

RACIOCÍNIO PROBABILÍSTICO APLICADO À SUSCETIBILIDADE DE ESCORREGAMENTOS: UM ESTUDO DE CASO EM CAMPO LARGO, PARANÁ, BRASIL

PROBABILISTIC REASONING APPLIED TO LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY: CASE STUDY IN CAMPO LARGO, PARANÁ, BRAZIL

Paulo C. Soares¹
Ana Paula Soares²
Alberto Pio Fiori¹

RESUMO

A análise de risco e suscetibilidade de escorregamentos tem sido feita por meio de modelos dinâmicos empíricos e analógicos. A ocorrência desses eventos é o resultado de uma combinação favorável de condições, as quais em geral não são acessíveis à investigação direta. Como alternativa, é possível investigá-las por meio de variáveis que apresentam relação de dependência com estas condições e conseqüentemente relação com a ocorrência do evento. A expectativa de um evento ocorrer resulta de uma relação empírica ou de um raciocínio, em ambos os casos decorrentes de uma série de observações ou evidências explícitas ou implícitas. O raciocínio é baseado em muitas premissas combinadas logicamente como em "Se Ei, então P", onde Ei simboliza uma série de evidências ou indicadores independentes que cumulativamente indicam que P é verdade e P representa a proposição do tipo "o evento ocorre." Diversas fontes de incertezas se associam a este raciocínio: (1) cada evidência é representada por uma informação geológica, derivada de um dado ou fato adquirido, contendo uma imprecisão em sua concepção e delimitação; (2) o evento escorregamento é definido por uma concepção mental, contendo uma imprecisão tanto na concepção como na determinação em campo; (3) a relação entre a evidência e o evento não é determinativa ou compulsória; é causal ou correlativa, e apenas a acumulação de evidências tem uma relação mais forte com o evento. Este caráter cumulativo das evidências permite uma abordagem probabilística desta relação por meio da regra de Bayes, de probabilidade condicional; calcula-se quanto uma evidência presente modifica a probabilidade original de ocorrência do evento relativamente à condição da evidência ausente. De forma homóloga, estas relações foram utilizadas para avaliar a probabilidade condicional nos espaços em que a presença da evidência ou do evento é incerta ou inexistente. Um estudo de caso foi desenvolvido na localidade de Três Córregos, município de Campo Largo, centro leste do Paraná, Brasil, próximo às cabeceiras do

1 Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geologia. soares@geologia.ufpr.br

2 Universidade federal do Paraná, Departamento de Geologia, bolsista Pibic-CNPq.

rio Açungui. A área é adequada pela diversidade de litologias e de estruturas, por intensa incisão no relevo, pela existência de remanescentes aplainados, com espesso manto de saprolitos. Várias características de cicatrizes de deslizamento de terra reelaboradas por água de superfície são indicativas de intensos movimentos de massa e erosão em tempo pré-atual. Uma grande diversidade de feições é indicativa de intensa erosão ao lado de elevado número de cicatrizes de escorregamentos, ocorridos em época pré-atual. Foram consideradas 24 variáveis espaciais geológicas e geomórficas, admitindo uma variação ternária, do tipo presente (1), ausente (-1) e incerta (0). Os fatores modificadores foram obtidos com os casos de cicatrizes mapeados. A aplicação do modelo probabilístico desenvolvido respondeu por 75% dos 120 casos observados e identificou 40 novos locais com valor de probabilidade de ocorrer acima do valor mínimo de suscetibilidade para o qual existem cicatrizes. As variáveis das categorias altitude (faixa 720-820 m), tipos litológicos (*hornfels*, filitos-calcários, cálcio-xistos), azimuth do declive (face sudoeste) e direção de fratura (NNE) constituem os principais fatores de desenvolvimento dos escorregamentos; a declividade baixa (menor que 10%) é favorável, porém revela elevada ambigüidade. O procedimento revelou-se adequado, ajustando-se bem aos fatos observados e fazendo previsões coerentes; ao mesmo tempo em que é de fácil aplicação.

Palavras-chave: raciocínio probabilístico, favorabilidade para escorregamento, análise da paisagem.

EXTENDED ABSTRACT

A landslide susceptibility analysis has been made using probabilistic methods instead of empiric or analog dynamic models. The occurrence of a landslide event is the result of a favorable combination of conditions, which commonly are not accessible to direct investigation. As alternative, it is possible to investigate them through variables that present dependence relationship with these conditions and consequently some relationship with the occurrence of the event. The expectation of an event to happen is the result of an empiric relationship or of a reasoning; in both cases a series of observations or evidences are explicit or implicit. The reasoning is based on many logically combined premises as in "If Ei, then P", where Ei symbolizes a series of evidences or independent indicators and P represents the proposition of the type "the event happens". The evidences cumulatively indicate that P is true or false. Several sources of uncertainties are associated to this reasoning: (1) each evidence is represented by a geological information, derived from acquired data or facts, bearing an imprecision in its conception and delimitation; (2) the event like landsliding is defined by a mental construction, with an imprecision either in the conception as in the determination in field; (3) the relationship between the evidence and the event is not determinative, compulsory or contingent; it is but just causal or correlative, and just the cumulative effect of evidences has a stronger relationship with the event, allowing probabilistic approach of the relationship. Bayes rule of conditional probability allows to calculate how much a present evidence modifies the original probability of occurrence of the event relatively to the condition of the absence of the evidence. In homologous form, these relationships were used to evaluate the conditional probability in the spaces where the presence of the evidence or of the event it is uncertain or nonexistent. A case study was developed at Três Córregos area located in Campo Largo county (figure 1), near Curitiba, Paraná State, Brazil, on the highs of Ribeira river valley and within current humid subtropical climate. Several features of landslide scars reworked by surface water are indicative of intense mass movements and erosion in pre-current time. A model of landslide geoindicators were constructed based on regional literature (figure 2) and on several landslide scar in the area (figures 3 and 4). Field work and photointerpretation mapped good diversity of fracture trace, lithologic and structural units (figures 5 and 6) and a relief of intense incision with remnants of pre-Quaternary paleosurfaces (figures 7 and 8); under these remnants thick saprolite mantles are preserved. Relief characterization was made by automatic DTM analysis, mapping slope declivity and azimuth and slope type (figures 9, 10 and 11). Twenty-four geologic and geomorphic space variables were considered, admitting a ternary variation (table 1), of the type present (1), absent (-1) and uncertain (0). The modifier factors were calibrated by using mapped scars. Eleven variables are definite favorable to landsliding, mainly the ones of the categories altitude (720-820 m), lithologic types (*hornfels*, filite-limestone, calcium-schist), slope azimuth (southwest face) and fracture direction (NNE); the lower slope (smaller than 10%) space variable is favorable, but reveals high ambiguity; convex slopes are slightly favorable (table 2). The application of the probabilistic model to forecast new points of landslides in the same area accounted for 75% of the 120 observed cases and identifies 40 new points with probability of landsliding value above the minimum value of probability for which scars were identified (figure 13). The uncertainty associated with data and model was evaluated and is limited to small values (14). Using the complement of the probability of non occurrence as a measure of landslide susceptibility (figure 15) the model account for 90% of observed cases. The procedure was revealed appropriate, adjusting well to the observed facts and making coherent forecasts; at the same time it is of easy application.

Key-words: probabilistic reasoning, landslide favorability, landscape analysis.

INTRODUÇÃO

A avaliação de riscos de escorregamentos tem sido feita utilizando modelos quantitativos mecânicos, modelos empíricos ou, ainda, modelos analógicos. Nos dois primeiros tipos, são caracterizadas as variáveis que geneticamente devem estar relacionadas com o escorregamento e o papel que cada uma desempenha no desencadeamento e desenvolvimento do fenômeno; no caso do modelo mecânico, uma relação física com o fenômeno é estabelecida por dedução. No caso do modelo analógico, consideram-se aquelas variáveis que por percepção de sua relação com os eventos em casos observados passam a ser consideradas associadas ao evento.

Na avaliação da potencialidade de ocorrência de depósitos minerais, tem sido recentemente utilizada uma outra metodologia, com base em relações probabilísticas entre evidências indicadoras e o evento. Tanto as evidências indicadoras, ou simplesmente indicadores, como os eventos, têm que ser conhecidos em um mesmo espaço, a partir de um determinado número de observações não viciadas de casos discretos deste espaço. Tem-se, neste caso, um modelo probabilístico do evento. O modelo probabilístico depende de um modelo de evento, tanto pelas características esperadas do evento, como pelos possíveis indicadores, observados ou suspeitados, independentemente da relação genética previamente verificada.

Essa metodologia é testada, no caso estudado, para avaliar a potencialidade de ocorrência de um determinado tipo de evento geológico, o escorregamento, numa área em que este tipo de evento ocorreu com frequência relativamente elevada nos últimos tempos, deixando cicatrizes no terreno que são facilmente reconhecidas em fotografias aéreas. Considerou-se escorregamento como deslizamento, um tipo de movimento de solo e rocha, rápido, não fluidizado (Augusto Filho 1998).

Por meio do mapeamento de áreas com cicatrizes de escorregamento, com base na interpretação de fotografias aéreas e utilizando variáveis que influenciam para que este evento ocorra, foi feito um cálculo de probabilidade de sua ocorrência, gerando assim um mapa com distribuição de valores para favorabilidade para o evento. O método de análise de favorabilidade aplicado foi ajustado para detectar áreas com risco de escorregamento. Cicatrizes de escorregamento têm sido utilizadas para calibrar modelos dinâmicos de escorregamento (Fiori 1995, Lopes 1995) com variáveis não georeferenciadas. Trata-se, nestes casos, de modelos relativamente simples por considerarem apenas duas variáveis espaciais

ais descritivas, relacionadas às forças motoras e resistentes enquanto função da altura e extensão da encosta. No caso de modelo probabilístico, um número maior de variáveis espaciais, georeferenciadas, é considerado.

OBJETIVO

O trabalho teve como objetivo principal avaliar o potencial de aplicação da probabilidade condicional na quantificação da favorabilidade e da suscetibilidade a escorregamentos. A probabilidade condicional é uma forma de avaliar a validade de um raciocínio do tipo “dado S, então H é verdadeiro”, proporcionalmente a “dado não S, então H é verdadeiro”, em que S exprime uma sucessão de evidências presentes ou ausentes, e H a hipótese de um objeto ou evento verdadeiro ou falso. A característica básica das entidades geológicas de não constituírem evidências inequívocas e de suas presenças ou ausências não serem perfeitamente definidas, incorporam diversas fontes de incertezas neste raciocínio (Soares 2000). A regra de Bayes da probabilidade condicional é, então, estendida para avaliar os efeitos das incertezas na ocorrência das evidências e do objeto buscado. Um estudo de caso é desenvolvido, com a aplicação do método em uma área teste na qual ocorrem diversas cicatrizes do fenômeno buscado. Nesta área de aplicação no estado do Paraná, foi feito um mapeamento geológico de detalhe por estudantes de graduação em geologia da Universidade Federal do Paraná, sob a coordenação dos professores M. Monastier, E. Salamuni e R. E. Lima, facilitando o acesso aos dados de campo e documentação cartográfica e fotográfica. As características da área e do trabalho desenvolvido permitiram utilizá-la como estudo de caso para testar a aplicabilidade do modelo probabilístico de escorregamento.

