

COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES CRITÉRIOS PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS DE SUSCETIBILIDADE AOS ESCORREGAMENTOS. EXEMPLO DO MUNICÍPIO DE CUBATÃO, SERRA DO MAR PAULISTA.

Comparison between different criteria to the elaboration of landslide susceptibility maps - City of Cubatão example, Serra do Mar Paulista

Mateus Vidotti Ferreira¹
Paulina Setti Riedel²
Eymar Silva Sampaio Lopes³
Eder Renato Merino⁴

¹**Universidade Estadual Paulista – UNESP**
Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente
mateusvidotti@yahoo.com.br

²**Universidade Estadual Paulista – UNESP**
Departamento de Geologia Aplicada
psriedel@rc.unesp.br

³**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**
Divisão de Processamento de Imagem
eymar@dpi.inpe.br

⁴**Universidade Estadual Paulista – UNESP**
Graduação em Geografia
ermerino82@yahoo.com.br

RESUMO

A ocorrência de escorregamentos translacionais rasos no litoral paulista é parte integrante da evolução natural das encostas, que se intensifica sob condições de clima tropical em uma morfologia de serras com desníveis em torno de 700m. Sob precipitações intensas, mesmo sem a interferência direta do homem, os movimentos de massa ocorrem de forma isolada ou generalizada. Devido à presença de um grande histórico de movimentos de massa, tomou-se como área de estudo parte da Serra do Mar Paulista localizada no município de Cubatão-SP. Esse trabalho teve como objetivo avaliar a técnica de análise multicriterial ponderada em SIG – Sistema de Informação Geográfica para elaboração de mapas de suscetibilidades aos escorregamentos translacionais. Buscou-se investigar como a qualidade dos dados e os pesos a eles atribuídos influenciam os resultados. Foram elaborados mapas de suscetibilidade, com diferentes pesos para os diferentes fatores, que são os condicionantes do processo: declividade, forma de vertente e litologias. Da mesma forma, foram também testados mapas de vertente com diferentes formas de obtenção. A utilização de dados de formas de vertente mais detalhados, produzidos a partir do modelo digital de elevação (MDE), produziram mapas de suscetibilidade aos escorregamentos mais adequados para estudos pontuais. Os mapas produzidos com os pesos 70% para declividade, 20% para forma de vertente e 10% para a geologia, no processo de validação, apresentaram o maior número de cicatrizes onde era esperado, na classe de muito alta suscetibilidade.

Palavras chaves: mapa de suscetibilidade ao escorregamento – análise multicriterial ponderada – Serra do Mar .

ABSTRACT

The occurrence of shallow translational landslides in the coast of São Paulo State, is also part of the natural development of slopes, which become more intense due to tropical weather over mountainous areas around 700m

above sea level. Under heavy raining conditions mass-movements take place in a regular and scattered manner, even without the direct human interference. We have chosen a region in the municipality of Cubatão with a unique geomorphologic profile, located in Serra do Mar, São Paulo State (SP), as our study area, due to the fairly common occurrence of mass movements. The present study aimed at evaluating the weighted multicriteria method to elaborate translational landslide susceptibility maps. We investigate how data quality and its attributed weights can influence the final results. Susceptibility maps were done using different weights for the several factors, that control the landslide process: slope, downhill profile and lithologies. In the same way, we also tested maps of downhill profile obtained by different methods. The more detailed downhill profile maps, obtained through the digital elevation model generated more suitable susceptibility maps concerning pontual studies. During the validation process, maps considering 70% for slope, 20% for downhill profile and 10% for lithology, presented more landslide scars where expected, in the very high susceptibility class

Keywords: weighted multicriteria analysis, landslide susceptibility maps, Serra do Mar

1. INTRODUÇÃO

Os movimentos gravitacionais de massa são processos que ocorrem e são estudados em todo o mundo. São em parte responsáveis pela evolução das formas do relevo e causam grandes danos socioeconômicos quando em desequilíbrio (GUIDICINI & NIEBLE, 1984). De acordo com a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB, 1991b), desde o século XIX vêm se registrando ocorrência de escorregamentos na Serra do Mar, contudo os estudos registrados abordando a origem e a dinâmica desses processos datam do início da década de 50 do século passado. Esses estudos buscam demonstrar a existência de uma relação entre os movimentos de massa e as áreas onde existe interferência na “natureza” para a construção de estradas e habitação. Cabe salientar que estes movimentos de massa estão também relacionados com os aspectos naturais, como chuvas intensas e prolongadas, estruturas geológicas, declividades acentuadas, drenagem superficial e subsuperficial, vegetação.

A Serra do Mar corresponde à escarpa montanhosa da borda oriental do Planalto Atlântico, acompanhando as direções geográficas e estruturais SW/NE do litoral sudeste brasileiro, transpondo desníveis médios de 1.000 metros em larguras entre 5 e 10 quilômetros, e estendendo-se por cerca de 1000 quilômetros do Estado do Rio de Janeiro ao estado de Santa Catarina (SANTOS, 2004). As escarpas da Serra do Mar ocupam a área da floresta tropical úmida, caracterizada por elevadas temperaturas e por chuvas torrenciais, fatores que causam um processo de alteração intenso. Estas características (condicionantes ou variáveis dos movimentos de massa), associadas ao relevo e aos tipos de rochas, podem desencadear os processos de escorregamentos (IPT, 1988). Esses processos podem ser classificados de acordo com o material envolvido, com o tipo de mecânica e a velocidade de movimentação. Na Serra do Mar, embora ocorram outros tipos de escorregamentos, o mais atuante na dinâmica superficial é o escorregamento translacional raso (AUGUSTO FILHO & VIRGILI, 1998). Esse tipo de escorregamento ocorre especialmente em áreas de encosta retilíneas com inclinação acima de 30° e

rupturas positivas de declive, muitas vezes induzido por cortes que ocorrem no terreno, concentração de águas superficiais, desmatamento, sobrepesos de aterros e lixo, etc. (SANTOS, 2004).

O uso do sistema de informações geográficas (SIG) tem auxiliado na sobreposição e interpretação de informações espaciais adquiridas de uma determinada área. Uma técnica muito utilizada é a análise multicriterial ponderada, sendo eficiente para os casos em que se têm diferentes variáveis ou condicionantes que contribuem para a ocorrência de um determinado processo, onde se deve, portanto, determinar a importância relativa de cada uma delas (BONHAM-CARTER, 1994). Neste procedimento, diferentes fatores que influenciam o processo são sintetizados através do cruzamento ordenado por pesos previamente definido por uma equipe, geralmente multidisciplinar. Contudo, as informações a serem cruzadas e os seus respectivos pesos associados necessitam de uma cautelosa avaliação para que o resultado do cruzamento represente da melhor forma possível a síntese desejada da informação.

Esse trabalho teve como objetivo avaliar a técnica de análise multicriterial ponderada em SIG para elaboração de mapas de suscetibilidades aos escorregamentos translacionais. Investigou-se como a qualidade dos dados e os pesos a eles atribuídos influenciam os resultados. Para validação dos resultados foram utilizados cadastros de cicatrizes extraídas através da interpretação visual de fotografias áreas de duas datas: 1985 e 1994.

2. LOCALIZAÇÃO

O município de Cubatão (Figura 1) foi escolhido como área de estudo devido à presença de um grande histórico de movimentos de massa, ocasionados por fatores geomorfológicos, geológicos, climáticos e antrópicos.

O município possui um parque industrial de grande importância para o estado, o que tem levado a uma intensa ocupação e conseqüente aumento da ação antrópica e da ocupação de áreas sujeitas a maior risco de ocorrência dos processos de movimento de massa. Existem na área também importantes obras lineares como rodovias, ferrovias, oleodutos, aquedutos e linhas

de transmissão de energia que podem induzir os movimentos de massa, além de estarem sujeitas à suas ocorrências naturais.

3. OBJETIVOS

Esse trabalho teve como objetivo avaliar a técnica de análise multicriterial ponderada em SIG para elaboração de mapas de suscetibilidades aos escorregamentos translacionais, buscando avaliar como a diferente atribuição de pesos e a qualidade dos dados influenciam os resultados.

