

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE SIG NA AVALIAÇÃO DE RISCO DE DESLIZAMENTO EM TRECHO DO TREM DE ALTA VELOCIDADE BRASILEIRO

GIS tools application to landslide hazard assessment in one stretch of the Brazilian high-speed train

Fausto Batista Mendonça*

Noris Costa Diniz**

Gustavo Macedo de Mello Baptista***

RESUMO – O projeto do trem de alta velocidade a ser construído no Brasil ligará as cidades de Campinas – SP e São Paulo – SP à cidade do Rio de Janeiro – RJ. Trata-se de uma obra linear inédita no país, que passará por tipos de terrenos diversos enfrentando condições adversas distintas. Este trabalho traz um mapeamento de risco de deslizamentos na região do trecho 4 do traçado inicial, próximo à cidade de Itatiaia no interior do estado do Rio de Janeiro. As cicatrizes de deslizamento foram inventariadas através de fotointerpretação. Mapas temáticos de pedologia, geomorfologia, uso e cobertura, litologia e hipsometria foram utilizados como dados para a álgebra de mapas que gerou o mapa de risco do trecho avaliado. Os resultados apontaram a existência de risco alto à ocorrência de deslizamentos em quase todo o trecho 4. Esse fato aponta para a necessidade de uma avaliação muito cuidadosa das condições geológicas das encostas que sofrerão intervenções durante a obra.

ABSTRACT – The design of the high speed train to be built in Brazil will connect Campinas city in São Paulo state and São Paulo city to Rio de Janeiro city. It is a linear work unprecedented in the country, which will go through various types of land experiencing different adverse conditions. This work presents a risk mapping of landslides in the region of the fourth section of the planned route, near the city of Itatiaia in Rio de Janeiro state. Landslides were inventoried by means of photointerpretation. Thematic maps with data from pedology, geomorphology, land use and land cover, lithology, hypsometry and geological/geotechnical units on a 2km buffer were used for the map algebra which generated the risk and hazard maps. The results indicate the existence of high risk for the occurrence of landslides along most of section four showing the need for a very thorough geotechnical evaluation of the geological conditions of the slopes that will suffer interventions during engineering work.

PALAVRAS CHAVE – Risco geológico, fotointerpretação, sensoriamento remoto.

* Engenheiro Civil, Mestrando em Geociências Aplicadas do Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (Especialista em geoprocessamento). E-mail: faustobm@hotmail.com

** Professora Adjunta, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (Doutora em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo). E-mail: noris@unb.br

*** Professor Adjunto, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (Doutor em Geologia pela Universidade de Brasília). E-mail: gmbaptista@unb.br

1 – INTRODUÇÃO

O traçado do TAV (Trem de Alta Velocidade), a ser construído no Brasil, passa por terrenos muito variados, desde mangues próximos a Baía de Guanabara no estado do Rio de Janeiro até serras e vales na divisa com São Paulo e turfeiras. Solos colapsáveis e mar de morros são encontrados ao longo do traçado no interior de São Paulo. A diferença no comportamento de solos tão distintos faz com que o estudo geológico-geotécnico ganhe importância e se torne complexo.

O trecho a ser estudado neste trabalho apresenta um corpo de Tálus que será cortado para a passagem da ferrovia. Na Fig. 1 observa-se o traçado otimizado da ferrovia, apresentado ao final do estudo de viabilidade, sendo a região do depósito apresentada nesta figura fruto da análise feita pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Esse tipo de massa de solo é capaz de apresentar um movimento conhecido como rastejo, que pode causar sérios danos a obras civis, por exemplo, deslocando suas fundações.



Fig. 1 – Carta-Imagem da área de estudo. Localização do corte do Tálus no traçado proposto.

Desde movimento de rastejo até deslizamento do corpo de Tálus correspondem à suscetibilidade natural desses terrenos de sopé de encosta na base do maciço alcalino do Itatiaia. Esta situação de perigo geológico pode se tornar uma situação de risco geológico à medida que estes movimentos gravitacionais de massa atinjam as estruturas civis existentes no seu alcance, como a rodovia e a barragem, e ainda a ferrovia a ser construída. Assim como a intervenção da ferrovia, dependendo de como seja realizada, pode vir a deflagrar situações de risco geológico, devido a cortes e aterros que venham a mobilizar e desestabilizar o corpo de Tálus.

O estudo da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) classificou o material do depósito de tálus como heterogêneo e incoerente, variando desde grandes blocos de matacões até as frações areia, silte e argila, com espessuras muito variáveis. Classificou também que a capacidade de suporte é em geral média, localmente baixa (CPRM, 2009b).

2 – OBJETIVOS

Analisa-se neste trabalho, por meio de Sensoriamento Remoto, fotointerpretação e Sistema de Informação Geográfica (SIG), o perigo de ocorrência de um movimento gravitacional de massa no corte do depósito de tálus observado no sopé da encosta do maciço alcalino do Itatiaia.

Os objetivos específicos são:

- Mapear cicatrizes de movimentos de massa, ocorridos na região, obtendo assim a indicação da existência de pontos mais frágeis e suscetíveis a deslizamentos de terra;
- Mapear áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa (MGM);
- Analisar a existência de perigo de MGM que possa comprometer o funcionamento do trem de alta velocidade.

3 – MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada é utilizada por vários autores para levantamento de áreas de risco, como Cardinali *et al.* (2002), Guzzetti *et al.* (2003), Vilaplana *et al.* (2002), Zuquette e Ahrendt (2003), Irigaray e Chacón (2003), Vedovello (2009) e Pimentel (2010), pode ser descrita em quatro etapas principais observadas na Fig. 2, que são:

- Inventário: etapa de busca de informações sobre a área estudada, onde imagens anteriores aos deslizamentos, cartas da região, dados de chuva e trabalhos geotécnicos realizados são elementos a serem levantados;
- Avaliação: nesta etapa destacam-se levantamentos preliminares de campo, geração de modelo digital de elevação (MDE), processamento digital de imagens, inventário de cicatrizes e caracterização do meio físico;
- Análise: aplicação de técnicas de SIG para a geração de informações com os dados levantados nas fases anteriores, mapeando áreas vulneráveis e sob risco. Nesta etapa é aplicado o processo de álgebra de mapas; e
- Resultado final: divulgação do produto gerado na análise.

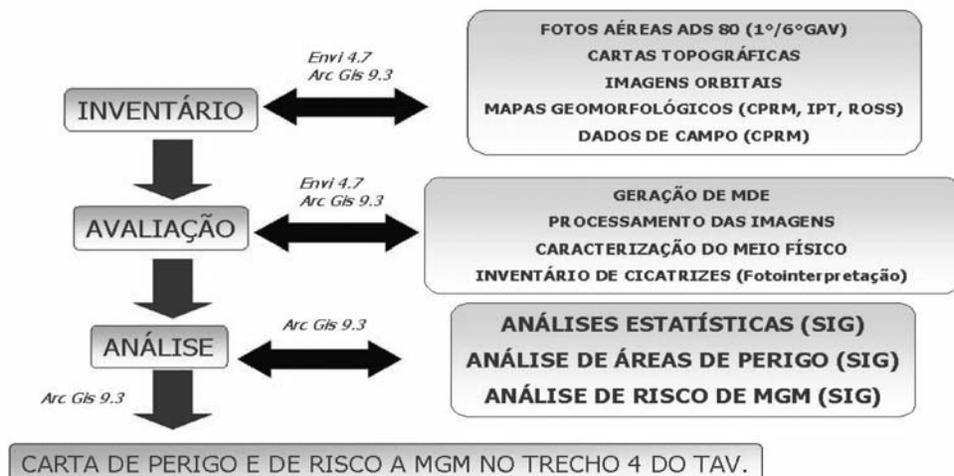


Fig. 2 – Metodologia adotada no trabalho.

Os aplicativos para a realização deste trabalho foram o ArcGis 9.3 na manipulação dos dados de SIG e o ENVI 4.7 nos processamentos digitais de imagens.

3.1 – Geração de MDE

Os modelos digitais de terreno fazem parte das diversas ferramentas que o sensoriamento remoto conseguiu trazer para os estudos de risco geológico, onde é possível visualizar os processos geomorfológicos e suas condicionantes, como, por exemplo, formas de vertentes e canais de drenagem. Observa-se na Fig. 3 um exemplo de imagem 3D gerada com dados da missão SRTM3.

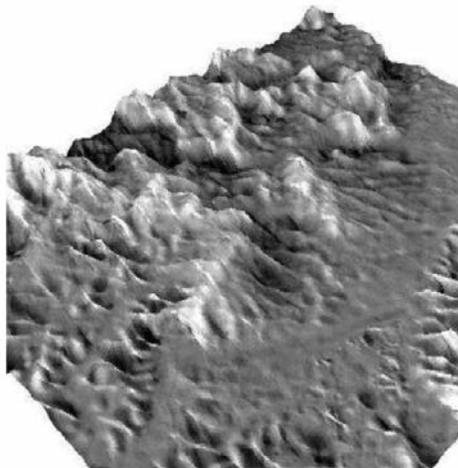


Fig. 3 – Imagem 3D gerada com dados da missão SRTM3.

