típicos de escorregamentos, sem nenhuma organização nem seleção granulométrica, além de estarem cobertos por densa vegetação, o que pode levar a crer que estariam atualmente estáveis. Esta observação de campo pode ser explicada pela Figura 19B, onde proporcionalmente com as classes onde estão inseridas as zonas do Parque, as áreas de movimentos de massa nos Sedimentos Recentes são significativas. Mesmo que somente 0,7% dos eventos antigos tenham ocorrido neste litotipo, o PNVT apresenta somente 1,4% de sua área total constituída por Sedimentos Recentes, o que explicaria este valor apresentado pelo gráfico.

Além disso, há uma diminuição nas porcentagens de distribuição dos escorregamentos nas Neolavas porque o Parque também apresenta considerada área neste litotipo.

Neste estudo, os escorregamentos nas Neolavas foram muito mais abundantes do que em outros litotipos, a ponto de não ocorrer eventos de certas idades em alguns litotipos. Para os movimentos recentes e antigos as Paleolavas também tiveram ocorrências, enquanto os muito antigos incidiram sobre as rochas ígneas anteriores às dos vulcões (Vulcanitas). Kamp *et al.* (2008) e Kawabata e Bandibas (2009) mostraram em seus trabalhos que as rochas vulcânicas de suas áreas de estudo apresentaram muito mais escorregamentos do que as unidades sedimentares inconsolidadas.

Sismicidade

Ao lado de altos índices pluviométricos, os sismos também são importantes causas desencadeadoras de escorregamentos. Apesar disso, Kamp *et al.* (2008) dizem em seu trabalho que embora os escorregamentos desencadeados por sismos sejam abundantes por uma área extensa em torno do epicentro, eles são concentrados em zonas específicas associados com a geologia do substrato, a geomorfologia, a topografia e a fatores humanos. Em outras palavras, os sismos não são fatores condicionantes para a maior ou menor ocorrência (susceptibilidade) de movimentos de massa, mas sim eventos que os ativam em locais com condições mais propícias.

Segundo Harp *et al.* (2011), mesmo assim, a relação entre os sismos e os escorregamentos ainda não é bem compreendida pela ciência, fazendo com que a análise ou zoneamento seja ainda mais complexa. A relação entre o tamanho dos escorregamentos e a magnitude dos sismos é conceitual e pouco compreendida. De forma geral, a tendência é de que maiores escorregamentos ocorrerão a partir de terremotos de maiores magnitudes, que normalmente têm maior duração temporal. Além disso, até hoje não há documentação suficiente sobre a densidade espacial e outras características de distribuição de escorregamentos de diferentes tipos de fontes de terremotos para se estabelecer qualquer diferença bem fundamentada entre escorregamentos causados por sismos em diferentes tipos de falhas. Porém algumas correlações já podem ser encontradas na literatura, como Cascini (2008) que observou que a distância máxima de grandes escorregamentos desencadeados por eventos sísmicos é fortemente relacionada com velocidades de propagação diferentes das ondas sísmicas dentro do relevo dos Apeninos. Particularmente, na direção dos Apeninos, para qualquer sismo de magnitude fixa, a distância máxima dele é quase coincidente com a reportada para países de clima úmido (como Japão e Filipinas). Reciprocamente, na direção Anti-Apeninos, a curva que representa a distância máxima de

grandes escorregamentos é próxima àquela proposta para países de clima seco (como Irã e Armênia), ou seja, Cascini diz que as ondas sísmicas se propagam a distâncias maiores em direções paralelas à cadeia de montanhas do que perpendiculares.

Adicionalmente, Floris e Bozzano (2008) *apud* Kamp *et al.* (2008) calcularam para os Apeninos italianos que a chance de que escorregamentos inicialmente causados por sismos sejam reativados por eventos chuvosos é de 10%.

Apresentação dos resultados

Para o presente trabalho foram feitos mapas de densidade dos epicentros e de intensidade de sismos para se comparar com o inventário de escorregamentos. Foi mostrado, por meio destes, que não se pode estabelecer, no atual estágio de conhecimento, maiores relações diretas entre os movimentos de massa com a distribuição espacial, nem com a intensidade dos tremores do PNVT.