MÉTODOS E TÉCNICAS DE TRABALHO

ANÁLISE DE FAVORABILIDADE

O trabalho utilizou a metodologia de análise de favorabilidade descrita por Agterberg (1989) e por Rostirolla et al. (1998), adotando-se um modelo analítico e preditivo alternativo (Soares 2001b) para incorporar a avaliação das incertezas associadas ao mapeamento dos indicadores.

A existência ou previsão de um evento geológico é resultante da conjunção de processos ou ações mutua-

mente condicionados, e a probabilidade de sua ocorrência ou sua descoberta pode ser representada pelo resultado de combinação de probabilidades condicionais (Soares 2000, inédito).

A favorabilidade para a ocorrência do evento é uma avaliação quantitativa da expectativa da ocorrência deste evento, dada a presença ou ausência de uma série de indicadores a ele associados. A avaliação probabilística desta favorabilidade estima a probabilidade condicional de ocorrer relativamente a de não ocorrer o evento no domínio da variável e fora deste. Em seguida, o mesmo é feito com as outras variáveis. As sucessivas probabilidades condicionais são combinadas, de forma a estabelecer um escore final de probabilidade (Soares 2000, inédito) de ocorrer o evento e de probabilidade de não ocorrer.

A base conceitual do modelo probabilístico de combinação de evidências é adaptada de Agterberg (1989). Dois conceitos devem estar bastante claros para a compreensão dos resultados. Trata-se dos conceitos de *necessidade* e de *suficiência*, que são discutidos por Rostirolla et al. (1998). Uma variável é dita mais *necessária* quanto mais ela está ausente onde o evento não ocorre; por outro lado, é tanto mais *suficiente* quanto maior a proporção de ocorrência do evento em que ela está presente. A necessidade é uma medida da veracidade da afirmação “se a evidência E é falsa, então a hipótese H não é verdade,” enquanto a suficiência mede a veracidade de “se E é verdade, então H também é verdade.”

De forma similar, diz-se que a condição de suficiência de uma variável (evidência E) é satisfeita quando a probabilidade de existência do escorregamento (hipótese H) é aumentada com a existência da variável [$P(H/E)=\text{máximo}$]. A condição de necessidade da variável é satisfeita quando a probabilidade de não existência do evento é aumentada com a não existência da variável [$P(H/E)=\text{máximo}$] (Rostirolla et al. 1998, Artur 1998).

Uma variável será considerada altamente necessária na seguinte situação: não ocorrendo a variável, não ocorrerá o escorregamento; por outro lado, uma variável será considerada altamente suficiente se, ocorrendo a variável, ocorrer o escorregamento. Idealmente, irá ocorrer o escorregamento onde um conjunto de evidências diagnósticas apresentem os mais altos graus de necessidade e suficiência (contraste).

O método de ponderação *bayesiana*, que segue os princípios de análise probabilística condicional, consiste em determinar a probabilidade de ocorrer um evento, no caso o escorregamento, dado uma condicionante (variável). As celas que contêm as cicatrizes são consideradas como um subconjunto do conjunto total de

dados, com a estimativa de favorabilidade envolvendo a interseção entre outros eventos (escorregamento e variável) (Agterberg 1989, Rostirolla et al. 1998, Artur 1998).

Neste trabalho, o ponderador *bayesiano* foi empregado para determinar as condições de necessidade e suficiência das variáveis. A potencialidade destas variáveis como indicadores de escorregamento foi combinada através do programa *Anfavin*, desenvolvido em *Turbo Basic* (Soares 2001, inédito).

Para desenvolvimento deste trabalho foi necessário dividir a área em celas e avaliar a presença, a ausência ou o desconhecimento de cada indicador e da cicatriz do evento buscado em cada cela. Assim, a área foi dividida em 2.240 casos de observação (celas), nos quais foram avaliadas as condições de cada indicador.

Pela regra de Bayes, a ocorrência de um indicador E modifica a probabilidade prévia de ocorrer um evento H, num espaço X, por um fator igual à probabilidade da existência de E dada a ocorrência do evento, ou:

$$P(H / E) = p(H) \cdot p(E / H) \quad (1)$$

Onde $p(H)$, $p(nH)$ (inexistência de H) e $p(iH)$ (H incerto) concorrem num mesmo espaço e sua soma é 1. De forma semelhante, $p(H|E)$, $p(H|nE)$ e $p(H|iE)$ somam 1.

Podemos estabelecer as relações homólogas no espaço E:

$$P(nH / E) = p(nH) \cdot p(E / nH) \quad (2)$$

$$P(iH / E) = p(iH) \cdot p(E / iH) \quad (3)$$

A razão entre estas probabilidades e seus espaços complementares constitui a chance (Ch) de ocorrer o tipo de condição estabelecida. Assim, tem-se (Soares, 2001b):

$$Ch(H / E) = [p(H)/(1-p(H))] \cdot [p(E/H)/(1-p(E/H))] \quad (4)$$

$$Ch(nH/E) = [p(nH)/(1-p(nH))] \cdot [p(E/nH)/(1-p(E/nH))] \quad (5)$$

$$Ch(iH/E) = [p(iH)/(1-p(iH))] \cdot [p(E/iH)/(1-p(E/iH))] \quad (6)$$

Para o domínio da não ocorrência de E (nE), as mesmas 6 relações podem ser estabelecidas, e outras tantas para o domínio de E incerto (iE). Os dois fatores do segundo membro, a chance prévia e o fator modificador, de cada relação, podem ser obtidos pelo conjunto de observações, de tal forma que as chances do evento podem ser determinadas para cada domínio do indicador E1, passando esta a constituir uma chance prévia que é usada para a determinação no domínio de E2 e sucessivamente para os domínios dos diversos indicadores.

$$Ch(H/E, nE, iE) = Ch(H) \cdot Fs, n, i_1 \cdot Fs, n, i_2 \cdot Fs, n, i_3 \dots Fs, n, i_n \quad (7)$$

$$Ch(nH/E, nE, iE) = Ch(nH) \cdot Fs, n, i_1 \cdot Fs, n, i_2 \cdot Fs, n, i_3 \dots Fs, n, i_n \quad (8)$$

$$Ch(iH/E, nE, iE) = Ch(nH) \cdot Fs, n, i_1 \cdot Fs, n, i_2 \cdot Fs, n, i_3 \dots Fs, n, i_n \quad (9)$$

Onde Fs, n, i são os fatores modificadores em cada condição do indicador presente, ausente ou incerto, respectivamente, para o indicador i .

Tendo-se a chance a posteriori das diversas condições do evento (H , nH e iH), e considerando que a pro-

babilidade do evento e seu complemento soma 1, determinou-se o valor da probabilidade de cada condição do evento.

ESTUDO DE CASO

Localização e contexto geológico e geomórfico da área

A área escolhida situa-se no Sul do Brasil, leste do

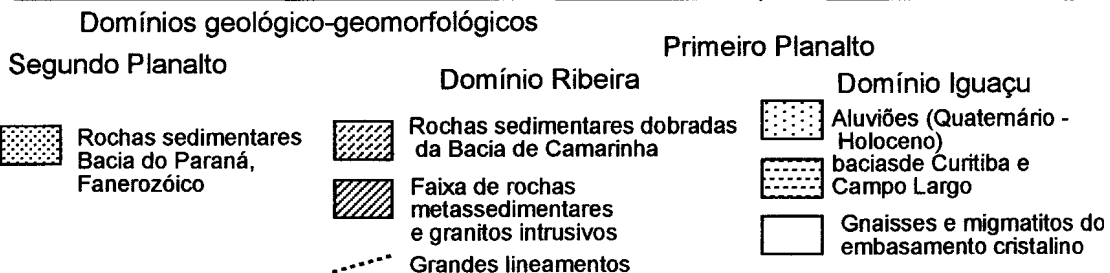
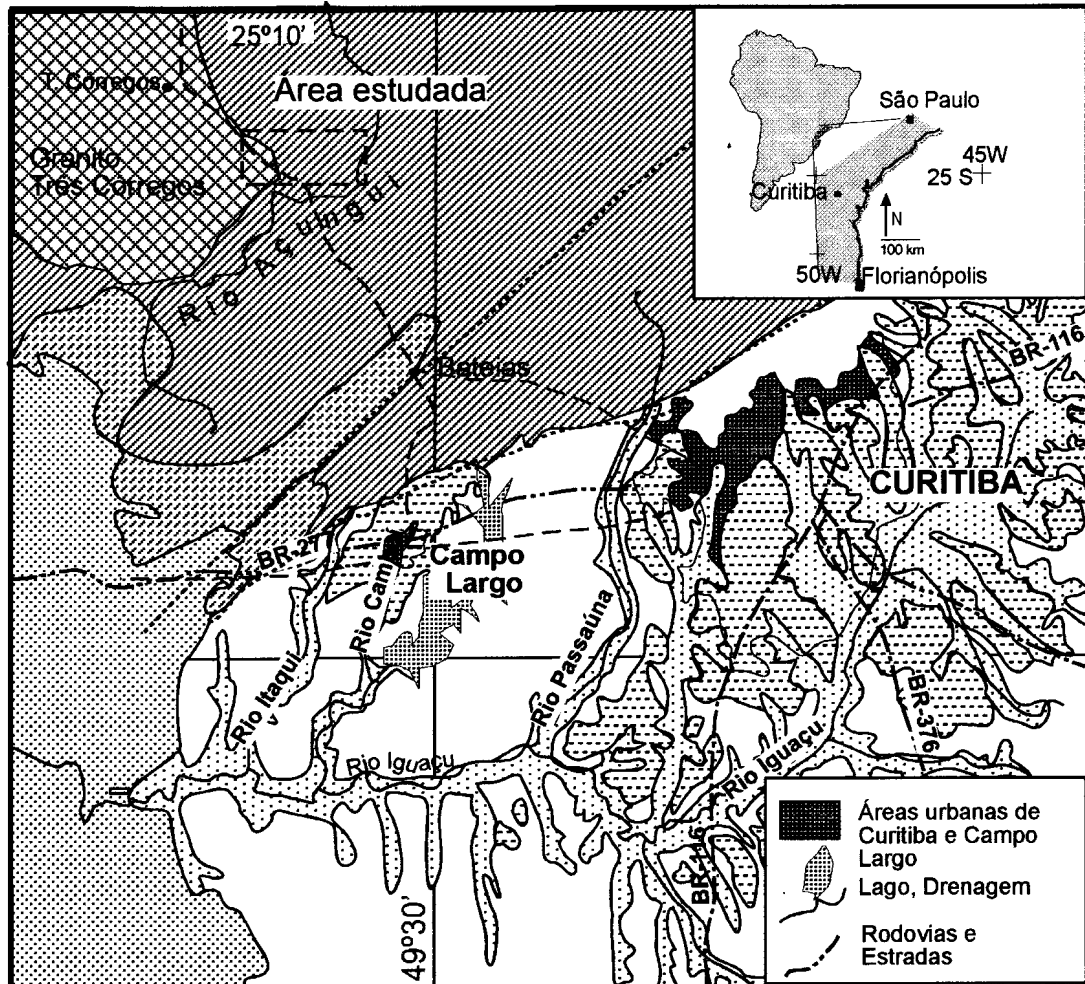