Na Fig. 4 observa-se um MDE do graben do Vale do Paraíba, na cidade de Itatiaia, no estado do Rio de Janeiro.

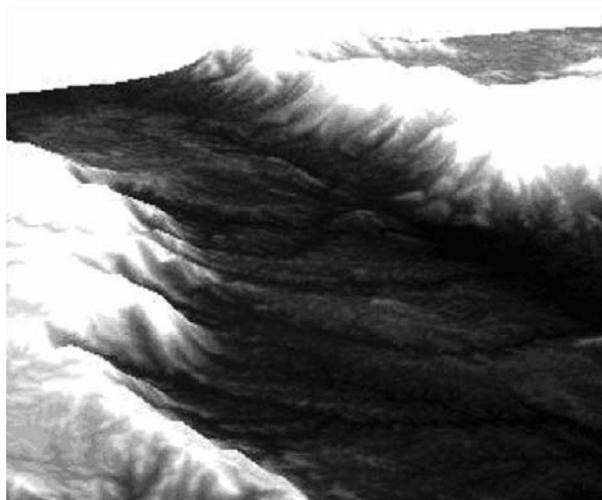


Fig. 4 – MDE dos dados da missão SRTM3 de um trecho do Vale do Paraíba (RJ)(Mendonça *et al.*, 2011).

3.2 – Modelo adotado para a operação entre mapas

De posse de uma feição, por exemplo, litologia da região, por meio de fotointerpretação, busca-se as áreas afetadas por movimentos de massa recentes e remotos. Esses movimentos são responsáveis pela formação da paisagem. Por meio de uma operação entre tabelas dentro do SIG é possível obter a densidade de movimentos em cada litologia, conforme demonstrado na Fig. 5, de Irigaray e Chacón (2003).

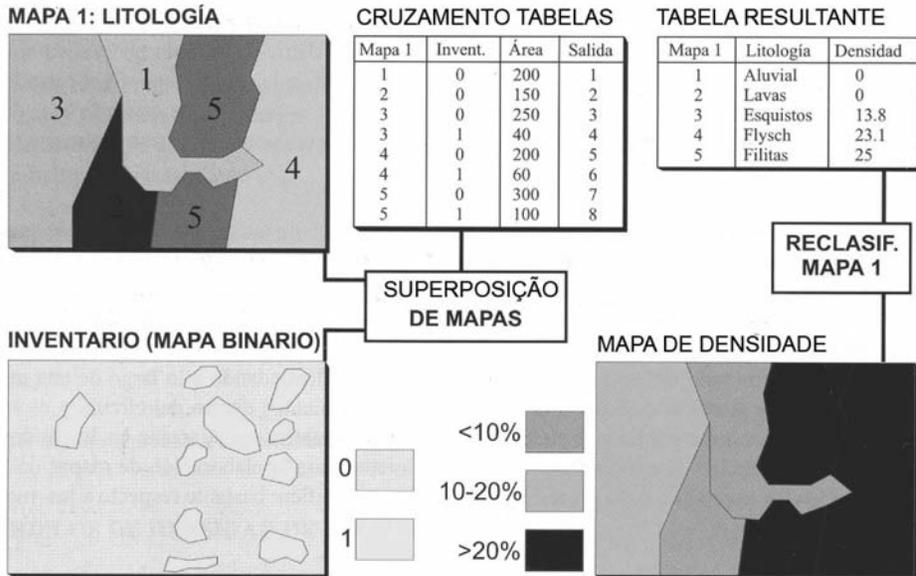


Fig. 5 – Operação para obter densidade de MGM (Irigaray e Chacón, 2003).

Trabalhos de fotointerpretação conduziram às estatísticas de MGM observados nas feições de litologia, pedologia, uso e cobertura, geomorfologia, hipsometria e unidades geológico-geotécnicas no *buffer* de 2km. Por um processo de fotointerpretação foram marcadas as áreas de movimentos de massa ocorridos na área de estudo, conforme pode ser observado na Fig. 6. Este procedimento é mencionado por Fell *et al.* (2008), Guzzetti *et al.* (2003), Cardinalli *et al.* (2002), Guzzetti *et al.* (1994), Zuquette e Ahrendt (2003), Ardizzone *et al.* (2002) e JTC-1 (2008) como necessário para uma avaliação de suscetibilidade e perigo geológico.

Após a vetorização dos MGM foram feitas as análises estatísticas de ocorrência em cada feição, para isso utilizou-se o comando *Intersect* em *Analysis Tools* do ArcGis 9.3 que gerou um *shape* da interseção das áreas de MGM e das áreas das feições. Em seguida, foi realizada a operação *sumarize* nas colunas de dados de áreas movimentadas e frequência de ocorrências, no intuito de se obter a quantidade de incidências e a proporção de área atingida em cada feição: litologia, pedologia, uso e cobertura, hipsometria, geomorfologia e unidades geológico-geotécnicas no *buffer* de 2km.

De posse dos resultados da operação *sumarize*, consegue-se relacionar as classes de cada tema atingidas, atribuir pesos e efetuar a álgebra de mapas para a obtenção das áreas de perigo de ocorrência de MGM e trechos de risco de deslizamentos no traçado proposto para o TAV.

Os trechos de risco são obtidos por meio de uma operação de interseção, *intersect* no ArcGis 9.3, entre o arquivo *raster*, ou matricial, resultado da álgebra de mapas e o vetor do traçado proposto para a ferrovia. Como o vetor possui um valor único e o *raster* apresenta valores de dados

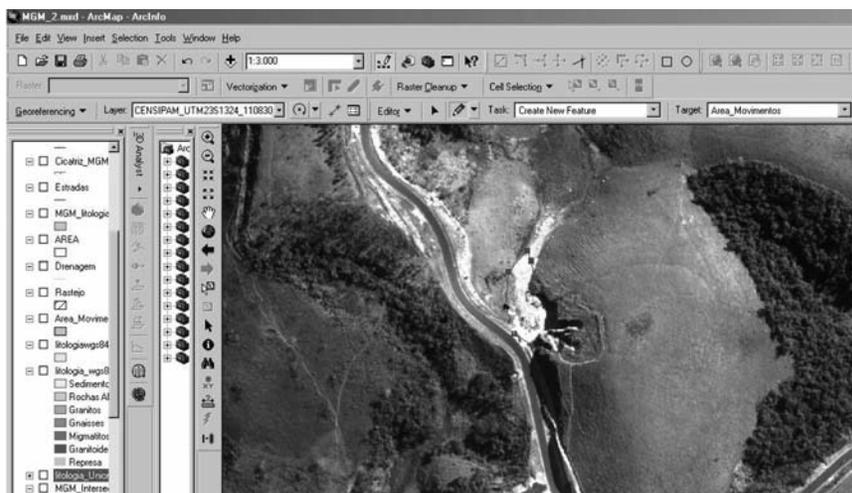


Fig. 6 – Edição de áreas atingidas por MGM.

diferentes nas áreas resultantes da operação de álgebra, ao efetuar a interseção o vetor assume os valores correspondentes às áreas dos trechos por onde passa.

Caso o traçado seja alterado é possível realizar a mesma operação e obter os trechos classificados quanto ao risco, uma vez que os critérios para a geração de áreas de perigo são referentes às características do terreno.

3.2.1 – Critério de distribuição dos pesos

Primeiramente os arquivos vetoriais foram transformados em *raster*, conforme preconizam Câmara (1995), Silva (1999), INPE (2007) e Coronado (2006). Para isso, foi aplicada a ferramenta *Feature to Raster (converter)* do ícone *Toolbox do Software ArcGis 9.3*.

A metodologia utilizada corresponde à mesma adotada por Pimentel (2010) na avaliação de áreas de risco na região de Angra dos Reis após as várias ocorrências de MGM naquela região em 2010. Pimentel (2010) efetua a distribuição dos pesos por meio da razão entre a percentagem de ocorrências e a área movimentada em cada classe dentro das feições (pesos equivalentes). Os pesos entre as feições foram distribuídos de forma igualitária até completar o valor de 100%.

Os pesos inseridos no *software* podem ser de “NODATA” a 9 de forma discreta. Como os valores obtidos nas razões são contínuos foi feita uma discretização dos pesos. Na coluna Peso ArcGis do Quadro 1 constam os valores discretizados em uma escala que possui intervalos iguais de 0,4.

Os campos referentes à massa d’água foram classificados como “NODATA” para não interferirem na álgebra da geração do mapa.

Quadro 1 – Conversão dos pesos.