O mapa de sismos foi feito levando-se em conta a magnitude de cada tremor e sua concentração espacial (Anexo 11). Como não há nada mencionado na literatura consultada sobre a utilização de dados sísmicos de forma espacial, estas duas variáveis foram usadas e testadas. Demoulin e Chung (2007); Harp *et al.* (2011) e Kamp *et al.* (2008) apenas citam os sismos como fator desencadeador (no tempo) não como condicionante (no espaço).

O mapa mostra que as maiores concentrações de eventos sísmicos acontecem ao longo dos limites centro-oeste e extremo NW do Parque (Anexo 11). As menores estão nas regiões E, NE e S do PNVT. Com relação às magnitudes, os maiores sismos estão próximos ao limite centro-oeste, uma ocorrência a NW e outra no extremo sul (Figura 20). Os destaques estão em 1998, quando ocorreram quatro sismos de 3,2 na escala de Richter; em 2002 quando houve o sismo mais forte dos últimos anos próximo ao limite NW externo ao Parque e em 2007 quando outros quatro tremores ocorreram na área centro-oeste do PNVT de 3,2, 3,3 e dois de 3,4 na escala de Richter.

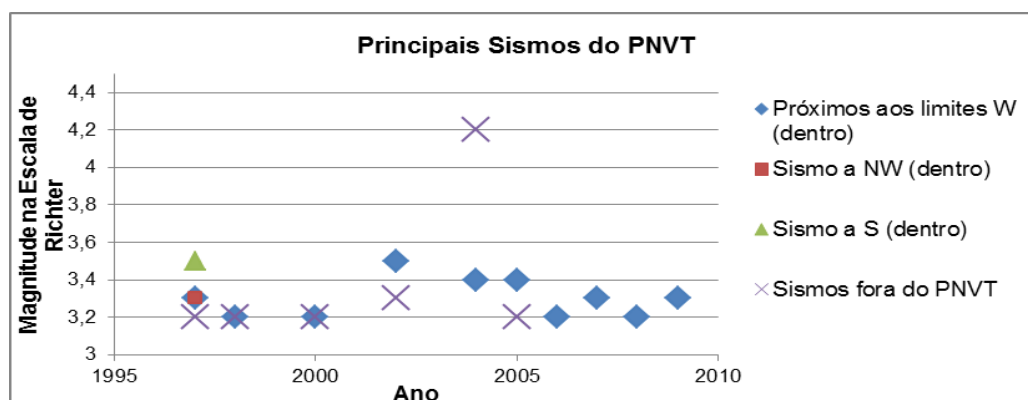


Figura 20 – Localização (se dentro ou fora dos limites do Parque), ano de ocorrência e magnitude dos sismos no PNVT desde 1993 até 2009.

USOS DOS DADOS PARA O MAPEAMENTO DE SUSCEPTIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS

A literatura mostra que há muitas formas de se classificar as metodologias de mapeamento de susceptibilidade a escorregamentos, mesmo sem um acordo geral sobre quais classes de métodos são mais eficientes. Weirich e Blesius (2007) as dividem em modelos probabilísticos e estatísticos com variáveis múltiplas, modelos geotécnicos, *overlays* lógicos e *overlays* semi-quantitativos; Ercanoglu e Gökceoglu (2004) e Demoulin e Chung (2007), em técnicas quantitativas e qualitativas; Ilanloo (2011) divide as metodologias em diretas e indiretas.

O modelo de mapeamento proposto para a utilização dos dados gerados neste trabalho se classificaria como o de *overlays* lógicos (ou semi-lógicos) segundo Weirich e Blesius (2007), quantitativo para Ercanoglu e Gökceoglu (2004) e Demoulin e Chung (2007) e indireto de acordo com Ilanloo (2011). Eles afirmam que este método evita subjetividade em muitos aspectos, além de ser relativamente simples, rápido e não depender demais da experiência do pesquisador, como em outras técnicas.

Ele base-se em operações com camadas de dados espaciais, representando cada um dos fatores ou parâmetros deflagradores de escorregamentos no passado determinados estatisticamente, como drenagem ou declividade. As operações seriam realizadas para se estabelecer relações entre as características do terreno onde há escorregamentos para áreas atualmente sem escorregamentos, mas com condições similares, gerando previsões quantitativas de susceptibilidade.

