

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

José Eduardo Bonini

Análise comparativa da capacidade preditiva entre dois modelos matemáticos para
avaliação de suscetibilidade à escorregamentos rasos: Um estudo de caso em
Itaóca (Vale do Ribeira, SP)

São Paulo

2017

JOSÉ EDUARDO BONINI

Análise comparativa da capacidade preditiva entre dois modelos matemáticos para
avaliação de suscetibilidade à escorregamentos rasos: Um estudo de caso em
Itaóca (Vale do Ribeira, SP)

Versão Corrigida

Trabalho de Graduação Individual (TGI) apresentado ao
Departamento de Geografia da Faculdade de Letras,
Filosofia e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de bacharel em Geografia.

Área de Concentração: Geomorfologia e Movimentos de
Massa

Orientadora: Prof^a Dra. Bianca Carvalho Vieira

São Paulo

2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio
convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

- B715a Bonini, José Eduardo
Análise comparativa da capacidade preditiva entre dois modelos matemáticos para avaliação de suscetibilidade à escorregamentos rasos: Um estudo de caso em Itaóca (Vale do Ribeira, SP) / José Eduardo Bonini ; orientadora Bianca Carvalho Vieira. - São Paulo, 2017.
78 f.
- TGI (Trabalho de Graduação Individual) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. Área de concentração: Geografia Física.
1. Escorregamentos rasos. 2. SHALSTAB. 3. Valor informativo. 4. Vale do Ribeira. 5. Itaóca. I. Vieira, Bianca Carvalho, orient. II. Título.

Resumo

Os movimentos de massa são processos naturais que configuram um risco para a populações que ocupem áreas em que estes fenômenos são recorrentes. A redução deste risco é papel do Estado, conforme a legislação brasileira, sendo que uma das formas de reduzi-lo é por meio de trabalhos que sejam capazes de identificar áreas potencialmente instáveis e suscetíveis aos processos. No caso dos escorregamentos rasos, temos métodos quantitativos disponíveis, como modelos matemáticos e estatísticos. O objetivo deste trabalho foi comparar a capacidade preditiva de dois modelos em diferentes resoluções: o Valor Informativo, estatístico; e o modelo SHALSTAB, de bases físicas. Os Modelos Digitais de Terreno (MDTs) necessários foram gerados a partir de dados topográficos em escala 1:10.000 com resoluções de 5m, 10m e 20m. Foi feita uma avaliação de suscetibilidade inicial em resolução de 10m, utilizando diferentes parâmetros morfológicos e o inventário de cicatrizes dos eventos de 2014 em Itaóca (SP) para produzir índices de Frequência (F) e Concentração de Cicatrizes (CC). Para executar o modelo SHALSTAB nas três resoluções foram introduzidos dados geotécnicos e hidrológicos extraídos da literatura disponível para áreas com características similares. No modelo do Valor Informativo foram usados seis parâmetros morfológicos, submetidos a uma análise sensitiva. A comparação entre os dois modelos foi feita por meio de índices produzidos durante a validação destes por meio da técnica da matriz de contingência. Em geral, os cenários dos modelos que utilizaram dados com tamanho de pixel igual a 20m apresentaram melhor performance. O modelo do Valor Informativo em resolução de 20m apresentou os melhores resultados quando confrontado com o SHALSTAB nas três resoluções trabalhadas. O modelo SHALSTAB apresentou uma superestimação de áreas instáveis muito maior que o do Valor Informativo, o que fica evidente na validação pela Matriz de Contingência.

Palavras-chave: Escorregamentos rasos; SHALSTAB; Valor Informativo; Vale do Ribeira; Itaóca.

Abstract

Mass movements are natural processes that represents a risk for the population who lives in areas where these processes are frequent. Reduce this risk is a duty of the State, according with the brazilian law, and one of the ways to reduce it are the application of mehtods that identify areas that can be unstable or susceptible to the processes. For the study of the shallow landslides, there are many quantitative methods such as mathematical and statiscal models This research aimed to compare the predictive capability of two diferent models in three diferent resolutions: the Informative Value Model, a statistical approach; and the SHALSTAB model, a physically based approach. The Digital Elevation Models (DEM) were derived from topographic data in 1:10.000 scale and with 5m, 10m and 20m resolution. A initial susceptibility assessment was performed using the 10m resolution, deriving from the DEM different morphological parameters and producing, with the landslide scars inventory for the 2014 events in Itaóca (São Paulo, Brazil), Frequency and Scar Concentrations indexes. For the SHALSTAB model, the necessary data were extracted from previous works in areas with similar characteristic, due to a lack of geotechnical and hidrological data specific for the study area. For the Informative Model, we used different morphological parameters derived from the DEMs in all three resolutions. The comparison between the models performance were made using indexes generated during the validation of the model through the contingency matrix. In general, the models scenarios that used data with 20m pixel size presented best performance. The Informative Value model in the 20m resolution presented a more accurate result than SHALSTAB in the three reolutions. The SHALSTAB model displayed a much more significant superestimation of unstable areas than the Informative Value Model, which becomes clear with the contingency matrix validation.

Keywords: *Shallow landslides; SHALSTAB; Informative Value; Vale do Ribeira; Itaóca.*

Lista de Figuras

Figura 1: Perfil esquemático de escorregamento translacional raso..	13
Figura 2: Perfil esquemático de um corrida de detritos.....	14
Figura 3: Fluxograma de procedimentos para geração dos mapas de suscetibilidade a escorregamentos rasos com o Modelo SHALSTAB, em sua versão do SAGA GIS.....	20
Figura 4: Mapa inventário de cicatrizes de Carou et al. (2017)	21
Figura 5: Módulo Flow Accumulation (Recursive) do SAGA GIS.....	24
Figura 6: Matriz de contingência e equações para cálculo dos índices de validação.	27
Figura 7: Fluxograma de procedimentos para geração dos mapas de suscetibilidade a escorregamentos rasos com o Modelo Valor Informativo.....	30
Figura 8: Mapa de localização da bacia do rio Gurutuba no Estado de São Paulo.	32
Figura 9: Áreas do município de Itaóca afetadas pelo evento de 2014..	33
Figura 10: Índices F e CC para o parâmetro morfológico Hipsometria.	35
Figura 11: Mapa hipsométrico da bacia do rio Alto Gurutuba, Itaóca (SP).....	36
Figura 12: Índices F e CC para o parâmetro morfológico de aspecto das encostas.....	37
Figura 13: Mapa de aspecto das encostas da bacia do rio Alto Gurutuba, Itaóca (SP).	38
Figura 14: Índices de F e CC para o parâmetro morfológico de ângulo de inclinação das encostas.....	39
Figura 15: Mapa de ângulo de inclinação das encostas da bacia do rio Alto Gurutuba, Itaóca (SP).....	40
Figura 16: Índices F e CC para o parâmetro morfológico de curvatura das encostas	41
Figura 17: Mapa de curvatura das encostas (Planta e Perfil) para a bacia do rio Alto Gurutuba, Itaóca (SP).....	42
Figura 18: Índices F e CC para o parâmetro morfológico de Áreas Contributivas.....	43
Figura 19: Mapa de Áreas Contributivas da bacia do rio Alto Gurutuba, Itaóca (SP).	44
Figura 20: Mapas de suscetibilidade a escorregamentos rasos gerados com SHALSTAB..	46
Figura 21: Curvas ROC para cada um dos seis cenários do modelo SHALSTAB.....	47
Figura 22: Gráficos das análises sensíveis dos parâmetros morfológicos nas três resoluções para o Valor Informativo.	49
Figura 23: Mapas de suscetibilidade a escorregamentos rasos gerados pela metodologia do Valor Informativo.....	52
Figura 24: Curvas ROC para cada os seis cenários selecionados do Valor Informativo, nos Grupos de Modelagem e de Validação. No eixo das abcissas temos a taxa de falsos positivos e, no eixo das ordenadas, a taxa de verdadeiros positivos.....	54
Figura 25: Curvas ROC para os cenários selecionados dos dois modelos. No eixo das abcissas temos a taxa de falsos positivos e, no eixo das ordenadas, a taxa de verdadeiros positivos	55
Figura 26: Gráficos de F e CC para os cenários selecionados para comparação. (A) Índices de F e CC para o cenário 01 do SHALSTAB (resolução de 5m); (B) cenário 01 do SHALSTAB (resolução de 20m); (C) cenário 02 (resolução de 5m) do Valor Informativo; (D) cenário 01 (resolução de 20m) do Valor Informativo; e (E) cenário 02 (resolução de 20m) do Valor Informativo.	56

Lista de Tabelas

Tabela 1: Propriedades geotécnicas e hidrológicas de rochas graníticas, granodioríticas e gnáissicas de diferentes locais do mundo.....	27
Tabela 2 – Valores dos parâmetros geotécnicos e hidrológicos obtidos pela calibração e utilizados nas modelagens finais com o modelo SHALSTAB.....	27
Tabela 3 – Índices de validação pela matriz de contingência para os seis cenários do modelo SHALSTAB.....	48
Tabela 4: Valores da análise sensitiva de cada um dos parâmetros morfológicos em três diferentes resoluções.....	49
Tabela 5 – Modelagens com o Valor Informativo e suas respectivas taxas de sucesso em três resoluções distintas.....	51
Tabela 6 - Índices de validação pela matriz de contingência para os seis cenários selecionados do Valor Informativo.....	54
Tabela 7 – Índices de validação pela matriz de contingência para os melhores cenários modelados com cada um dos dois modelos aplicados.....	56

Lista de Abreviações

AAC: Área Abaixo da Curva

ACC: Acurácia

CC: Índice de Concentração de Cicatrizes

F: Índice de Frequência

FPR: Taxa de Falsos Positivos (*False Positive Rates*)

IGC: Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo

MFD: Algoritmo *Multiple Flow Direction*

MDT: Modelo Digital de Terreno

ROC: *Receiver Operating Characteristics*

SAGA GIS: Sistema de Informações Geográficas *System for Automated Geoscientific Analyses*

TPR: Taxa de Verdadeiros Positivos (*True Positive Rates*)

Agradecimentos

Inicialmente, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que financiou a pesquisa de iniciação científica e estágio no exterior.

A minha orientadora, Prof^a Dra. Bianca Carvalho Vieira, que me guiou durante todo este trabalho. Também agradeço ao Prof^o Dr. Carlos Valdir de Meneses Bateira e aos outros pesquisadores do Laboratório de Geografia Física da Universidade do Porto que, além da boa recepção, ensinaram-me muito. Agradeço também a todos os amigos do Grupo de Pesquisa de Processos Morfodinâmicos da Universidade de São Paulo (GPmorfo), por toda a ajuda em campo e fora dele, essenciais para a execução desta pesquisa.

Agradeço principalmente a minha mãe, Jenny, que, além de sempre me incentivar a estudar, proveu as condições para que isso fosse possível. Também meus irmãos e a João, que me apoiaram em todas as situações.

Sumário

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO	10
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
2.1 Movimentos de massa: conceituação e classificação	12
2.2 Modelos de previsão de escorregamentos.....	15
2.2.2 SHALSTAB.....	15
2.2.3 Valor Informativo.....	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1 Inventário de cicatrizes e Análise Morfométrica	20
3.2 Aplicação do modelo SHALSTAB	22
3.3 Validação do Modelo SHALSTAB.....	27
3.4 Valor Informativo	28
3.4 Comparação SHALSTAB x Valor Informativo	31
4. ÁREA DE ESTUDO	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Análise morfométrica: escorregamentos rasos e parâmetros morfológicos	35
4.2 SHALSTAB	45
4.3 Valor Informativo	48
4.4 Comparação SHALSTAB x Valor Informativo	54
Considerações Finais.....	58
Referências	59
Apêndice A – Mapas dos parâmetros morfológicos empregados na modelagem do Valor Informativo nas três resoluções	65
Apêndice B – Cálculos do Valor Informativo para os parâmetros morfológicos nas três resoluções empregadas.....	68
Apêndice C – Mapas de Valor Informativo não classificados.....	71
Apêndice D – Gráficos das Curvas de Sucesso dos seis cenários de Valor Informativo, com as quebras na geometria da curva destacadas.....	72

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Movimentos gravitacionais de massa são processos naturais que podem atingir grandes magnitudes, muitas vezes causando sérios danos econômicos e humanos. O desastre de 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro constitui um exemplo do risco a que estão expostas as populações que habitam áreas suscetíveis aos movimentos de massa. A Lei Federal nº 12.608 de 10 de Abril de 2012 dispõe que é dever dos Estados, União e Municípios adotar medidas para redução de risco de desastres como estes.

Utilizar métodos para identificar áreas de risco é uma forma de trabalhar no sentido da redução de riscos relacionados aos movimentos de massa. Há diversos métodos, sendo que os modelos de análise estatística e matemática estão entre os mais objetivos.

Os modelos estatísticos aplicados às avaliações de suscetibilidade têm como premissa básica a ideia de que futuros movimentos de massa irão ocorrer, mais provavelmente, em condições similares aquelas que condicionaram os movimentos que já ocorreram: portanto, é necessário um conhecimento aprofundado do funcionamento dos processos em questão para que um modelo estatístico seja aplicado, pois está implícito que os fatores condicionantes e deflagradores dos fenômenos sejam conhecidos (CARRARA *et al.*, 1991; ZÊZERE *et al.*, 1999; FRATTINI *et al.*, 2010). Dessa forma, os modelos estatísticos são amplamente utilizados para estabelecer relações funcionais entre processos geomorfológicos e fatores ligados a eles, de maneira direta ou indireta (JADE e SARKAR, 1993).

Tais ferramentas podem ser classificadas como uma forma quantitativa e objetiva de se avaliar a suscetibilidade das encostas aos movimentos de massa, sendo que a validação destas previsões também pode ser feita por vias estatísticas, como veremos mais adiante. Zêzere *et al.* (1999) apontam que análises estatísticas descritivas da suscetibilidade a movimentos de massa podem deter-se sobre os fatores condicionantes, que são, em determinada escala temporal, constantes no tempo, e os fatores deflagradores. Podemos listar as características do terreno (sua geologia e características morfométricas), bem como processos geomorfológicos, físicos e humanos atuantes nas encostas como fatores condicionantes – estes últimos

são apontados pelos autores também como fatores deflagradores, dependendo da intensidade e duração que assumam.

A escolha destes fatores considerados como condicionantes dos movimentos é uma etapa crucial da modelagem estatística, pois é nela que será definido qual o conjunto de parâmetros relevante no condicionamento dos processos. Não se trata de uma tarefa simples, pois a complexidade dos sistemas naturais pode confundir o julgamento dos investigadores, sendo que é aqui que o conhecimento acerca do processo e a experiência do operador do modelo é posta à prova (FRATTINI *et al.*, 2010).

Os modelos matemáticos em bases físicas, por sua vez, representam fisicamente o fenômeno por meio de equações, o que os torna menos dependentes de julgamentos do operador (HAGGET e CHORLEY, 1967).

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de dois modelos: um estatístico (Valor Informativo) e outro determinístico em bases físicas (SHALSTAB), ambos para avaliação de suscetibilidade a escorregamentos rasos em escala de bacia hidrográfica, utilizando três resoluções distintas de Modelos Digitais de Terreno (MDT)

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Movimentos de massa: conceituação e classificação

A classificação dos diferentes tipos de movimentos de massa segue, usualmente, critérios referentes ao plano de ruptura e ao tipo de material envolvido no movimento. Existe uma grande quantidade de classificações diferentes, o que, muitas vezes, gera confusões e ambiguidades na terminologia já que as diferentes classificações são pensadas para profissionais e objetivos distintos (CROZIER, 1986).

De acordo com Bierman e Montgomery (2014), os movimentos de massa podem ser inicialmente subdivididos em três grandes grupos: escorregamentos, corridas e quedas. Nesta seção, destacaremos apenas os escorregamentos rasos e as corridas de detritos (*debris flow*).