<i>Pesos equivalentes</i>	<i>Peso ArcGis</i>
Até 0,4	1
0,8	2
1,2	3
1,6	4
2	5
2,4	6
2,8	7
3,2	8
3,6	9
4 ou mais	9

3.2.2 – Passos desenvolvidos

Os passos foram desenvolvidos segundo metodologia da JTC-1 (2008), que se divide em básico, intermediário e avançado. As etapas do passo básico, foram desenvolvidas nesse trabalho. As etapas completas podem ser vistas no Quadro 2.

Quadro 2 – Metodologia JTC-1 para inventariar cicatrizes de MGM.

<i>Classificação</i>	<i>Atividades</i>
Básica	Inventário de MGM por fotos aéreas ou imagens satelitais localizando e quantificando eventos e áreas.
	Identificar relação entre topografia, geologia e geomorfologia.
	Apresentação dos resultados em forma de mapas contendo dados como: <i>grids</i> , drenagem, vias, topografias e outras informações que se tenha da área.
Intermediária	As mesmas atividades da fase básica mais:
	Distinguir diferentes partes do deslizamento.
	Mapear feições de deslizamento e contornos.
	Levantar informações sobre o histórico de deslizamentos na região.
	Analisar a evolução do uso da terra e como as interações do Homem com o solo poderiam ter influenciado as ocorrências.
Avançada	As mesmas atividades da fase intermediária mais:
	Preparar um inventário de dados geotécnicos.
	Implementar investigações para uma melhor definição das condições geotécnicas.
	Análises geotécnicas para compreender os processos de instabilização.
	Catologação de reativações de risco e informações dos períodos de atuação dos agentes desencadeadores para a geração de um inventário de períodos de ocorrência podendo aplicar em validações de aproximações mais avançadas.

Com o modelo digital de elevação gerado por meio dos dados da missão SRTM3 foi possível levantar os perfis topográficos do Tálus do Itatiaia. Por meio dos perfis notam-se as áreas deposicionais do Tálus do Itatiaia.

Foi desenvolvido um trabalho por meio de processamento digital de imagens no intuito de verificar a direção preferencial de escoamento superficial no depósito de tálus próximo à Represa do Funil. Fell *et al.* (2008), Cascini *et al.* (2005) e Castellanos e van Westen (2008) citam a importância de análises qualitativas na avaliação de susceptibilidade e de zoneamento de risco geológico.

Trabalhos de fotointerpretação conduziram às estatísticas de MGM observados nas feições de litologia, pedologia, uso e cobertura, geomorfologia, hipsometria e unidades geológico-geotécnicas no *buffer* de 2km.

Após este processo foi realizada uma operação entre tabelas no intuito de se obter a quantidade de incidências e a proporção de área atingida em cada feição.

Após o somatório das áreas de mesma litologia obteve-se um quadro resumo das incidências na feição. Este quadro resumo foi feito para todas as classes gerando os registros de incidências de MGM em cada classe.

Na Fig. 7 observa-se a tabela gerada como resultado da operação *sumarize*, no *software* ArcGis, entre litologia e áreas de MGM. A mesma operação foi realizada entre áreas de MGM e as outras feições.

D R	Area km2	Cnt Area k	First lege	Last legen	Sum Area k	var
1	1,42239540028	4	Gnaisses	Gnaisses	0,1139	
2	2,48739022661	17	Gnaisses	Gnaisses	0,3634	
3	7,56888483868	1	Sedimentar Aluvionar	Sedimentar Aluvionar	0,0335	
4	15,04999405700	1	Granit?ude	Granit?ude	0,0066	
5	17,54773337790	2	Granitos	Granitos	0,1031	
6	21,73704290440	5	Sedimentos Terciários	Sedimentos Terciários	0,0195	
7	73,34131125850	48	Gnaisses	Gnaisses	0,7235	
8	85,49812219900	5	Sedimentos Terciários	Sedimentos Terciários	0,0232	
9	127,68210702500	13	Rochas Alcalinas	Rochas Alcalinas	0,3875	
10	160,00344490000	161	Sedimentos Terciários	Sedimentos Terciários	2,2462	
11	180,12906889000	2	Gnaisses	Gnaisses	0,0208	
12	439,83260651400	30	Gnaisses	Gnaisses	0,8226	
13						

Fig. 7 – Resultado da operação entre litologia e áreas de MGM.

4 – GEOMORFOLOGIA DA ÁREA

O trecho do Vale do Paraíba que possui o Tálus do Itatiaia compreende um vale entre duas serras, a Serra da Mantiqueira, onde está localizado o Pico do Itatiaia, e a Serra da Bocaina, que se liga a Serra do Mar. Sua localização pode ser vista na Fig. 8 que foi gerada com dados SRTM3.

Ross e Moroz (1997) descrevem que a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira fazem parte da Unidade Morfoestrutural Cinturão Orogênico do Atlântico. O Planalto e a Serra da Mantiqueira localizam-se a Nordeste do Estado de São Paulo, tendo a Leste o Estado do Rio de Janeiro, ao Norte Minas Gerais e ao Sul o Médio Vale do Paraíba. A Serra do Mar segue na região desde o Planalto da Bocaina até o Vale do Ribeira do Iguape margeando o litoral.

A Serra da Mantiqueira, segundo Almeida e Carneiro (1998), resultou de um importante evento tectônico iniciado no Paleoceno, que também influenciou a formação da Serra do Mar. Os

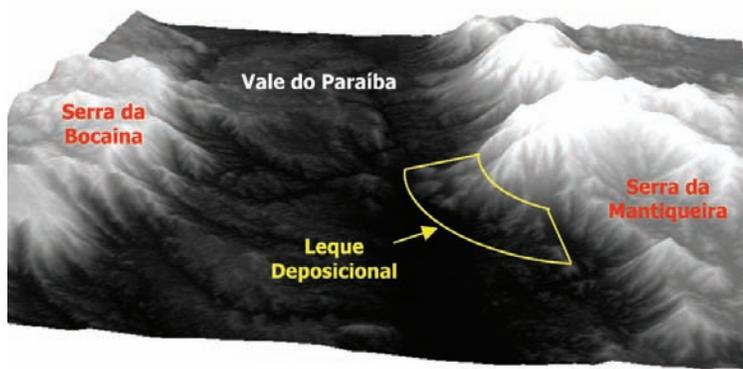


Fig. 8 – Graben do Vale do Paraíba com destaque para o depósito de Tálus. (Mendonça *et al.*, 2011).

autores relatam que por cerca de três a quatro dezenas de milhões de anos a Serra do Mar recuou até a posição atual por efeito de processos erosivos. Na Fig. 9 observam-se as linhas de perfis traçadas sobre o MDE para extrair os perfis topográficos.

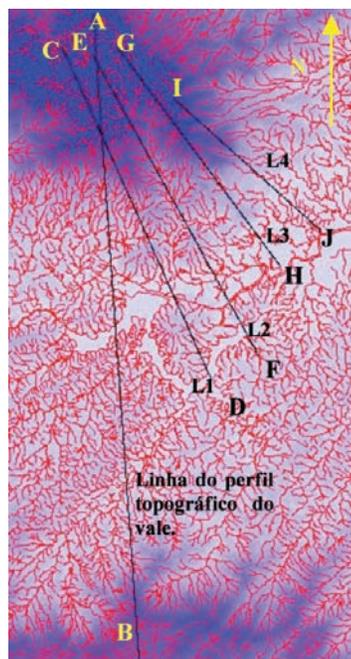


Fig. 9 – Traçado das linhas para extração dos perfis topográficos.

O Vale do Paraíba apresenta-se conforme o perfil topográfico da Fig. 10, extraído do modelo SRTM3, onde à direita tem-se a Serra do Mar e à esquerda a Serra da Mantiqueira. Na elevação da esquerda é possível visualizar o topo do Pico do Itatiaia atingindo cota em torno de 2700 m. A cota no leito do Rio Paraíba do Sul nesse trecho está em 450 m.

Os perfis topográficos obtidos desde a calha do Rio Paraíba do Sul até o topo do Pico do Itatiaia podem ser vistos na Fig. 11.

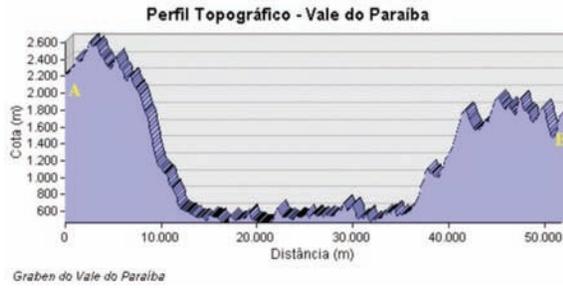


Fig. 10 – Perfil topográfico do Vale do Paraíba no trecho estudado.