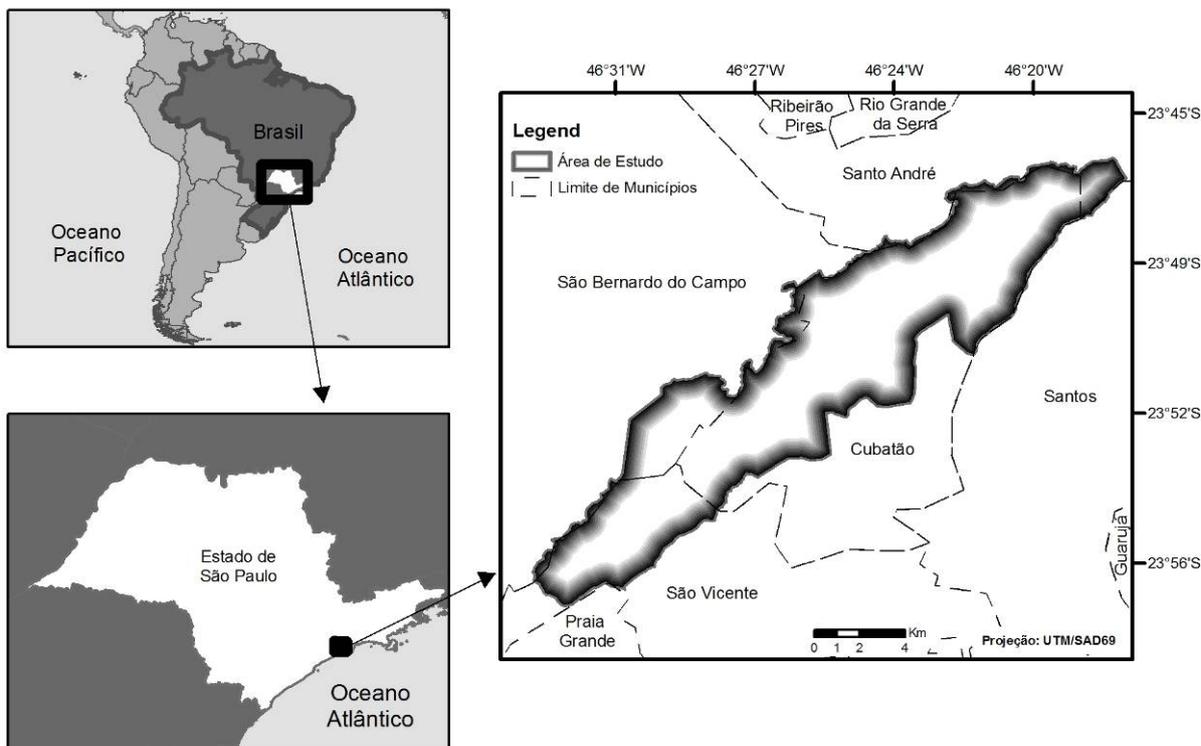


Fig. 1 - Área de Estudo

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para esse trabalho foi elaborado um banco de dados geográfico, com o objetivo de armazenar e integrar informações do meio físico. A figura 2 apresenta o diagrama de trabalho com destaque para o banco de dados geográfico.

4.1 Modelo de elevação do terreno.

O modelo de elevação do terreno é o resultado do trabalho de Lopes et al. (2006). As informações altimétricas do terreno, isolinhas e pontos cotados, e a rede de drenagem, necessários para geração MDE, foram obtidas das cartas topográficas adquiridas junto a AGEM (Agência Metropolitana da Baixada Santista), folhas 4215 e 4216, na escala 1:10.0000 com equidistância de 5m das curvas de nível, em formato *dwg* (AutoCad).

Os dados, apesar do formato digital e do georeferenciamento, precisaram ser ajustados para obtenção de um melhor modelo. Os principais ajustes foram: suavização e adensamento das isolinhas, inserção de pontos cotados e ordenação da drenagem. Os MDEs foram produzidos com três objetivos diferentes: 1) Ortorectificação das fotografias aéreas do ano de 1995 e 1994; 2) Produção do mapa de declividade por bacia hidrográfica; 3) Produção do mapa de forma de vertente detalhado, por bacia hidrográfica. No primeiro caso, os MDEs foram recortados na área das fotografias aéreas e com a mesma resolução das fotografias, 0,5 metros para o ano de 1985 e 0,8 metros para o ano de 1994. No segundo e terceiro casos, os MDEs foram produzidos na área de cada Bacia e com resolução de 1 metro. O interpolador utilizado para obtenção do MDE foi o TOPOGRID, disponível no ArcGIS 9.2 (ESRI, 2006).

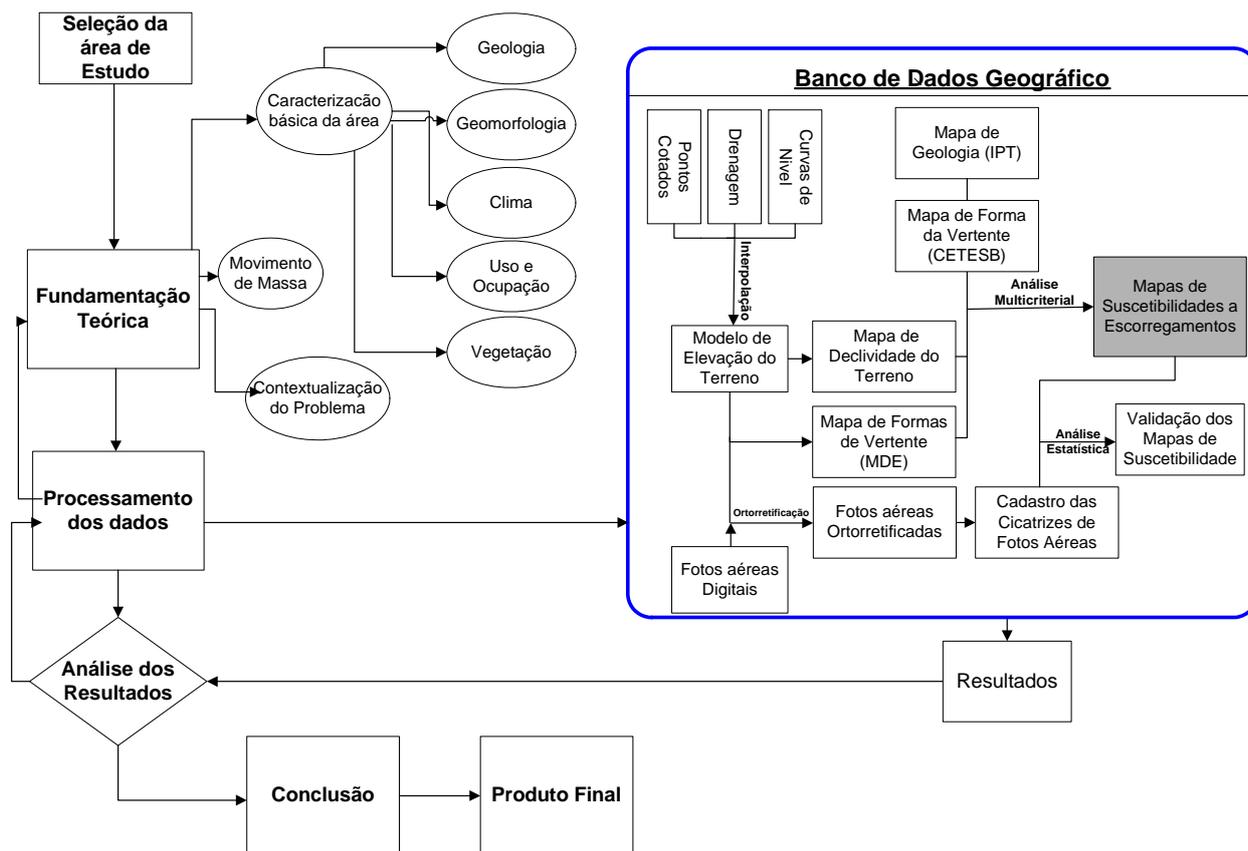


Fig. 2 - Diagrama de trabalho.

4.2 Ortorretificação das fotografias aéreas e cadastro visual das cicatrizes de escorregamento.

As fotografias aéreas ortorectificadas e o cadastro visual de cicatrizes de escorregamento utilizados são resultados do trabalho de Lopes et al (2006).

Para executar a ortorectificação das fotos aéreas, além do modelo numérico de terreno (MDE) criado para cada foto, foram informados os parâmetros de orientação interior, como a distância focal e medidas das marcas fiduciais, e ainda parâmetros de orientação exterior, composto de um conjunto razoável de pontos de controle (coordenadas geográficas X/Y e elevação Z), obtidos de uma base de referência adotada como sendo as ortofotos digital de 2001, com 0,98 metros de resolução da SMA-SP- PPMA (Secretaria do Meio Ambiente –Estado de São Paulo- Projeto de Preservação da Mata Atlântica) e das cartas plani-altimétricas da AGEM (2002), na escala 1:10.000. O software utilizado para a ortorectificação foi o ENVI 4.1 (RSInc, 2004)

O cadastro dos escorregamentos foi realizado para toda a extensão da área de estudo nas fotos de 1985, do INPE, na escala 1:25.000 e nas fotos de 1994, da BASE, na escala 1:35.000. A extração das cicatrizes foi efetuada através de interpretação visual, diretamente na tela do computador, utilizando-se a sobreposição de curvas de nível da base topográfica digital, para favorecer a identificação das feições, recorrendo-se às fotos originais, montadas sob o estereoscópio de

espelho, para o esclarecimento de eventuais dúvidas. Os principais critérios utilizados para o reconhecimento das cicatrizes dos escorregamentos foram: ausência de vegetação, tonalidade, cor, posição na vertente, forma, dimensão e orientação na vertente.