Ainda de acordo com Bierman e Montgomery (2014), os escorregamentos podem ser classificados de acordo com seu plano de ruptura como rasos (translacionais) ou profundos (rotacionais). Os escorregamentos rasos podem ser definidos como movimentos de massa rápidos condicionados por uma descontinuidade planar do substrato e regidos pela gravidade, sendo que a água não desempenha um papel de transporte; os escorregamentos rasos são desencadeados quando as forças que resistem à movimentação são superadas pelas forças cisalhantes, sendo um exemplo a perda da coesão por saturação em água. As cicatrizes resultantes do processo assumem formas alongadas e bem definidas (SELBY, 1983; CROZIER, 1986; SUMMERFIELD, 1991; GUIDICINI e NIEBLE, 1983; BIERMAN e MONTGOMERY, 2014).

Ainda a respeito da deflagração destes movimentos, Selby (1983) ressalta que sua ocorrência está associada, quase sempre, a fortes precipitações capazes de fazer com que o nível do lençol suba até as proximidades da superfície do solo por tempo suficiente para gerar um aumento da poro-pressão da água e a consequente ruptura da encosta ao longo de uma descontinuidade de resistência, conforme exemplifica o esquema apresentado na Figura 1

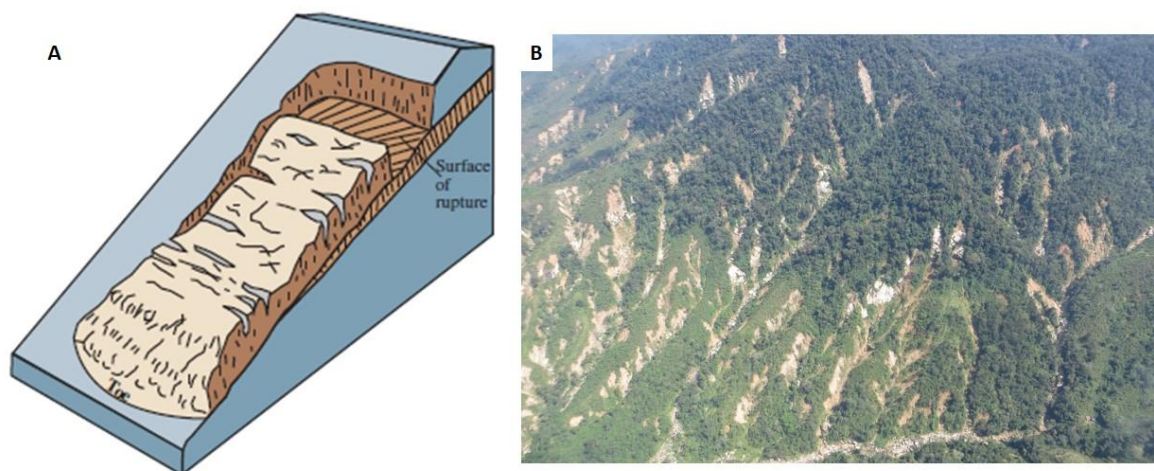


Figura 1: Perfil esquemático de escorregamento translacional raso. (A) No perfil, note a superfície de ruptura bem definida e a extrusão da massa deslizada, que ocorre devido a existência de um obstáculo na superfície. (B) Foto aérea da bacia do rio Gurutuba (Itaóca-SP) em 2014, após a deflagração de diversos escorregamentos rasos, cujas cicatrizes possuem cor mais clara na imagem. Fonte: USGS, 2014; GPMorfo.

Corridas de detritos (*debris flow*) são definidas por Dias (2017), utilizando as classificações de Costa (1984), Hungr *et al.* (2001) e Takahashi (2007), como um “fluido visco-plástico (não newtoniano) saturado, composto por materiais detríticos (materiais finos a grosseiros, matéria orgânica, etc.), de elevada densidade, força e velocidade, ocorrendo em canais pré-estabelecidos ou em encostas” (p.8).

As corridas de detritos possuem, conforme destaca Dias (2017), se embasando em Augusto Filho (1993) e Takahashi (2007), três mecanismos deflagradores principais: a) a partir da erosão de depósitos no leito do rio; b) a partir de um escorregamento nas encostas, cujo material torna-se uma corrida de detritos pelo acúmulo de água; e c) a partir do colapso de barreiras de detritos na drenagem devido a fortes precipitações. As corridas de detritos que ocorrem nas escarpas da Serra do Mar são deflagradas, principalmente, pelo aporte de sedimentos realizado pelos escorregamentos nas encostas associados à fortes precipitações (DIAS, 2017). Na Figura 2A, temos uma representação idealizada de uma corrida de detritos, destacando a canalização do fluxo, o que também se torna evidente na Figura 2B. Na Figura 2C é possível notar a grande diversidade de materiais carregados pelas corridas de detritos.

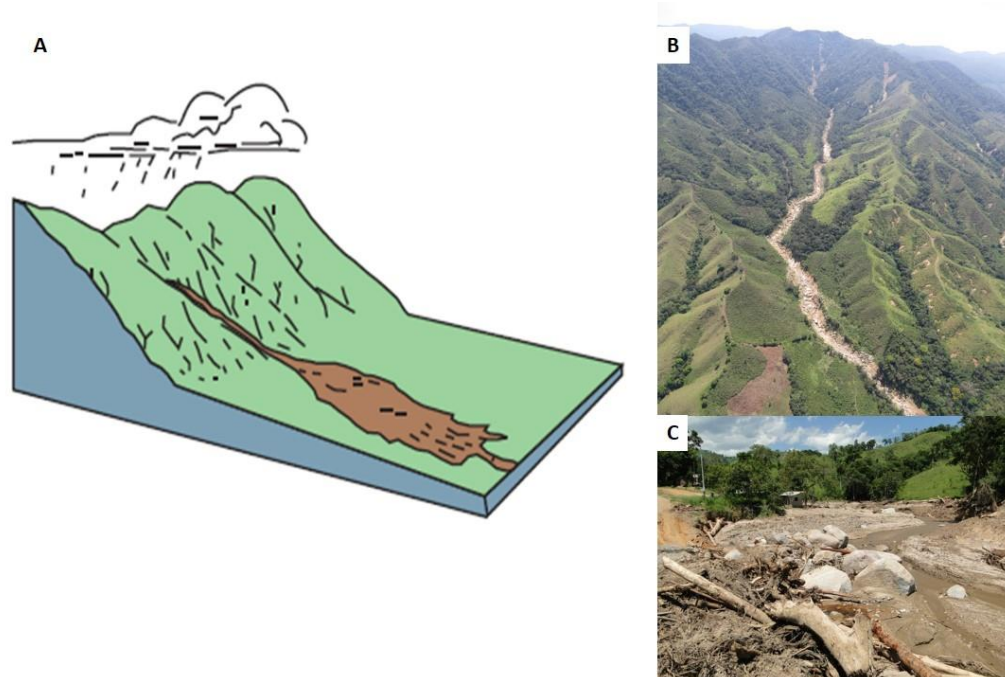


Figura 2: Perfil esquemático de um corrida de detritos (A). (B) Imagem aérea da bacia do rio Guarda-Mão, em Itaóca, após uma corrida de detritos. (C) Depósitos da corrida de detritos do rio Guarda-Mão, em 2014,, havendo blocos de grandes dimensões, sedimentos de granulometrias diversas e materiais orgânicos, como troncos de árvores. Fonte: USGS, 2014; GPmorfo.

Embora cada bacia hidrográfica possua um conjunto de atributos, relações e arranjos entre suas variáveis que lhe são únicos, é possível apontar alguns parâmetros comuns entre elas que contribuem para maior ou menor suscetibilidade a determinado processo (MONTGOMERY *et. al.*, 1998). No caso dos escorregamentos rasos, podemos destacar as declividades mais acentuadas como mais propícias para sua ocorrência, desde que exista material disponível para ser mobilizado; também, os movimentos tendem a ocorrer mais nas porções côncavas do relevo, pois estas concentram os fluxos de subsuperfície e, logo, necessitam de uma menor quantidade de precipitação para alcançar o nível de saturação necessário para deflagrar o processo (SELBY, 1983; MONTGOMERY e DIETRICH, 1994). Intervenções humanas, como cortes de estradas e ruas, podem aumentar a suscetibilidade de uma encosta a escorregamentos rasos, sendo exemplo disso os eventos de 1966 e 1967 no Rio de Janeiro, grande parte deflagrada nas margens de estradas e ruas (MEIS e SILVA, 1968).

Há ainda os eventos de Caraguatatuba em 1967, o da Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011, e o de Itaóca em 2014, todos deflagrados após eventos de

precipitação extremos e de curta duração, que foram precedidos por um período longo de chuvas (BIGARELLA, 1994; DE PLOEY e CRUZ, 1979; COELHO NETTO *et al.*, 2011). Em todos estes eventos, o aporte de material proveniente dos escorregamentos, aliado à precipitação, deflagrou corridas de detritos, sendo estes exemplos da ocorrência conjunta destes fenômenos.

2.2 Modelos de previsão de escorregamentos

Os modelos são estruturas simplificadas do funcionamento de um aspecto do mundo real, sendo uma aproximação reduzida do fenômeno. Não se trata da realidade em si, mas de uma representação de aspectos fundamentais de um fenômeno que ocorre na realidade. Quanto mais variáveis o modelo possuir menos funcional ele é, o que leva os modelos a serem construídos, inicialmente, de maneira mais simples. Os modelos caracterizam-se por sua seletividade, estruturação, reaplicabilidade e simplicidade (HAGGET e CHORLEY, 1967; HARVEY, 1967; VIEIRA e MARTINS, 2016).

No caso da avaliação da suscetibilidade a escorregamentos rasos podemos distinguir, principalmente, modelos estocásticos e modelos matemáticos em bases físicas. Nos primeiros, são estabelecidas correlações entre a ocorrência dos processos e condicionantes julgadas relevantes (ângulo de inclinação das encostas, cobertura vegetal, uso do solo etc.), estando os valores numéricos associados a uma probabilidade de ocorrência (CARRARA *et. al.*, 1991, CROSTA e FRATTINI, 2003). Os modelos matemáticos em bases físicas, por sua vez, representam fisicamente o fenômeno por meio de equações, o que os torna menos dependentes de julgamentos do operador.

2.2.2 SHALSTAB

O modelo matemático SHALSTAB (*Shallow Slope Stability Model*) foi desenvolvido nos Estados Unidos na década de 1990, apresentado nos trabalhos de Montgomery e Dietrich (1994) e Dietrich e Montgomery (1998), sendo pensado para aplicação em escala de bacia hidrográfica. Estes autores apontam que, enquanto as especificidades locais certamente influenciam a ocorrência e magnitude dos escorregamentos rasos, é a topografia o fator controlador dominante, na medida em que é ela que define os ângulos de inclinação e as zonas de convergência dos fluxos de superfície e subsuperfície.

A estrutura do modelo proposto é composta de duas partes: um modelo de estabilidade, baseado na equação de Mohr-Coulumb numa estrutura de talude infinito para ignorar os efeitos de borda, combinado com um modelo hidrológico (TOPOG – Equação 1), que utiliza índices de chuva constantes para prever zonas de saturação no terreno (O’LOUGHLIN, 1986).

$$W = \frac{qa}{bT\text{sen}\theta} \quad (1)$$

Aqui, q é a taxa de precipitação; a é a área de contribuição; b é o comprimento do limite inferior de cada a ; T é a transmissividade do solo saturado; e θ é o ângulo de inclinação da encosta.

O TOPOG calcula um índice de umidade que é a razão do fluxo de água local para determinado valor de precipitação, considerando-se a inclinação local e transmissividade do solo saturado. Quando o valor de W ultrapassa 1, o solo encontra-se saturado e inicia-se um fluxo superficial. A fusão do modelo de O’Loughlin (1986) com o modelo de estabilidade, após ser submetida às operações descritas por Montgomery e Dietrich (1994), nos encaminha à equação abaixo (Equação 2). Os resultados são expressos em logaritmo, devido aos baixos valores resultantes.

$$\log \frac{Q}{T} = \left(\frac{\text{sen } \theta}{a/b} \left(\frac{C'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{p_s}{p_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right) \right) \quad (2)$$

Onde “ Q ” é chuva crítica necessária para a ruptura [mm]; “ T ” é a transmissividade do solo [m²/dia]; “ a ” é a área de contribuição [m²]; “ b ” é o comprimento do contorno da célula [m]; “ c ” é a coesão do solo [Pa]; “ θ ” é o ângulo da encosta [°]; “ ρ_w ” é a densidade da água [kN/m³]; “ p_s ” densidade do solo [kN/m³]; “ g ” é a gravidade [m/s²]; “ z ” é a espessura do solo e “ ϕ ” é o ângulo de atrito interno [°].

Montgomery e Dietrich (1994) definiram quatro classes de estabilidade para tratar os resultados do modelo: **Incondicionalmente Instável** (porções instáveis mesmo secas); **Instáveis**; **Estáveis** (área de contribuição pequena demais para desencadear o processo); e **Incondicionalmente Estável** (mesmo saturadas continuam estáveis). Uma porção é incondicionalmente instável quando a relação abaixo encontra-se satisfeita:

$$\tan \theta > \tan \phi \quad (3)$$

E incondicionalmente estável quando:

$$\theta \leq \tan \phi \left[1 - \left(\frac{p_w}{p_s} \right) \right] \quad (4)$$

As simplificações assumidas pelo modelo matemático SHALSTAB, de acordo com Montgomery e Dietrich (1994), são:

- a. O fluxo de subsuperfície deve ser proporcional à taxa de recarga de umidade e a área de contribuição encosta acima, com a recarga sendo espacialmente uniforme;
- b. Nível de água e o fluxo de subsuperfície são paralelos à superfície da encosta local;
- c. O índice de umidade (W) não pode exceder 1 no modelo hidrológico, o que implica em ignorar os fluxos hortonianos e considerar apenas os de subsuperfície;
- d. A condutividade hidráulica do solo saturado deve ser uniforme conforme aumenta a profundidade do solo.
- e. A espessura do solo é interpretada de forma perpendicular à encosta.

O modelo é simples, indicando não a frequência de iniciação de escorregamentos, mas um índice de estabilidade relativa, expresso na quantidade da chuva crítica. As porções menos estáveis também configuram as áreas de iniciação das corridas de detritos, sendo que áreas com um mesmo índice de chuva crítica podem ser apontadas como possuindo o mesmo tipo de controle topográfico (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994).

Os parâmetros topográficos como área de contribuição e inclinação das encostas podem ser derivados de Modelos Digitais de Terreno (MDTs), que devem possuir alta resolução para não gerar distorções nos produtos resultantes da aplicação do modelo, superestimando as áreas estáveis e/ou instáveis (DIETRICH e MONTGOMERY, 1998).

Outra das dificuldades é a disponibilidade de dados hidrológicos, geotécnicos e pedológicos, que varia muito de uma para outra região. É possível superar isto utilizando valores calculados para áreas com características geológicas, climáticas e geomorfológicas similares a da área de estudo. Para isso, é preciso testar os valores em busca de um conjunto que resulte em uma análise de suscetibilidade que se adeque ao inventário de cicatrizes da área,

Apesar disso, o modelo SHALSTAB é relativamente menos limitado em relação a outros modelos matemáticos em bases físicas para previsão de escorregamentos rasos, detentores de uma estrutura mais complexa e que demandam, portanto, um maior *input* de dados. Há autores que ressaltam a utilidade do SHALSTAB para uma análise inicial da área de estudo para, depois, refinar as análises com outros modelos (SORBINO et. al, 2010).