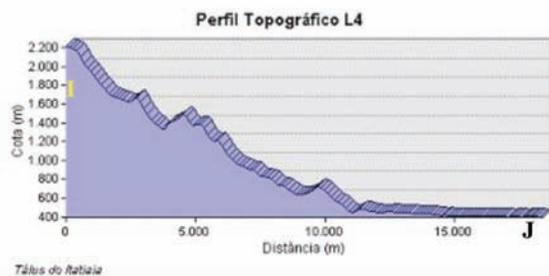
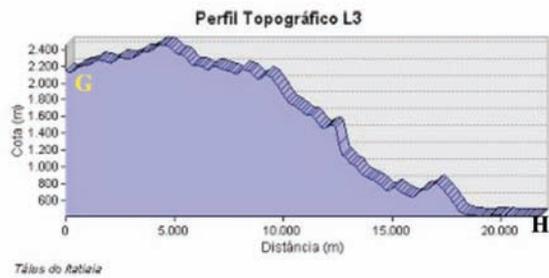
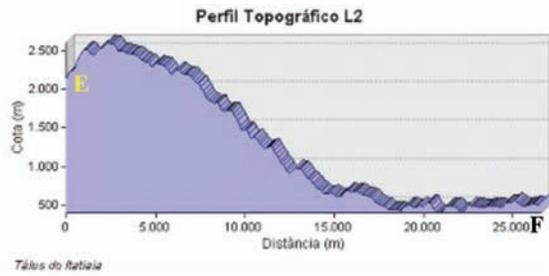
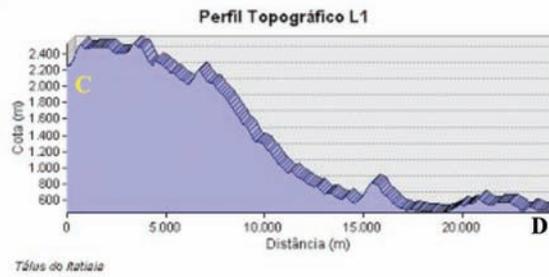


Fig. 11 – Perfis topográficos do Tálus do Itatiaia.

5 – CÂMERAS AÉREAS DIGITAIS

Atualmente existem diversos tipos de sensores remotos aplicados à obtenção de imagens, tais como: câmeras aerofotogramétricas, sensores a laser, satélites imageadores em diversas faixas do espectro e radares. Cada um traz consigo vantagens e limitações bem particulares.

Em substituição às câmeras aéreas analógicas, as digitais evoluíram e trouxeram aos vãos aerofotogramétricos mais agilidade e precisão, elevando a qualidade do produto gerado. Entretanto, quanto melhor a resolução espacial, maior a quantidade de dados gerados, carecendo de mais espaço de armazenamento.

Os filmes fotográficos foram substituídos pelas matrizes CCD (*Charge-Coupled Device*, que é um detector por carga acoplada) que transformam radiações eletromagnéticas em pulsos elétricos que têm sua intensidade medida e geram as imagens. Na Fig. 12 observa-se uma imagem obtida por uma câmera aérea digital com resolução espacial de 0,5 m. As ocorrências de deslizamento podem ser interpretadas visualmente.



Fig. 12 – Imagem de câmera aérea digital. Resolução espacial de 0,5 m.

Os planejamentos dos vãos ganharam agilidade e precisão, pois os resultados dos estudos no planejamento do vôo são inseridos diretamente nos equipamentos de bordo, como recobrimento lateral e longitudinal, por exemplo. Assim o operador pode visualizar, antes do vôo, todas as manobras a serem realizadas pela aeronave, verificar possíveis erros e corrigi-los antes do vôo. As faixas de vôo que antes eram marcadas em uma carta em papel hoje são inseridas no *software* que gerencia o funcionamento da câmera durante o vôo, onde a carta em formato digital ou o MDE da área podem servir como fundo de tela, facilitando ao operador a visualização de feições no terreno, e assim acompanhar a correta execução do aerolevanteamento.

O projeto do Vale do Paraíba contemplava uma área de 510 km², sendo necessários 55 minutos de imageamento a uma altura de vôo de 30 000 ft com a aeronave Learjet. As imagens foram geradas entre 08:30h e 15:30h.

van Westen *et al.* (2008) e Yalcin e Bulut (2007) relatam que para descrever áreas sob risco de movimento gravitacional de massa ou que tenham sofrido este fenômeno, imagens com resolução espacial melhores que 3 m são mais indicadas para a aplicação de interpretação visual ou estereoscopia. Dependendo da capacidade da aeronave empregada existem câmeras que podem fornecer imagens com resolução espacial de até 5 cm.

6 – PRODUTOS DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Dados espacializados no meio ambiente podem ser integrados trazendo cada um a sua particularidade e gerando informações importantes que isoladamente não auxiliariam nas decisões a serem tomadas. Essa integração é gerenciada por um Sistema de Informação Geográfica.

Para a representação de mapas temáticos, Câmara (1995) descreve as vantagens e desvantagens de cada formato, conforme visto no Quadro 3. Associados aos dados matriciais ou vetoriais existem os atributos alfanuméricos (Diniz, 1998) que são armazenados em tabelas em forma de planilha.

Quadro 3 – Comparação entre representação vetorial e matricial (Câmara, 1995).

Aspecto	Vetorial	Matricial
Relações espaciais entre objetos	Relacionamento topológico entre objetos disponíveis	Relacionamentos espaciais devem ser inferidos
Ligação com banco de dados	Facilita associar atributos a elementos gráficos	Associa atributos apenas a classes do mapa
Análise, simulação e modelagem	Representação indireta de fenômenos contínuos Álgebra de mapas é limitada	Representam melhor os fenômenos com variação contínua no espaço Simulação e modelagem mais fáceis
Escalas de trabalho	Adequado tanto a grandes quanto pequenas	Mais adequado para pequenas escalas (1:25 000 ou menos)
Algoritmos	Problemas com erros geométricos	Processamento mais rápido e eficiente
Armazenamento	Por coordenadas (mais eficiente)	Por matrizes

6.1 – Mapa do cone de dejeção do Tálus do Itatiaia

O depósito de Tálus do Itatiaia se estende desde a cidade de Engenheiro Passos, no limite dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro até próximo a Penedo, distrito de Resende. Observa-se na Fig. 13, que é uma área deposicional bem extensa, cerca de 10 km no perímetro da sua base. O cone deposicional do tálus foi marcado por interpretação visual com o auxílio das imagens obtidas na fase de inventário.

6.2 – Pontos de campo

O mapa de pontos de campo foi gerado com base nos dados da CPRM que realizou a visita à área de estudo em março de 2009. Todos os dados já se encontravam em SAD 69 e assim foram inseridos no mapa. Na Fig. 14 observa-se a folha de pontos de campo da área de estudo que foi feita no formato A3. O trecho recebeu o nome de Trecho 4 pela equipe de campo.

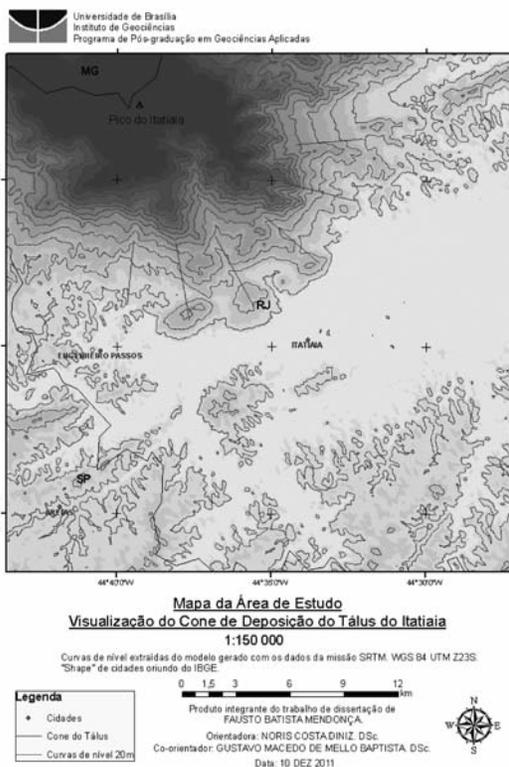


Fig. 13 – Mapa do cone deposicional do Tálus do Itatiaia.