Figura 1: Localização da área de estudo de caso e contexto geológico-geomorfológico. A área situa-se no Primeiro Planalto Paranaense, em domínio de intensa erosão, com nível de base no rio Ribeira; o relevo é controlado por arranjos litológicos e estruturas NE e fraturas e diques NW. Location of the case study area and geologic-geomorphologic context. The area is located in the Segundo Planalto Paranaense, in the domain of intense erosion, with base level in the Açungui-Ribeira River; the relief is controlled by lithology distributions, northeastern folds and fractures and by northwestern dikes.

estado do Paraná, a cerca de 100 km a noroeste de Curitiba, no município de Campo Largo, no Segundo Planalto do Paraná, bacia do rio Açungui (figura 1). A região está na zona de máxima atividade erosiva da bacia do Açungui, próximo ao divisor com a bacia do rio Iguaçu. O clima atual é subtropical úmido, com precipitação pluviométrica anual da ordem de 1.600 mm. A área estudada apresenta uma superfície de 28,2 km² e está localizada a nordeste do município de Campo Largo – Paraná, na localidade de Três Córregos, a 20 km da localidade de Bateias. Limita-se pelas coordenadas: longitude 638.000 a 644.000 UTM (m), relativamente ao meridiano central de 51° W, e latitude 7.211.200 e 7.215.900 UTM (m) em relação ao Equador, acrescidas as constantes de 500.000 e 10.000.000 m, respectivamente.

Para chegar ao local de estudo, partindo de Curitiba, deve-se acessar a BR-277, indo até o município de Campo Largo. Então, toma-se a rodovia PR-510, que liga a rodovia federal à PR-090, na localidade de Bateias. Exceto a última rodovia, que corta a área em sentido noroeste, as demais possuem revestimento asfáltico. Pode-se utilizar também o acesso pela PR-090, a partir do bairro de Santa Felicidade, em Curitiba, porém as condições de tráfego são inferiores.

O relevo da área encontra-se num estágio juvenil, conservando paleosuperfícies de pedimentos em alguns espigões com altitude da ordem de 960 m e vales com nível de base local a 600 m. As rochas são predominantemente metamórficas, em grau baixo, com intercalações de granitos.

SELEÇÃO DOS INDICADORES

Os indicadores descritos a seguir foram considerados potencialmente relacionados com o evento, fazendo parte do modelo hipotético (figura 2). A relação com o evento foi definida pela relação probabilística observada. Cada indicador constituiu uma variável espacial, podendo adquirir os valores 1, se presentes, -1, se ausentes e 0, se incertos, na malha de observações.

1. Lineações de relevo negativas discretas: constituem feições do relevo associadas a *zonas de fraturas*; formam indicadores classificados por direções (a) N0-45E, (b) N45-90E, (c) N0-45W e (d) N45-90W.
2. Hipsometria: uma paleo-superfície está presente na área, com extensiva ocorrência, constituindo remanescente de superfície de pedimentos, na faixa de altitudes entre 720 e 820 m; nesta superfície, encontram-se solos e paleo-solos espessos, na maioria alóctones; faixas hipsométricas mais elevadas constituem essencialmente formas de relevo remanescentes, enquanto faixas mais baixas compõem o relevo

em intenso entalhamento pré-atual e atual. As faixas seguintes foram tomadas como possíveis indicadores: (a) 520-620 m, (b) 620-720 m, (c) 720-820 m e (d) 820-920 m.

3. Declividade: este dado da encosta foi classificado em quatro faixas de valores de inclinação, consideradas para avaliar qual seria o melhor indicador de interesse (a) 0-10°, (b) 10-20°, (c) 20-30°, (d) >30° de declividade.
4. Direção da encosta: esta variável foi considerada de interesse, pois à medida que a encosta se encontra paralela à direção de fraturas, ou em posição de menor insolação, ocorre maior facilidade de deslizamento na superfície e maior umidade no solo. Quatro faixas de valores azimutais ortogonais à direção das encostas e apontando para o máximo declive foram consideradas: (a) 0-90°, (b) 90-180°, (c) 180-270°, (d) 270-360°.
5. Tipo de encosta: diferentes setores da encosta apresentam diferentes geometrias em perfil, aos quais se associam diferentes tipos de solo e diferentes processos de evolução; assim, em encostas convexas predominam solos espessos e a erosão é limitada pela capacidade de transporte; encostas retilíneas apresentam erosão limitada pelo intemperismo, com solos pouco espessos, escoamento linear subparalelo em rampas; nas encostas côncavas, ocorre erosão limitada pelo transporte, em equilíbrio com a deposição e o escoamento linear confluyente. Os três segmentos foram classificados, cada um podendo ser um indicador independente: (a) encosta côncava, (b) encosta convexa e (c) encosta retilínea.
6. Tipos litológicos: o tipo litológico predominante no maciço sobre o qual se desenvolveu a encosta constitui variável importante, pois é um fator controlador do tipo de solo (dadas condições similares de clima, de tempo de vida da paisagem e de declividade) e das propriedades de permo-porosidade (granulometria dos constituintes, teor de argila, óxidos de ferro, etc) e de resistência ao cisalhamento; cinco distintas associações litológicas foram discriminadas a partir do mapa geológico de detalhe da área (Soares Lopes & Empinotti 2000): (a) granito, (b) *hornfels*, (c) associação de filitos e mármore, (d) cálcio-xisto e (e) diques de diabásio.

Ao todo, estas variáveis compuseram 24 indicadores potenciais, avaliados no mesmo espaço geográfico da ocorrência das cicatrizes de escorregamento.

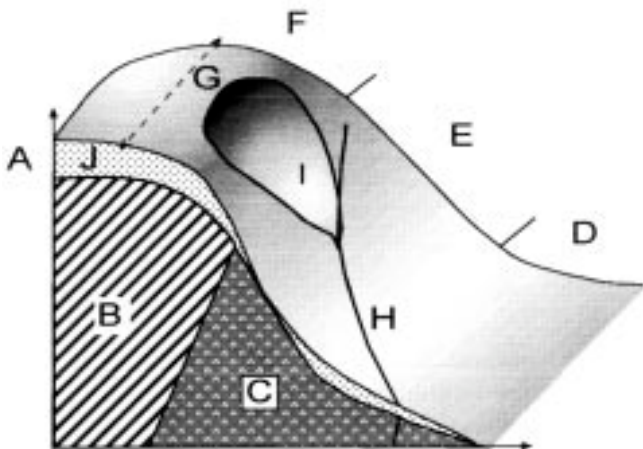


Figura 2: Ilustração esquemática do modelo descritivo de contexto geológico e geomórfico de ocorrência de escorregamento. Atributos considerados como parte do modelado da encosta e que desempenham um papel esperado na ocorrência de escorregamento: A – altitude do relevo; B, C – tipos litológicos; D, E, F – tipo de perfil da vertente (convexo, retilíneo e côncavo); G – orientação da face da encosta; H – traço de fratura (direção 1,2,3... e mergulhos; J – tipos e espessura do solo; I – cicatriz de escorregamento; *Schematic illustration of the descriptive model of geologic and geomorphic context of landslide occurrence. Attributes considered part of the slope model and that play an expected role in the landslide occurrence: A – Altitude of the relief; B, C – Lithologic types; D, E, F – type of profile of the slope (convex, ratline and concave); G – orientation of the face of the slope; H - trace of fracture (direction 1,2,3... and dives); J – types and thickness of soil; I – landslide scar.*

CICATRIZES DE ESCORREGAMENTO

As cicatrizes de escorregamento são identificadas em fotografias aéreas e no campo com frequência relativamente elevada. Constituem feições em crescente no alto da encosta, na zona de ruptura, e aproximadamente triangulares e alongadas na base da vertente, com vegetação diferente do entorno, densidade de relevo elevada e filetes de escoamento subparalelo (figura 3). São formas sem vegetação, no caso do evento ser recente, até com vegetação quase inteiramente recomposta, nos casos mais antigos. Em campo foi verificado que se trata de escorregamentos situados no manto intemperizado, iniciando no solo e atingindo o saprolito com dinâmica rotacional e translacional. Em muitos casos, são ainda encontrados detritos transportados na base. Cicatrizes de escorregamento têm sido utilizadas para calibrar modelos dinâmicos de escorregamento (Fiori 1995, Lopes 1995) com variáveis não georreferenciadas. Trata-se, nestes casos, de modelos relativamente simples por considerarem apenas duas variáveis espaciais descritivas, relacionadas às forças motoras e resistentes enquanto função da altura e extensão da encosta. No caso de modelo probabilístico, um número maior de variáveis espaciais é considerado e estas variáveis estão georreferenciadas.

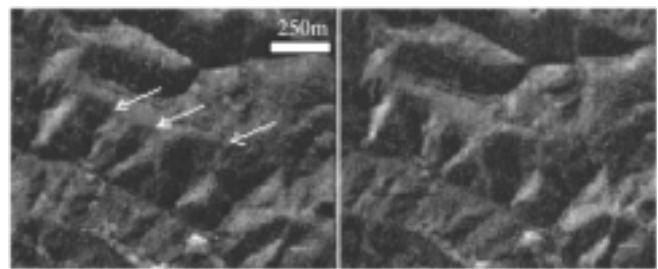


Figura 3: Estereopar para observação em 3D das características típicas da área de ocorrência de escorregamento, enquanto objeto de referência: a cicatriz. Três cicatrizes são evidentes, embora já tenha ocorrido retrabalhamento erosivo da feição original. O escorregamento ocorreu a partir de um interflúvio que se situa como remanescente de uma superfície de pedimentação, quase inteiramente dissecada. *Stereopair for 3D observation of the typical characteristics of the area of landslide occurrence, while reference object: the scar. Three scars are evident, although it has already happened erosive reworking of the original feature. The landslide happened starting from an watershed that represents a remainder of a pediment surface, almost entirely dissected.*

AQUISIÇÃO DOS DADOS

FOTOGRAFIAS AÉREAS

Foram utilizadas fotos aéreas para a análise do relevo e da drenagem (Soares & Fiori, 1975), caracterizando as zonas homólogas de relevo e interpretando os possíveis substratos litológicos associados. A análise e interpretação foram feitas em fotografias aéreas (ITC, 1980) na escala 1: 25.000.