Dito isto, temos como exemplos de aplicação do modelo SHALSTAB os trabalhos de Meisina e Scarabelli (2007), na Itália, e aqueles realizados na região Norte de Portugal por Teixeira et al. (2015), Faria et al. (2016). Como exemplo de aplicações bem sucedidas no Brasil, podemos citar os estudos realizados para bacias no Rio de Janeiro (FERNANDES et. al., 2004; VIEIRA, 2007; GOMES et. al., 2008) e São Paulo-SP (LISTO e VIEIRA, 2012). Nota-se uma ausência de trabalhos deste tipo para o Vale do Ribeira.

2.2.3 Valor Informativo

Destacamos o método do Valor Informativo (*Information Value*), proposto por Yin e Yan (1988), que foi sido aplicado em regiões de Portugal (ZÊZERE et al, 1997), Índia (JADE e SARKAR, 1993) entre outros, com bons resultados. Um método estatístico bivariado, o valor informativo visa apontar quais são as áreas mais suscetíveis à ocorrência dos escorregamentos rasos. Para isso, uma área é dividida em determinado número de polígonos que representam uma encosta uniforme, delimitada por limites naturais. Determinado elemento j ($j = 1, [...], N$) será classificado como instável ou estável com base no seu valor informativo, que se for positivo será classificado como instável e negativo caso estável (JADE e SARKAR, 1993; ZÊZERE, 1997). O cálculo do valor informativo total de um elemento j é representado nas equações (5) e (6).

$$L_j = \sum_{i=1}^M X_{ji} I_i \quad (5)$$

Na qual X_{ji} é o valor da variável i ($j = 1, [...], N$ e $i = 1, [...], M$), sendo que X_{ji} é igual a 1 se a variável i existe em determinado elemento j , e igual a 0 se a variável i inexistente em determinado elemento j ; M é o número de variáveis associados em dada área; L_i corresponde ao valor informativo atribuído a cada movimento pela variável i , definida na equação (7).

$$i = \log \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (6)$$

Sendo N o número total de elementos; S o número total de elementos com cicatrizes; S_i o número total de elementos com cicatrizes e que apresentam a variável i ; e N_i o número total de elementos que apresentam a variável i .

Em suma, os valores de i são considerados como significativos no condicionamento dos processos analisados quando possuem valores positivos, indicando uma relação entre os processos e a variável mais intensa quanto mais alto for este valor. Inversamente, valores negativos representam que a variável não determina a ocorrência dos processos (PEREIRA, 2009).

As principais limitações dos métodos estatísticos, incluso nisto o Valor Informativo, de acordo com (VAN WESTEN *et al*, 2003; PEREIRA, 2009), são:

- a) Uma simplificação dos fatores condicionantes, já que serão geralmente usadas informações que estejam mais facilmente disponíveis;
- b) Os fatores selecionados podem não ser (e geralmente não são) independentes entre si;
- c) A simplificação fundamental de que os movimentos de massa futuros tenderão a ocorrer nas mesmas condições que os movimentos pretéritos;
- d) A necessidade de utilização de mapeamentos executados em escalas de detalhe, nem sempre disponíveis.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar a comparação que está na proposta no objetivo deste trabalho, devemos, antes, compreender a escala e os mecanismos de funcionamento do processo geomorfológico estudado, pois ele é essencial para que possamos identificar as potencialidades e limitações dos modelos de avaliação de suscetibilidade SHALSTAB e Valor Informativo. Após esta etapa teórica e conceitual da pesquisa, segue-se a aplicação de ambos os modelos em nossa área de estudo, utilizando o *software* livre SAGA GIS (*System for Automated Geoscientific Analyses*) (Figura 3)

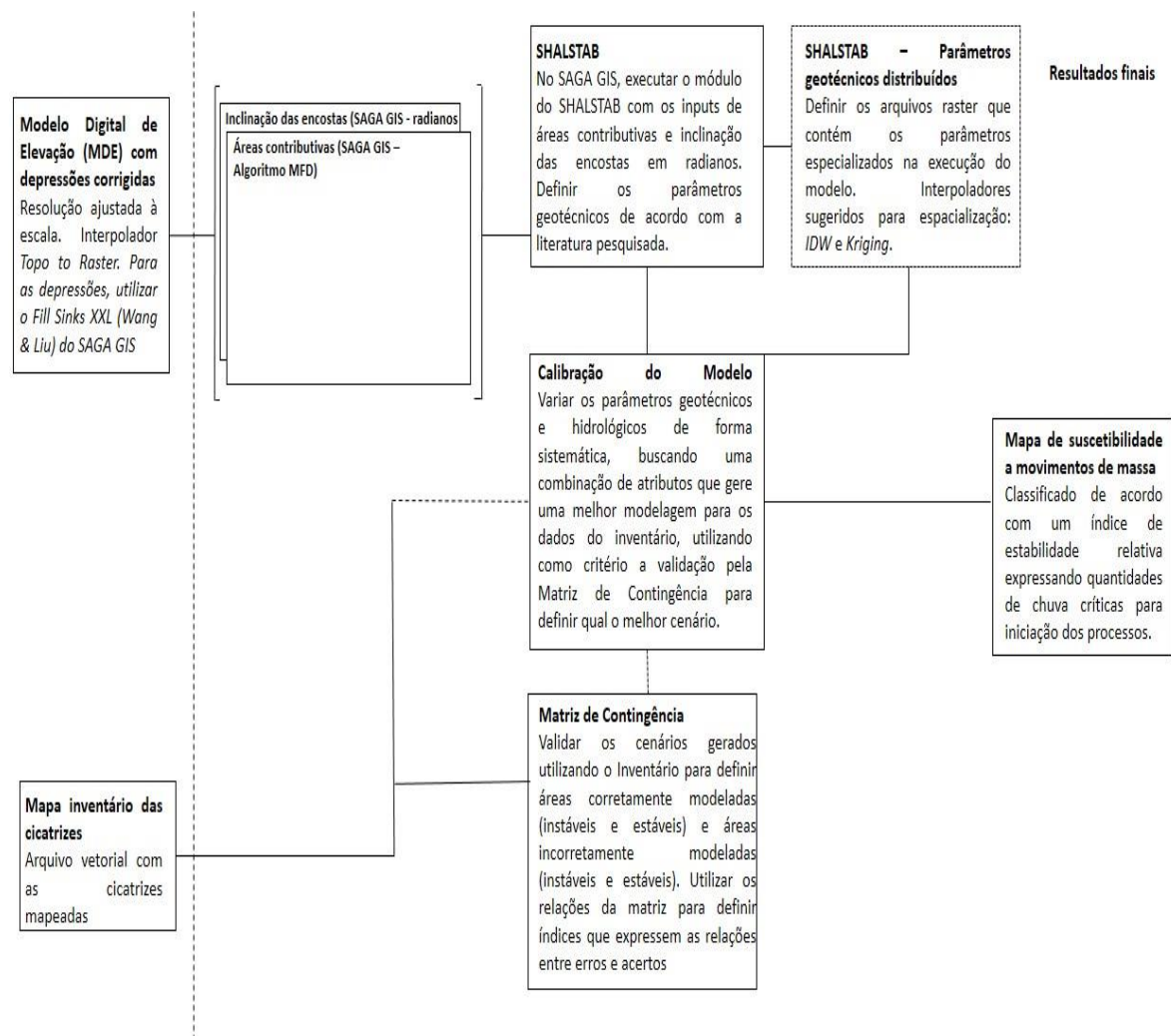


Figura 3: Fluxograma de procedimentos para geração dos mapas de suscetibilidade a escorregamentos rasos com o Modelo SHALSTAB, em sua versão do SAGA GIS. Também é utilizado o software ArcMap 10.3, especialmente nas etapas que antecedem a validação dos resultados.

3.1 Inventário de cicatrizes e Análise Morfométrica

Para esta análise foi utilizado o inventário de cicatrizes da bacia do rio Gurutuba, produzido por Carou *et al.* (2017), por meio imagens de 2014 disponíveis no software *Google Earth Pro*. O total de cicatrizes mapeadas foi de 336, algumas checadas posteriormente em trabalho de campo. A grande maioria das cicatrizes possui áreas de até 300m² (CAROU *et al.*, 2017). A Figura 4 apresenta o inventário citado.

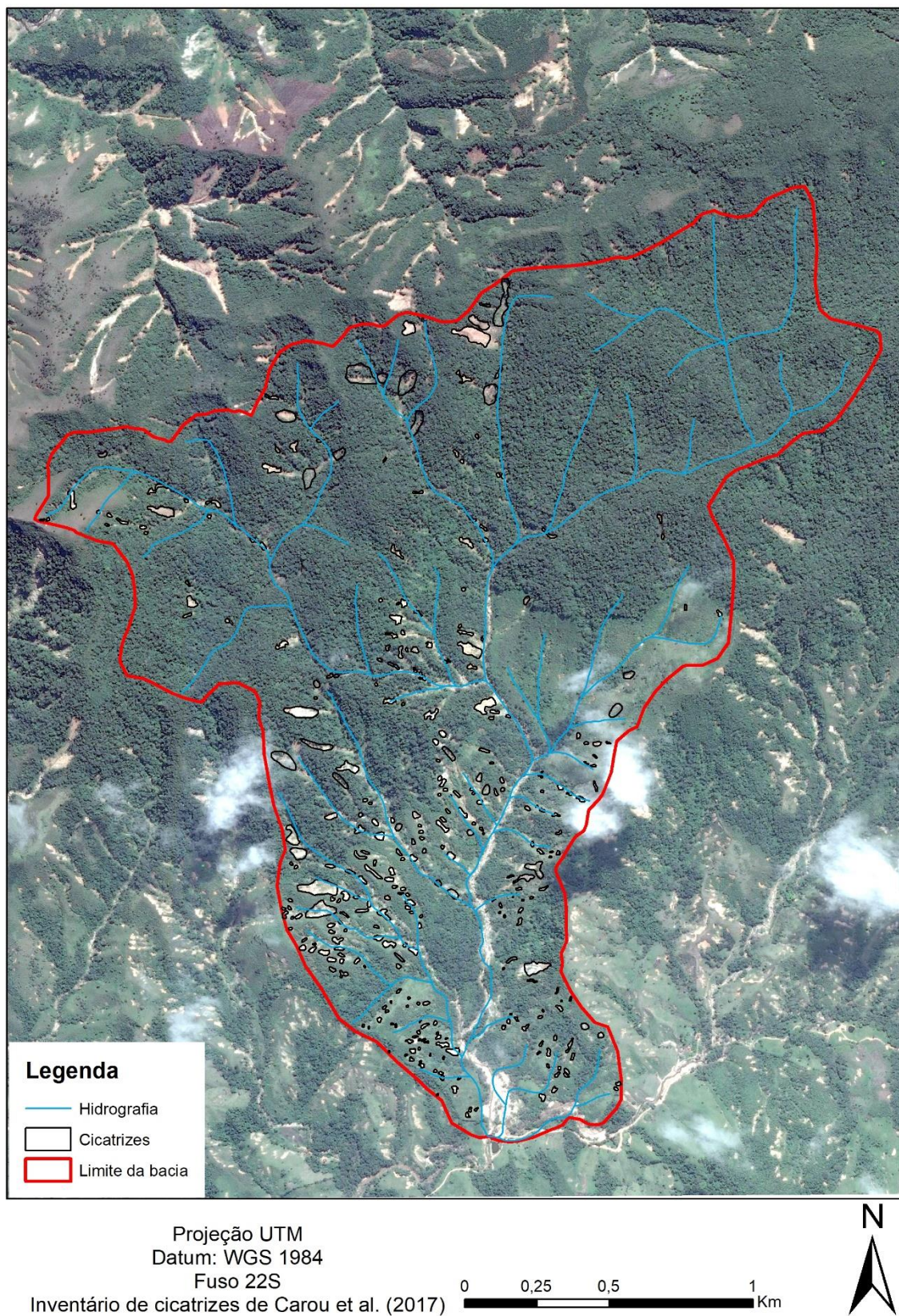


Figura 4: Mapa inventário de cicatrizes de Carou et al. (2017). Imagem: Google Earth

Na produção dos mapas temáticos foi empregado o MDT com resolução de 10m, gerado a partir de dados topográficos em escala 1:10.000 do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) por meio do interpolador *Topo to Raster* do software *ArcGIS 10.2.2*. Os mapas temáticos de hipsometria, aspecto, curvatura e ângulo de inclinação das encostas foram produzidos também por meio do *ArcGIS 10.3*, e o mapa de áreas contributivas é o mesmo utilizado pelos modelos que foram aplicados, gerado pelo algoritmo MFD (*Multiple Flow Direction*) do SAGA GIS.

A partir dos mapas temáticos em resolução de 10m, foram calculados índices de Frequência (F) e Concentração de Cicatrizes (CC) por classe para cada um dos parâmetros morfológicos. Tais índices consistem, respectivamente, na razão entre o número de células de cada classe e o número total de células da bacia e a divisão do total de células com cicatrizes pelo total de células da bacia (Equações 7 e 8).

$$F = \frac{n^{\circ} \text{ de células de cada classe}}{n^{\circ} \text{ total de células da bacia hidrográfica}} \quad (7)$$

$$CC = \frac{n^{\circ} \text{ de células de cada classe que apresentam cicatrizes}}{n^{\circ} \text{ total de células da bacia hidrográfica}} \quad (8)$$

Os valores referentes ao número de células que apresentam cicatrizes foram obtidos pela conversão dos arquivos vetoriais do inventário para formato *raster*, e, em seguida, a execução da ferramenta *Extract by Mask* para cada um dos mapas temáticos. Os produtos desta etapa permitiram avaliar quais as relações entre os parâmetros morfológicos da bacia e a ocorrência de escorregamentos rasos.

3.2 Aplicação do modelo SHALSTAB

O SHALSTAB se encontra entre os módulos do SAGA GIS sendo uma das ferramentas de análise de terreno disponíveis na seção dedicada à estabilidade de encostas.

O SAGA GIS é um programa de computador de livre acesso, que utiliza a linguagem C++. A ideia de sua criação era produzir uma plataforma simples e efetiva para a utilização de algoritmos ou métodos de análise de dados espaciais numa interface acessível. A maior parte das ferramentas desenvolvidas para o SAGA focam

em análise de dados matriciais, em especial a análise de MDTs, uma das motivações para o desenvolvimento do sistema (CONRAD *et. al.*, 2015). Entre os trabalhos publicados recentemente que utilizam o *software* destacam-se as análises de dados LiDAR (ORLOV e SADKOV, 2016), simulações de escoamento superficial utilizando diversos algoritmos disponíveis (LOPEZ-VICENTE *et. al.*, 2014) e mapeamentos geomorfológicos de movimentos de massa (MANTOVANI *et. al.*, 2010).

Os *inputs* possíveis do SHALSTAB no SAGA GIS são diversos, sendo um dos grandes diferenciais a possibilidade de se utilizar dados de coesão, condutividade hidráulica e ângulo de fricção interna distribuídos, por meio de arquivos matriciais (*grids*) para cada um destes parâmetros. Estes arquivos podem ser gerados desde que se tenha acesso a uma grande quantidade de dados representativos da área de estudo, de modo que uma interpolação confiável seja possível. Também é possível executar a ferramenta com parâmetros constantes, caso não se tenha acesso a dados espacialmente distribuídos.

Para executar o modelo matemático são necessários dois *inputs* básicos: um *grid* de ângulo da inclinação das encostas, em radianos; e um *grid* das áreas contributivas. Ambos devem ser gerados no próprio *software*, a partir de um MDT, com as ferramentas *Slope*, *Aspect*, *Curvature* e *Flow Accumulation (Recursive)*, respectivamente. Para gerar o mapa de áreas contributivas é necessário possuir um MDT sem depressões que possam comprometer a simulação da hidrologia da encosta, havendo um procedimento automatizado por Wang e Liu (2006), disponível no SAGA GIS – Ferramenta: *Fill Sinks XXL (Wang & Liu)*.