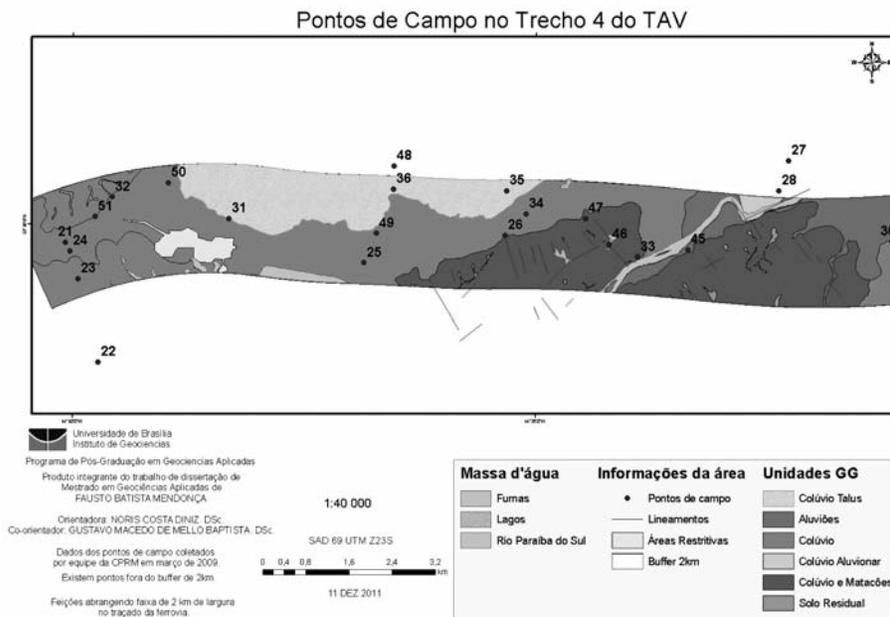


Fig. 14 – Pontos de campo no traçado do TAV.

6.3 – Inventário de cicatrizes de MGM na área avaliada

As imagens utilizadas para a vetorização das áreas de cicatrizes de MGM apresentavam resolução espacial de 0,5 m e sistema de projeção WGS 84. Foram obtidas no dia 30 de agosto de 2011 a uma altura de voo de 30 000 ft, entre 08:30h e 15:30h. Na Fig. 15 observa-se o trabalho de vetorização feito manualmente no *software* ArcGis como um processo de fotointerpretação.

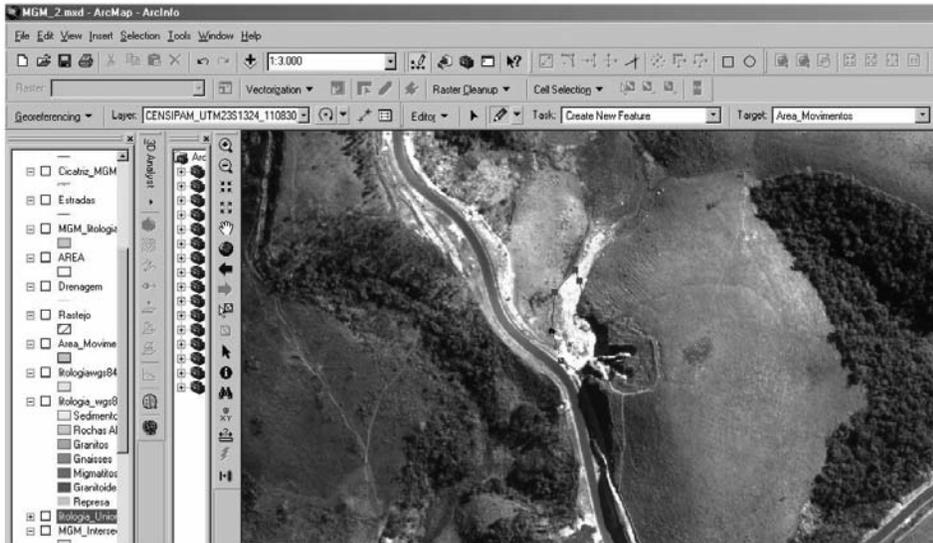


Fig. 15 – Vetorização das cicatrizes de MGM.

Os anfiteatros gerados por deslizamentos remotos são feições constantes em toda a região de estudo. Foi possível observar também diversos deslizamentos recentes em solos superficiais de taludes às margens da rodovia Presidente Dutra, mostrando que a região se caracteriza por frequentes instabilidades nos taludes de corte.

7 – O PROJETO DO TAV

A ferrovia ligará a região da Leopoldina, na cidade do Rio de Janeiro, à cidade de Campinas no estado de São Paulo, totalizando 511 km de trilhos. O traçado passa por terrenos como baixada, serra, colinas e morros, cada um com suas particularidades de formação e limitações de construções. Estas limitações precisam ser vencidas para garantir segurança aos usuários no período de utilização e aos operários no período de implantação.

Entretanto, o conhecimento da geologia da região é primordial para a implantação de estradas, sejam de ferro ou asfaltada. Copons e Vilaplana (2008) falam sobre a necessidade de se conhecer a geomorfologia do terreno para a sua correta utilização, reduzindo os riscos.

No trecho avaliado constam depósitos de tálus no sopé, que podem gerar instabilidades ao sofrerem cortes e emboques, onde Assis (2009) menciona o risco de impactos muito negativos para a operação do empreendimento. O estudo aponta a necessidade de alteração do traçado para evitar o corte no sopé do tálus, ou investigar a melhor forma de estabilizar o mesmo. Sendo assim, o traçado foi deslocado para o Sul da área do depósito de tálus, porém interfere no dique da Represa do Funil, como pode ser observado na Fig. 16. Ao Norte, observa-se o depósito de tálus. A seta indica a simbologia de feições erosivas de rastejo (CPRM, 2009a).

As incidências e as áreas movimentadas descritas no Quadro 5 foram superpostas ao perfil 1 do MDE, gerando a Fig. 17 que demonstra que a maior quantidade de ocorrências de MGM, assim como as maiores áreas movimentadas estão na região do sopé da elevação do Pico do Itatiaia.

Quadro 5 – Estatística de MGM na litologia.

LITOLOGIAS	Geoformas	Amplit. (m)	Altim. (m)	Decliv.	Áreas Lito (km ²)	Quant. MGM	Área MGM (km ²)	Soma áreas de MGM (%)	Freq. MGM (%)
Rochas Alcalinas	Escarpas	300	2000	30%	127,68	13	0,39	7,97%	4,50%
Granitóides	Morros	200	1000	25%	15,05	1	0,01	0,14%	0,35%
Granitos	Morros	200	800	25%	17,55	2	0,10	2,12%	0,69%
Gnaisses	Morrotos	100	700	18%	677,21	101	2,04	42,03%	34,95%
Dep. Sed. Aluvionar	Planícies	50	600	5%	7,56	1	0,03	0,69%	0,35%
Dep. Sed. Coluvionar - Tálus	Morrotos	50	600	8%	267,24	171	2,29	47,06%	59,17%
TOTAL					1112,3	289	4,86	100%	100%

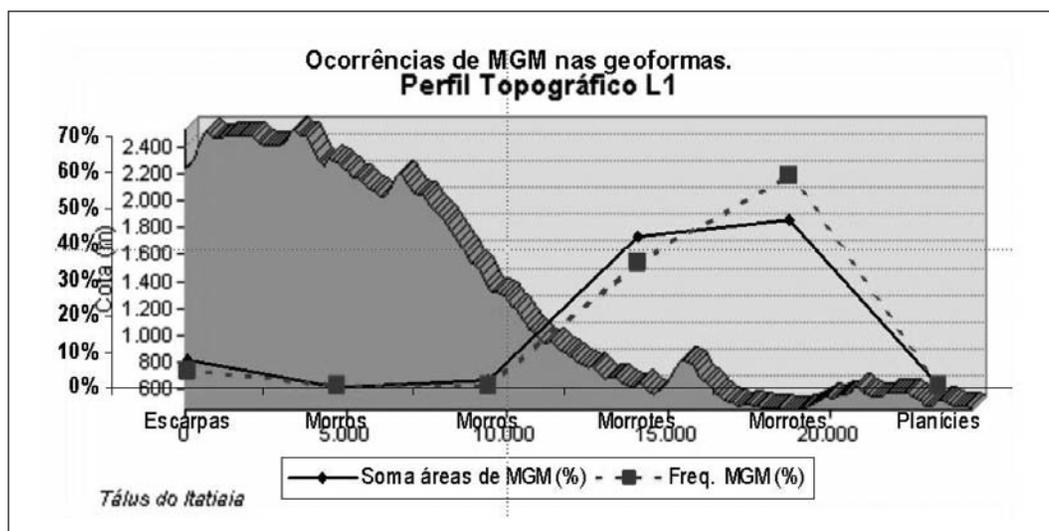


Fig. 17 – Superposição de incidências de MGM ao perfil topográfico L1.

Quadro 6 – Estatística de MGM na feição de uso do solo e cobertura vegetal.

Cobertura observada	Legenda	Área (km²)	Área (%)	Área MGM (km²)	Área MGM (%)	Freq. MGM	Freq. MGM (%)
Pecuária	Ap	173,09	40,13%	2,80	50,72%	207	60,35%
Floresta Estacional Semidecidual	F	10,41	2,41%	0,32	5,72%	20	5,83%
Floresta Ombrófila Densa	D	223,13	51,74%	1,86	33,68%	75	21,87%
Florestamento / /Reflorestamento	R	0,81	0,19%	0,04	0,65%	2	0,58%
Agricultura	Ac	0,42	0,10%	0,05	0,97%	3	0,87%
Influência Urbana	Iu	18,85	4,37%	0,20	3,64%	15	4,37%
Savana Florestada	Sd	1,89	0,44%	0,08	1,48%	9	2,62%
Vegetação Secundária Inicial	Vsi	2,68	0,62%	0,17	3,14%	12	3,50%
TOTAL		431,28	100%	5,53	100%	343	100%

Quadro 7 – Estatística de MGM na morfologia.