4.3 Seleção das bacias

A área de estudo apresenta vinte e cinco bacias hidrográficas, entretanto foram selecionadas duas para produção e avaliação dos mapas de suscetibilidades ao escorregamento, devido à maior disponibilidade de informação de campo e ao elevado número de cicatrizes destas bacias.

As bacias escolhidas foram a 09, que apresentou 182 cicatrizes nas fotos aéreas de 1994 e a 20, que apresentou 340 cicatrizes no ano de 1985. A figura 3 apresenta a área de estudo com as bacias selecionadas em destaque e as figuras 4 e 5 apresentam a distribuição das cicatrizes nas bacias 09 e 20, respectivamente.

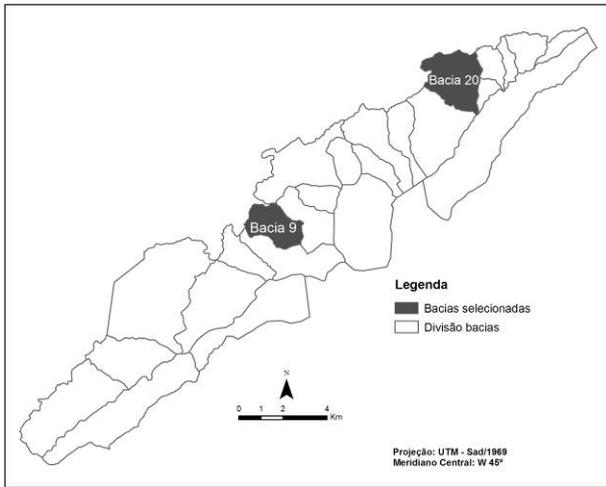


Fig. 3 – Bacias de estudo selecionadas.

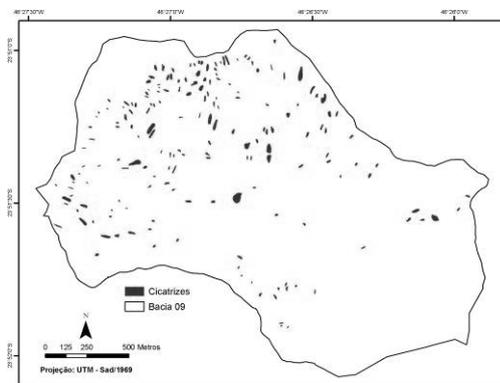


Fig. 4 – Cicatrizes de Escorregamentos (bacia 09), ano 1994.

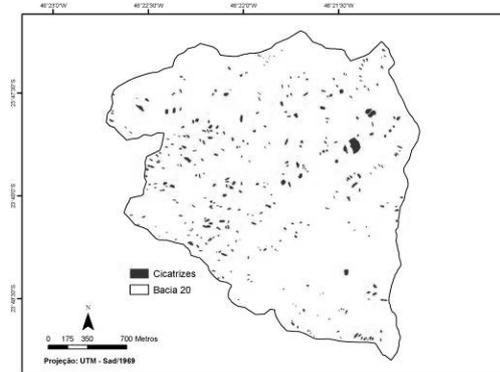


Fig. 5 – Cicatrizes de Escorregamentos (bacia 20), ano 1985.

4.4 Mapas de declividade do terreno

Os mapas de declividade do terreno foram derivados dos modelos de elevação do terreno gerado pelo interpolador TopoGrid do ArcGis 9.2. Em seguida, os valores dos pixels foram classificados segundo a tabela 1:

TABELA 1 – CLASSES DO MAPA DE DECLIVIDADE.

Classe de declividade	Intervalo de declividade
Classe 1	$D > 20^\circ$
Classe 2	$20^\circ < D < 30^\circ$
Classe 3	$30^\circ < D < 45^\circ$
Classe 4	$D > 45^\circ$

Apesar da criteriosa seleção do interpolador, os mapas de declividade apresentaram duas características não desejáveis. A primeira é a existência de pequenas classes isoladas dentro de classes muito maiores (figura 6a) e a segunda é a grande delimitação das áreas de drenagem (figura 6b). Para remoção desses efeitos indesejados foram utilizados filtros de borda e área, ferramentas presentes no software ArcGis 9.2. O objetivo desse procedimento foi tentar uma maior homogeneização das classes no mapa, criando áreas um pouco maiores e removendo as menores.

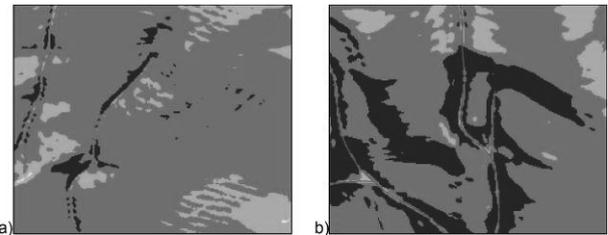


Fig. 6 - Efeitos indesejados no mapa de declividade. a) Detalhe de pequenas áreas isoladas. b) Detalhe da excessiva delimitação da drenagem.

4.5 Mapas de forma de vertente (MDE)

Os mapas de forma de vertente digitais, utilizados neste trabalho, foram gerados ao partir do MDE produzido pelo TopoGrid do ArcGis 9.2 (ESRI, 2006), o mesmo utilizado para gerar o mapa de declividade do terreno. A ferramenta do ArcGis para geração dos mapas foi a *Curvature* do Módulo Spatial Analyst, que tem como entrada de informação apenas o modelo numérico do terreno. Foram encontrados problemas quando se tentou utilizar o MDE TopoGrid diretamente, pois os resultados obtidos não traziam destacadas as formas de vertentes de uma forma contínua, mas sim com pequenas estrias (Figura 7), o que dificultava as análises posteriores sobre estes produtos.



Fig. 7 – Zoom em área da Bacia 20, demonstrando formas de vertentes (cinza claro - vertentes côncavas; cinza escuro – vertentes planas; preto – vertentes convexas).

Frente a este problema, foram realizados vários testes, com o objetivo de tentar suavizar o MDE para gerar mapas de forma de vertente com áreas mais contínuas. O processo que produziu o melhor resultado está descrito abaixo:

1 – A partir do MDE TopoRaster do ArcGis, com resolução de 1 X 1 metro, foram geradas curvas com equidistância de 10 metros com o método *Countour* do Spatial Analyst;

2 – Utilizando as curvas com equidistância de 10 metros, foi gerado um novo MDE, com resolução de 10X10 metros;

3 – A partir do MDE 10X10 metros, foram geradas novas curvas de nível com equidistância de 5 metros;

4 – Com as curvas de nível de 5 metros de equidistância, foi gerado um MDE de 5X5 metros de resolução;

5 – Com o novo MDE de 5X5 metros de resolução, foram geradas curvas de nível com 2,5 metros de equidistância;

4 – Com as curvas de nível de 2,5 metros de equidistância, foi gerado um MDE de 2,5 X 2.5 metros de resolução;

4.6 Mapa litológico (IPT) e Mapa de formas de vertente (CETESB)

O mapa litológico utilizado foi obtido no relatório produzido pelo IPT (1986), com escala 1:50.000. O outro mapa de vertente a ser testado neste trabalho, para a produção dos mapas de suscetibilidade, foi gerado no projeto Carta Morfodinâmica da Serra do Mar na Região de Cubatão – SP (CETESB, 1991a), a partir da interpretação das formas das curvas de nível em mapas topográficos, apoiadas por observação das formas de vertentes em fotografias aéreas, com escala 1:50.000. Ambos os mapas citados foram digitalizados e recortados nas áreas das duas bacias escolhidas para análises.

4.7 Mapas de Suscetibilidade

Neste trabalho, os mapas de suscetibilidade ao escorregamento translacional foram produzidos através

da análise multicriterial, realizada com a utilização do Software Arc Gis 9.2 (ESRI, 2006). Para determinar a suscetibilidade de uma área, foram considerados três importantes condicionantes: declividade, forma de vertente e a geologia, segundo IPT(1988). Os produtos testados nessa análise e os pesos estabelecidos para as diferentes classes dos mapas estão sintetizados nas tabelas 2, 3, 4 e 5

TABELA 2 – MAPA DE DECLIVIDADE - INTERVALOS DE CLASSES E PESOS ASSOCIADOS.

Mapa de Declividade	
Classes de Declividade (em graus)	Pesos
0 - 20	2
20 - 30	4
30 - 45	8
45 - 90	4

TABELA 3 - MAPA DE FORMA DE VERTENTE, OBTIDO – CLASSES E PESOS ASSOCIADOS.