Foi utilizado o algoritmo *Multiple Flow Direction (MFD* – Ferramenta: *Multiple m_flow Direction*), proposto por Quinn *et al.* (1991), que calcula as áreas de contribuição considerando um fluxo multidirecional distribuído de uma das células para as demais adjacentes, em três direções, produzindo uma concentração dos fluxos em caminhos. O algoritmo MFD consta na proposição original de Montgomery e Dietrich (1994) e Dietrich e Montgomery (1998) e tem seu funcionamento sintetizado na Equação 9.

$$\Delta A_i = \frac{A(\tan\beta_i L_i)}{\sum_{j=1}^n (\tan\beta_j L_j)} \quad (9)$$

Na qual A é a área de contribuição acumulada na célula; $\tan\beta_i$ é o quociente entre altitude e distância nas direções encosta abaixo; L_i é o comprimento na iésima direção (cardinal ou diagonal); n é número total de direções encosta abaixo; e ΔA é a quantidade de fluxo que atravessa a iésima célula.

Foram empregados três MDTs com resolução de 5m, 10m e 20m, feitos a partir dados topográficos obtidos em cartas do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC elaborados com a ferramenta de interpolação *Topo to Raster* (ArcMap 10.3) Justifica-se o uso de três modelos distintos pela necessidade de se entender melhor o papel desempenhado pela resolução do MDT nos produtos gerados com o SHALSTAB. A partir do MDT com as depressões corrigidas, geramos o mapa de áreas contributivas e o de ângulo de inclinação, em radianos (Figura 5)

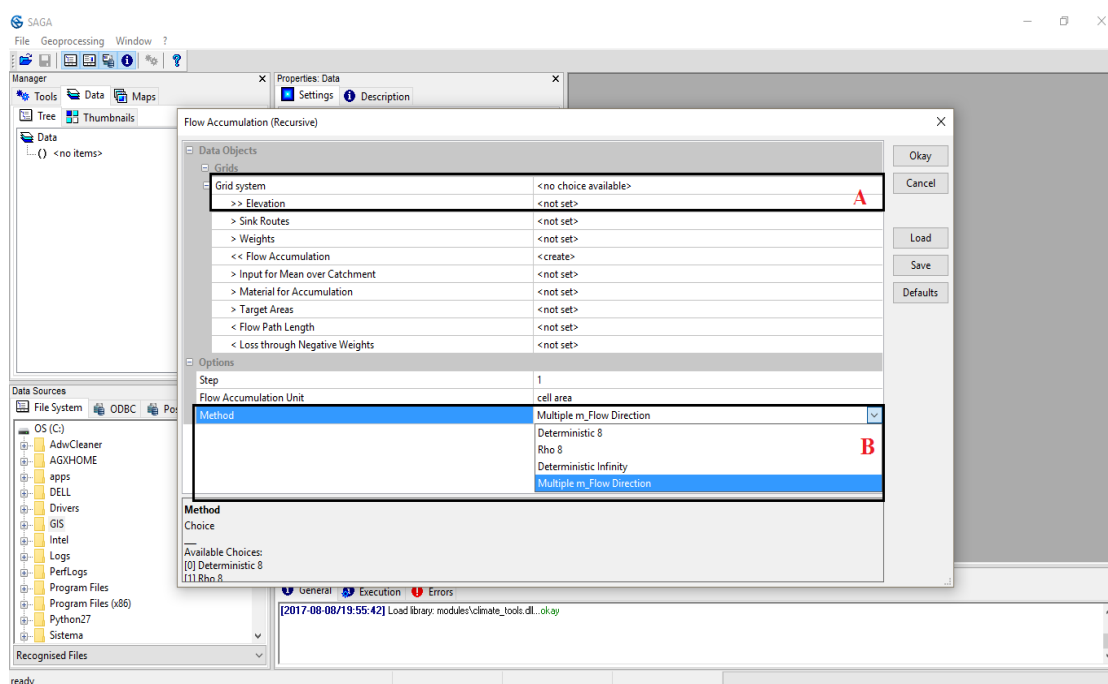


Figura 5: Módulo Flow Accumulation (Recursive) do SAGA GIS. Estão destacados: (A) Inputs necessários: selecionar o grid system, para acessar às informações do projeto e inserir o MDT; e (B) a diversidade de métodos para execução da ferramenta, estando destacado o algoritmo MFD.

Os parâmetros geotécnicos e hidrológicos necessários para alimentar o modelo obtidos na literatura encontram-se sistematizados na Tabela 1, sendo acompanhados de suas fontes, ano de publicação, litologia e localização das áreas estudadas. Este levantamento nos forneceu um intervalo de variações possíveis de cada parâmetro durante os testes, buscando dado conjunto de parâmetros que correspondesse melhor com o inventário de cicatrizes, tomando como ponto de partida os dados

contido na Tabela 1. Após os testes, foram selecionados dois cenários de valores para os parâmetros necessários ao modelo (Tabela 2).

Tabela 1 – Propriedades Hidrológicas e Geotécnicas de diferentes solos

p (m)	K _{sat} (m/s)	p _s (kN/m ³)	Φ (°)	C (kPa)	Litologia	Área /Autores
-	-	26,2 a 27,9	28 a 32	234 a 248	Granodioritos muito alterados	Sierra Nevada, CA, EUA Krank e Watters (1983)
-	-	26,1 a 26,6	46 a 46,5	0 a 19,3	Granodioritos completamente alterados	
-	-	26,6	38,6	0 a 33,78	Solo residual da alteração dos granodioritos	
-	-	13 a 18	40 a 30	15 a 35	Solos residuais derivados de granitos porfíricos e equigranulares	Königshainer Berge, Alemanha Thuro e Scholz (2004)
-	-	18 a 23	30 a 20	10 a 20	Granitos porfíricos e equigranulares completamente alterados	
-	-	23 a 25,2	20 a 10	50 a 25	Granitos porfíricos e equigranulares muito alterados	
-	-	25 a 25,6	-	-	Granitos porfíricos e equigranulares moderadamente alterados	
0-20	-	18,63 a 18,82	31 a 33	13,24 a 28,44	Solo residual e granitóides completamente alterados	Maciço de Serre, Itália letto <i>et.al.</i> (2016)
10-30	-	19,12	36	7,84	De solos residuais a Granitóides muito alterados	
10-35	-	24,61 a 24,81	37 a 39	5,88 a 7,16	De granitóides muito alterados a alterados	
0-2	1,38.10 ⁻⁵	14,9	36,5	3,8	Solo derivado de granitos	Jinbu Myeon, República da Coreia Kim <i>et.al</i> (2015)
0-5	10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁷	-	25 a 37	0 a 11	Solos derivados de gnaisses e metassedimentos da Serra do Mar	Caraguatatuba (SP), Brasil Vieira <i>et al.</i> (2015)
1-2,7	5,44.10 ⁻⁶	14,3 a 14,9	16 a 24	5 a 12,5	Solos residuais derivados de granodioritos, com componente granítico dominante	Cordilheira dos Andes, Colômbia Aristizábal <i>et al.</i> (2015)
0-5	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁷	-	25 a 37	0 a 11	Solo derivado de gnaisses e metassedimentos	Caraguatatuba (SP), Brasil Gomes e Vieira (2016)

Tabela 2 – Parâmetros geotécnicos e hidrológicos obtidos pela calibração e utilizados nas modelagens com o modelo SHALSTAB

Cenário	d _{min} (g/cm ³)	d _{max} (g/cm ³)	p _{min} (m)	p _{max} (m)	K _{sat} _{min} (m/h)	K _{sat} _{max} (m/h)	Φ _{min} (°)	Φ _{max} (°)	C' _{min} (MPa)	C' _{max} (MPa)
1	1,5	1,6	2	8	1,5012	1,5012	27	36	0	0,002
2	1,5	1,6	2	8	0,15012	1,5012	27	36	0	0,002

d_{min} densidade do solo seco mínima) e densidade do solo seco máxima; p_{min} e p_{max} são a profundidade do solo mínima e máxima; K_{sat}_{min} e K_{sat}_{max} a condutividade hidráulica saturada mínima e máxima, ; Φ_{min} e Φ_{max} são o ângulo de atrito interno mínimo e máximo; e C'_{min} e C'_{max} são a coesão aparente dos solos

3.3 Validação do Modelo SHALSTAB

A validação dos resultados do modelo empregado foi feita por meio da metodologia da matriz de contingência e curva ROC (*Receiver Operating Characteristics*), descrita em Fawcett (2006). Essa técnica, aplicada à avaliação de suscetibilidade, classifica os resultados de quatro maneiras: Positivo Verdadeiro (*True Positive*), quando a previsão classificou dada área como suscetível e ela apresenta cicatrizes; Negativo Verdadeiro (*True Negative*), quando a área é apontada como estável e não possui cicatrizes; Falso Positivo (*False Positive*), que representa áreas que a previsão indicou como suscetíveis, mas sem cicatrizes; e Falso Negativo (*False Negative*), referente a áreas classificadas pelo modelo como estáveis, mas que possuem cicatrizes. Com isso, é possível construir uma matriz de contingência e alguns índices para avaliar o desempenho do modelo (Figura 6).

		<u>True class</u>			
		p	n		
<u>Hypothesized class</u>	Y	True Positives	False Positives	$fp\ rate = \frac{FP}{N}$	$tp\ rate = \frac{TP}{P}$
	N	False Negatives	True Negatives	$precision = \frac{TP}{TP+FP}$	$recall = \frac{TP}{P}$
Column totals:		P	N	$accuracy = \frac{TP+TN}{P+N}$	

Figura 6: Matriz de contingência e equações para cálculo dos índices Taxa de Verdadeiros Positivos (True Positive Rate – TPR); Taxa de Falsos Positivos (False Positive Rate – FPR); Precisão (Precision); Acurácia (Accuracy); e Recall. Extraído de Fawcett (2006).

As taxas de positivos verdadeiros (TPR: *True Positive Rate*; *Hit Rate*) e de falsos positivos (FPR: *False Positive Rate*; *False Alarm Rate*) nos fornecem informações valiosas acerca da qualidade do mapeamento, pois, respectivamente, elas representam a área total prevista como instável e com escorregamentos, em relação à área total classificada como instável; e a área total prevista como instável e não deslizada, em relação à área total incorretamente classificada¹. Portanto, quanto

¹ No caso do modelo SHALSTAB, foram consideradas como Instáveis pela matriz de contingência as classes: Incondicionalmente Instável; 0-50mm/dia; 50-100mm/dia; e 100-200mm/dia. Foram consideradas estáveis as classes: 200-400mm/dia; > 400mm/dia; e Incondicionalmente Estável. Já para o modelo do Valor Informativo, as classes consideradas como instáveis pela matriz de contingência foram: Suscetibilidade Muito Alta; Alta; e Média. As classes consideradas estáveis foram:

menor a FPR, maior será a qualidade do mapeamento. Além disso, a razão entre TPR e FPR nos fornece um indicador de precisão da modelagem eficiente, pois, quanto maior o quociente desta operação, teremos uma maior taxa de acertos aliada à uma menor taxa de erro, ou seja, quanto mais elevado o valor desta relação melhor é o desempenho do modelo. Os outros índices presentes na Figura 4 estão descritos abaixo:

- a) Acurácia (*Accuracy*): Indica a suscetibilidade bem classificada relativamente à área total.
- b) Precisão (*Precision*): Aponta a capacidade preditiva das áreas classificadas como instáveis (potencial de deslizamento)
- c) *Recall*: Idêntico à TPR.

As taxas obtidas podem ser organizadas em forma de gráfico, para facilitar a leitura dos resultados. Neste caso, define-se a TPR no eixo das ordenadas e a FPR no eixo das abcissas. Para o processo de validação, utilizamos o inventário dos escorregamentos do evento de 2014, elabora por Carou *et al.* (2017) e apresentado na seção referente à nossa área de estudo.

3.4 Aplicação do modelo do Valor Informativo

A aplicação do método do valor informativo para a avaliação de suscetibilidade na bacia do rio Gurutuba foi feita com base em parâmetros morfológicos possíveis de serem obtidos através de um MDT. Nossa intenção com isso, mais do que avaliar a suscetibilidade aos processos na bacia, foi entender de que forma o modelo se comportava quando aplicado com parâmetros morfológicos derivados de MDTs de diferentes resoluções.

Assim, os três MDTs, descritos anteriormente, foram também empregados aqui. Os parâmetros selecionados foram o ângulo de inclinação das encostas; o aspecto; a curvatura em planta/perfil; as áreas contributivas; a posição da média encosta²; e a hipsometria. Além da disponibilidade, estes parâmetros foram

Suscetibilidade Baixa; e Muito Baixa. Em ambos os casos as classes consideradas instáveis e estáveis não variaram com a dimensão da célula.

² Este parâmetro secciona a encosta em quatro partes, cada correspondendo a 25% da encosta. Dessa forma, é possível avaliar de maneira objetiva se os escorregamentos estão mais concentrados na baixa, média ou alta encosta.

escolhidos levando-se em conta aqueles que eram mais utilizados nos estudos presentes na literatura (JADE e SARKAR, 1993; ZÊZERE, 1997; PEREIRA, 2009).

A classificação de cada um dos mapas destes parâmetros foi testada diversas vezes, buscando-se encontrar aquela que fosse mais adequada para ser utilizada nas modelagens finais do Valor Informativo. Justificam-se a ausência das variáveis litologia e uso do solo, presentes nos outros estudos que utilizam o método, devido à homogeneidade geológica (FALEIROS, 2008; FALEIROS *et al.*, 2012) e de uso do solo na área de estudo, que apresenta praticamente apenas encostas naturais, sem interferência antrópica significativa. Um parâmetro que provavelmente melhoraria nossa análise, mas que não foi incluído devido aos custos operacionais e à ausência de dados em uma escala de detalhe, é a densidade de fraturas e falhas na área, que se encontra próxima das zonas de cisalhamento Ribeira e Figueira (FALEIROS, 2008; FALEIROS *et al.*, 2012)

Para gerar os mapas de ângulo de inclinação, aspecto e curvatura em planta/perfil da área de estudo foi utilizado o *software ArcMap 10.3*, com seu módulo *3D Analyst*. As áreas contributivas foram obtidas por meio da ferramenta *Flow Accumulation (Recursive)* disponível no *software* livre SAGA GIS, tendo sido executada com o algoritmo *Multiple Flow Direction*, por motivos já explicitados anteriormente. O mesmo programa foi utilizado para obtenção do parâmetro de Posicionamento da Média Encosta (*Mid-slope Position*), que é gerado pela ferramenta *Relative Heights and Slope Positions*³. Os procedimentos estão sintetizados no fluxograma da Figura 7.

³ Os demais produtos gerados por esta ferramenta (*Normalized Heights*; *Valley Depth*; *Standardized Heights*; e *Slope Heights*) foram igualmente testadas, tendo sido descartadas de nossa análise por apresentarem valores informativos muito negativos e IF baixo.