Também a partir do mapa analítico foi feito o mapa de lineações (interpretadas como traço de fratura). Foram distinguidos os traços de diferentes direções, classificadas por setores: N00-45E, N45-90E, N00-45W e N45-90W.

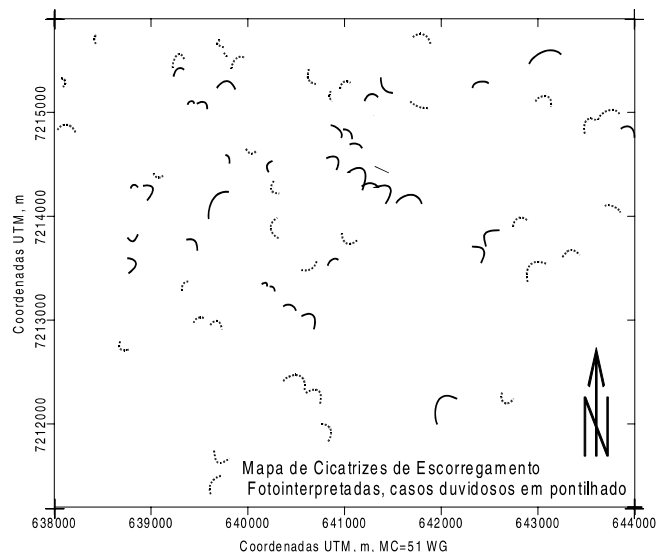


Figura 4: Mapa de localização das cicatrizes de escorregamentos interpretadas em fotografias aéreas. As cicatrizes que apresentam dúvidas sobre sua real existência são indicadas em pontilhado. *Map of location of the landslides scars, interpreted in aerial photos. The scars that present doubts about its real existence are stippled.*

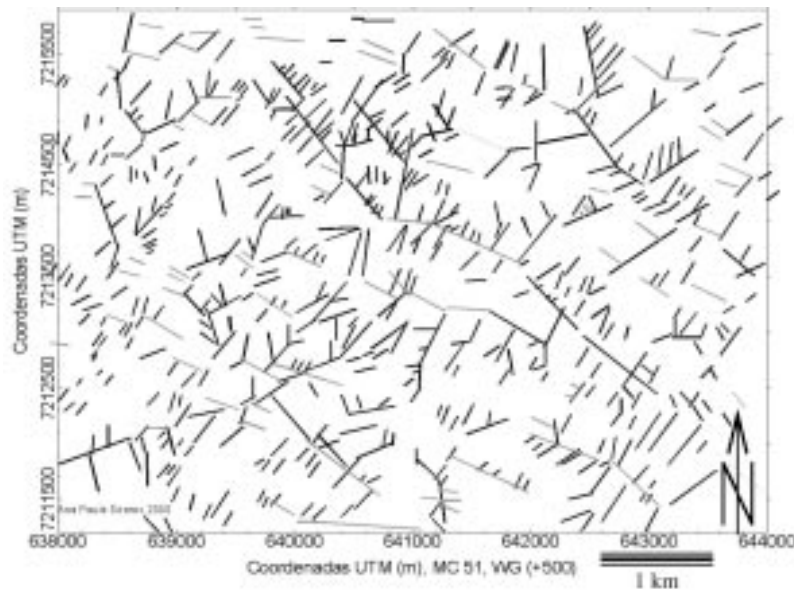


Figura 5: Lineações negativas discretas, interpretadas como representativas de traços de fratura. Os traços foram ajustados às celas de pesquisa e classificados por direções. *Discrete negatives linears, interpreted as representative of fracture lines. The lines were adjusted to the research cells and classified by directions.*

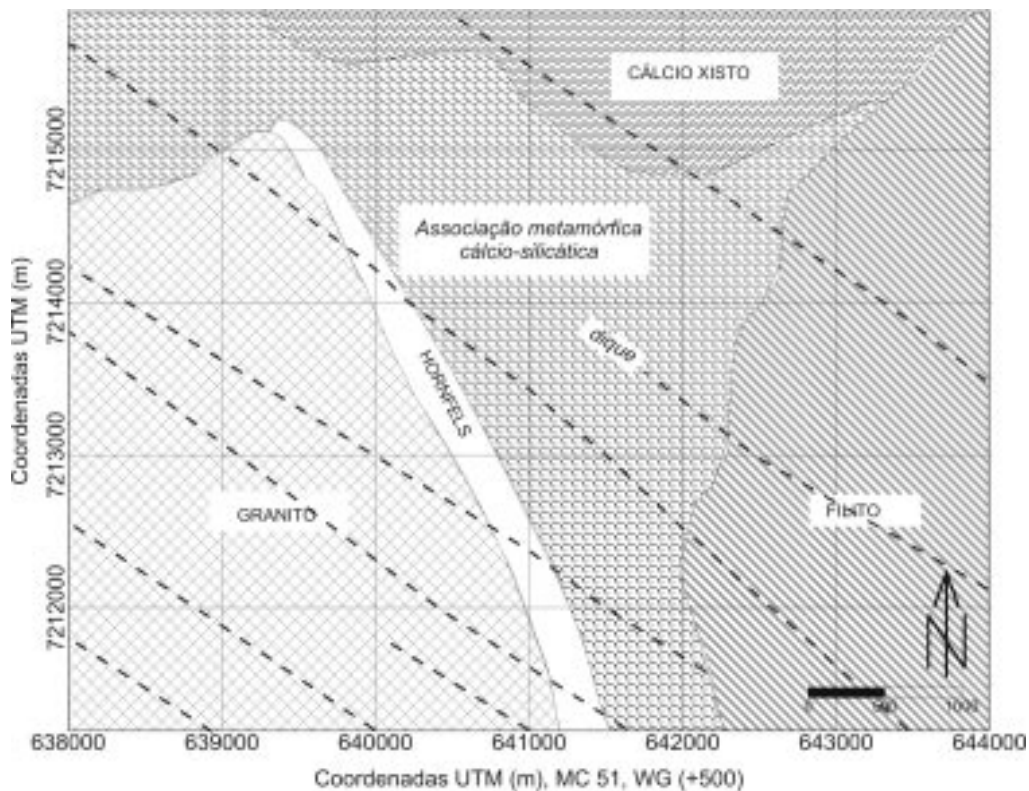


Figura 6: Mapa litológico da área. A unidade Granito é formada por granito porfirítico, com textura grossa, estrutura maciça, leucocrático, rico em quartzo, K-feldspato e Na-plagioclásio; a unidade Filito inclui quartzo-clorita-sericita filitos, lentes de conglomerados e faz parte do grupo Açungui; a unidade de Cálcio-xistos contém corpos de mármore intercalados em xistos com carbonato e com clorita, tremolita-actinolita, enquanto a unidade Cálcio-silicática contém predominantemente carbonato-amfibólio xistos, pertencendo ambas à unidade Água Clara, do grupo Setuva. A unidade Hornfels resulta de metamorfismo de contato da intrusão granítica. *Lithologic map of the area. The Granite unit is formed by porphyritic granite, with coarse texture, massive, leucocratic, rich in Quartz, K-Feldspar and Na-Plagioclase; the Phyllite unit includes quartz-chlorite-sericite phyllites and lenses of conglomerate, bearing to the Açungui group; the Calcium-schists unit counts bodies of marbles inserted in carbonate and chlorite tremolite actinolite schists, while the Calcium-silicate unit is made up predominantly of carbonate-amphibole schist, both belonging to the Água Clara unit, of the Setuva group. The Hornfels unit results of contact metamorphism of the granite intrusion.*

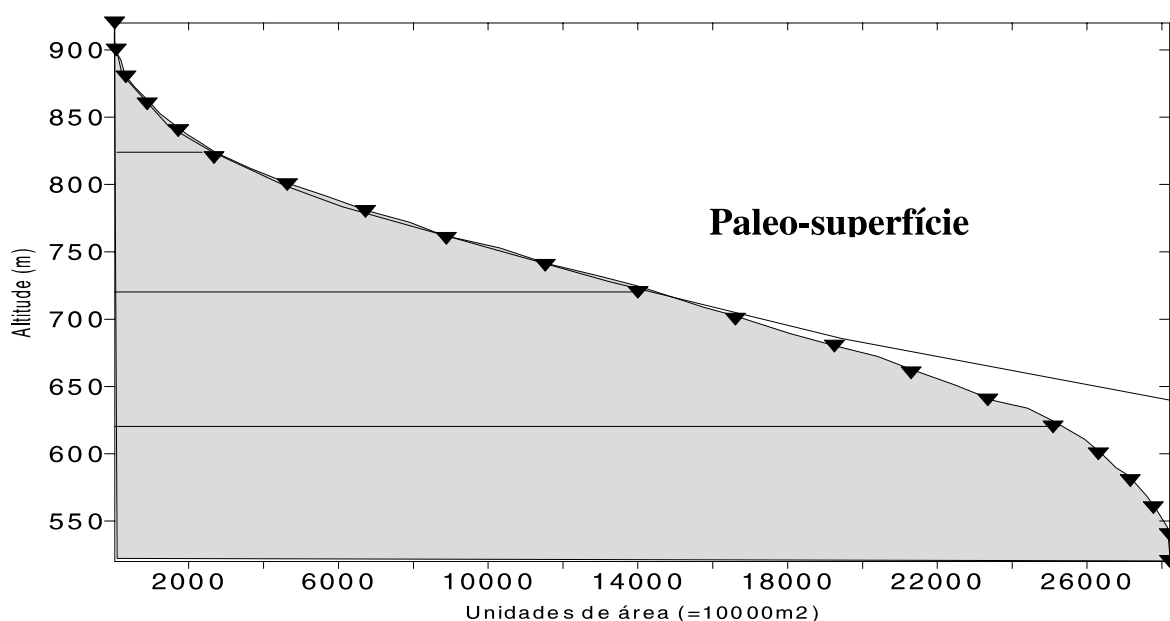


Figura 7: Curva hipsométrica da área, bacia do rio Beleza, cabeceiras do rio Açungui. Observa-se a paleosuperfície remanescente e a zona de intenso entalhe erosivo da bacia de drenagem atual, abaixo da cota de 700 m. A faixa altimétrica de 700 a 820 preserva a maior parte de remanescentes dos pedimentos pré-existent, gerando o patamar típico. *Hypsometric curve of the area, Beleza River basin, headlands of the Açungui river. The paleosurface remnant is observed; the zone of intense erosive incision of current drainage network is below the 700 m altitude. The altimetric interval from 700 to 820 preserves most of remnants of the pre-existent pediments, generating the typical terrace form.*