Mapa de Formas de Vertente (CETESB)	
Formas de Vertentes	Pesos
Convexa	2
Côncava	4
Retilínea	8

TABELA 4 - MAPA DE FORMAS DE VERTENTE, OBTIDO DIGITALMENTE – CLASSES E PESOS ASSOCIADOS.

Mapa de Formas de Vertente (MDE)	
Formas de Vertentes	Pesos
Convexa	2
Côncava	4
Retilínea	8

TABELA 5 – MAPA LITOLÓGICO - INTERVALOS DE CLASSES E PESOS ASSOCIADOS.

Mapa Litológico (IPT)		
Classes	Siglas	Pesos
Areias e argilas de deposição em mangues e pântanos	Qp	Restricted*
Areias e argilas de deposição flúvio-lagunar	Qb	Restricted*
Areias finas inconsolidadas e quartzosas de deposição marinha	Qmc	Restricted*
Areias quartzosas em depósitos de praias	Qma	Restricted*
Areias silte, argila e cascalhos de deposição fluvial no planalto	Qa	Restricted*
Corpos granitóides granulação média aspecto maciço	PSEOY	1
Faixa cataclástica, em parte recristalizada, milonitos e filonitos associados a falhamentos transcorrentes e ou inversos	PSEOM	3
Filitos sericita-quartzo xistos e clorita-xistos	PSPF	8
Micaxistos com teores variáveis de quartzo	PSPX	7
Migmatitos estromatíticos com paleossoma dominante de biotita-muscovita-clorita xisto com ou sem sillimanita e granada	PSeMc	5
Migmatitos estromatíticos com paleossoma dominante de micaxistos	PSeMm	5
Migmatitos estromatíticos e ou oftalmíticos de neossoma dominante, e ou nebulíticos. Passam a granitóides sintectônicos	AcMn	2
Migmatitos estromatíticos com paleossoma de hornblenda-biotita gnaiss	AcMb	4
Migmatitos oftalmíticos com paleossoma biotita gnáissico	AcMg	4
Migmatitos oftalmíticos por vezes estromatíticos	AcMp	3
Quartzito	AcQ	3
Quartzitos micáceos e quartzitos puros	PSPQ	4
Rochas calco-silicatadas com epídoto anfibólio e biotita	PSPC	2
Sedimentos inconsolidados de granulometria variada, depósitos coluviais no sopé da escarpa ou depósitos na planície costeira	Qc	Restricted*

*Restricted - Pesos Próximos a zero

Foram produzidos 12 mapas de suscetibilidade ao escorregamento, sendo 6 para a bacia 09 e 6 para a bacia 20. A tabela 6 apresenta os mapas e os pesos associados para todas as análises multicriteriais realizadas. Para todos os mapas produzidos, os pesos atribuídos às classes permaneceram constantes, variando somente os pesos dos mapas. Para uma mesma sequência de pesos foram efetuados dois testes para cada bacia, um com a utilização do mapa de forma das vertentes da CETESB, mais generalizado, e outro para o mapa obtido digitalmente a partir do MDE, com maior detalhamento.

TABELA 6 – MAPAS E PESOS ASSOCIADOS PARA AS ANÁLISES MULTICRITERIAIS.

Análise Multicriterial 1 (Bacia 09)	Pesos
Mapa de declividade (MDE)	70%
Mapa geológico (IPT)	10%
Mapa de forma de vertente (CETESB)	20%
Análise Multicriterial 2 (Bacia 09)	Pesos
Mapa de declividade (MDE)	70%
Mapa geológico (IPT)	10%
Mapa de forma de vertente (MDE)	20%
Análise Multicriterial 3 (Bacia 09)	Pesos
Mapa de declividade (MDE)	50%
Mapa geológico (IPT)	25%
Mapa de forma de vertente (CETESB)	25%
Análise Multicriterial 4 (Bacia 09)	Pesos

Mapa de declividade (MDE)	50%
Mapa geológico (IPT)	25%
Mapa de forma de vertente (MDE)	25%
Análise Multicriterial 5 (Bacia 09)	Pesos
Mapa de declividade (MDE)	34%
Mapa geológico (IPT)	33%
Mapa de forma de vertente (CETESB)	33%
Análise Multicriterial 6 (Bacia 09)	Pesos
Mapa de declividade (MDE)	34%
Mapa geológico (IPT)	33%
Mapa de forma de vertente (MDE)	33%
Análise Multicriterial 7 (Bacia 20)	Pesos
Mapa de declividade (MDE)	70%
Mapa geológico (IPT)	10%
Mapa de forma de vertente (CETESB)	20%
Análise Multicriterial 8 (Bacia 20)	Pesos
Mapa de declividade (MDE)	70%
Mapa geológico (IPT)	10%
Mapa de forma de vertente (MDE)	20%
Análise Multicriterial 9 (Bacia 20)	Pesos
Mapa de declividade (MDE)	50%
Mapa geológico (IPT)	25%
Mapa de forma de vertente (CETESB)	25%
Análise Multicriterial 10 (Bacia 20)	Pesos
Mapa de declividade (MDE)	50%
Mapa geológico (IPT)	25%

Mapa de forma de vertente (MDE)	25%
Análise Multicriterial 11 (Bacia 20)	Pesos
Mapa de declividade (MDE)	34%
Mapa geológico (IPT)	33%
Mapa de forma de vertente (CETESB)	33%
Análise Multicriterial 12 (Bacia 20)	Pesos
Mapa de declividade (MDE)	34%
Mapa geológico (IPT)	33%
Mapa de forma de vertente (MDE)	33%

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Mapa de declividade

As figuras 8 e 9 apresentam os mapas finais de declividade, que foram utilizados na análise multicriterial, sobrepostos pelas cicatrizes de escorregamento.

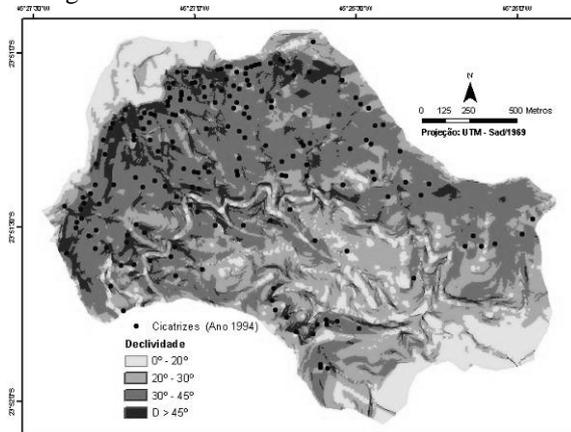


Fig. 8 – Mapa de declividade final (bacia 09)

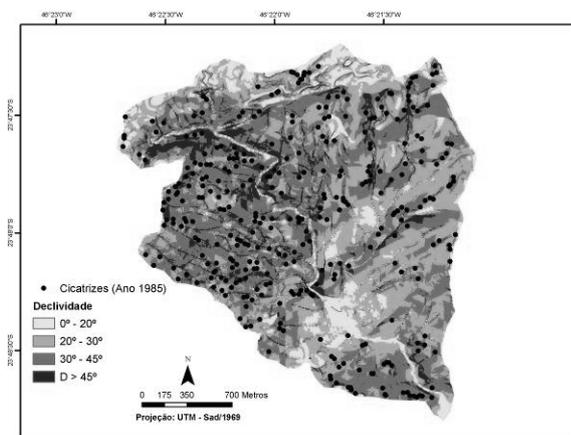


Fig.9 – Mapa de declividade final (bacia 20)

As tabelas 7 e 8 apresentam as estatísticas das cicatrizes por classe de declividade das bacias 09 e 20, respectivamente.

TABELA 7 – ESTATÍSTICA DAS CICATRIZES POR CLASSE DE DECLIVIDADE (BACIA 09).

Intervalo de declividade	% do número total de cicatrizes	% da área ocupada da bacia	Concentração (número de cicatrizes por m ²)
D > 20°	0%	14,67%	0
20° < D < 30°	5,49%	29,28%	0,000010
30° < D < 45°	78,57%	46,75%	0,000090
D > 45°	15,93%	9,30%	0,000091

Intervalo de declividade	% do número total de cicatrizes	% da área ocupada da bacia	Concentração (número de cicatrizes por m ²)
D > 20°	1,47%	10,18%	0,000009
20° < D < 30°	20,59%	35,82%	0,000036
30° < D < 45°	68,82%	44,57%	0,000097
D > 45°	9,12%	9,43%	0,000061

TABELA 8 – ESTATÍSTICA DAS CICATRIZES POR CLASSE DE DECLIVIDADE (BACIA 20).

Observando-se as tabelas, nota-se que existe uma grande correlação entre a declividade e cicatrizes de escorregamentos. As bacias apresentam quase 50% das suas áreas com declividade entre 30° e 45° e com mais de 68% das cicatrizes concentradas nesse intervalo e a classe de declividade menor que 20° tem 0% de cicatrizes para a bacia 09 e 1,47% de cicatrizes para a bacia 20, apesar de suas áreas corresponderem a 14,67% para a bacia 09 e 10,18% para a bacia 20.