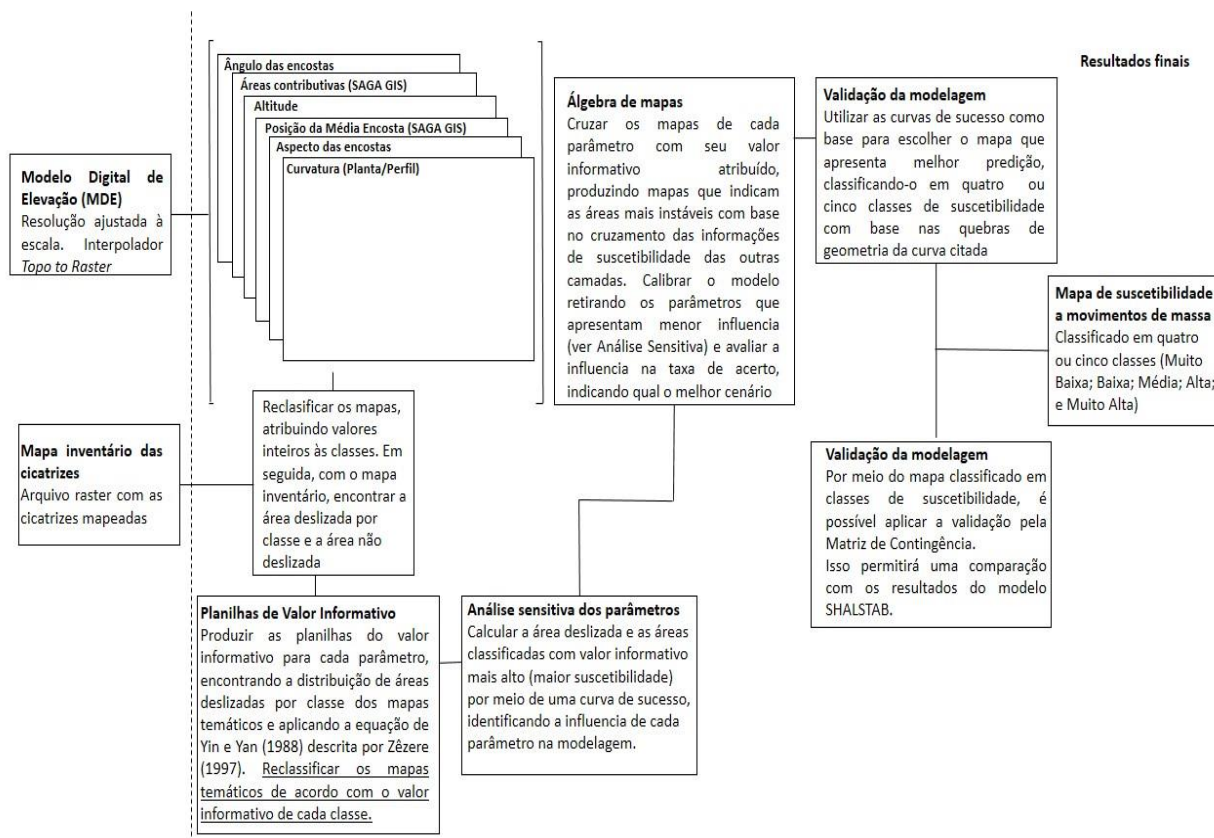


Figura 7: Fluxograma de procedimentos para geração dos mapas de suscetibilidade a escorregamentos rasos com o Modelo Valor Informativo, utilizando o software ArcMap 10.3 e SAGA GIS.

3.4.1 Validação do modelo do Valor Informativo

A técnica escolhida para validação dos produtos obtidos com o modelo do Valor Informativo foi a Taxa de Sucesso (CHUNG e FABBRI, 2003), utilizada também por Pereira (2009). Para que o modelo do Valor Informativo possa ser testado, é preciso realizar uma validação cruzada, na qual o inventário de cicatrizes é submetido à partição aleatória, gerando um Grupo de Modelagem e um Grupo de Validação. Este último é tratado como um conjunto de escorregamentos que ainda não ocorreu.

As curvas dos dois grupos traduzem a relação entre a predição gerada pelo método e os movimentos mapeados em um inventário, sendo que para avaliar a qualidade do modelo de forma geral, Pereira (2009) recomenda que se calculem as Áreas Abaixo da Curva (AAC), que varia de 0 (pior capacidade preditiva possível) a 1 (melhor capacidade preditiva possível). As AAC são calculadas de acordo com a Equação (8).

$$AAC = \sum_{i=1}^n ((Lsi - Li) \frac{ai+bi}{2}) \quad (8)$$

Na qual a expressão $(Lsi - Li)$ corresponde à amplitude da classe; ai é o valor de y associado à Li ; e bi é o valor de y associado a Lsi .

Com isso, pode-se realizar uma análise sensitiva de cada um dos parâmetros utilizados na análise, sendo necessário executar o método do valor informativo para cada parâmetro isolado, elaborando sua taxa de sucesso (PEREIRA, 2009). Após isso, podemos comparar os resultados obtidos, apontando qual dos atributos tem maior influência na taxa de sucesso. Em seguida à análise sensitiva, efetuamos diferentes modelagens com os parâmetros, de modo que fosse possível avaliar se todos os seis de fato contribuíam para aumentar a qualidade da análise.

Os mapas foram selecionados por apresentarem maior taxa de sucesso, tanto com o grupo de modelagem quanto com o de validação. Os produtos selecionados foram classificados em níveis de suscetibilidade definidos de acordo com as quebras na geometria da curva de sucesso, conforme recomenda Pereira (2009). Estes mapas classificados foram então validados pela matriz de contingência e curva ROC, permitindo uma comparação com os resultados do SHALSTAB.

3.4 Comparação SHALSTAB x Valor Informativo

A comparação entre os resultados dos dois modelos foi feita com base nos índices da matriz de contingência e Curva ROC para os melhores cenários gerados, sendo que o índice TPR/FPR foi nosso principal indicador de qualidade da modelagem. Buscando aprofundar a comparação, foram produzidos gráficos de índices de Frequência (F) e Concentração de Cicatrizes (CC) para os cenários selecionados, etapa executada utilizando o inventário de cicatrizes de Carou *et al.* (2017).

4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo insere-se no município de Itaóca (SP), na divisa com o Estado do Paraná (Figura 8). Integrando a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 11 – Ribeira do Iguape (UGRHI 11), sub-bacia do Baixo Ribeira, o rio Alto Gurutuba é afluente do Rio Palmital. Tendo aproximadamente 4,56 km² de área, a bacia foi escolhida para este estudo devido aos escorregamentos concentrados desencadeados durante os dias 13 e 14 de janeiro de 2014, em que precipitações intensas atingiram a região, focadas nas cabeceiras de drenagem das bacias, pois nos relatos dos moradores do centro da cidade não constam fortes chuvas (BROLLO *et. al.*, 2015; GRAMANI, 2015; GRAMANI e ARDUIN, 2015).

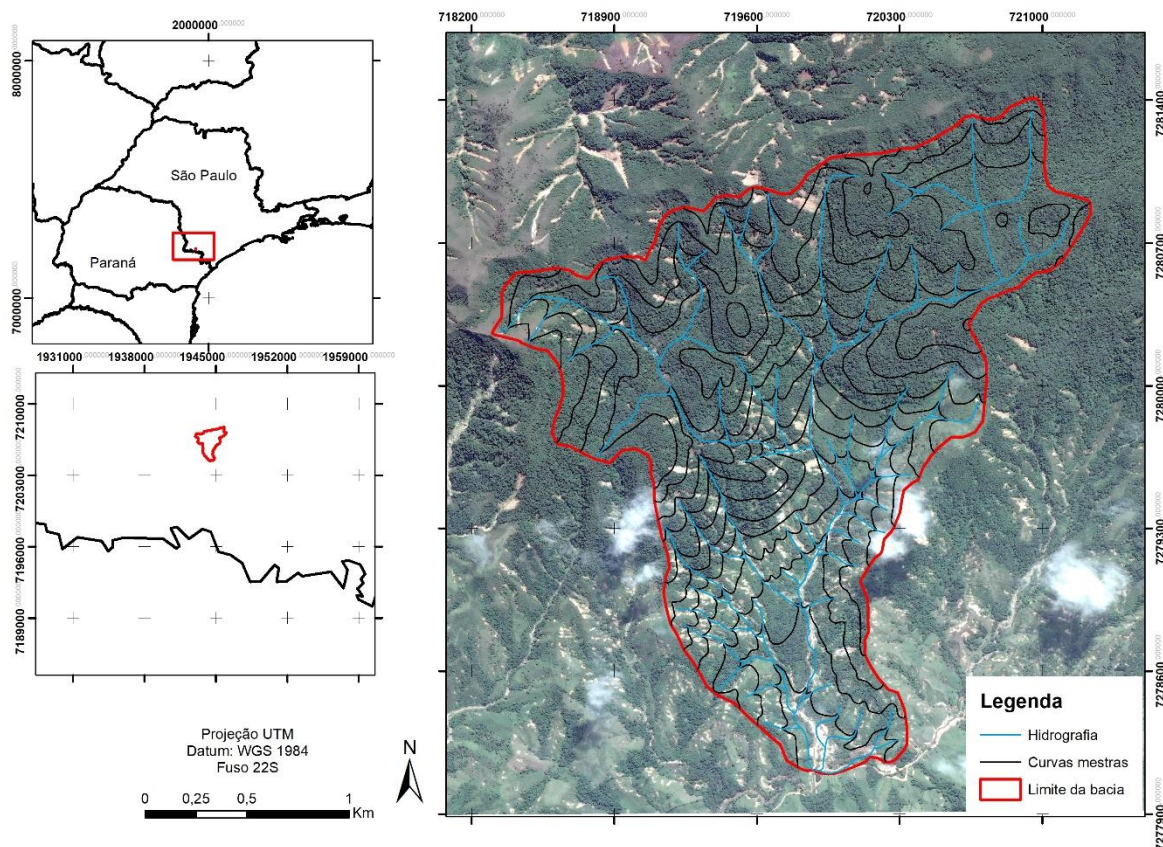


Figura 8: Mapa de localização da bacia do rio Gurutuba no Estado de São Paulo, na região do Vale do Ribeira. As cicatrizes de escorregamentos do evento de 2014 podem ser vistas na imagem, apresentando coloração mais próxima do branco.

A região do município de Itaóca, segundo Brollo *et. al.* (2015), registrou um total de cinco acidentes de proporções significativas entre 1991 e 2014, em sua maioria inundações que atingiram os bairros da cidade. O evento de 2014 foi, portanto, muito

mais destrutivo, totalizando uma precipitação de mais de 200mm em apenas 2h (GRAMANI, 2015), gerando uma corrida de detritos que transportou quantidades impressionantes de blocos, seixos, sedimentos, vegetação e construções, tendo inclusive alterado o curso de canais fluviais (Figura 9). Entre os afetados, 23 moradores faleceram, além de dezenove casas totalmente destruídas e uma ponte no centro da cidade que foi arrastada pela enxurrada. A inundação que atingiu as casas do centro chegou a atingir os 2,13m de altura (BROLLO *et. al*, 2015).



Figura 9: Áreas do município de Itaóca afetadas pelo evento de 2014. (A) parte do município de Itaóca afetada pela corrida de detritos do rio Guarda-Mão, em 2014. (B) Fotos oblíquas dos escorregamentos na bacia do Alto Gurutuba. Extraído de Bonini *et al.*, 2017.

Os processos de corrida de detritos foram mais intensos na bacia do Rio Guarda-Mão, contígua a área de estudo. Gramani (2015) ressalta que as feições e depósitos observados em seus trabalhos de campo indicam que o processo é recorrente na bacia, uma vez que estes são correlatos aos de outras localidades onde as corridas são, também, recorrentes. A bacia do rio Alto Gurutuba apresentou muito mais escorregamentos em suas encostas do que a do rio Guarda-Mão, totalizando 336 cicatrizes concentradas nos terços médio e inferior da bacia (Figura 8; CAROU *et. al.*, 2017).

O embasamento rochoso da bacia do Gurutuba é bastante homogêneo, sendo composto de rochas graníticas pouco fraturadas e muito intemperizadas, com forte presença de blocos arredondados nas drenagens e perfis (GRAMANI, 2015; GRAMANI e ARDUIN, 2015). Num contexto mais amplo, a área de estudo se insere na Unidade Itaóca, que ocupa cerca de 70% da área do Batólito Itaóca, composto de granitóides calcioalcalinos monzoníticos com metassedimentos encaixantes do subgrupo Lajeado (MELLO e BETTENCOURT, 1998; FALEIROS *et. al.*, 2012). Nas

proximidades encontram-se as Zonas de Cisalhamento Ribeira e Figueira, que exercem evidente controle estrutural nas drenagens e encostas da região, cujos indícios são os cotovelos das drenagens e as facetas triangulares das encostas.

A bacia do Rio Ribeira de Iguape é descrita por Ross (2002) como possuindo forte controle geológico-estrutural no sentido ENE-SSW concordante com a direção do Cinturão Orogênico do Atlântico no trecho do Sudeste brasileiro. Os relevos desta bacia são alongados, com topos convexos e vales predominantemente estreitos e profundos, com encostas de inclinações entre 30% e 60%. Os topos convexos são, de acordo com Ross (2002), resultado das ações morfoclimáticas atuais, com efeito das variações climáticas de ambientes áridos a semiáridos no passado. Nota-se uma carência de trabalhos de caracterização da área em escalas de maior detalhe.

Uma primeira aproximação ao tema pode ser encontrada em Brollo *et. al.* (2015), que caracteriza os solos de Itaóca como pouco desenvolvidos, sendo que são os setores côncavos do relevo onde o Granito Itaóca é o substrato geológico que apresentam espesso manto de alteração argilo-siltico-arenoso.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise morfométrica: escorregamentos rasos e parâmetros morfológicos

As análises dos dados para a hipsometria (Figuras 10 e 11) indicaram que 30,4% da bacia possui elevações entre 750 e 850m, sendo que a classe com o maior CC (21%) entre 450 e 550m, que perfaz 9% da área total. Além disso, altitudes entre 450 e 750m apresentaram um CC total de 42%, indicando uma maior suscetibilidade no terço médio da bacia, conforme aponta também Carou *et al.* (2017).

Vieira (2007) aponta para a possibilidade da influência da altitude na variação do volume pluviométrico, por meio de um efeito orográfico, o que pode ter influência na ocorrência de movimentos de massa.

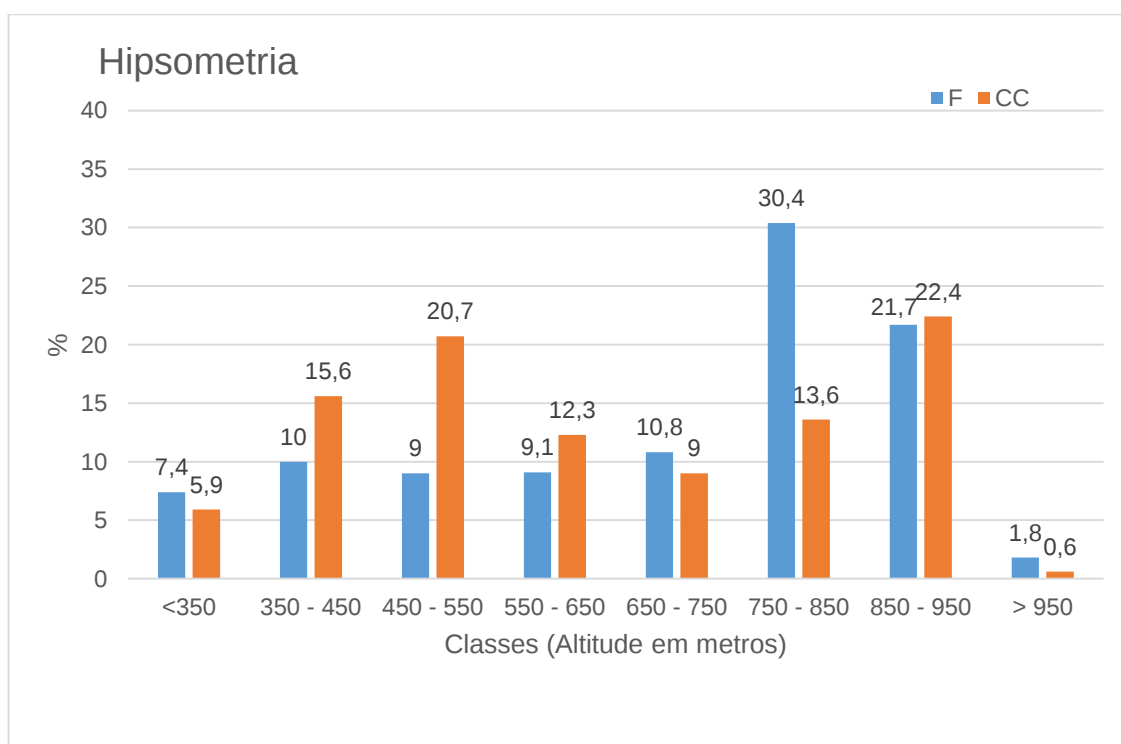


Figura 10: Índices F e CC para o parâmetro morfológico Hipsometria.