Unidades	Área (km²)	Frequência MGM	Área MGM (km²)	Área (%)	Frequência (%)	Área MGM (%)
Domínio de Colinas Dissecadas	4,07	2	0,0049	0,34%	0,72%	0,11%
Domínio Colinoso - Mar de Morros	737,68	98	1,4195	61,67%	35,13%	33,04%
Tabuleiros	77,59	59	0,7038	6,49%	21,15%	16,38%
Alinhamentos Serranos e Degraus Estruturais	14,28	1	0,0066	1,19%	0,36%	0,15%
Planícies Aluviais	96,79	4	0,0522	8,09%	1,43%	1,22%
Maçãos Intrusivos Alcalinos	265,67	115	2,1088	22,21%	41,22%	49,09%
TOTAL	1196,08	279	4,30	100%	100%	100%

Quadro 8 – Estatística de MGM na pedologia.

Unidades	Área (km ²)	Frequência MGM	Área MGM (km ²)	Área (%)	Frequência (%)	Área MGM (%)
Urbano	0,30	2	0,0307	0,16%	1,14%	1,48%
PVa1	22,96	43	0,7662	12,37%	24,43%	36,90%
PVa2	54,43	49	0,3742	29,32%	27,84%	18,02%
PVa5	26,62	7	0,1343	14,34%	3,98%	6,47%
Ce	7,14	1	0,0335	3,85%	0,57%	1,61%
LAa2	74,21	74	0,7373	39,97%	42,05%	35,51%
LVa13	258,21	104	1,9207	139,06%	59,09%	92,51%
Ca6	70,29	16	0,6107	37,86%	9,09%	29,41%
TOTAL	185,68	176	2,08	100%	100%	100%

Quadro 9 – Estatística de MGM nas unidades geológico geotécnicas no *buffer* de 2km.

Unid_GG	Área (km ²)	Frequência MGM	Área MGM (km ²)	Área (%)	Frequência (%)	Área MGM (%)
Tálus	5,12	35	0,31	14,62%	41,18%	28,75%
Colúvio e Matacões	9,01	9	0,14	25,74%	10,59%	12,98%
Colúvio	20,66	36	0,44	59,01%	42,35%	40,54%
Solo Residual	0,22	5	0,19	0,63%	5,88%	17,73%
Aluvião	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%
Colúvio Aluvionar	0	0	0	0,00%	0,00%	0,00%
TOTAL	35,01	85	1,08	100%	100%	100%

Quadro 10 – Distribuição dos pesos das classes.

	% Ocorrência	% área MGM	Razão	Peso	Peso ArcGis
LITOLOGIA				17,0%	
Rochas Alcalinas	4,89	7,97	0,61355	0,6	2
Granitóides	0,38	0,14	2,71428	2,7	7
Granitos	0,75	2,12	0,3537	0,4	1
Gnaisses	30,08	42,03	0,71568	0,7	2
Depósito Sedimentar	63,91	47,75	1,344	1,3	4
HIPSOMETRIA				17,0%	
1750-2650	0,00	0,00	NODATA	0	1
1250-1750	0,00	0,00	NODATA	0	1
750-1250	2,00	9,00	0,222222	0,2	1
500-750	39,00	51,00	0,764706	0,8	2
380-500	59,00	40,00	1,475	1,5	4
USO E COBERTURA				17,0%	
Pecuária	60,35	50,72	1,189866	1,2	3
Floresta Estacional Semidecidual	5,83	5,72	1,019231	1,0	2
Floresta Ombrófila Densa	21,87	33,68	0,649347	0,7	2
Florestamento / Reflorestamento	0,58	0,65	0,892308	0,9	2
Agricultura	0,87	0,97	0,896907	0,9	2
Influência Urbana	4,37	3,64	1,200549	1,2	3
Savana Florestada	2,62	1,48	1,77027	1,8	5
Vegetação Secundária Inicial	3,50	3,14	1,11465	1,1	3
GEOMORFOLOGIA				17,0%	
Domínio de Colinas Dissecadas	72,00	0,11	654,5455	6,6	9
Domínio Colinoso - Mar de Morros	35,13	33,04	1,063257	1,1	3
Tabuleiros	21,15	16,38	1,291209	1,3	3
Alinhamentos Serranos e Degraus Estruturais	0,36	0,15	2,4	2,4	6
Planícies Aluviais	1,43	1,22	1,172131	1,2	3
Maçiços Intrusivos Alcalinos	41,22	49,09	0,839682	0,8	2
PEDOLOGIA				17,0%	
Urbano	1,14	1,48	0,77027	0,8	2
PVa1	24,43	36,90	0,66206	0,7	2
PVa2	27,84	18,02	1,54495	1,6	4
PVa5	3,98	6,47	0,615147	0,6	1
Ce	0,57	1,61	0,354037	0,4	1
LAa2	42,05	35,51	1,184173	1,2	3
LVa13	59,09	92,51	0,638742	0,6	1
Ca6	9,09	29,41	0,309079	0,3	1
UNID. GG				15,0%	
Tálus	41,18	28,75	1,432348	1,4	4
Colúvio e Matações	10,59	12,98	0,815871	0,8	2
Colúvio	42,35	40,54	1,044647	1,1	3
Solo Residual	5,88	17,73	0,331641	0,3	1
Aluvião	0,00	0,00	NODATA	NODATA	1
Colúvio Aluvionar	0,00	0,00	NODATA	NODATA	1

Como a álgebra do *software* permite apenas valores inteiros, a divisão dos pesos entre as classes foi feita de forma automática. Assim cinco classes receberam 17,0% e uma recebeu 15,0%.

O resultado foi o mapa de perigo dentro do *buffer* de 2 km, visto na Fig. 19. Nota-se que a área de alta suscetibilidade de ocorrer MGM abrange boa parte do traçado no *buffer* de 2 km.

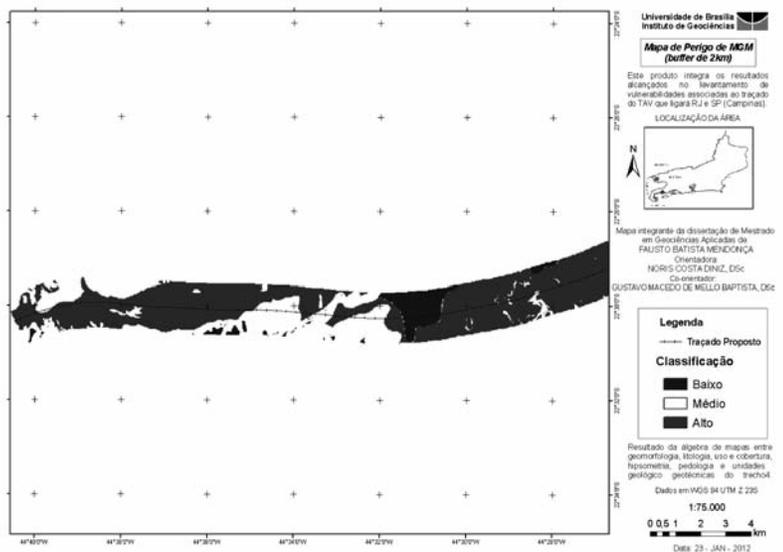


Fig. 19 – Mapa de perigo no *buffer* de 2 km.

Para a geração do mapa de risco a MGM no traçado do TAV efetuou-se uma operação de interseção, sem ponderações de pesos, entre o mapa de perigo, Fig. 19, e o traçado proposto. Foi obtido o mapa de risco a movimento gravitacional de massa no traçado, Fig. 20.

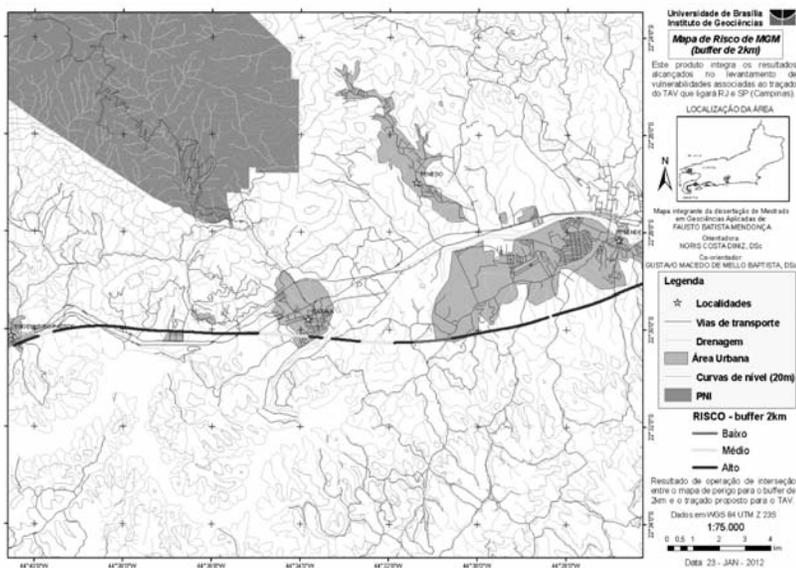


Fig. 20 – Mapa de risco de atingimento de MGM no trecho 4 do TAV.