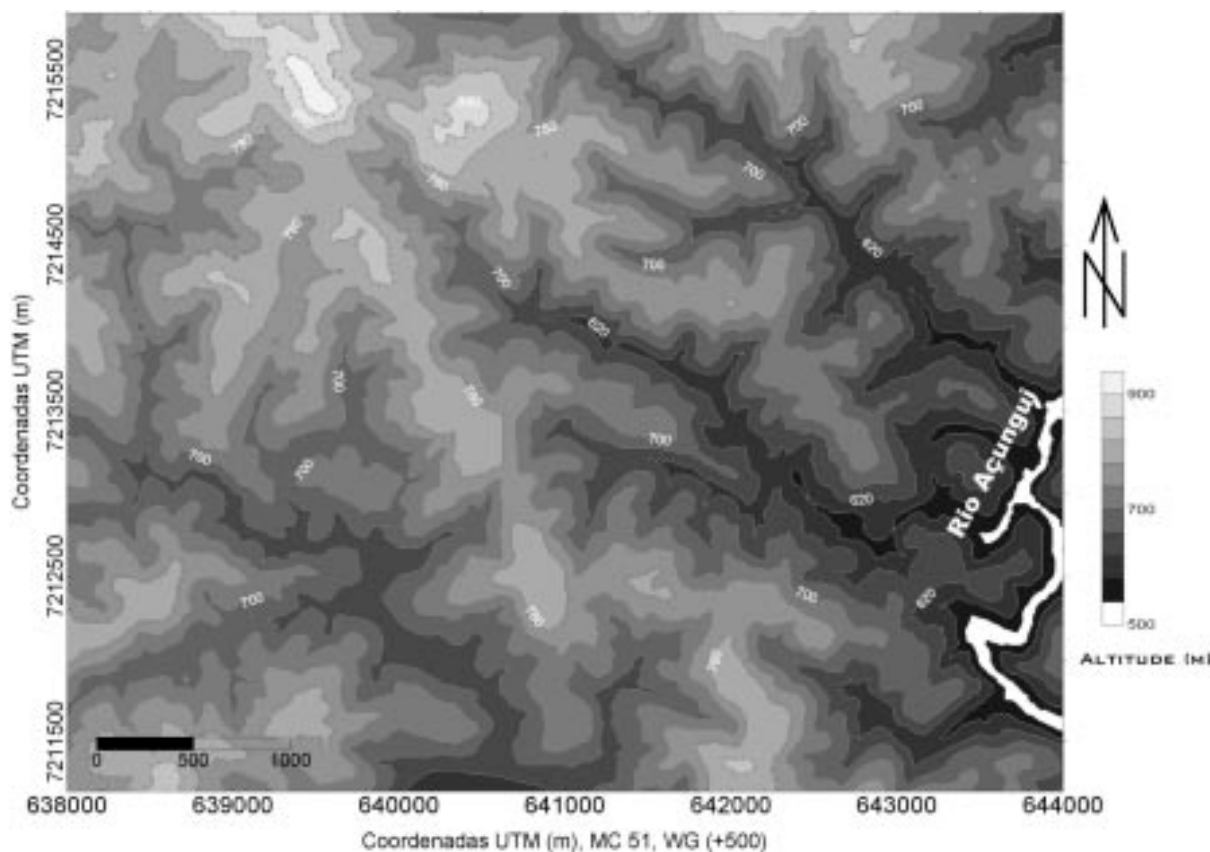


Figura 8: Mapa hipsométrico da área ressaltando os interflúvios claros acima de 800 m, com os remanescentes de *inselbergs* acima de 900 m e o intenso entalhe pela drenagem afluente do rio Açungui. *Hypsometric map of the area standing out the clear watersheds above 800 m, with the inselberg remnants above 900 m and the intense valley erosion by the drainage flowing to Açungui River.*

As cicatrizes que serviram de referência como objeto de busca foram identificadas nas mesmas fotografias aéreas. São feições típicas pela sua morfologia (figura 3), tendo sido classificadas como *presentes* quando existentes (atribuindo-se o valor 1), *incertas* quando sua existência não podia ser 100% confiável (atribuindo-se a esta o valor 0) e *ausentes* (atribuindo-se o valor -1). A distribuição espacial da variável cicatriz está apresentada na figura 4.

COMPOSIÇÃO DO MAPA DAS FEIÇÕES TRAÇADAS EM FOTOS AÉREAS

Todas as feições traçadas nas fotos aéreas foram desenhadas e tiveram suas escalas e sistema de georreferência ajustados, por setores da foto aérea, aos da carta topográfica. Os arquivos de polígonos e linhas referentes aos mapas de cicatrizes (figura 4) e de traço de fraturas (figura 5) e de litologias da área (figura 6) foram transformados em formato ASCII (tipo *.bln, Surfer[®]) de forma a calcular a distribuição espacial do erro como fator. Verificada esta distribuição, foi ajustado um polinômio de 6º grau – como fator multiplicativo dos arquivos dos polígonos e linhas – aos valores de fator de erro, ajustando-os adequadamente à base topográfica.

COMPOSIÇÃO DO MAPA DIGITAL (MDT): CARACTERIZAÇÃO QUANTITATIVA DAS UNIDADES DE PAISAGEM

A aquisição dos dados altimétricos foi feita a partir de digitalização de pontos nas curvas de nível (Surfer[®]) e de pontos auxiliares nos interflúvios e linhas de drenagem. O arquivo gerado foi convertido em ASCII *.XYZ. Com estes dados, inicialmente foi construída uma curva hipsométrica (figura 7), sendo claramente percebida a existência de um patamar na faixa de 720-820 m, interpretado como remanescente de uma paleosuperfície, na qual é esperada maior espessura de solos. A partir desta, as demais faixas foram delimitadas como possíveis indicadores.

O modelo digital do terreno foi construído com a interpolação pelo método da mínima curvatura, gerando uma *malha* de 15 m x 15 m (Rockware[®], Surfer[®]). Com o *grid* foram gerados:

1. Mapa de contorno, definindo as faixas hipsométricas (figura 8) e permitindo a visualização dos interflúvios onde se preservam remanescentes de pedimentos e as zonas de intenso entalhe erosivo nos vales;
2. Mapa de sombreamento, para visualização do terreno (figura 9);

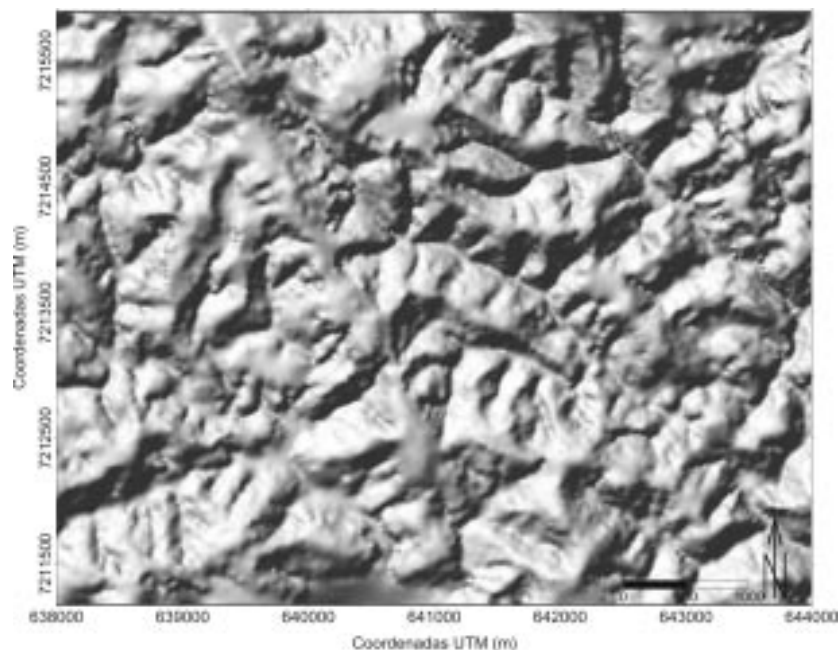


Figura 9: Modelo digital de terreno com sombreamento, iluminação de NW; observar elevado controle estrutural no desenvolvimento do relevo. Inúmeras feições menores, com início na parte superior das encostas, constituem as cicatrizes de escorregamento, mais ou menos retrabalhadas. *Digital terrain model with shading from NW; high structural control in the development of the relief is evident. Countless smaller features, locate in the upper part of the slope, constitute the landslide scars, somewhat reworked.*

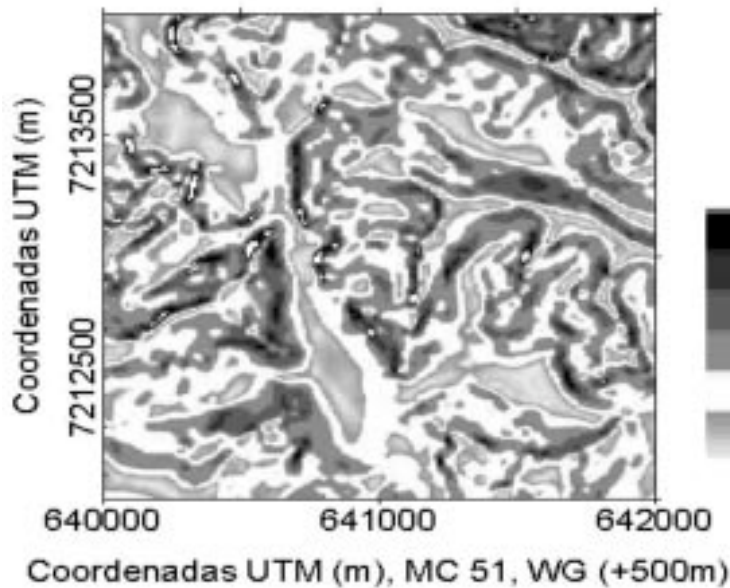


Figura 10: Exemplo de faixas de declives das encostas em graus, em parte da área estudada. Observar o interflúvio com direção NNW, da parte central da área, com baixa declividade. Nas bordas deste interflúvio, é encontrado elevado número de cicatrizes de escorregamento. *Example of zones of same slope angle in degrees, central part of the studied area. Note the watersheds with direction NNW, at the central part of the area, with low declivity. At the borders of this watershed, high number of landslides scars are found.*