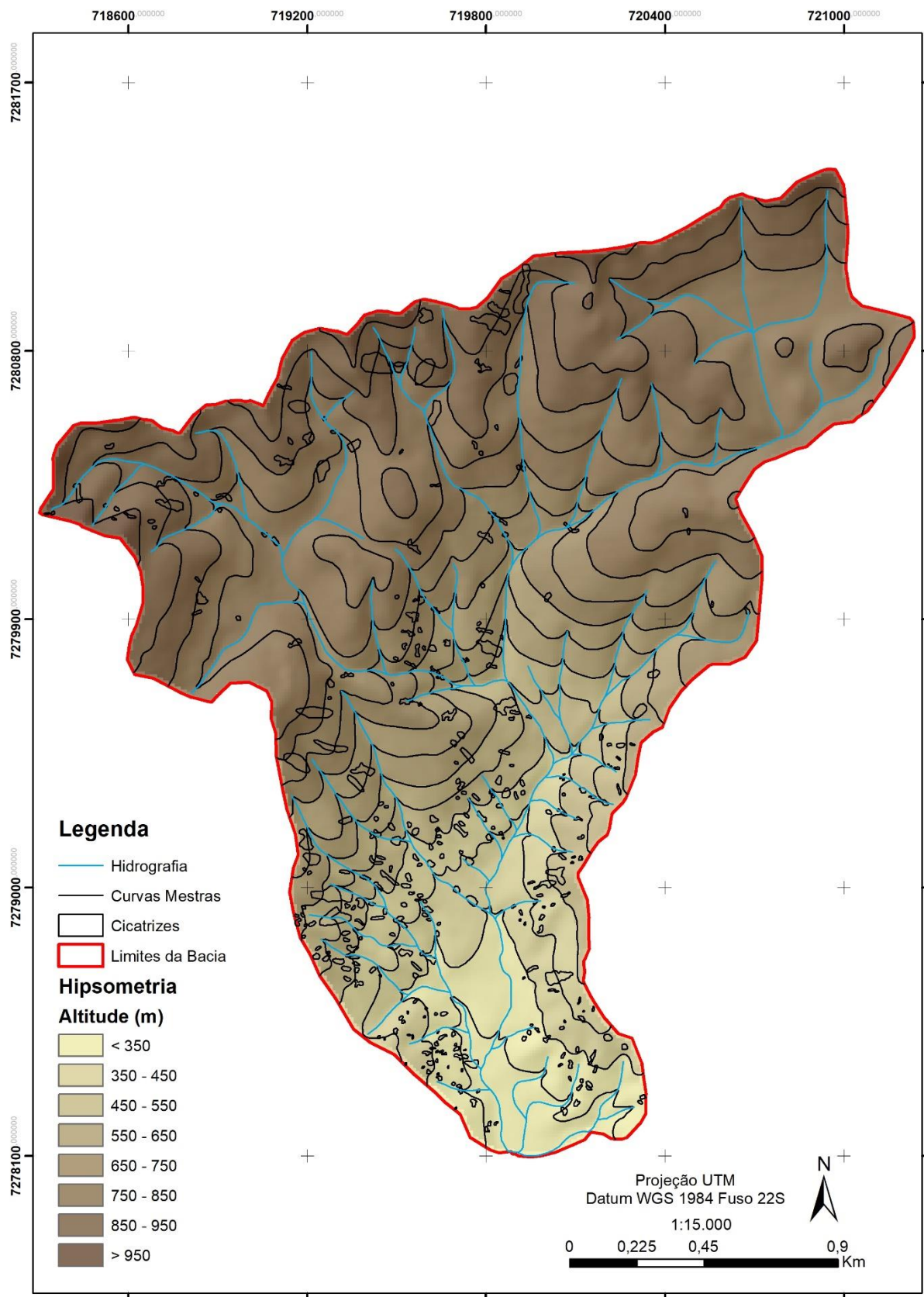


Figura 11: Mapa hipsométrico da bacia do rio Alto Gurutuba, Itaóca (SP).

Observa-se nas Figuras 12 e 13, que as orientações predominantes são Sul (20,8%), Sudeste (20,8%) e Leste (18,2%), sendo que as classes com maior CC são Leste (37,2%) e Sudeste (29,4%), totalizando um CC de 66,6%. Os menores valores de CC correspondem às encostas voltadas para Norte (1,6%) e Noroeste (1,7%).

O trabalho de Lin *et al.* (2016), realizado na bacia do rio Gurutuba também apresentou resultados semelhantes, com encostas mais suscetíveis em Leste e Sudeste. De acordo com Gao (1993), uma vez que existe diferença na quantidade de radiação recebida pela encosta conforme sua orientação, aquelas que recebem mais radiação serão menos suscetíveis, pois estarão mais secas quando a precipitação se iniciar e, logo, precisarão de maiores quantidades de água para saturarem.

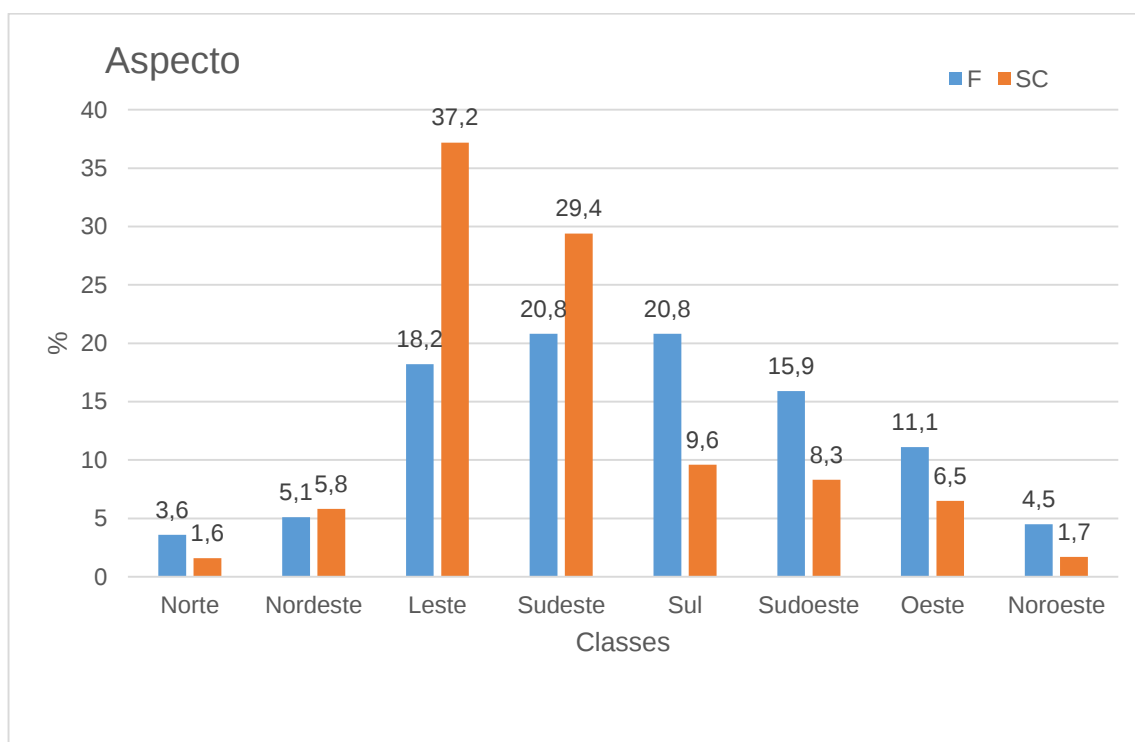


Figura 12: Índices F e CC para o parâmetro morfológico de aspecto das encostas.

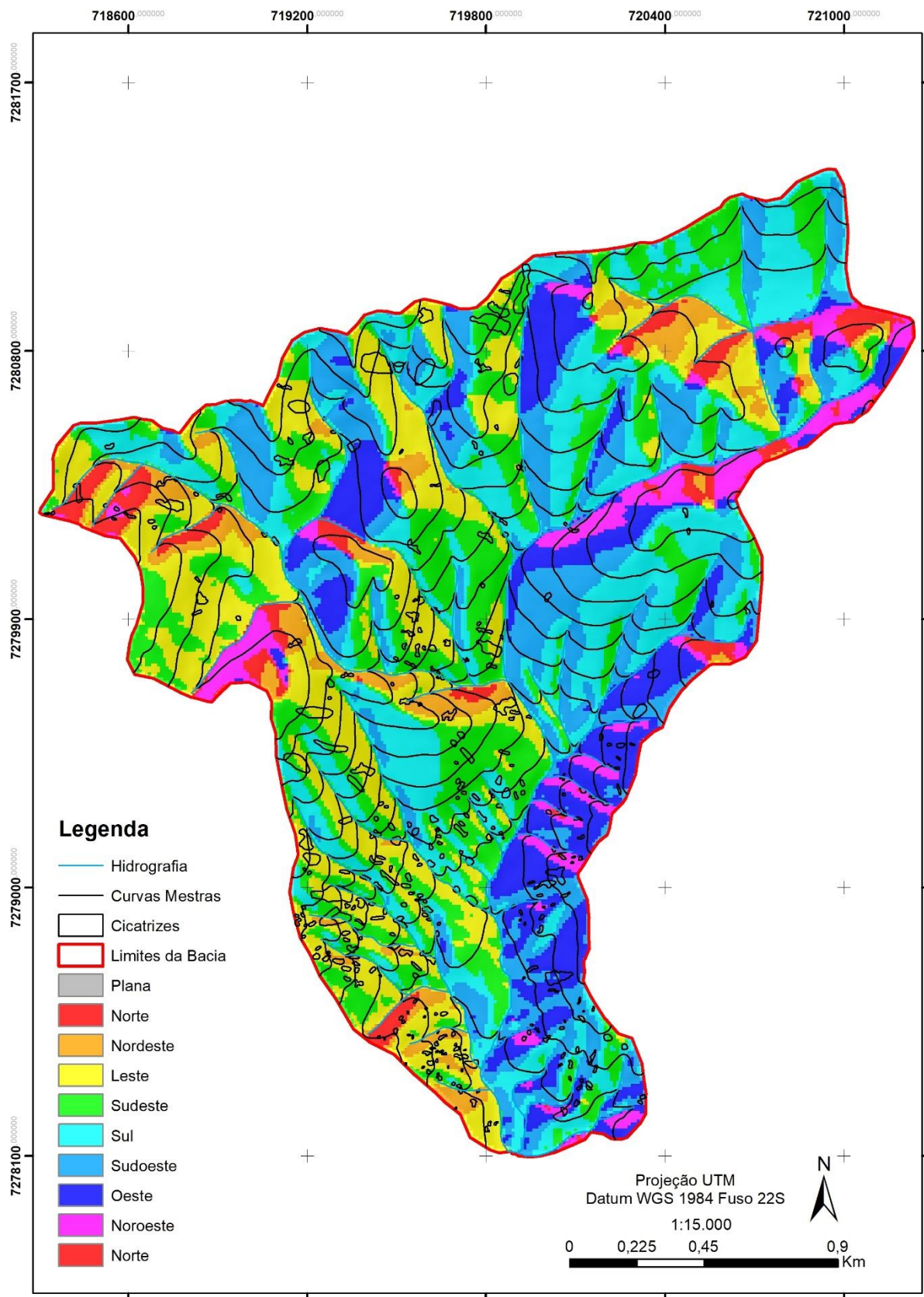


Figura 13: Mapa de aspecto das encostas da bacia do rio Alto Gurutuba, Itaóca (SP).

Nota-se, para o ângulo de inclinação, que o índice CC apresentou uma tendência de aumento a partir da classe de 20° a 25°, atingindo um máximo na classe de 30° a 35°, e declinando em seguida (Figuras 14 e 15), sendo que as encostas com ângulos entre 25 e 40° apresentaram um CC total de 73%. Tal resultado encontra respaldo na literatura, conforme demonstram os trabalhos feitos para as bacias dos rios Quitite e Papagaio por Fernandes *et al.*, 2004, onde as encostas com ângulos entre 18° e 37° apresentaram mais cicatrizes, e o estudo de Nery e Vieira (2015), no qual as encostas com ângulos acima de 30° apresentaram maior concentração de cicatrizes.

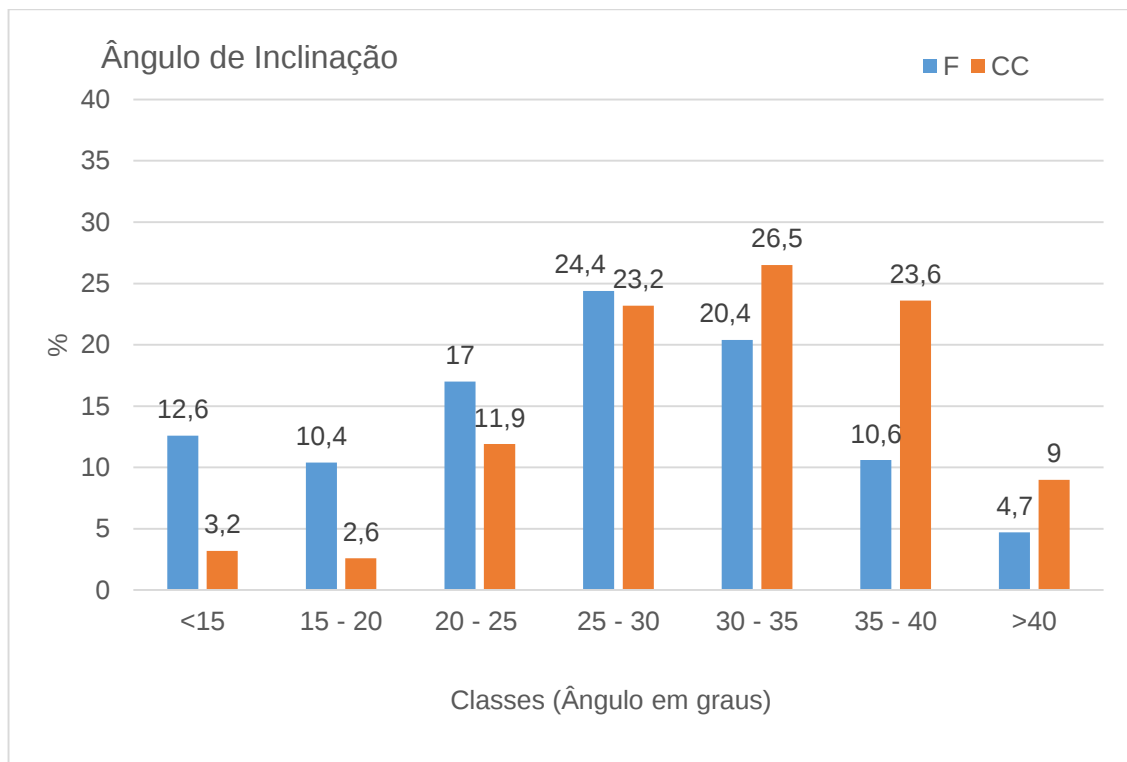


Figura 14: Índices de F e CC para o parâmetro morfológico de ângulo de inclinação das encostas.