Importante destacar que, para a bacia 09, a concentração de cicatrizes é a mesma para as classes de declividade de 30° a 45° e maior que 45°, não confirmando o que foi relatado por IPT (1987), que afirma que a ocorrência de escorregamento na região da Serra do Mar em Cubatão diminui para intervalos de declividade superiores a 45°. Nota-se uma maior discordância nos resultados na classe entre 20° e 30°. A bacia 09 tem uma concentração 4 vezes menor de cicatrizes nessa classe, quando comparada com a bacia 20. Esses resultados indicam que a declividade é um grande condicionante para a ocorrência dos escorregamentos translacionais, mas não explica sozinha a ocorrência do processo.

5.2 Mapa litológico (IPT) e Mapa de formas de vertente (CETESB)

As figuras 10 e 11 apresentam os mapas litológicos (IPT) e de formas de vertente (CETESB) para a bacia 09 e as figuras 12 e 13 os mesmos para a bacia 20.

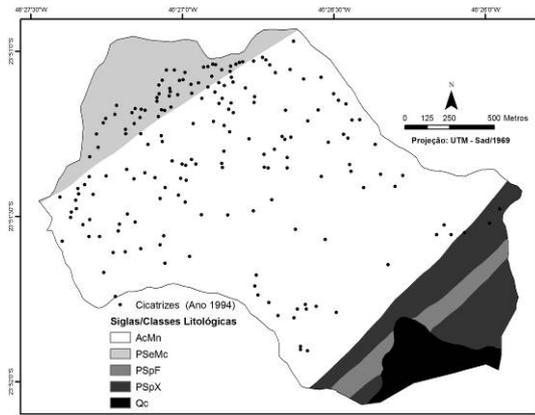


Fig. 10 – Mapa litológico – IPT, 1986 (bacia 09).

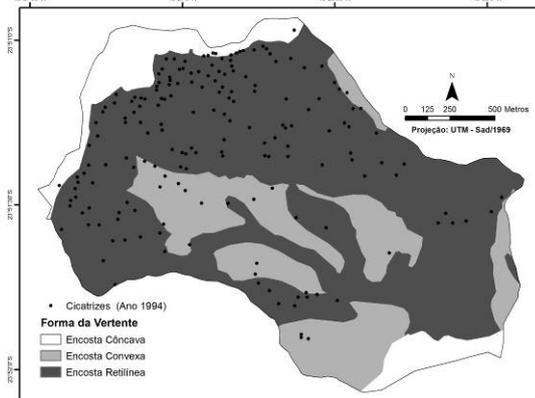


Fig. 11 – Mapa de formas de vertente – CETESB, 1991a.(bacia 09).

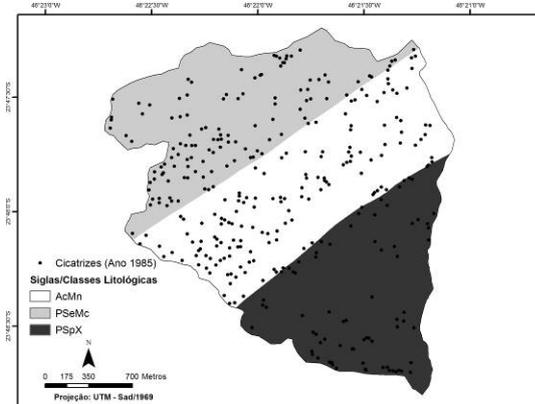


Fig. 12 – Mapa litológico – IPT, 1986 (bacia 20).

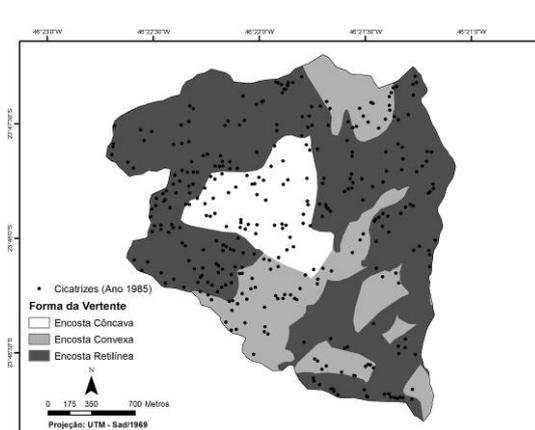


Fig. 13– Mapa de formas de vertente – CETESB, 1991a (bacia 20).

As tabelas 9, 10, 11 e 12 apresentam estatísticas das cicatrizes por classe litológica e por forma de vertente (CETESB), das bacias 09 e 20

TABELA 9 – ESTATÍSTICA DAS CICATRIZES POR CLASSE LITOLÓGICA (BACIA 09).

Sigla litológica	% do número total de cicatrizes	% da área ocupada da bacia	Concentração (número de cicatrizes por m ²)
AcMn ¹	71,98%	71,83%	0,000052
PSeMc ²	26,37%	11,01%	0,000124
PSpX ³	1,65%	9,98%	0,000009
PSpF ⁴	0,00%	2,93%	0
Qc ⁵	0,00%	4,25%	0

¹AcMn - Migmatitos estromatíticos e ou ofthalmíticos de neossoma dominante, e ou nebulíticos. Passam a granitóides sintectônicos.

²PSeMc - Migmatitos estromatíticos com paleossoma dominante de biotita-muscovita-clorita xisto com ou sem sillimanita e granada.

³PSpX - Micaxistos com teores variáveis de quartzo.

⁴PSpF - Filitos sericita-quartzo xistos e clorita-xistos.

⁵Qc - Sedimentos inconsolidados de granulometria variada, depósitos colúviais no sopé da escarpa ou depósitos na planície costeira.

TABELA 10 – ESTATÍSTICA DAS CICATRIZES POR FORMA DE VERTENTE (CETESB) (BACIA 09).

Forma de vertente	% do número total de cicatrizes	% da área ocupada da bacia	Concentração (número de cicatrizes por m ²)
Retilínea	86,81%	68,86%	0,000067
Côncava	3,30%	7,10%	0,000025
Convexa	9,89%	24,04%	0,000022

TABELA 11 – ESTATÍSTICA DAS CICATRIZES POR CLASSE LITOLÓGICA (BACIA 20).

Sigla litológica	% do número total de cicatrizes	% da área ocupada da bacia	Concentração (número de cicatrizes por m ²)
AcMn ¹	43,24%	37,50%	0,000073
PSeMc ²	35,00%	31,94%	0,000069
PSpX ³	21,76%	30,56%	0,000045

¹AcMn - Migmatitos estromatíticos e ou ofthalmíticos de neossoma dominante, e ou nebulíticos. Passam a granitóides sintectônicos.

²PSeMc - Migmatitos estromatíticos com paleossoma dominante de biotita-muscovita-clorita xisto com ou sem sillimanita e granada.

³PSpX - Micaxistos com teores variáveis de quartzo.

TABELA 12 – ESTATÍSTICA DAS CICATRIZES POR FORMA DE VERTENTE (CETESB) (BACIA 20).

Forma de vertente	% do número total de cicatrizes	% da área ocupada da bacia	Concentração (número de cicatrizes por m ²)
Retilínea	64,12%	63,96%	0,000063
Côncava	14,71%	13,50%	0,000069
Convexa	20,88%	22,53%	0,000058

Os resultados do cruzamento das cicatrizes com o mapa litológico demonstram que não existe uma correlação direta da ocorrência de escorregamento com a classe

litológica. Teoricamente, as classes litológicas que mais favoreceriam a ocorrência de escorregamentos nas bacias seriam a PSpX e PSpF por serem formadas por micaxistos e filitos, litologias com baixos ângulos de atrito interno, no entanto são as que apresentam menores concentrações de cicatrizes. Esse resultado ocorre devido às classes se localizarem em áreas das bacias com menores declividades, sendo um indicativo da grande influência da declividade nos processos de escorregamentos na Serra do Mar.

Com relação ao resultado do mapa de formas de vertente, observa-se uma alta predominância nas duas bacias de áreas de vertentes retilíneas. A bacia 09 apresenta uma maior concentração de cicatrizes em vertentes retilíneas, seguidas por concentrações semelhantes em vertentes côncavas e convexas. A bacia 20 apresenta concentrações semelhantes para as três formas de vertente, sendo um pouco maior para as vertentes côncavas. Importante observar que a escala do mapa de formas de vertente (1:50.000) não é totalmente adequada para se analisar feições com dimensões dos escorregamentos translacionais. Desta forma, realizou-se o mapa de formas de vertente a partir do modelo digital de elevação, com detalhamento mais compatível com a análise, conforme descrito no item 4.5.

5.3 Mapa de formas de vertente (MDE)

As figuras 14 e 15 apresentam os mapas de formas de vertente, obtidos diretamente do MDE, para as bacias 09 e 20.