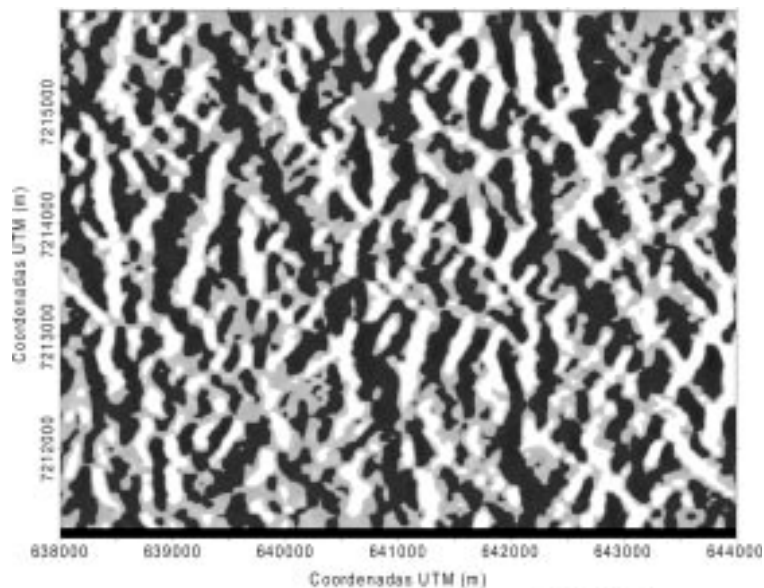
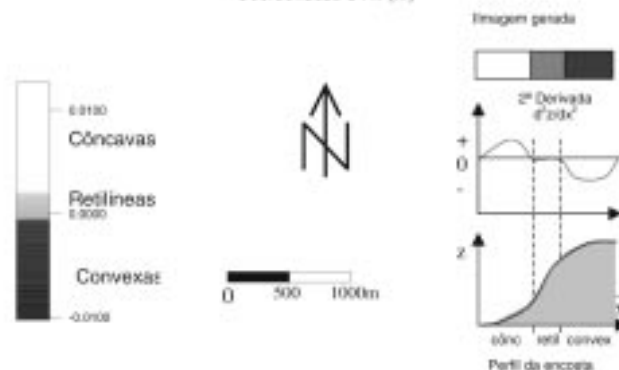


Figura 11: Setor da área mostrando o resultado da classificação automática do tipo de encostas com base na segunda derivada, onde encostas retilíneas têm valor em torno de zero (cinza), as convexas, valores negativos (branco) e as côncavas têm valores positivos (cinza escuro). Representação esquemática da relação entre a segunda derivada, a forma dos segmentos da encosta e a imagem gerada. *Section of the area showing the result of the automatic classification of the slope types based on the second derivative of DTM. Planar segments has value around zero (gray); convex has negative values (white) and the concave ones have positive values (dark gray). Schematic representation of the relationship among second derivative, the form of the segment of the slopes and the generated image.*



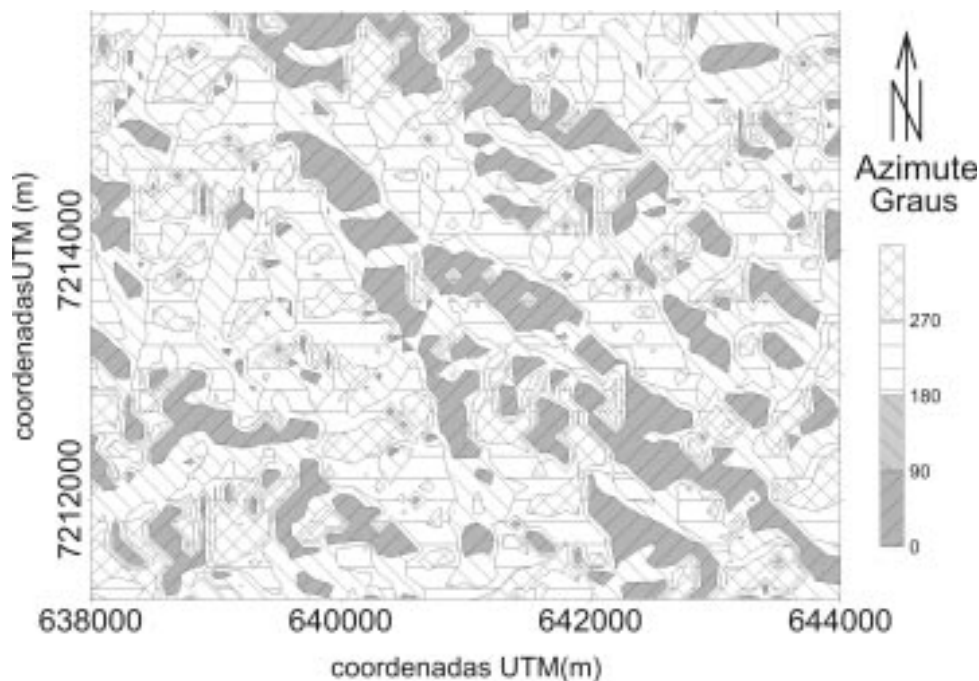


Figura 12: Orientação azimutal do declive das encostas. Notam-se extensos interflúvios e vales NW, com face das encostas voltadas para NE e SW. *Azimuthal orientation of the maximum slope. Extensive watersheds and valleys striking NW, with face of the slopes toward NE and SW.*

3. Mapa de declive, definindo as faixas de declive em graus (figura 10); diferentes faixas de declives foram consideradas variáveis espaciais;
4. Mapa da segunda derivada (figura 11), utilizado para mapear automaticamente as formas convexas, côncavas e retilíneas; as formas convexas resultam em aclives decrescentes e declives crescentes (2.ª derivada negativa) em X e em Y, e as formas côncavas, opostamente, em 2.ª derivada positiva; pequeno desvio em torno do zero foi utilizado para definir encosta retilínea;
5. Mapa de azimutes do relevo (figura 12), definindo as direções de declive das encostas; foram consideradas variáveis espaciais importantes por apresentarem uma face livre potencialmente associada a descontinuidades estruturais;

RELAÇÕES ENTRE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS E FEIÇÕES GEOLÓGICAS E GEOMÓRFICAS DE RELEVO

A distribuição dos diversos indicadores e da ocorrência das cicatrizes foi feita por meio de uma malha regular de observações georreferenciadas com 2.820 celas correspondendo cada uma a 10.000 m² (100 m por 100 m); esta malha foi superposta à distribuição de cada vari-

ável, registrando a presença, a ausência ou a incerteza atribuindo-se valor 1, -1, ou 0, respectivamente. A construção da planilha (tabela 1) foi feita usando o comando *digitize* (*SURFER*®) e reclassificando os pontos nas celas através do programa *Reclass* (Soares 2000, inédito).

Nas 2.820 celas foram observados 73 casos de cicatrizes identificadas sem dúvida, 78 casos duvidosos, restando 2.639 casos sem o registro do evento.

FAVORABILIDADE PARA ESCORREGAMENTOS

Dois passos distintos são necessários na estimativa da favorabilidade: o primeiro é a determinação dos pesos de cada indicador, tendo em vista as relações de frequências observadas entre o indicador e a cicatriz, compondo o modelo probabilístico; o segundo é a aplicação do modelo probabilístico de forma a avaliar as condições de favorabilidade para cada cela e, desta forma, naquelas favoráveis em que ainda não ocorreram o evento tem-se o maior risco do evento ocorrer. Para determinação deste modelo e sua aplicação, foi utilizado um *software* específico (Anfavin, Soares, inédito 2).

DETERMINAÇÃO DO MODELO PROBABILÍSTICO

O modelo probabilístico é composto da chance prévia modificada por tantos fatores quantos forem os indicadores. A chance prévia é a razão entre a probabili-

TABELA 1: Exemplo de tabela de variáveis espaciais gerada no *Surfer* a partir dos dados adquiridos, reclassificados por cela (*Reclass*). *Example of table of space variable generated in Surfer based on the acquired data, classified by cell (Reclass).*

| cela | X | Y | frat. NNE | frat. NNW | frat. ENE | frat. WNW | alt. 520-620 |
|------|--------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| 1 | 638000 | 7211200 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0 |
| 2 | 638000 | 7211300 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 3 | 638000 | 7211400 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| 4 | 638000 | 7211500 | 0 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 5 | 638000 | 7211600 | -1 | -1 | 1 | -1 | -1 |

dade de ocorrer e a de não ocorrer, independentemente da consideração a qualquer fator. Entretanto, ambos os valores de probabilidade de “ocorrer” ou “não ocorrer” são estimados pela probabilidade experimental (observada) e, portanto, não inclui toda a probabilidade de ocorrer, mas apenas os eventos já ocorridos. Tem-se que admitir, então, a chance prévia maior que aquela resultante das observações e o programa permite admitir esta situação. O mapeamento dos diversos indicadores não constitui um dado absoluto, admitindo um certo grau de confiabilidade, tanto naqueles casos tidos como presentes, como naqueles tidos como ausentes; assim, uma medida de confiabilidade é atribuída para cada variável mapeada, bem como para as cicatrizes.

Os resultados do modelo probabilístico de ocorrência de escorregamento, conforme relação (7) podem ser expressos por:

$$Ch(H/E_i, nE_i, iE_i) = Ch(H) \cdot Alog(S \cdot LS_i, LN_i) \quad (10)$$

Onde LS e LN representam o logaritmo dos fatores modificadores quando o indicador está presente e ausente respectivamente. $Ch(H)$ assume o valor mínimo de 0,028, podendo alcançar 0,069, se considerarmos todos os casos duvidosos como realmente cicatrizes.

Os valores apresentados na tabela 2 mostram o peso de cada indicador no modelo, tanto para indicar a probabilidade do evento quando o indicador está presente (LS), quanto para indicar sua improbabilidade, quando o indicador está ausente (LN). Neste caso, a soma algébrica dos dois fatores constitui uma medida do poder do indicador, designado contraste (CON, Agterberg 1989).

Observa-se que o principal indicador é a faixa hipsométrica, seguida pelo tipo litológico, declividade baixa, direção nordeste-sudoeste. Os indicadores com pesos negativos revelam a expectativa oposta: no caso de suficiência negativa, indicam que a presença da variá-

vel reduz a probabilidade do evento; no caso de necessidade positiva, a ausência do indicador aumenta a probabilidade do evento.

Assim, de acordo com o modelo probabilístico adotado, quanto maior a necessidade, mais negativo é o ponderador, e quanto maior a suficiência, mais positivo é o ponderador. A variável que mostra o mais alto contraste será aquela que apresenta, relativamente às outras, o maior poder de gerar o escorregamento.

APLICAÇÃO DO MODELO PROBABILÍSTICO

Este modelo foi utilizado para prever a ocorrência do evento a partir dos indicadores apontados, conforme seus pesos determinados. A mesma malha foi tomada como referência, calculando-se a chance a posteriori e a probabilidade do evento. O modelo probabilístico, ajustado e calibrado, foi aplicado na mesma área geográfica da modelagem, de tal forma que locais em que não ocorre o registro do evento, embora estejam numa faixa de valor de probabilidade acima do valor crítico mínimo de ocorrência, passem a ser considerados locais onde há expectativa de ocorrer o evento.

O mesmo programa (*Anfavin*), usado para ajuste e calibração do modelo, é adotado para a predição. Também todas as variáveis foram consideradas e o mesmo número de celas. Adotou-se na chance prévia a expectativa de ocorrência de um novo evento. As incertezas nas variáveis foram mantidas. Os resultados calculados consideram que a soma das probabilidades de ocorrer ou não, com as incertezas ou ambigüidades, são complementares.