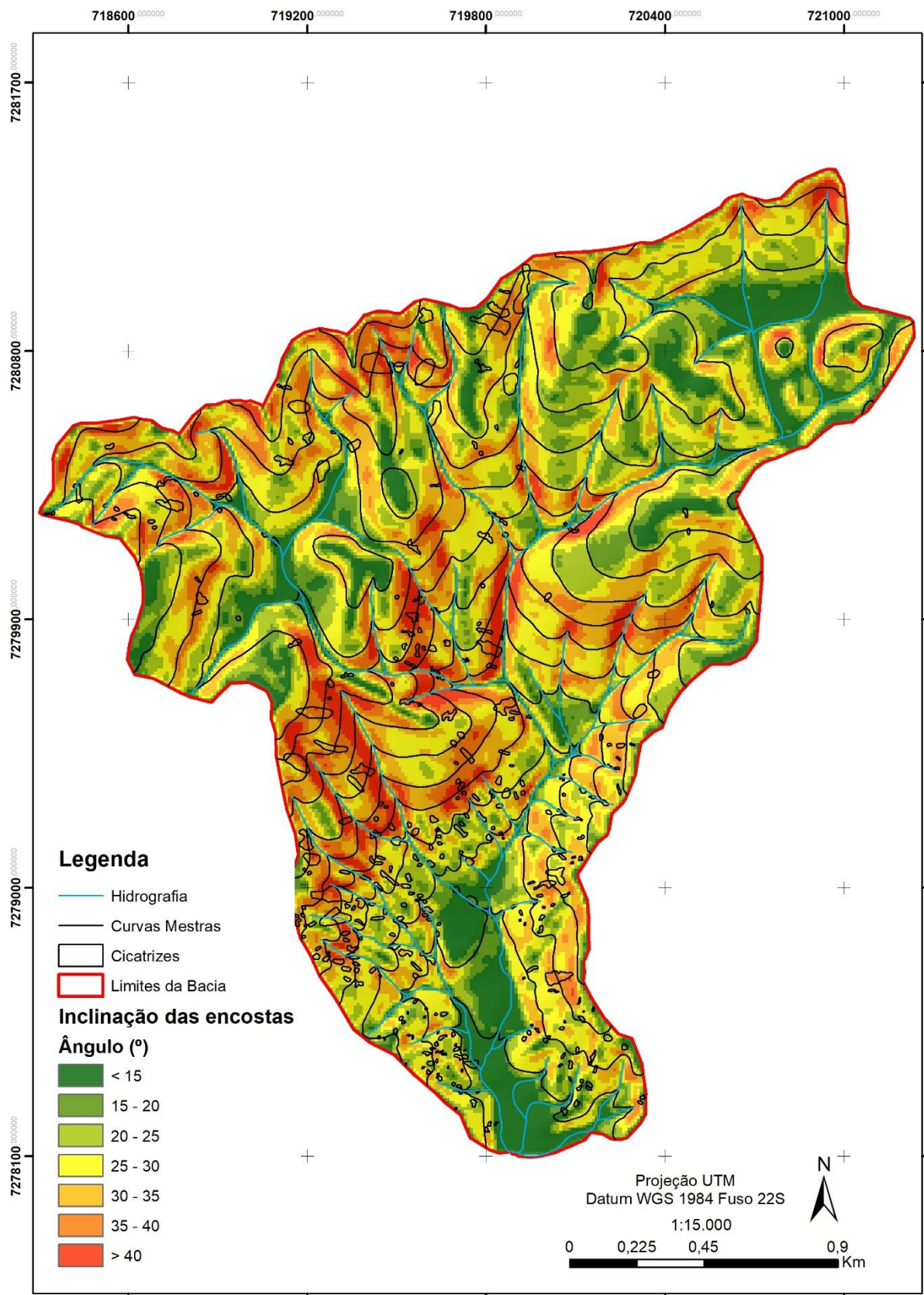


Figura 15: Mapa de ângulo de inclinação das encostas da bacia do rio Alto Gurutuba, Itaóca (SP).

A curvatura das encostas apresentou valores similares de F para as três classes (Figura 16), com as porções retilíneas possuindo área ligeiramente superior (34,9%), conforme a Figura 17. Também o índice CC se mostrou bem distribuído, indicando maior suscetibilidade nas encostas Convexas (35,2%) e Côncavas (33,9%). Em geral, são as encostas com curvaturas côncavas que apresentam maior suscetibilidade aos escorregamentos rasos, por concentrarem os fluxos de superfície e subsuperfície (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994), como é o caso do trabalho de Fernandes *et al.* (2004). Nossos resultados diferem disto, porém, os valores de F e CC das três classes são próximos, com diferença máxima de 4,2%.

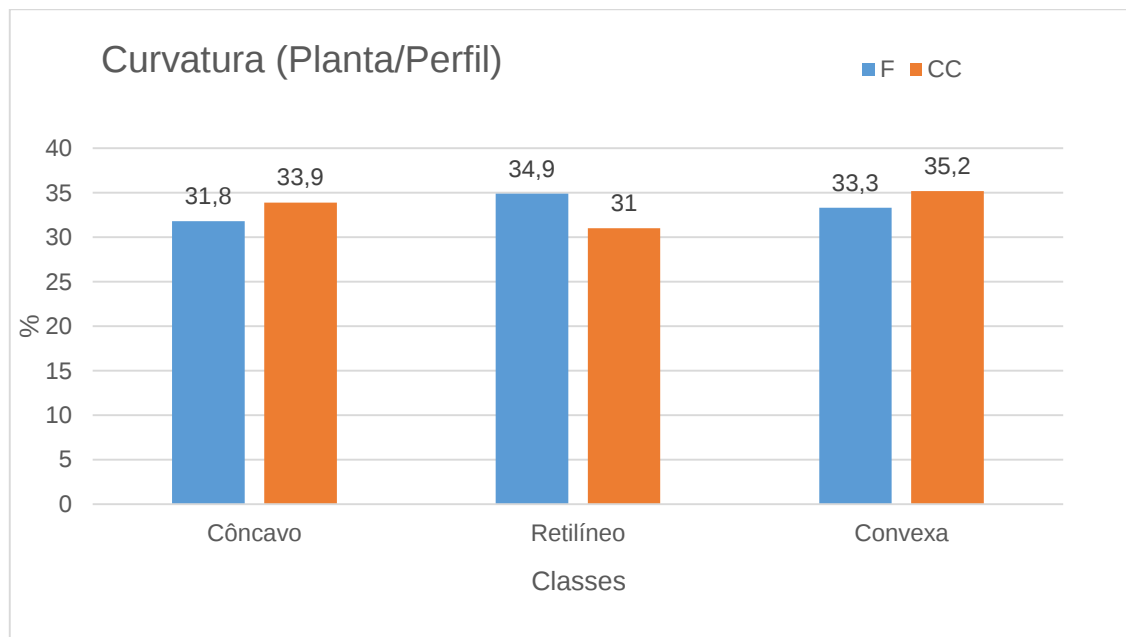


Figura 16: índices F e CC para o parâmetro morfológico de curvatura das encostas

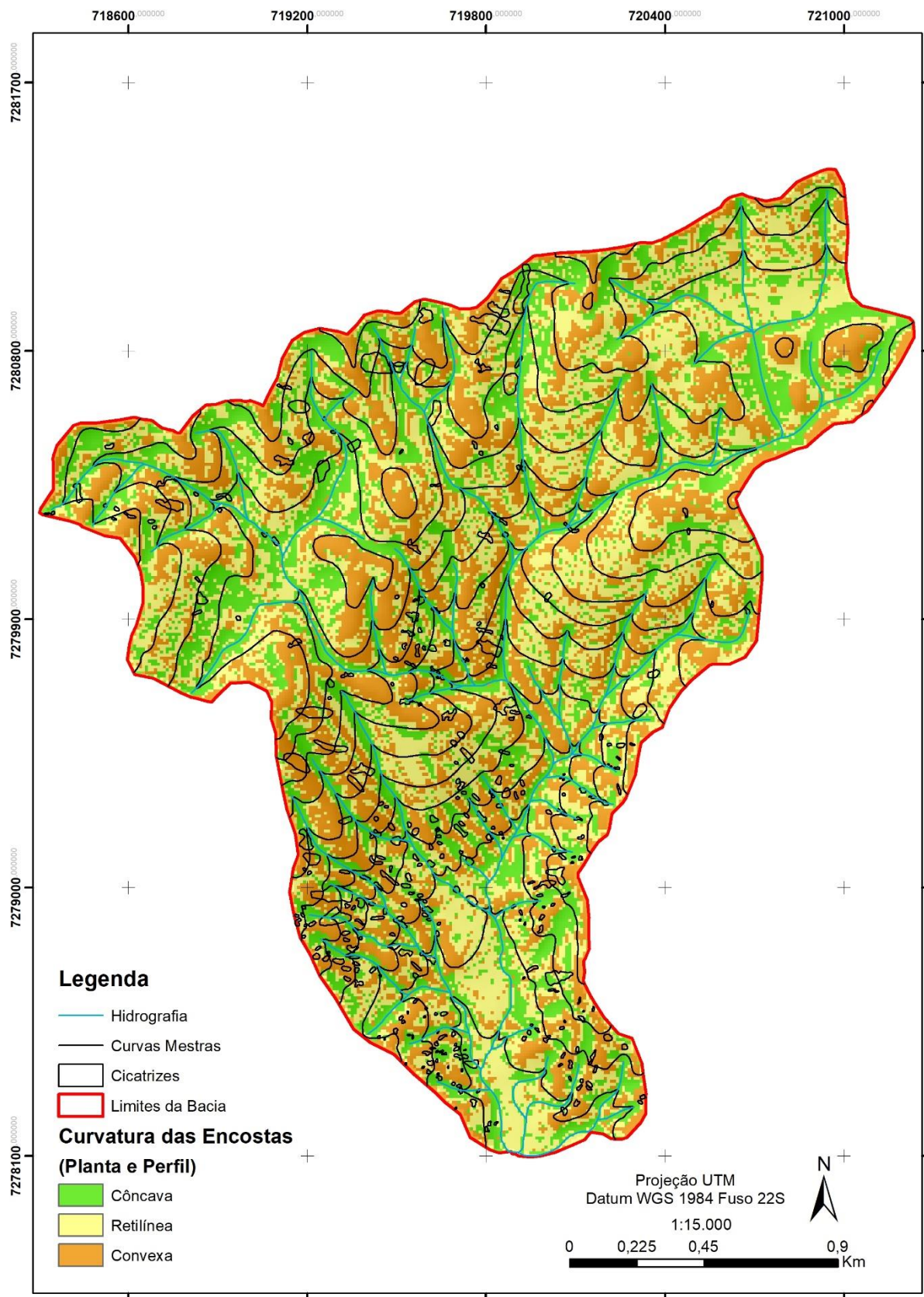


Figura 17: Mapa de curvatura das encostas (Planta e Perfil) para a bacia do rio Alto Gurutuba, Itaóca (SP).

Os índices de F e CC para as áreas contributivas (Figuras 18 e 19) revelaram que aproximadamente 40% da bacia possui áreas de contribuição que tem até 600m², sendo esta a classe que detém o maior índice de CC (39,43%). Nota-se uma tendência geral de decréscimo do índice F conforme aumenta o tamanho da área de contribuição, fato que é também acompanhado pelo decréscimo de CC, sendo que as áreas contributivas de até 2000m² apresentaram um CC total de 84,57%. Isso ocorre, provavelmente, pois as zonas onde a área de contribuição atinge valores elevados corresponde, principalmente, aos fundos de vale e áreas com ângulos de inclinação mais reduzidos, resultado similar ao encontrado por Vieira (2007).

Analisar as áreas contributivas numa avaliação de suscetibilidade a escorregamentos rasos e outros movimentos de massa é de fundamental importância, pois este parâmetro é capaz de relacionar a forma da encosta com processos hidrológicos nela atuantes.