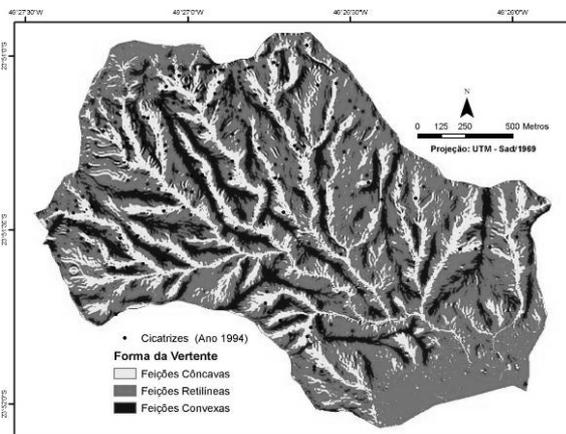


Fig. 14– Mapa de formas de vertente MDE (bacia 09).

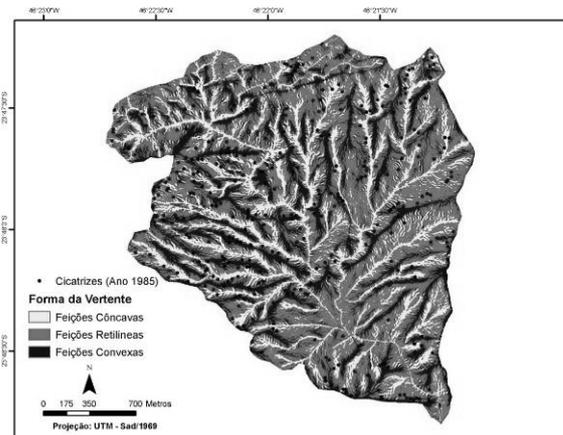


Fig. 15– Mapa de formas de vertente MDE (bacia 20).

As tabelas 13 e 14 apresentam as estatísticas das cicatrizes por forma de vertente, segundo o modelo digital de elevação (MDE) das bacias 09 e 20, respectivamente.

TABELA 13 – ESTATÍSTICA DAS CICATRIZES POR FORMA DE VERTENTE (MDE) (BACIA 09).

Forma de vertente	% do número total de cicatrizes	% da área ocupada da bacia	Concentração (número de cicatrizes por m ²)
Retilínea	63,19%	59,57%	0,000055
Côncava	17,58%	21,09%	0,000043
Convexa	19,23%	19,33%	0,000051

TABELA 14 – ESTATÍSTICA DAS CICATRIZES POR FORMA DE VERTENTE (MDE) (BACIA 20).

Forma de vertente	% do número total de cicatrizes	% da área ocupada da bacia	Concentração (número de cicatrizes por m ²)
Retilínea	63,82%	55,57%	0,000072
Côncava	12,94%	20,09%	0,000041
Convexa	23,24%	24,34%	0,000060

Observa-se uma alta predominância nas duas bacias de áreas de vertentes retilíneas. Esperava-se que em áreas de vertentes retilíneas e côncavas ocorresse uma maior concentração de cicatrizes quando comparada com as vertentes convexas, pelo motivo que as primeiras favorecem a formação de solos menos espessos, associadas a altas declividades. No entanto, essa premissa não foi confirmada nas duas bacias estudadas, sendo que ambas apresentaram menores concentrações de cicatrizes na forma de vertente côncava.

5.4 Análise multicriterial

Optou-se por não apresentar em forma de figura as análises resultantes dos pesos 50%, para declividade, 25% para formas de vertente e 25% para as litologias, pelo fato desta representar uma situação intermediária dentre os pesos comparados.

As figuras 16, 17, 18, 19, apresentam os mapas de suscetibilidade aos escorregamentos e estatísticas para

as bacias 09 e 20.

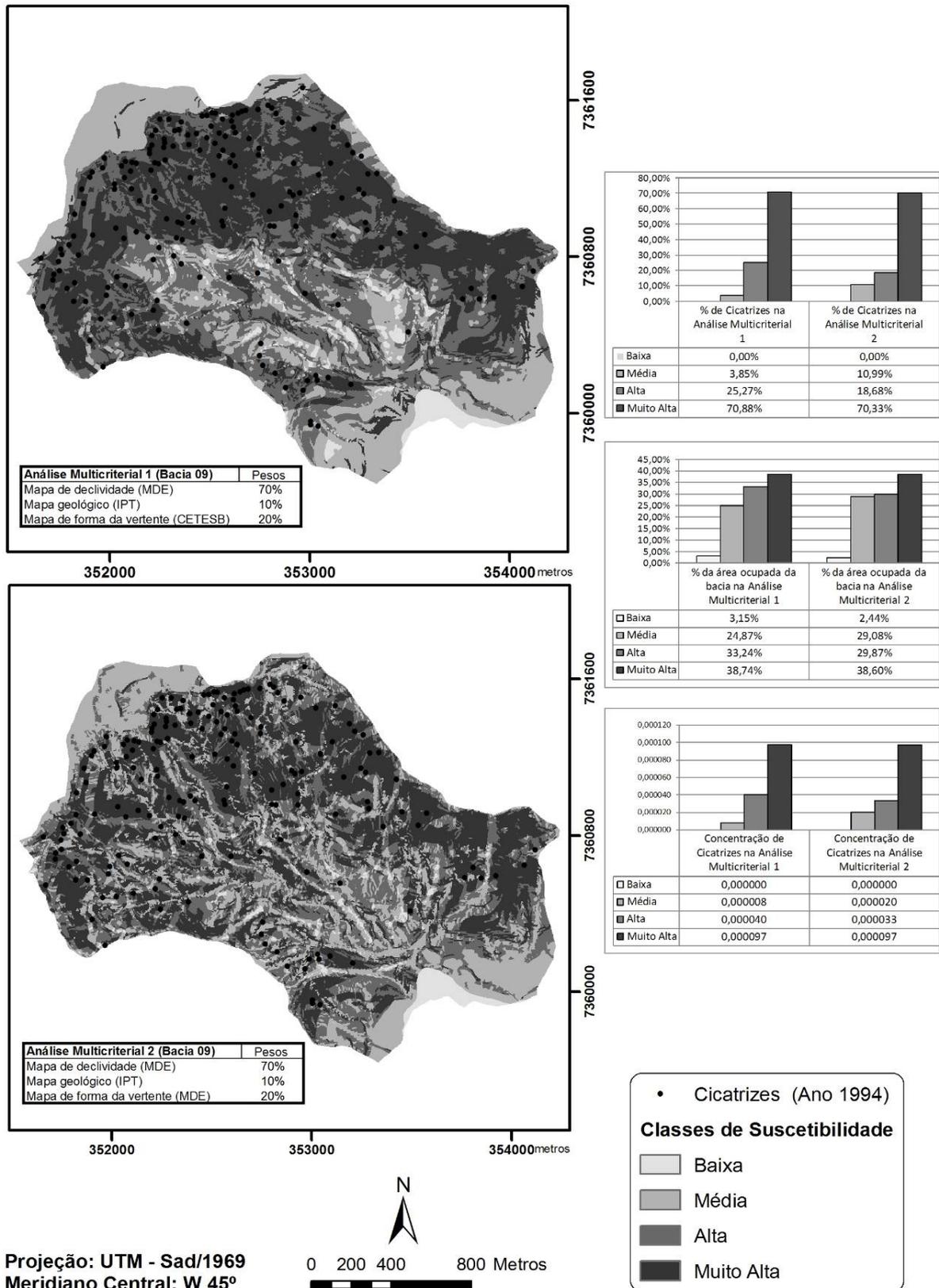


Fig. 16 - Mapas de suscetibilidade - Bacia 09 - **Análise multicriterial 1** - com mapa de forma de vertente analógico e generalizado; **Análise multicriterial 2** - com mapa de forma de vertente digital e detalhado