Nas camadas, cada célula (pixel) ou alguma outra área específica bem definida são analisadas e tem peso atribuído seguindo alguma importância dada. A atribuição de peso a cada componente pode ser feita com respeito à frequência de escorregamentos relativa com o qual cada fator é associado.

Wang *et al.* (2009) concluem que, no modelo de análise estatística, onde cada caractere de cada camada tem um valor (ou peso), a questão principal é atribuir valor para cada fator em separado. Existem muitas técnicas para a atribuição, como o método de pontuação por um especialista, de fatores de pesagem estatística e o processo analítico hierárquico. No método de pontuação por um especialista, os pesos são dados diretamente por vários especialistas de acordo com sua experiência e conhecimento, o que pode apresentar dificuldades inerentes ao processo pela incerteza e imprecisão do processo de decisão do ser humano. No modelo de fatores de pesagem estatística, os pesos dos fatores são calculados de acordo com as estatísticas de eventos de escorregamentos históricos. Já o processo analítico hierárquico precisa estabelecer um grande número de matrizes de

juízo pela comparação de cada par possível de atributos. Portanto, para o uso mais correto dos dados gerados neste trabalho, sugere-se a adoção de um dos dois últimos métodos citados.

Wang *et al.* (2009) ainda indicam que o mapeamento indireto envolve o mapeamento e análise estatística de um grande número de parâmetros considerados relevantes para os deslizamentos e obter relações preditivas entre as condições do terreno e a ocorrência de deslizamentos. Adicionalmente, o estudo de Ercanoglu e Gökceoglu (2004) indica alguns cuidados com relação à utilização dessa técnica. Os autores citam que a determinação dos fatores condicionantes é crucial. A confiabilidade e acurácia dos dados coletados também influencia o sucesso da metodologia aplicada. Além do mais, a análise das relações de causa e efeito não é simples, pois um deslizamento é raramente ligado a uma só causa. Contudo qualquer parâmetro pode ser importante com respeito a ocorrência de deslizamentos em uma região, mas o mesmo parâmetro pode não ser importante em outra região. Por isso, diferentes parâmetros são usados e classificados subjetivamente ou objetivamente para produzir um mapa de susceptibilidade a deslizamentos.

O tipo de análise, fase de desenvolvimento e escala de zoneamento também dependem da complexidade das características dos deslizamentos, da homogeneidade do terreno, da variabilidade espacial dos fatores, dos parâmetros geotécnicos, da quantidade de dados disponíveis e da experiência do pesquisador (Cascini, 2008). Ademais, a fase e a qualidade do zoneamento de susceptibilidade também dependem do conhecimento do papel de cada fator que predispõe um deslizamento.

De maneira geral, todos os autores convergem em certos pontos quanto ao mapeamento de susceptibilidade a deslizamentos, não importando o método usado, nem a região investigada. O primeiro deles inclui os Sistemas de Informações Geográficas como ferramentas de extrema utilidade em seus estudos, devido à maior facilidade com o qual os *overlays* dos mapas podem ser manipulados e os procedimentos aritméticos simples são realizados. Adicionalmente, eles se fundamentam no princípio de que "o presente e o passado são as chaves para o futuro", para o qual possam considerar as características de deslizamentos existentes, para avaliar futuras áreas onde eles possam ocorrer. Por fim, afirmam que a análise e posterior mapeamento da susceptibilidade a deslizamentos são instrumentos valiosos e eficientes para o planejamento da sociedade.

Mesmo com os problemas na qualidade das fotografias aéreas disponíveis, os resultados retirados de partes visíveis do PNTV ainda podem ser válidos para toda a área. Os resultados de Nandi e Shakoor (2009) mostraram que levar em conta uma parte menor e representativa da área pode produzir resultados realísticos com menos tempo e esforço

quando se procura avaliar o desempenho das técnicas propostas. Porém, a acurácia e confiabilidade dos dados coletados também influenciam o sucesso de uma dada metodologia. Ademais, as análises das relações de causa e efeito não é sempre simples, pois um escorregamento é raramente ligado a uma só causa (Ilanloo, 2011).