No Quadro 11 constam os comprimentos das classes de risco para o trecho 4 na região avaliada. Todo o trecho foi classificado.

Quadro 11 – Comprimento das classes de risco no *buffer* de 2km no trecho avaliado.

<i>Buffer</i> de 2km	
Risco	Comprimento (km)
ALTO	23,18
MÉDIO	6,09
BAIXO	1,53

8.2 – Filtros direcionais no depósito de tálus

Foi desenvolvido um trabalho por meio de processamento digital de imagens no intuito de verificar a direção preferencial de escoamento superficial no depósito de tálus próximo à Represa do Funil. Fell *et al.* (2008), Cascini *et al.* (2005) e Castellanos e van Westen (2008) citam a importância de análises qualitativas na avaliação de susceptibilidade e de zoneamento de risco geológico. O filtro utilizado foi o filtro passa alta de Sobel, Quadro 12.

Quadro 12 – Filtros direcionais de Sobel (IBGE, 1999).

Filtros de Sobel											
N-S			NE-SW			E-W			NW-SE		
1	2	1	0	1	2	-1	0	1	-2	-1	0
0	0	0	-1	0	1	-2	0	2	-1	0	1
-1	-2	-1	-2	-1	0	-1	0	1	0	1	2

A imagem submetida a filtragem foi uma cena pancromática do sensor CBERS 2B, Fig. 21.



Fig. 21 – Imagem PAN da área.

As imagens que realçaram mais as linhas de fluxo superficial de água foram as filtradas nas direções E-W e NE-SW, como visto na Fig. 22 e na Fig. 23, o que quer dizer que as linhas de escoamento superficial predominam no sentido NW-SE, ou seja, perpendicular à varredura dos filtros de Sobel. Este também se mostra como o sentido de deslocamento do depósito de tálus, pois acompanha o sentido do fluxo de escoamento superficial, uma vez que a força desenvolvida por MGM gerado por escoamento de água de chuva é um dos fatores que acarretam o deslocamento de depósitos de tálus e outros tipos de deslizamentos.

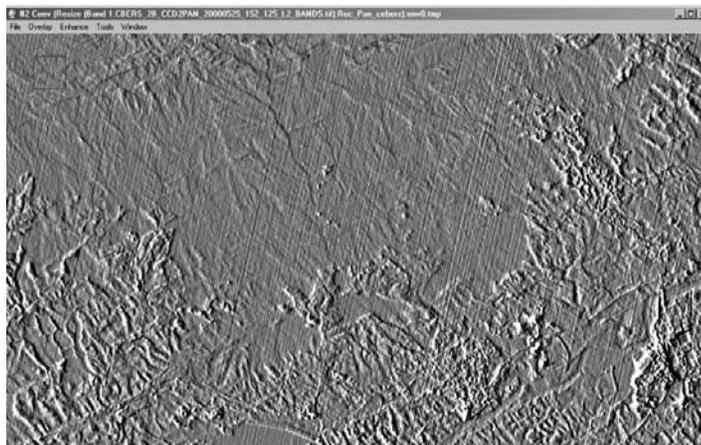


Fig. 22 – Imagem filtrada na direção E-W.

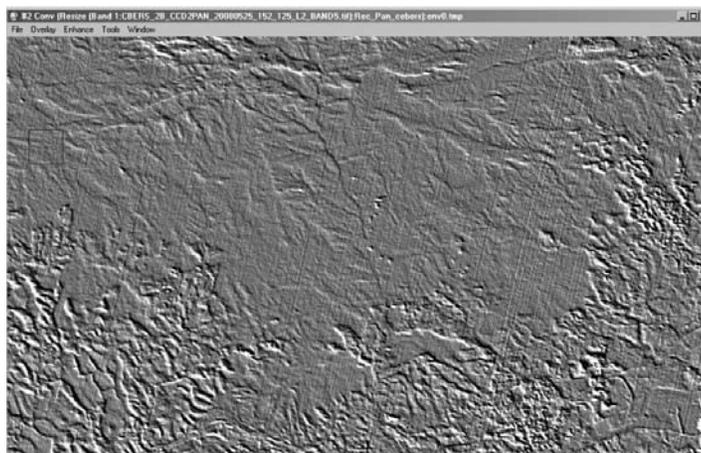


Fig. 23 – Imagem filtrada na direção NE-SW.

9 – VALIDAÇÃO DA ANÁLISE - AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ÁREAS DE MGM

Foi feita a verificação do padrão de distribuição das ocorrências de MGM na área de estudo. No mapa da Fig. 24 nota-se que o padrão de distribuição de pontos de ocorrência de MGM não é uniforme na área, porém com o teste de χ^2 foi possível confirmar que a distribuição segue a

geomorfologia da região, como pode ser visualizado no mapa, uma vez que a concentração dos registros de MGM estão no sopé do maciço alcalino do Pico do Itatiaia.

A distribuição χ^2 parte da premissa que a distribuição é equidistante (Montgomery e Runger, 2003). A divisão em subáreas foi feita por meio da quadrícula do mapa que contém os registros de MGM oriundos de fotointerpretação, conforme a Fig. 24.

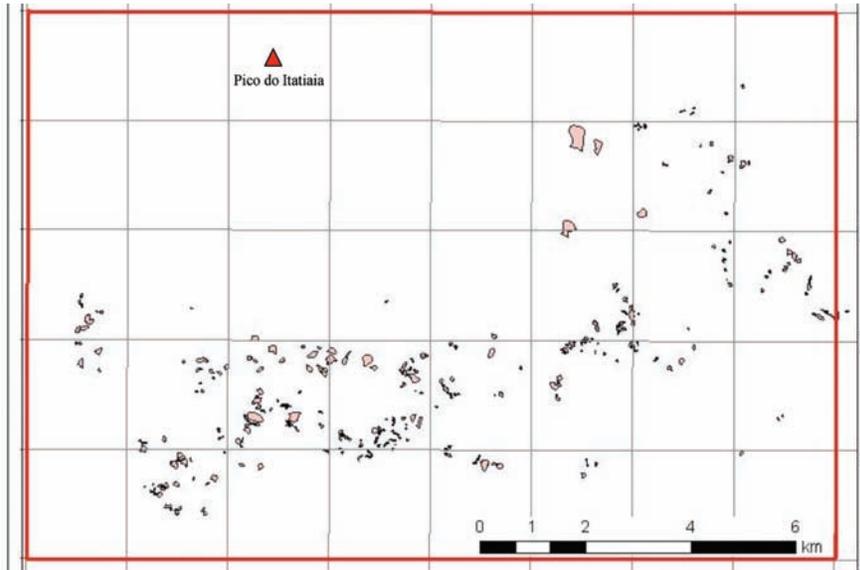


Fig. 24 – Divisão de subáreas para teste de hipótese.

O mapa foi dividido por 40 subáreas de igual tamanho, aproveitando a quadrícula, e computadas a quantidade de pontos de MGM em cada uma delas. Com $k = 40$ (n° de subáreas), $v = 40 - 2 = 38$ (graus de liberdade) e um nível de significância de 5% tem-se na tabela de χ^2 o valor crítico de 53,37. Sendo $N = 264$ o número total de observações, o número, E , esperado em cada subárea é dado por

$$E = N/k = 6,60 \quad (1)$$

Sendo O o número de pontos observados em cada subárea, o cálculo de χ^2 , dado pela expressão

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E)^2}{E} \quad (2)$$

é apresentado no Quadro 13.

Como o valor de χ^2 é maior que o valor crítico ($656 > 53,37$) conclui-se que o padrão de distribuição de pontos não é uniforme.

Porém é possível visualizar no padrão de distribuição da Fig. 24 que os movimentos de massa se distribuem ao longo da área deposicional de sedimentos, em torno do sopé do Pico do Itatiaia. Na região do Pico não foram observados movimentos de massa remotos nem recentes.

Nas elevações maiores a superfície apresenta diversos blocos de rocha que podem ser oriundos de corridas de blocos que só poderiam ser confirmadas com visitas de campo ou sensoriamento de alta resolução multitemporal.

Desta forma, os dados aqui analisados tendem a ocorrer nas elevações mais baixas, na região do sopé do Pico do Itatiaia.