A probabilidade é calculada admitindo-se que a soma das probabilidades do evento ocorrer, não ocorrer e ser incerto é igual a um. O mesmo aplicativo *Anfavin* foi utilizado, gerando uma planilha com os diversos resultados por cela, com as respectivas coordenadas. A

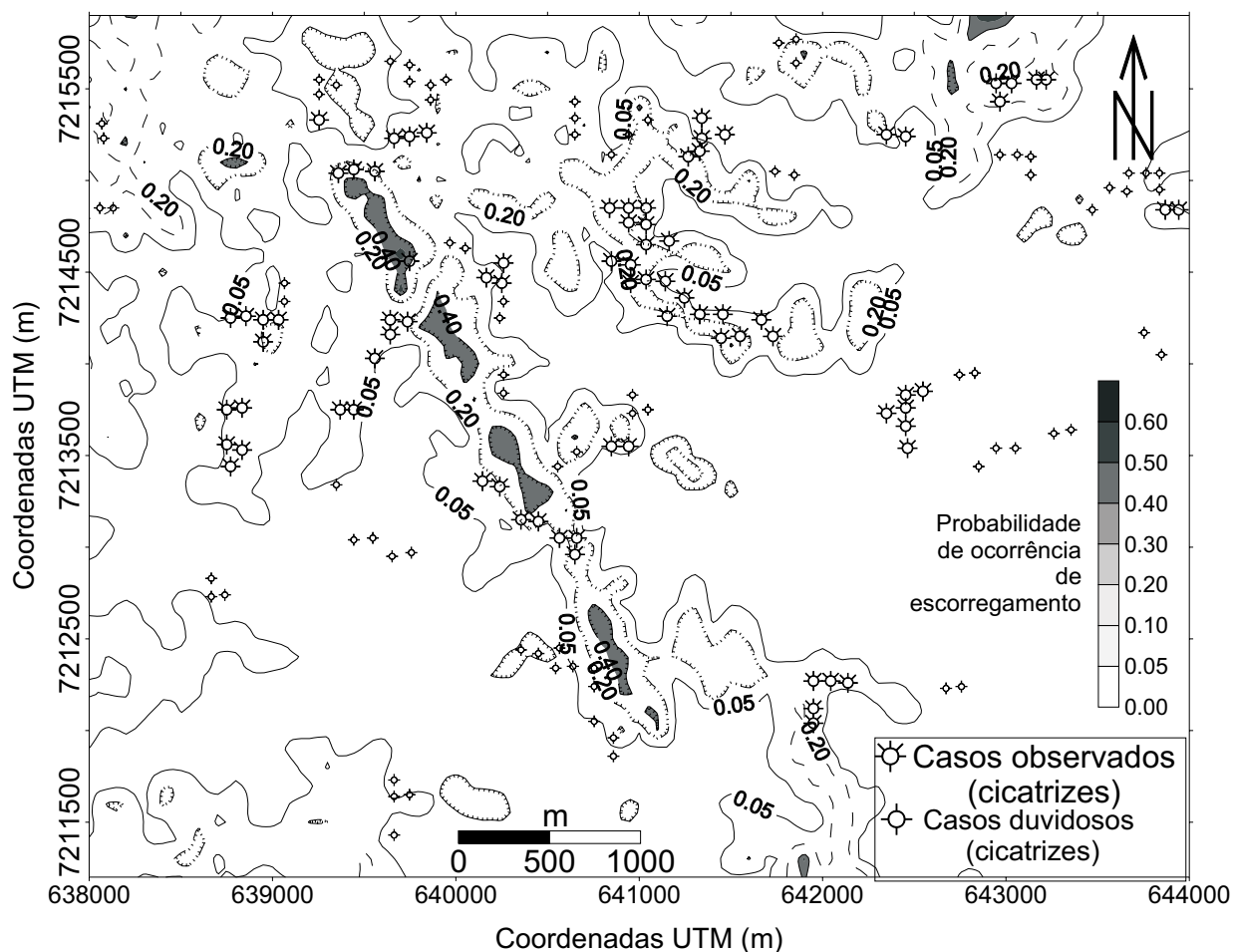


Figura 13: Resultados de favorabilidade representados pela probabilidade do evento escorregamento existir, de acordo com o modelo probabilístico adotado. Os casos observados estão localizados para comparação. *Favorability results represented by the probability of the landslides event to exist, in agreement with the probabilistic model adopted. The observed cases are located for comparison.*

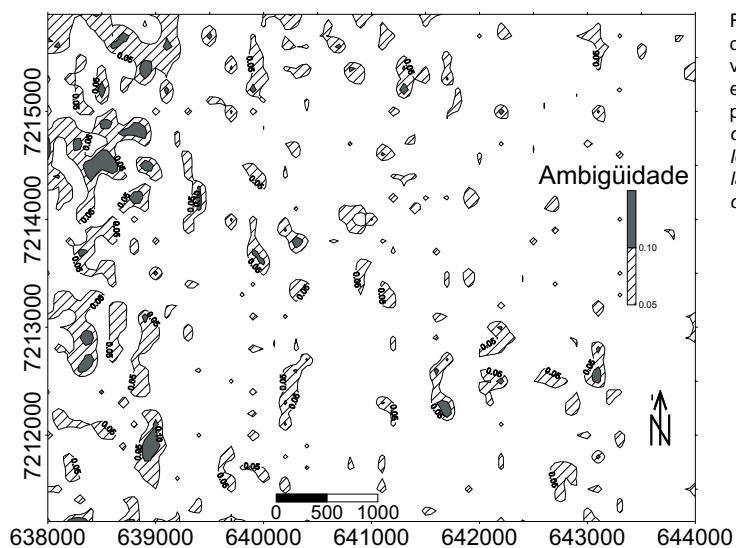


Figura 14: Mapa de ambigüidade da aplicação do modelo probabilístico de escorregamento. Os valores revelam baixa incerteza na definição da suscetibilidade a escorregamentos, especialmente nas áreas onde a probabilidade de não ocorrer é elevada. *Map of ambiguity of the probabilistic model of landslide. The values reveal low uncertainty in the definition of the susceptibility to landslide, especially in the areas where the probability of the event absence is high.*

partir dos valores da planilha foi gerado um *grid* por interpolação com o método da mínima curvatura, admitindo uma certa relação de vizinhança entre os valores de favorabilidade. O *grid* com os valores de favorabilidade foi contornado para a geração do mapa preditivo e de incertezas utilizando o programa *Surfer*. O resultado é apresentado nas figuras 13 e 14.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos como pesos no modelo probabilístico (tabela 2), com os mais altos contrastes e

grau de suficiência dados pelos indicadores (faixa hipsométrica de 720-820 m), 14 (litologia tipo *hornfels*), 17 (litologia tipo cálcio xisto), 15 (litologia filito-mármores), 7 (baixos declives) e 8 (altitude entre 820 e 920 m) parecem surpreendentes.

A faixa altimétrica é aquela dos remanescentes de pedimentos, portanto com solos e paleossolos espessos, no alto das encostas, desenvolvidas por entalhe desta paleo-superfície. Conforme esperado inicialmente, constitui um indicador significativo. O baixo valor de LN, elevado valor de necessidade, corresponde a um fator multiplicativo de 0,24, ou cerca de quatro vezes menor a

TABELA 2: Variáveis em ordem decrescente de contraste e suficiência. *Variables in decreasing order of contrast and sufficiency.*

| Evidência | LN(E)= Log $p(P/nE)/p(nP/nE)$ necessidade | LS(E) = log $p(P/E)/p(nP/E)$ suficiência | LAS(E)=log ambigüidade | CON(E) = LS(E)-LN(E) contraste |
|-----------------------|--|---|--------------------------------------|---|
| 7 - alt.720-820 | -1,43637 | 0,63473 | 0,00012 | 2,07111 |
| 14 hornfels | -0,04576 | 0,90419 | 0,00012 | 0,94995 |
| 17 Ca xisto | -0,05586 | 0,52280 | 0,00012 | 0,57866 |
| 15 -.fil/calcareo ass | -0,15173 | 0,34647 | 0,00012 | 0,49821 |
| 9 - dec.0-10 | -0,25492 | 0,22321 | 0,02469 | 0,47813 |
| 8 - alt.820-920 | -0,01728 | 0,40744 | 0,00012 | 0,42472 |
| 20 - az.180-270 | -0,13790 | 0,13620 | 0,01235 | 0,27410 |
| 23 convexa | -0,15276 | 0,11057 | 0,06173 | 0,26333 |
| 10 - dec.10-20 | -0,07552 | 0,08230 | 0,00012 | 0,15782 |
| 1- frat,nne | 0,00371 | 0,14098 | 0,00012 | 0,13727 |
| 18 - az.0-90 | 0,00964 | 0,09605 | 0,02469 | 0,08641 |
| 24 retilínea | 0,10053 | -0,06725 | 0,07407 | -0,16778 |
| 12 - dec.>30 | 0,09131 | -0,08621 | 0,01235 | -0,17752 |
| 19 - az.90-180 | 0,07206 | -0,12509 | 0,04938 | -0,19715 |
| 11 -dec.20-30 | 0,18083 | -0,15661 | 0,00012 | -0,33745 |
| 13 granito | 0,11402 | -0,24798 | 0,00012 | -0,36200 |
| 21 - az.270-360 | 0,04020 | -0,53447 | 0,04938 | -0,57467 |
| 3 - frat.ene | 0,03125 | -0,61999 | 0,01235 | -0,65124 |
| 22 côncava | 0,17237 | -0,55966 | 0,04938 | -0,73204 |
| 4 - frat.wnw | 0,05979 | -0,69877 | 0,00012 | -0,75857 |
| 16 filito | 0,17015 | -0,77180 | 0,00012 | -0,94195 |
| 2 - frat.nnw | 0,04252 | -0,95764 | 0,01235 | -1,00016 |
| 6 - alt.620-720 | 0,51111 | -0,90429 | 0,04938 | -1,41540 |
| 5 - alt.520-620 | 0,15033 | -9,31128 | 0,00012 | -9,46161 |

probabilidade de ocorrer o evento quando fora desta faixa de altitude. Significa ainda que fora da faixa de 720-820 m é pouco provável a ocorrência do escorregamento.

Os três fatores seguintes, vinculados ao tipo litológico, são controladores primários do tipo de solo, onde a presença de carbonatos ou cálcio-silicatos favorecem o intemperismo, gerando maior espessura dos solos e conteúdo mais argiloso, resultando em maior fragilidade do solo, tanto pelo maior conteúdo em umidade como pela menor resistência ao cisalhamento.

A elevado valor atribuído para baixa declividade parece contraditório com o esperado; escorregamentos são aguardados em encostas com maior declive, onde fica reduzida a tensão normal ao plano de escorregamento. O fato de ser mais favorável a menor declividade está refletindo o fato de que o relevo está num estágio de desenvolvimento em que a erosão que está entalhando a paleo-superfície é limitada pelo intemperismo, ou seja, exceto nas áreas de solos remanescentes da paleo-superfície, o manto alterado é pouco

espesso, não gerando peso suficiente para provocar escorregamento, uma vez que estes escorregamentos são gerados no manto de alteração.