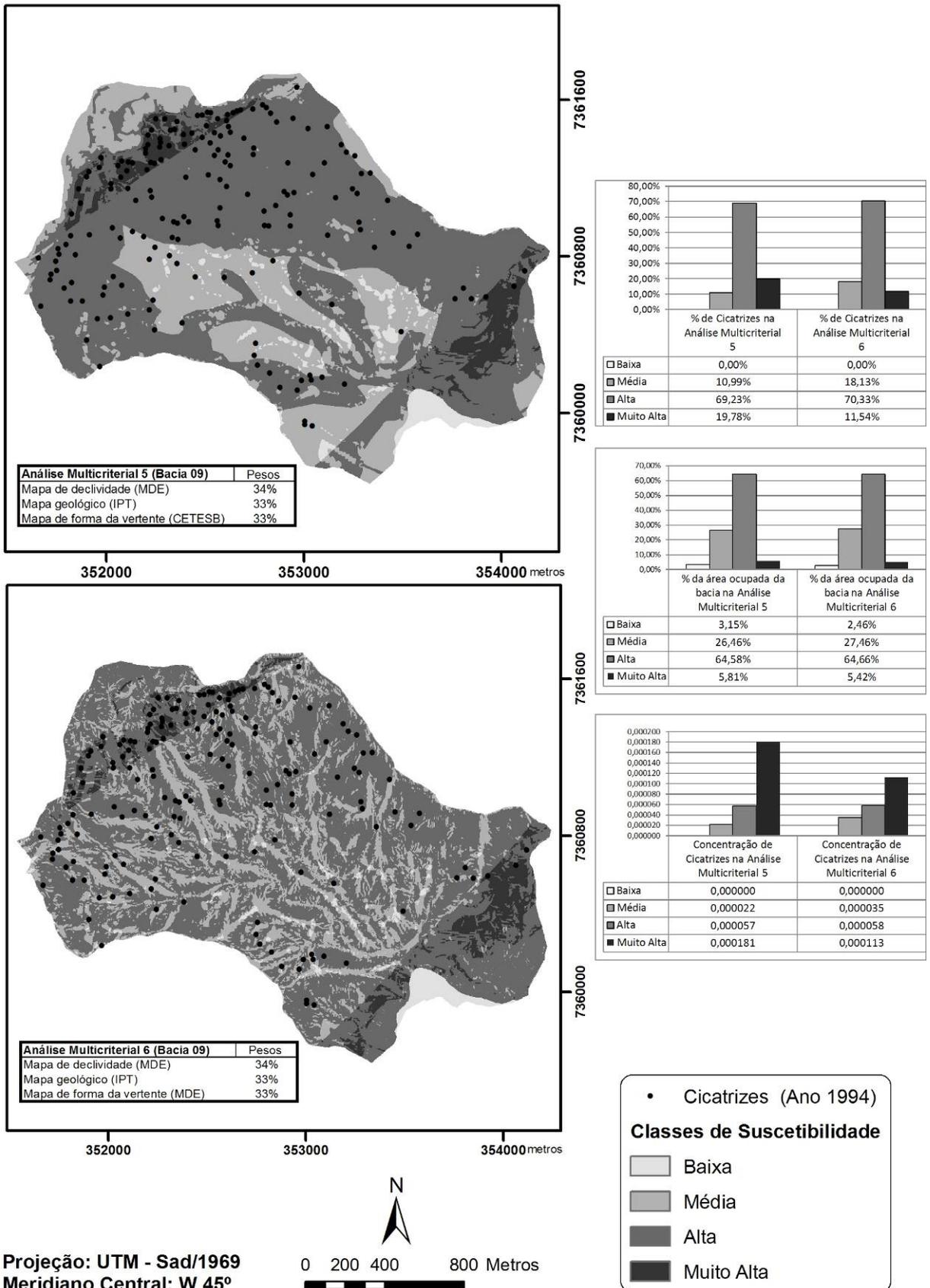


Fig. 17 - Mapas de suscetibilidade - Bacia 09 - **Análise multicriterial 5** - com mapa de forma de vertente analógico e generalizado; **Análise multicriterial 6** - com mapa de forma de vertente digital e detalhado

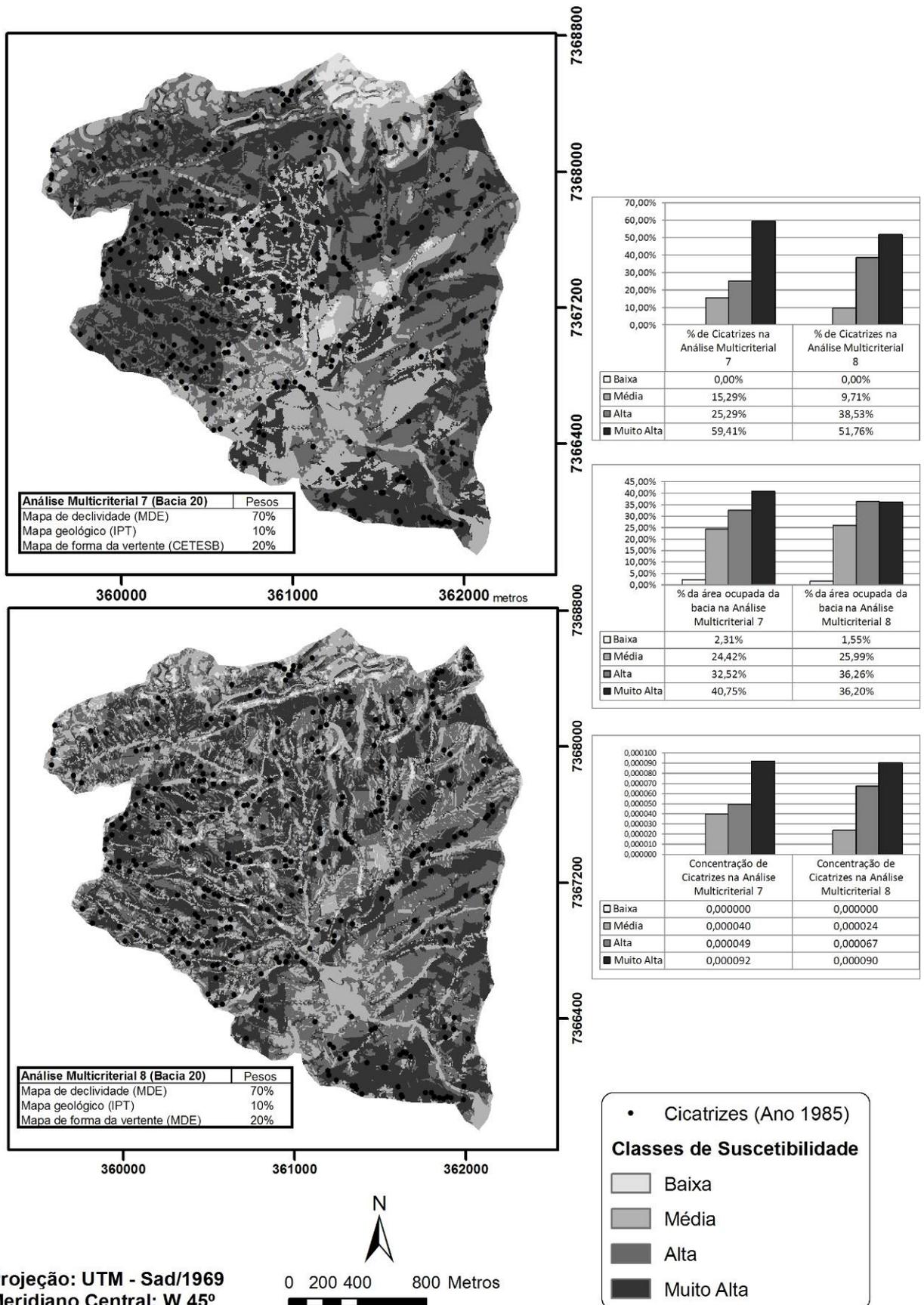


Fig. 18 - Mapas de suscetibilidade - Bacia 09 - **Análise multicriterial 7** - com mapa de forma de vertente analógico e generalizado; **Análise multicriterial 8** - com mapa de forma de vertente digital e detalhado