Quadro 13 – Cálculo do valor de χ^2 .

Subárea	O_i	$(O_i - E)^2/E$
1	0	6,6
2	0	6,6
3	0	6,6
4	0	6,6
5	0	6,6
6	0	6,6
7	3	1,963636
8	1	4,751515
9	0	6,6
10	0	6,6
11	0	6,6
12	0	6,6
13	0	6,6
14	3	1,963636
15	14	8,29697
16	2	3,206061
17	6	0,054545
18	1	4,751515
19	1	4,751515
20	1	4,751515
21	1	4,751515
22	14	8,29697
23	11	2,933333
24	15	10,69091
25	4	1,024242
26	16	13,38788
27	39	159,0545
28	47	247,297
29	14	8,29697
30	21	31,41818
31	7	0,024242
32	2	3,206061
33	0	6,6
34	22	35,93333
35	3	1,963636
36	4	1,024242
37	8	0,29697
38	3	1,963636
39	0	6,6
40	1	4,751515
$\Sigma =$	264	656,6061

10 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação à hipótese apresentada nos objetivos deste trabalho ficou claro que existe perigo de ocorrência de movimento gravitacional de massa associado ao corte a ser realizado no depósito de tálus no sopé do Pico do Itatiaia. A presença de diversas áreas de movimentações remotas e recentes são indícios claros de que os terrenos na região estão sujeitos a movimentações.

O levantamento de cicatrizes de movimentos gravitacionais de massa por meio de imagens de sensoriamento remoto de alta resolução demonstrou ser um método eficaz, pois permitiu que o mapeamento fosse concluído com alto grau de detalhamento.

No mapeamento das cicatrizes de movimentos ocorridos foi possível visualizar que as áreas de incidência de movimentos se distribuem ao longo da base do depósito de tálus. As áreas que se mostraram mais frágeis foram exatamente as mais próximas e dentro do *buffer* de 2km que foi estabelecido na definição do traçado.

Constatou-se, como era esperado, que a região apresenta perigo ou suscetibilidade ao surgimento de movimentos gravitacionais de massa, mesmo sem a intervenção de obras de corte nas encostas. Trata-se de uma característica natural da região.

A realização de cortes no depósito de tálus, desestabilizando a encosta, confere um risco ao TAV por MGM na região classificada como perigosa, que não pode ser desprezado na realização do empreendimento. Os mapas de risco ao TAV, de atingimento por MGM, gerados neste trabalho apontam boa parte do trecho avaliado como de alto risco. Sendo assim, a região é suscetível e apresenta perigo alto a ocorrência de MGM. O mapeamento detalhado do depósito de tálus faz-se necessário para que não haja prejuízos de vidas e nem econômicos nas benfeitorias existentes e nas futuras.

11 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M.; Carneiro, C. D. R. (1998). *Origem e evolução da Serra do Mar*. Rev. Brasileira de Geociências, vol. 28, nº 2, pp. 135-150.
- Ardizzone, F.; Cardinali, M.; Carrara, A.; Guzzetti, F.; Reichenbach, P. (2002). *Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps*. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 2, pp. 3-14.
- Assis, A. P. (2009). *Modelos geológico-geomecânicos e seus riscos associados ao longo do traçado do TAV – Etapa III*, 54 p.
- Câmara, G. (1995). *Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos*. Tese de Doutorado. INPE, São José dos Campos, 252p. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/teses/gilberto/>>. Acessado em 23 dez 2011.
- Cardinali, M.; Reichenbach, P.; Guzzetti, F.; Ardizzone, F.; Antonini, G.; Galli, M.; Cacciano, M.; Castellani, M.; Salvati, P. (2002). *A geomorphological approach to the estimation of landslide hazards and risks in Umbria, Central Italy*. Natural Hazards and Earth System Science, vol. 2, pp. 57-72.
- Cascini, L.; Bonnard, C.; Corominas, J.; Jibson, R.; Montero-Olarte, J. (2005). *Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development*. O. Hungr, R. Fell, R. Couture and E. Eberhardt (eds.) Landslide Risk Management, Taylor and Francis, London, pp. 199-235.
- Castellanos, E.; van Westen, C. J. (2008). *Qualitative landslide susceptibility assesment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guant'anamo, Cuba*. Geomorphology, vol. 94, pp. 453-466.

- Copons, R.; Vilaplana, J. M. (2008). *Rockfall susceptibility zoning at a large scale: From geomorphological inventory to preliminary land use planning*. Engineering Geology, vol. 102, pp. 142-151.
- Coronado, J. A. (2006). *Avaliação da suscetibilidade a deslizamentos por meio do uso de sistemas de informações geográficas: aplicação em uma área do Eixo Cafeteiro Colombiano*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 92 p.
- CPRM Serviço Geológico do Brasil (2009a). *Mapeamento geológico-geotécnico e delimitação das áreas de risco geológico ao longo do traçado da via do trem de alta velocidade – TAV – Etapa I*, 205p.
- CPRM Serviço Geológico do Brasil (2009b). *Modelos geológico-geomecânicos e seus riscos associados ao longo do traçado do TAV – Etapa III*, 54p.
- Diniz, N. C. (1998). *Automação da cartografia geotécnica: uma ferramenta de estudos e projetos para avaliação ambiental*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 297p.
- Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W. (2008). *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. Engineering Geology, vol. 102, pp. 85-98.
- Guzzetti, F.; Cardinali, M.; Reichenbach, P. (1994). *The AVI project: a bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy*. Environmental Management, vol. 18, pp. 623-633.
- Guzzetti, F.; Reichenbach, P.; Cardinali, M.; Ardizzone, F.; Galli M. (2003). *The impact of landslides in the Umbria region, Central Italy*. Natural Hazards and Earth System Science, vol. 3, pp. 469-486.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1999). *Introdução ao processamento digital de imagens*. Manuais técnicos em geociências, nº 9, pp. 67-68, Rio de Janeiro.
- INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (2007). *Fundamentos de geoprocessamento: teórica*. Apostila do Curso de Fundamentos de Geoprocessamento, São José dos Campos, SP.
- Irigaray, C.; Chacón, J. (2003). *Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante S.I.G.* F. J. Ayala-Carcedo & J. Corominas (eds.) Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas de SIG, 2, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 21-36.
- JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineering Slopes (2008). *Guidelines for landslides susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. Engineering Geology, vol. 102, pp. 83-84.
- Mendonça, F. B.; Diniz, N. C.; Baptista, G. M. M. (2011). *Aplicação de filtros direcionais para a identificação da direção de movimentação de depósito de tálus, utilizando imagens CBERS 2B e dados da missão SRTM em trecho a ser cortado para a passagem da ferrovia do trem de alta velocidade*. 13º CBGE – 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 7 p., CD-ROM.
- Montgomery, D. C.; Runger, G. C. (2003). *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. Tradução da segunda edição por Verônica Calado, Rio de Janeiro, Editora Livro Técnico e Científico, 462 p.

- Pimentel, J. (2010). *Projeto áreas de risco na região de Angra dos Reis, RJ: modelagem espacial de dados em SIG para a geração de mapa previewal de áreas de risco geológico* – Rio de Janeiro – CPRM – Serviço Geológico do Brasil e KIGAM – Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources, 113p.
- Ross, J. L. S.; Moroz, I. C. (1997). *Mapa geomorfológico do estado de São Paulo*. Laboratório de Geomorfologia – Departamento de Geografia – FFLCH – USP / Laboratório de Cartografia Geotécnica – Geologia Aplicada – IPT / FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – Mapas e Relatórios – São Paulo, Escala 1:500 000.
- Silva, A. B. (1999). *Sistema de informações geo-referenciadas: conceitos e fundamentos*. Editora da UNICAMP, Campinas – SP, 236 p.
- van Westen, C. J.; Castellanos, E.; Kuriakose, S. L. (2008). *Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview*. Engineering Geology, vol. 102, pp. 112-131.
- Vedovello, R. (2009). *Resgate histórico da atuação do Instituto Geológico na prevenção de desastres naturais*. M. M. N. Pressinotti & R. do Amaral (eds.) O Instituto Geológico na prevenção de desastres naturais, 1, Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente, Governo de São Paulo, pp. 1-7.
- Vilaplana, J. M.; Pallás, R.; Guinau, M.; Falgás, E.; Alemany, X.; Muñoz, A. (2002). *Propuesta para una cartografía de peligrosidad geológica asociada a los movimientos de ladera en el noroeste de Nicaragua*. Serie Geográfica, vol. 10, pp. 109-119.
- Yalcin, A.; Bulut, F. (2007). *Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE – Turkey)*. Natural Hazards, vol. 41, pp. 201-226.
- Zuquette, L. V.; Ahrendt, A. (2003). *Triggering factors of landslides in Campos do Jordão City, Brazil*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 62, pp. 231-244.