O indicador subsequente na ordem de importância é a faixa de altitude de 820-920 m: caracteriza-se por suficiência elevada, porém necessidade baixa; o elevado peso deste fator pode ser atribuído, de forma similar à faixa 720-820, à ocorrência da paleo-superfície, em situação mais próxima dos *inselbergs* ainda remanescentes na área, apresentando paleo-solos espessos.

O indicador seguinte, azimuth 180-270, corresponde a uma maior favorabilidade para escorregamento nas encostas voltadas para sudoeste, secundariamente nordeste, e direção NW-SE. Amplificam em cerca de 20% a probabilidade de ocorrência do evento. Podem estar relacionadas com diques de diabásio e fraturamento noroeste, embora as direções de traço de fraturas identificadas que mais se associem sejam aquelas representadas por traços NE-SW, o indicador 1, embora pouco significativo. O tipo de encosta com perfil

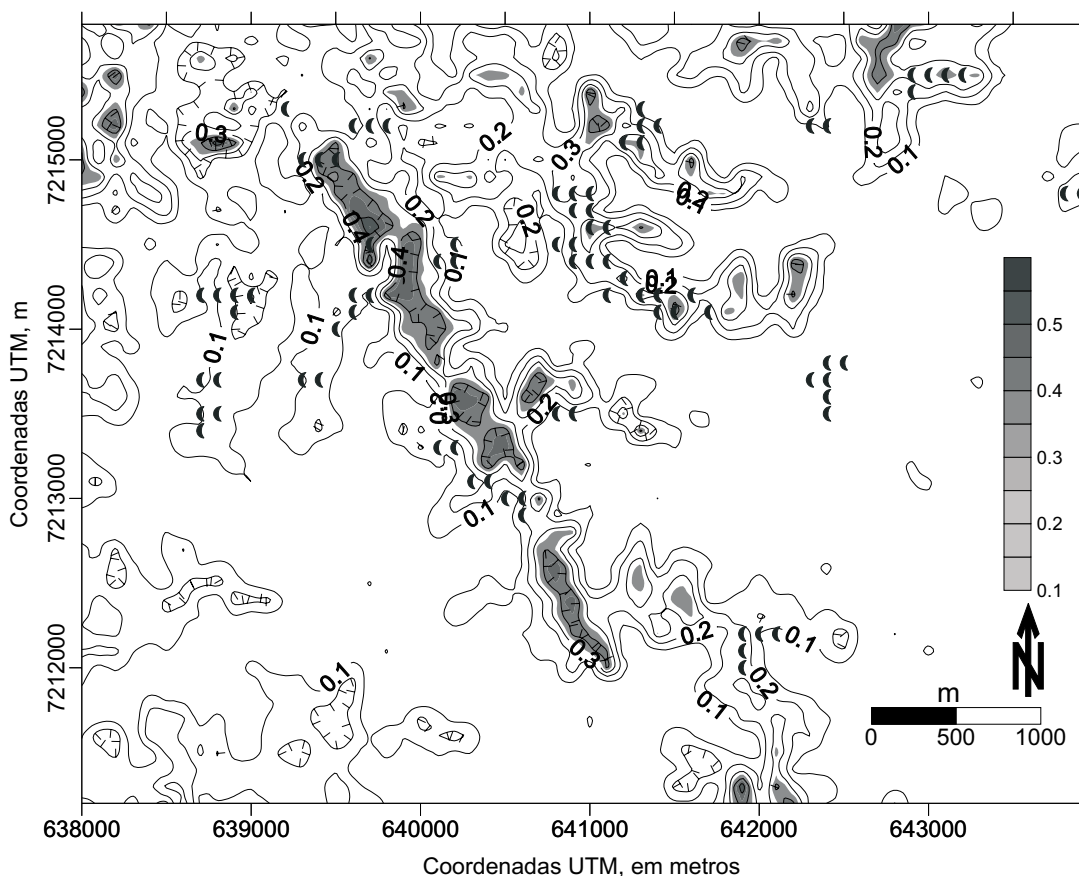


Figura 15: Mapa de suscetibilidade, definida como o complemento da probabilidade de não ocorrer o evento, ou seja, a probabilidade de ocorrer mais incerteza. Observar que apenas seis casos, dos setenta observados, situam-se abaixo da faixa de 10% de probabilidade do evento. *Susceptibility map, defined as the complement of the probability of not happening the event, that is to say, the probability of the event added to the uncertainty. Observe that just six out of the seventy observed cases, are located below the zone of 10% of probability of the event.*

convexo também constitui um indicador pouco importante, contribuindo com 10% na amplificação do condicionamento do evento.

Entre os indicadores negativos, ou seja, aqueles que apresentam fator de suficiência redutor da probabilidade do evento, destacam-se as direções NE-SW das encostas, as lineações em torno de E-W (ENE-WSW e WNW-ESE), as declividades elevadas, as baixas altitudes e as áreas de granito e de filito.

No mapa preditivo (figura 13), observa-se que há um razoável ajuste das áreas com probabilidade maior que 5% de ocorrência do evento e os casos observados: apenas 12% dos casos observados estão fora da faixa de probabilidades superiores a 5%. Considerando que a área de probabilidades inferiores a 5% corresponde a 65% das observações, pela chance prévia de 0,028 seria esperado um número de 45 ocorrências, caso os indicadores não fossem considerados. Isto revela que o modelo reduziu significativamente as áreas com expectativa de risco de escorregamento.

Os dez casos de cicatrizes que ficam fora da faixa de probabilidade superior a 5% estão contíguos a estas áreas, sugerindo que um dos indicadores principais, provavelmente a faixa 720-820 m, foi mal dimensionado e deveria estar ajustado para 700 a 800 m, por exemplo.

A ambigüidade associada ao modelo desenvolvido é relativamente baixa, com valores entre 0 e 0,15, revelando um bom ajuste do modelo, especialmente onde é prevista a não ocorrência do evento (figura 14).

Adotando-se o conceito de suscetibilidade como o complemento da probabilidade de não ocorrer o evento, ou seja, a probabilidade de ocorrer mais a incerteza (ambigüidade) associada à determinação, os resultados são ainda mais significativos (figura 15). Apenas seis casos ficam abaixo da suscetibilidade de 10% do evento ocorrer.

Apesar do modelo ajustado ter um razoável poder de predição, diversas questões permanecem por resolver. A primeira é a questão metodológica da exigência de

independência das variáveis. Diversos indicadores apresentam uma expectativa de relação de dependência positiva; por exemplo, tipos litológicos e tipo de encostas, direção de traços de fratura e direção de encostas. Por outro lado, alguns indicadores são excludentes, ou seja, a existência de um exclui a possibilidade da presença de outro, como no caso das litologias ou das faixas hipsométricas.

Também algumas outras variáveis poderiam ser incorporadas, especialmente as direções e mergulho das foliações e do bandamento litológico. Por outro lado as variáveis com baixo poder preditivo e maior dependência ou excludência poderiam ser eliminadas na aplicação do modelo.

CONCLUSÕES

O procedimento metodológico, que inclui a utilização conjunta de vários indicadores geológicos e geomórficos, como fraturas, altitudes, declividade, tipos de encostas, azimute de relevo e litologias, mostrou-se eficiente na caracterização das zonas mais prováveis de ocorrência de escorregamento na região de Campo Largo (PR), sendo uma ferramenta nova importante na predição destes eventos. A utilização do método de quantificação de favorabilidade permitiu determinar a importância das variáveis, em termos de necessidade e suficiência, e sugerir novas áreas submetidas a um risco classificado de eventos tipo escorregamento.

As áreas mais favoráveis para escorregamento foram caracterizadas por tipos litológicos, paleossuperfícies e paleossolos, direções das encostas e declive, ficando razoavelmente delimitadas em mapa, uma vez que os valores de incerteza são muito baixos. A relativa simplicidade operacional dos procedimentos metodológicos e técnicos e a qualidade dos resultados são estimulantes para a implementação e aplicação em outros locais e mesmo outros tipos de eventos.

REFERÊNCIAS

- AGTERBERG F.P. 1989. Systematic approach to dealing with uncertainty of geoscience information in mineral exploration. In: APCOM SYMPOSIUM 21. Las Vegas, 1989. *Anais... Las Vegas, Proceedings*, p. 165-178.
- ARTUR P.C. 1998. *Paleolineamentos na Bacia do Paraná: favorabilidade para acumulações de petróleo*. Curitiba. (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná).
- BIGARELLA, J.J., 1975. *Topic for discussions*. International Symposium on the Quaternary. *Boletim Paranaense de Geociências*, **33**: 171-276.
- FIORI, A.P. 1995. Estudo da estabilidade de vertentes da área de Guaraqueçaba, Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, **43**: 25-40.
- FIORI A. P. & BORCHARDT, N., 1997. Influência da vegetação na estabilidade de taludes naturais. *Boletim Paranaense de Geociências*, **45**: 43-58.
- LOPES J.A.U. 1995. *Os movimentos coletivos de solos e a evolução das encostas naturais nas regiões tropicais e subtropicais úmidas*. Curitiba, 157 p. (Dissertação de Mestrado, PPGG-UFPR).
- ROSTIROLLA S. P. 1996 *Avaliação de favorabilidade em exploração: um enfoque metodológico*. Rio Claro. (Tese de

doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista).

ROSTIROLLA S.P., SOARES P.C. & CHANG H.K. 1998. Bayesian and multivariate methods applied to favorability quantification in Reconcavo Basin and Ribeira Belt, Brazil. *Nonrenewable Resources*, **7** (1): 7-24.

SOARES A.P., LOPES A. & EMPINOTTI, L.C. 2000. *Relatório do mapa geológico da região de Beleza, Município de Campo Largo, Paraná*. Relatório de graduação do curso de Geologia da UFPR, 90 p. 6 Anexos. Curitiba.

SOARES P.C. 2001a. *Anfavin*: aplicativo para análise de favorabilidade georreferenciada pela regra de Bayes num ambiente de incertezas. Curitiba, UFPR. Programa em *Turbobasic*^R. Disponível com o autor.

SOARES P.C. (no prelo). Incertezas no raciocínio geológico: um ensaio. Curitiba. *Boletim Paranaense de Geociências*, 48.

SOARES P.C. (em preparação) 2001b. *A questão das incertezas geológicas no raciocínio probabilístico*. **28 p.**

SOARES P.C. & PERDOCINI, L.C. 1999. Incerteza e combinação de evidências; a questão dos diamantes do rio Tibagi – PR (Brasil). *Revista Brasileira de Geociências*, **29** (3): 307-312.

SOARES P.C. & FIORI, A. P. 1975. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas. *Notícia Geomorfológica*. PUC-Campinas, **16** (32): 71-104

YOUNG A. 1978. *Slopes*. London, Longman, 288 p.

Recebido em 2 jul. 2001

Aceito em 23 nov. 2001