É preciso ainda reconhecer que o zoneamento de escorregamentos não é uma ciência precisa e que os resultados são apenas uma previsão do comportamento das encostas baseada nos dados avaliados. De forma geral, fases intermediárias e avançadas de zoneamento serão menos sujeitas a erros do que um zoneamento preliminar, de acordo com as escalas (Fell *et al.*, 2008). Além disso, a avaliação qualitativa a susceptibilidade é baseada inteiramente no julgamento do autor da análise. É importante ressaltar que o mapeamento de susceptibilidade a escorregamentos não quantifica o número de escorregamentos que podem ocorrer em um dado período de tempo. Estas probabilidades somadas ao tempo que podem ocorrer são feitas em um mapeamento de perigo (*hazard*).

Temporalmente, as previsões que podem ser geradas a partir desses dados são similares à cobertura feita pelos dados. Levando-se em conta que há apenas fotos aéreas de uma data no trabalho, pode-se considerar que não é possível correlacionar o tempo a um futuro mapeamento de susceptibilidade a escorregamentos. Por isso um dos principais problemas no preparo dos mapas é a ausência de um bom banco de dados e registros consistentes de escorregamentos anteriores. Em áreas como a do PNVT, onde não há dados sobre frequência de escorregamentos, não há como realizar estudos mais aprofundados (zoneamento de perigo ou risco), somente susceptibilidade.

Para uso no planejamento do PNVT, deveria se assumir que os eventos são temporalmente lineares. Para escorregamentos causados por sismos, isto é totalmente irreal com uma escala de tempo muito menor do que o período de recorrência de fortes terremotos locais. A frequência de recorrência não é reconhecida, uma vez que os sismos somente começaram a ser sistematicamente monitorados há menos de 20 anos. Quanto a deslizamentos causados pelas chuvas, o período de recorrência delas ainda é pouco conhecido, havendo ainda poucos dados sobre a pluviosidade local. As previsões temporais de escorregamentos que poderiam ser causados por erupções do vulcão Tenorio também são prejudicadas por falta de dados. Atualmente não se tem certeza sobre a idade de suas últimas erupções, nem sobre seu nível de atividade. Portanto, os dados atuais não poderiam permitir mapeamentos e previsões mais detalhadas do que o de susceptibilidade.

Uma sugestão para atribuir pesos aos diferentes parâmetros quando de seu uso para o mapeamento de susceptibilidade a escorregamentos seria a soma dos IRs de cada grupo de idade de escorregamentos, quanto maior o valor, maior o peso (Tabela 10). Uma outra

sugestão seria a atribuição dependente da idade dos eventos, ou seja, os mais novos teriam maior peso.

Tabela 10 – Sugestão de pesos para os diferentes parâmetros do terreno e idade dos movimentos de massa.

Idade	Cobertura do Solo	Litologia	Distância das Drenagens	Distância das Falhas	Altitude
Recentes	49,15	3,12	8,19	3,96	30,63
Antigos	16,95	3,47	8,61	4,00	28,02
Muito antigos	2,91	2,83	8,64	4,40	11,10
Idade	Direção	Curvatura Planform	Curvatura Profile	Declividade	
Recentes	7,96	2,00	2,00	21,26	
Antigos	8,90	2,00	2,00	21,52	
Muito antigos	9,34	2,00	2,00	14,41	

CONCLUSÕES

O Parque Nacional Vulcão Tenorio é uma área naturalmente propensa à ocorrência de escorregamentos, comprovado pela detecção de 248 eventos de diferentes idades (Anexo 1). Estes movimentos de massa podem ser desencadeados em terrenos de diferentes características, aqui chamadas de parâmetros. Destes, nove foram analisados para se saber quais são os de maior recorrência em locais com escorregamentos e, portanto, os mais significativos e relevantes para a previsão de zonas com maiores probabilidades de que futuros eventos possam ter início.

Pôde-se perceber que a curvatura foi o parâmetro que menos influenciou os escorregamentos do Parque, enquanto a declividade, altitude e cobertura foram os mais influentes. De forma geral, pode-se concluir que as zonas onde ocorreram as maiores áreas com escorregamentos estão (1) assentadas sobre Neolavas, (2) muito próximas das linhas de drenagem, (3) entre distâncias entre um a três quilômetros das falhas ativas, (4) entre 1.400 e 1.800 metros de altitude, (5) em encostas a SW, W e NW, (6) em encostas com qualquer curvatura e (7) entre 25 e 48° de declividade.