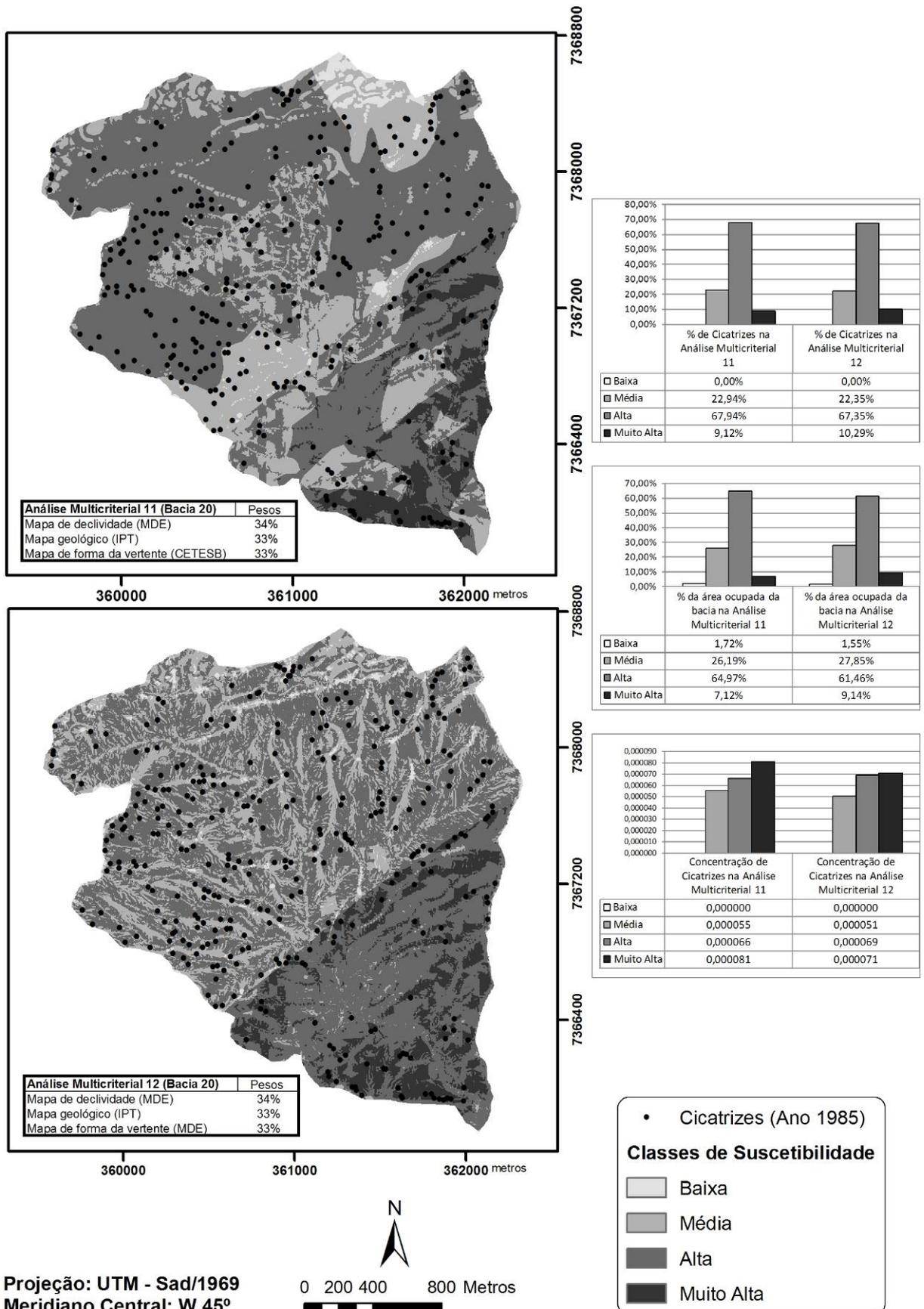


Fig. 19 - Mapas de suscetibilidade - Bacia 09 - **Análise multicriterial 11** - com mapa de forma de vertente analógico e generalizado; **Análise multicriterial 12** - com mapa de forma de vertente digital e detalhado

Observa-se em todos os resultados obtidos pela análise multicriterial, que mais de 70% da área das bacias apresentaram suscetibilidade alta e muito alta e, por se tratarem de duas bacias localizadas em áreas de alta declividade na Serra do Mar, esse resultado é bastante coerente.

De uma forma geral, os resultados dos mapas produzidos com os dados de formas de vertente interpretados visualmente (CETESB), são estatisticamente semelhantes aos produzidos de forma digital (MDE). A tabela 15, porém, mostra que numa análise pontual das cicatrizes, houve mudanças de classes das mesmas, da ordem de 35%, quando da inserção do mapa digital, fato justificado pelo maior detalhamento percebido visualmente, que possibilita um melhor posicionamento das cicatrizes em seu contexto geomorfológico.

TABELA 15 – PORCENTAGEM DE CICATRIZES QUE MUDARAM E QUE PERMANECERAM NA MESMA CLASSE DE SUSCETIBILIDADE COM A SUBSTITUIÇÃO DOS MAPAS DE FORMA DE VERTENTE.

	% de cicatrizes que permaneceram na mesma classe com a substituição dos mapas de forma de vertente	% de cicatrizes que mudaram de classe com a substituição dos mapas de forma de vertente
Análises 1 e 2	72,53%	27,47%
Análises 3 e 4	64,29%	35,71%
Análises 5 e 6	65,38%	34,62%
Análises 7 e 8	65,88%	34,12%
Análises 9 e 10	52,35%	47,65%
Análises 11 e 12	61,18%	38,82%

Com relação aos diferentes pesos utilizados entre os mapas foi observado que a redução do peso da declividade na análise reduziu a área da classe de muito alta suscetibilidade e aumentou a área de alta suscetibilidade, sendo que nos mapas de suscetibilidade produzidos com pesos iguais para todos os condicionantes, as áreas de suscetibilidade muito alta ficaram reduzidas a menos 10% da área total das bacias. A concentração de cicatrizes na classe muito alta também diminuiu com a redução do peso da declividade, entretanto continuou sendo maior em todas as análises. De forma geral, observa-se que a maior diferença entre os resultados se deu quando foram atribuídos os mesmos pesos para os três condicionantes. Os resultados obtidos com peso da declividade superior aos demais condicionantes foram semelhantes entre si. Observando todos os resultados, pode-se afirmar que os mapas produzidos com os pesos 70% para declividade, 20% para forma de vertente e 10% para as litologias foram os mais condizentes com a distribuição das cicatrizes nas bacias e com a literatura pesquisada.

6. CONCLUSÕES

A declividade é o principal condicionante para ocorrência de escorregamentos translacionais na Serra

do Mar sobrepondo-se aos condicionantes litologia e forma de vertente. Na bacia 09 ocorreu uma discordância significativa com o que é citado na literatura, pois a concentração de cicatrizes é a mesma para as classes de declividade de 30° a 45° e acima de 45°, não confirmando o que foi relatado por IPT (1987), que afirma que a ocorrência de escorregamentos na região da Serra do Mar de Cubatão diminui para intervalos de declividades superiores a 45°.

Os escorregamentos translacionais ocorrem em horizontes de solo pouco desenvolvidos, com forte influência do material parental, ou seja, da rocha. Desta forma, era de se esperar uma alta correlação entre as litologias com menor ângulo de atrito interno, como xistos e filitos, e a ocorrência do processo. No caso de Cubatão esta correlação não foi observada, talvez pelo fato destas litologias se localizarem em áreas de baixa declividade, onde os escorregamentos não se desenvolvem.

Os mapas produzidos com os pesos 70% para declividade, 20% para forma de vertente e 10% para a geologia apresentaram o maior número de cicatrizes onde era esperado, na classe de muito alta suscetibilidade, o que está em concordância com o que é relatado na literatura, que considera a declividade como o mais importante condicionante dos escorregamentos na Serra do Mar. Os resultados dos mapas produzidos com os pesos 50% para declividade, 25% para forma de vertente e 25% para geologia se assemelharam bastante aos resultados dos mapas anteriores se diferenciando por apresentarem uma área pouco menor das bacias com suscetibilidade muito alta. A maior diferença ocorreu com os mapas produzidos com pesos iguais, que resultaram uma área muito reduzida das bacias com suscetibilidade muito alta, o que não é condizente com a área de estudo e com seu histórico de ocorrências, pois se tratam de áreas consideradas como de muito alta suscetibilidade aos escorregamentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PETROBRAS, pelo apoio na realização do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGUSTO FILHO, O; VIRGILI, J.C. **Estabilidade de Taludes**. In: OLIVEIRA, A.M. dos S.; BRITO, S.B.A. de (Ed.) **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. Cap. 15, p. 244-269.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Ottawa: Pergamon, 1994. 398 p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL “(CETESB)”. **Carta morfodinâmica da Serra do Mar na região de**

Cubatão - São Paulo. São Paulo, 1991a. 36p. Relatório.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL “(CETESB)”. **Mapeamento do uso do solo, das cicatrizes de escorregamentos e caracterização preliminar da estrutura da cobertura vegetal da serra do mar, em Cubatão SP.** São Paulo, 1991b. XXXX. 85p. Relatório.

ESRI – Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS Desktop 9.2.** Redlands, California, USA, 2006.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de Escavação.** 2ª Edição. São Paulo. Edgard Blücher, 1984, 194p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) **Programa Serra do Mar: Levantamentos básicos na folhas de Santos e Riacho Grande.** São Paulo, 1986. Relatório n 23394, 5 vol.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT) **Estudos das instabilizações de encostas da Serra do Mar na região de Cubatão, objetivando a caracterização do fenômeno “Corrida de Lama” e a prevenção de seus efeitos.** São Paulo, 1987. Relatório n 25636/87.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Programa Serra do Mar: Estudo geotécnico dos principais mecanismos de instabilização na Serra do Mar.** São Paulo, 1988. Relatório n 25957.

LOPES, E.S.S.; RIEDEL, P.S.; VIDOTTI, M.; MERINO, E.R. **Análise de modelo numéricos de terreno para modelos geomorfológicos.** In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6, 2006, Goiânia. **Anais.** V.2, p.1-9.

RSI - Research Systems, Inc. **ENVI 4.1.** Pearl East Circle Boulder, USA, 2004.

SANTOS, Álvaro Rodrigues dos. **A grande Barreira da Serra do Mar: da trilha dos Tupiniquins à Rodovia dos Imigrantes,** São Paulo: O nome da Rosa, 2004.