Além disso, conclui-se que, os dados gerados por este estudo se mostram promissores para a produção de mapas na área do PNV, mesmo que, levando-se em conta o atual estágio de desenvolvimento das pesquisas na área de análise de riscos e a falta de uma metodologia mais uniforme torna muito difícil a comparação de mapas de susceptibilidade a movimentos de massa de diferentes autores e áreas de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS E BIBLIOGRAFIA

- AKSOY, B., ERCANOGLU, M. **Landslide identification and classification by object-based image analysis and fuzzy logic: an example from the Azdavay region (Kastamonu, Turkey)**. *Computer & Geosciences* (38): 87-98, 2012.
- ALAVARADO, G.E. **Costa Rica – Land of volcanoes**. Gallo Pinto Press, Cartago: 1993. 177 p.
- ALVARADO, G. E., CARR, M., GAZEL, E. **Margins volcano field trip to Arenal and Guanacaste, June 22-26, 2007**.
- AYENEW T., BARBIERI, G. **Inventory of landslides and susceptibility mapping in the Dessie area, northern Ethiopia**. *Engineering Geology* (77): 1-15, 2005.
- CASCINI, L. **Applicability of Landslide Susceptibility and Hazard Zoning at Different Scales**. *Engineering Geology* (102): 164-177, 2008.
- CIVELLI, G., LOCATI, U., BIGIOGGERO, B., CHIESA, S., ALVARADO, G. E., MORA, O. **Geología de la hoja Tierras Morenas**. *Revista Geológica de América Central* (33): 99-110, 2005.
- CHIESA, S., ALVARADO, G. E., PECCHIO, M., CORELLA, M., ZANCHI, A. **Contribution to petrological and stratigraphical understanding of the Cordillera de Guanacaste lava flows, Costa Rica**. *Revista Geologica de America Central* (17): 19-43, 1994.
- DEMOULIN, A., CHUNG, C.-J.F., **Mapping landslides susceptibility from small datasets: a case study in the Pays de Herve (E Belgium)**. *Geomorphology* (89): 391-404, 2007.
- DUMAN, T. Y., ÇAN, T., EMRE, Ö., KEÇER, M., DOĞAN, A., ATEŞ, Ş., DURMAZ, S. **Landslide inventory of northwestern Anatolia, Turkey**. *Engineering Geology* (77): 99-114, 2005.
- ERCANOGLU, M., GÖKCEOĞLU, C. **Use of Fuzzy Relations to Produce Landslide Susceptibility Map of a Landslide Prone Area (West Black Sea Region, Turkey)**. *Engineering Geology* (75): 229-250, 2004.
- FACURI, G. G., SILVA, K. F. B., TAYLOR, W. **Volcano-estratigrafía del flanco norte del volcán Tenorio**. *Boletín del Colegio de Geólogos Costa Rica*. V.16, n. 1. San José, 2010a.
- FACURI, G. G., SILVA, K. F. B., TAYLOR, W. **A geologia da porção norte do complexo vulcânico Tenorio-Montezuma, Costa Rica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 45, 2010b. Belém.
- FACURI, G. G., SILVA, K. F. B. **Vulcanoestratigrafia e análise de riscos do flanco norte do complexo vulcânico Tenorio-Montezuma, Costa Rica**. In: SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 5., 2011. Goiás.
- FACURI, G.G., SILVA, K. F. B. **Fotointerpretação: o uso de anaglifos em substituição ao estereoscópio de espelhos**. *Anais do 46º Congresso Brasileiro de Geologia (em publicação)*.
- FELL, R., COROMINAS, J., BONNARD, C., CASCINI, L., LEROI, E., SAVAGE, W. Z., JOINT TECHNICAL COMMITTEE ON LANDSLIDES AND ENGINEERED SLOPES. **Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning**. *Engineering Geology* (102): 85-98, 2008.
- FELPETO, A., MARTÍ, J., ORTIZ, R. **Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment**. *Journal of volcanology and geothermal research* (166): 106-116, 2007.
- GALLI, M., ARDIZZONE, A., CARDINALI, M., GUZZETI, F., REICHENBACH, P. **Comparing landslide inventory maps**. *Geomorphology* (94): 268-289, 2008.
- GÖKCEOĞLU, C., AKSOY, H. **Landslide susceptibility mapping of the slopes in residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques**. *Engineering Geology* (44):147-161, 1996.
- HARP, E. L., KEEFER, D. K., SATO, H. P., YAGI, H. **Landslide inventories: The essential part of seismic landslide hazard analyses**. *Engineering Geology* (122): 9-21, 2011.

- ILANLOO, M. **A comparative study of fuzzy logic approach for landslide susceptibility mapping using GIS: An experience of Karaj dam basin in Iran.** *Procedia Social and Behavioral Sciences* (19): 668-676, 2011.
- KAMP, U, GROWLEY, B. J., KHATTAK., G. A., OWEN, L. A. **GIS-based landslide susceptibility mapping for the 2005 Kashmir earthquake region.** *Geomorphology* (101): 631-642, 2008.
- KAWABATA, D., BANDIBAS, J. **Landslide susceptibility mapping using geological data, a DEM from ASTER images and an Artificial Neural Network (ANN).** *Geomorphology* (113): 97-109, 2009.
- KAZMIERCZAK, A., CARTER, J. **Adaptation to climate change using green and blue infrastructure. A database of case studies.** Universidade de Manchester, 2010.
- KIMERLING, A. J., BUCKLEY, A. R., MUEHRCKE, P. C., MUEHRCKE, J. O. **Map use: reading analysis interpretation.** 7a edição. Redlands: ESRI Press, 2011. 610 páginas.
- KITCHEN, C.H. **Petrologic and geochemical analysis of volcanic deposits in the Tenorio volcanic complex, Bijagua, NW of Costa Rica.** Colorado College. Costa Rica, 2003.
- LAN, H. X., ZHOU, C. H., WANG, L. J., ZHANG, H. Y., LI, R. H. **Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China.** *Engineering Geology* (76): 109-128, 2004.
- LEE, S., RYU, J. H., WON, J. S., PARK, H. -J. **Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network.** *Engineering Geology* (71): 289-302, 2004.
- NANDI, A., SHAKOOR, A. **A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses.** *Engineering Geology* (110): 11-20, 2009.
- OLIVEIRA, A. M. S., AUGUSTO FILHO, O. **Análise de movimento de massa com base em observações do evento do ano 2000 de Campos do Jordão (Estado de São Paulo, Brasil).** *Solos e Rochas*, São Paulo, 28 (1): 99-111, Janeiro-Abril, 2005.
- SISTEMA NACIONAL DE ÁREAS DE CONSERVACIÓN. **Plan de turismo sostenible Parque Nacional Volcán Tenorio.** 2009
- TAYLOR, W., BARQUERO, R., ROJAS, W., MONTERO, W. & LINKIMER, L., **La crisis sísmica de Bijagua de Upala (Enero-Marzo del 2002), Costa Rica.** Red Sismológica Nacional, San José [Informe interno], 2002, 20 p.
- TAYLOR, W. **La actividad sismotectónica durante el 2008 en los alrededores de los proyectos de generación eléctrica Miravalles, ARCOSA y Tejona.** *Boletín OSIVAM*, 20 (32). San José, 2009.
- VAHIDNIA, M. H., ALESHEIKH, A. A., ALIMOHAMMADI, A., HOSSEINALI, F. **A GIS-based neuro-fuzzy procedure for integrating knowledge and data in landslide susceptibility mapping.** *Computers & Geosciences* (36): 1101-1114, 2010.
- van WESTEN, C. J., CASTELLANOS, E., KURIAKOSE, S. L. **Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview.** *Engineering Geology* (102): 112-131, 2008.
- WANG, W., XIE, C., DU, X. **Landslides susceptibility mapping in Guizhou province based on fuzzy theory.** *Mining Science and Technology* (19): 399-404, 2009.
- WEIRICH, F., BLESIOUS, L. **Comparison of satellite and air photo based landslide susceptibility maps.** *Geomorphology* (87): 352-364, 2007.

ANEXOS