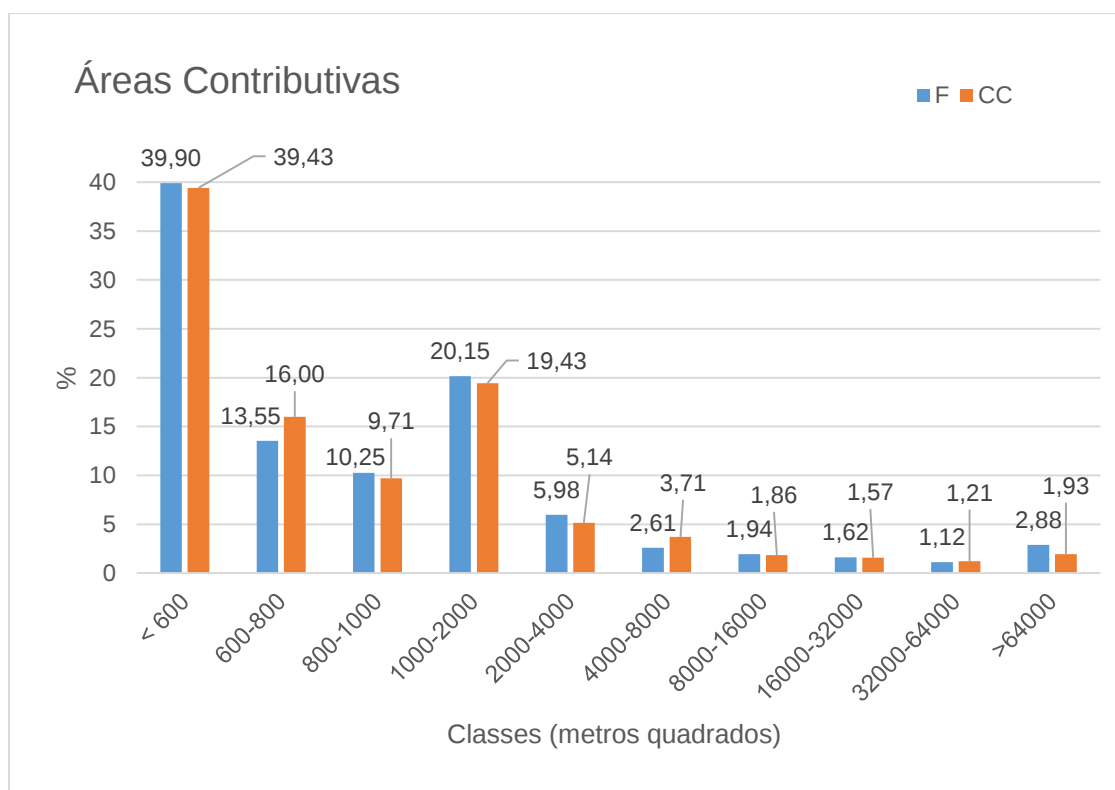


Figura 18: Índices F e CC para o parâmetro morfológico de Áreas Contributivas

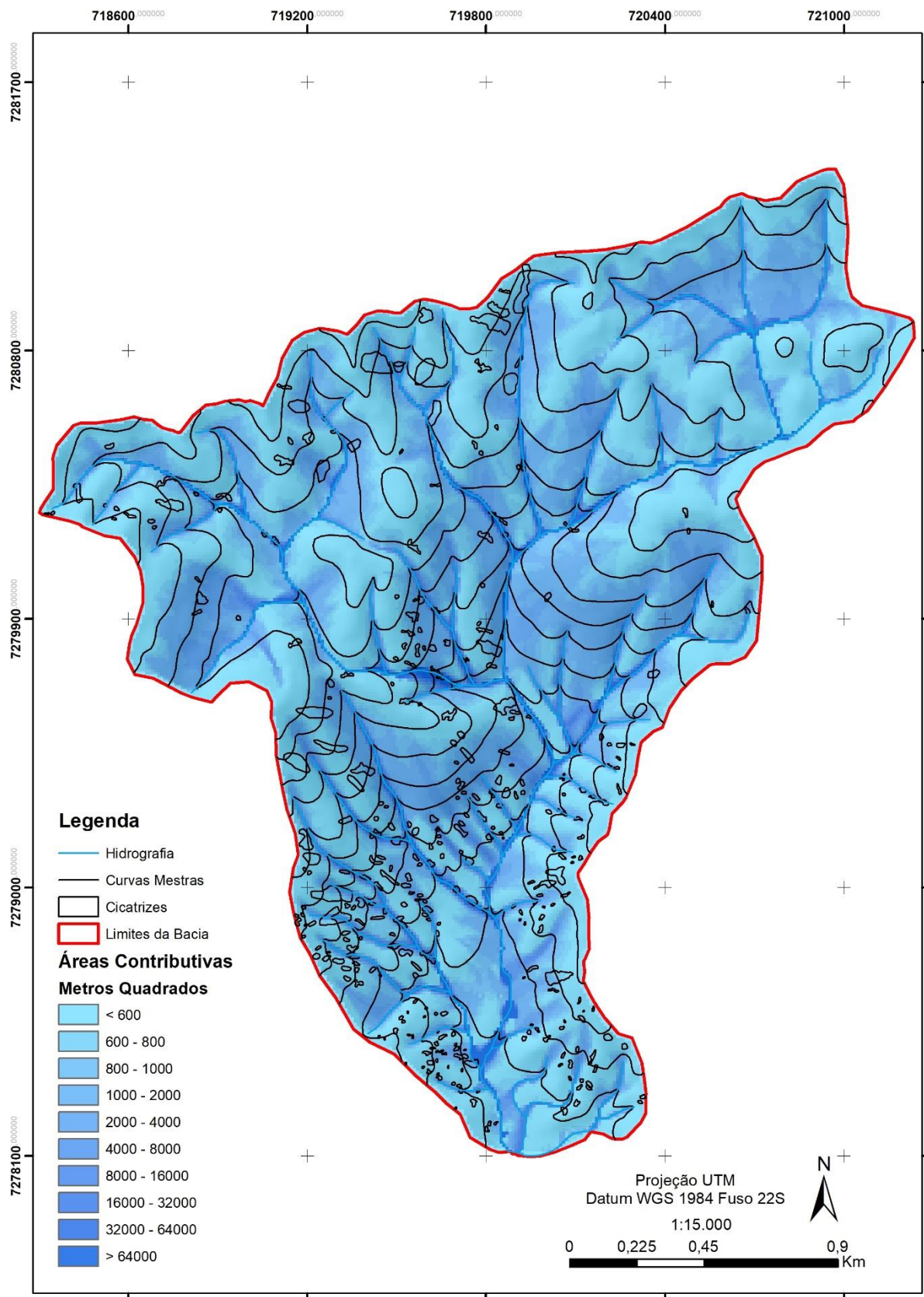


Figura 19: Mapa de Áreas Contributivas da bacia do rio Alto Gurutuba, Itaóca (SP).

4.2 Suscetibilidade a partir do modelo SHALSTAB

Utilizando como *input* os dados apresentados na **Tabela 2**, executamos dois cenários do modelo SHALSTAB em três resoluções diferentes, produzindo seis mapas de suscetibilidade a escorregamentos rasos (**Figura 20**). Estes mapas passaram pela validação com o método da matriz de contingência, tendo sido construída uma curva ROC (*Receiver Operating Characteristics*) para cada um, de modo que pudéssemos avaliar qual obteve melhor performance (**Tabela 3 e Figura 21**).

De um modo geral, nota-se uma superestimação das áreas instáveis, fato evidenciado pelos valores elevados de FPR. Porém, as modelagens realizadas com os parâmetros do cenário 01 apresentaram melhor desempenho, com os menores valores de FPR

Na Figura 20, a curva referente ao cenário 01 (resolução de 20m), apresentou o melhor resultado, com a melhor relação TPR/FPR. Embora o cenário 02 desta resolução possua a melhor TPR, seus índices de Acurácia e Precisão são baixos, sendo este o cenário que apresenta a maior FPR calculada.

Na **Tabela 3**, vemos que o cenário 01 (resolução de 5m) apresentou valores de FPR, ACC e Precisão muito próximos dos obtidos pela melhor modelagem, sendo considerado, portanto, nosso segundo melhor resultado, em lugar do cenário um em resolução de 20m, por motivos explicitados no parágrafo acima. Nesta resolução mais alta, é provável que a superestimação de que falam Montgomery e Dietrich (1994) seja diminuída.

Com o intuito de comparar os resultados obtidos com o SHALSTAB, podemos citar, aqui, o trabalho de Faria *et al.* (2017), que aplicaram a técnica da matriz de contingência para validar suas modelagens em terraços agrícolas da região Norte de Portugal, obtendo índices de TPR e FPR, respectivamente, de 0,77 e 0,67, o que resulta em uma relação TPR/FPR equivalente à 1,14. Nossos resultados apresentam, conforme consta na Tabela 7, valores similares de TPR, mas com um índice de FPR mais reduzido, de aproximadamente 0,533, tanto para a resolução de 5m quanto para a de 20m.

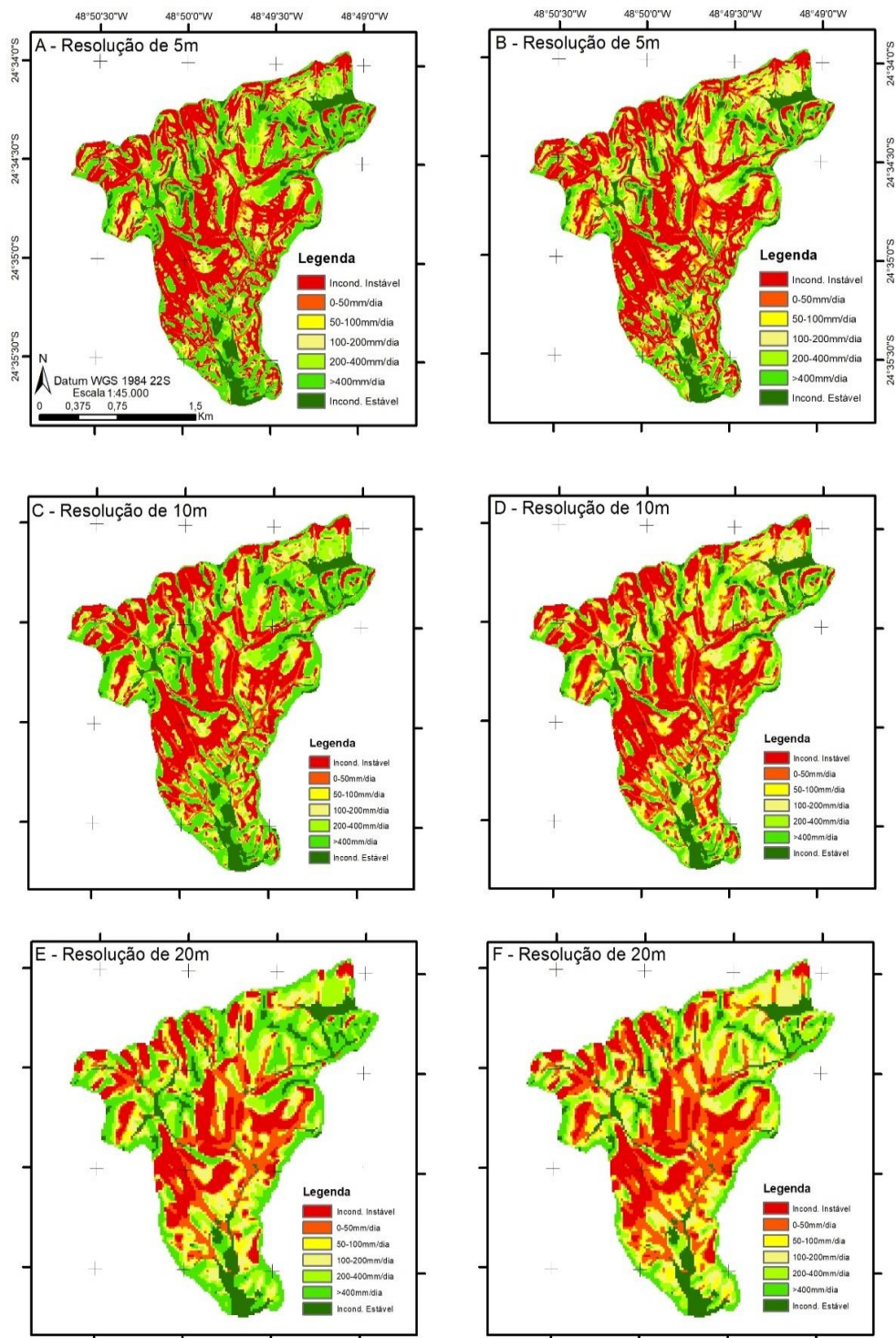


Figura 20: Mapas de suscetibilidade a escorregamentos rasos gerados com o SHALSTAB: (A) cenário 01 em resolução de 5m; (B) cenário 02 em resolução de 5m; (C) cenário 01 em resolução de 10m; (D) cenário 02 em resolução de 10m; (E) cenário 01 em resolução de 20m; e (F) cenário 02 em resolução de 20m.

Tabela 3 – Índices de validação pela matriz de contingência para os seis cenários

Resolução; número do cenário	Índices de Validação				
	TPR	FPR	ACC	Precisão	TPR/FPR
5m; 01	0,743352	0,532	0,476669	0,043228	1,397278
5m; 02	0,822295	0,644	0,370441	0,039666	1,277943
10m; 01	0,752496	0,537	0,471478	0,042497	1,401296
10m; 02	0,845934	0,655	0,359931	0,039301	1,291502
20m; 01	0,78273	0,533	0,477305	0,045558	1,468537
20m; 02	0,880223	0,666	0,351647	0,041189	1,321656

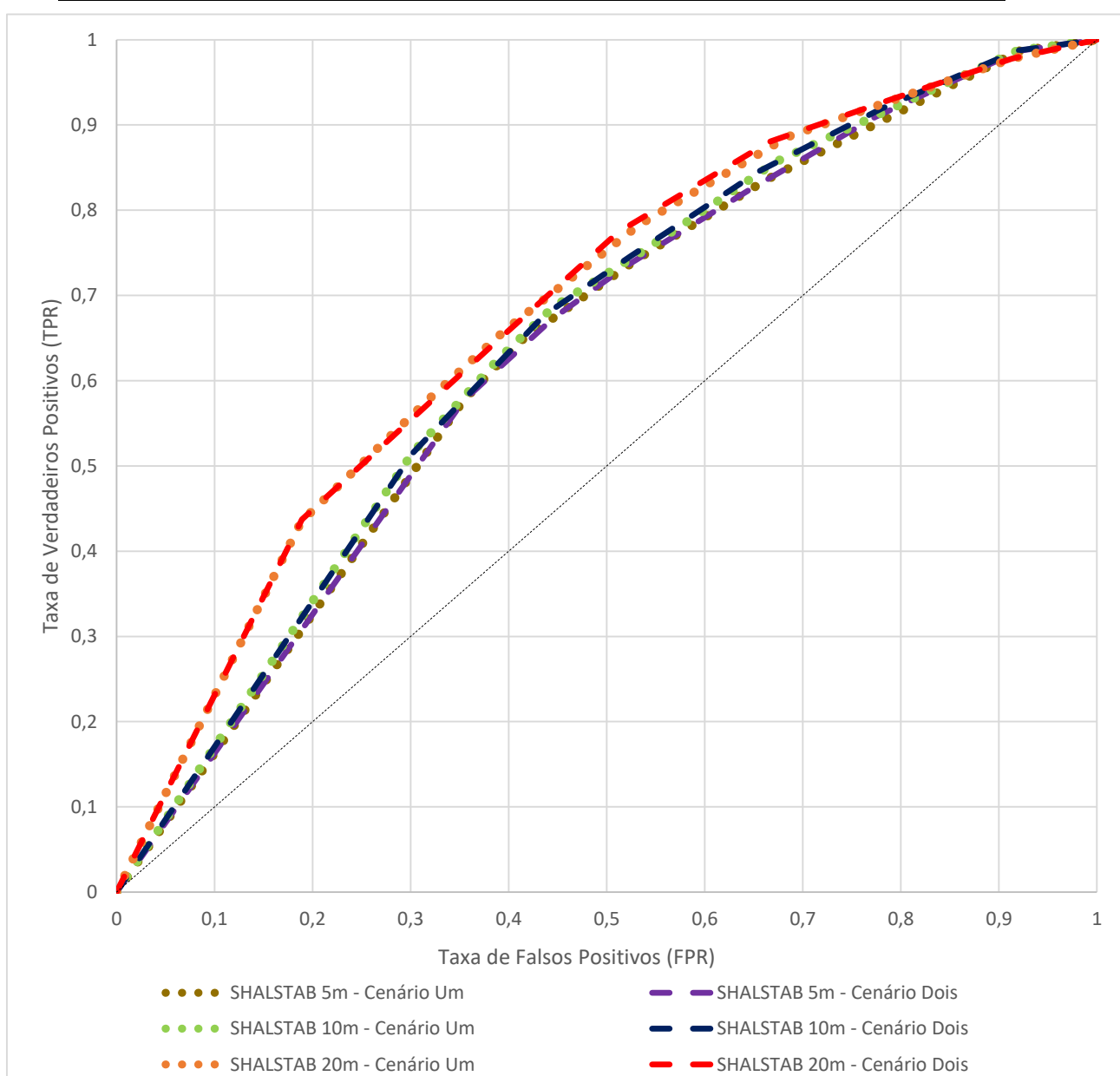


Figura 21: Curvas ROC para cada um dos seis cenários do modelo SHALSTAB. No eixo das abcissas temos a taxa de falsos positivos e, no eixo das ordenadas, a taxa de verdadeiros positivos.

5.3 Valor Informativo

Após calcular o valor informativo para cada parâmetro (Apêndice A, B e C) efetuamos uma análise sensível de cada um para as três resoluções (**Tabela 4 e Figura 22**).

Analizando a **Tabela 4** e a **Figura 22**, é perceptível que a variável que apresenta a melhor taxa de sucesso quando isolada das demais é diferente em cada resolução: em resolução de 5m, tal parâmetro é o aspecto das encostas (0,661029 ou 66,10%), que apresenta taxa muito similar àquelas do ângulo de inclinação (0,623818 ou 62,38%) e da hipsometria (0,611126 ou 61,11%). Na resolução de 10m, a variável com a maior taxa de sucesso é o ângulo de inclinação das encostas (0,636324 ou 66,16%), com o aspecto (0,628026 ou 62,80%) e a hipsometria (0,603847 ou 60,38%) possuindo também taxas elevadas. Por fim, a resolução de 20m apresenta os mesmos três parâmetros com as taxas mais elevadas, sendo que o aspecto detém o maior índice (0,651277 ou 65,12%). Portanto, as variáveis aspecto das encostas (resolução 5m e 20m) e ângulo de inclinação (10m) são as que apresentam melhor relação com as cicatrizes mapeadas.

Tabela 4 – Valores da análise sensível dos parâmetros morfológicos em três diferentes resoluções.

Variável	Taxas de sucesso para as diferentes resoluções		
	5m	10m	20m
Ângulo de Inclinação	0,623818	0,636324	0,634175
Hipsometria	0,611126	0,603847	0,606872
Aspecto	0,661029	0,628026	0,651277
Curvatura (Planta/Perfil)	0,516129	0,504277	0,458922
Posição da média encosta	0,519402	0,515957	0,52944
Áreas Contributivas	0,504973	0,488282	0,559921

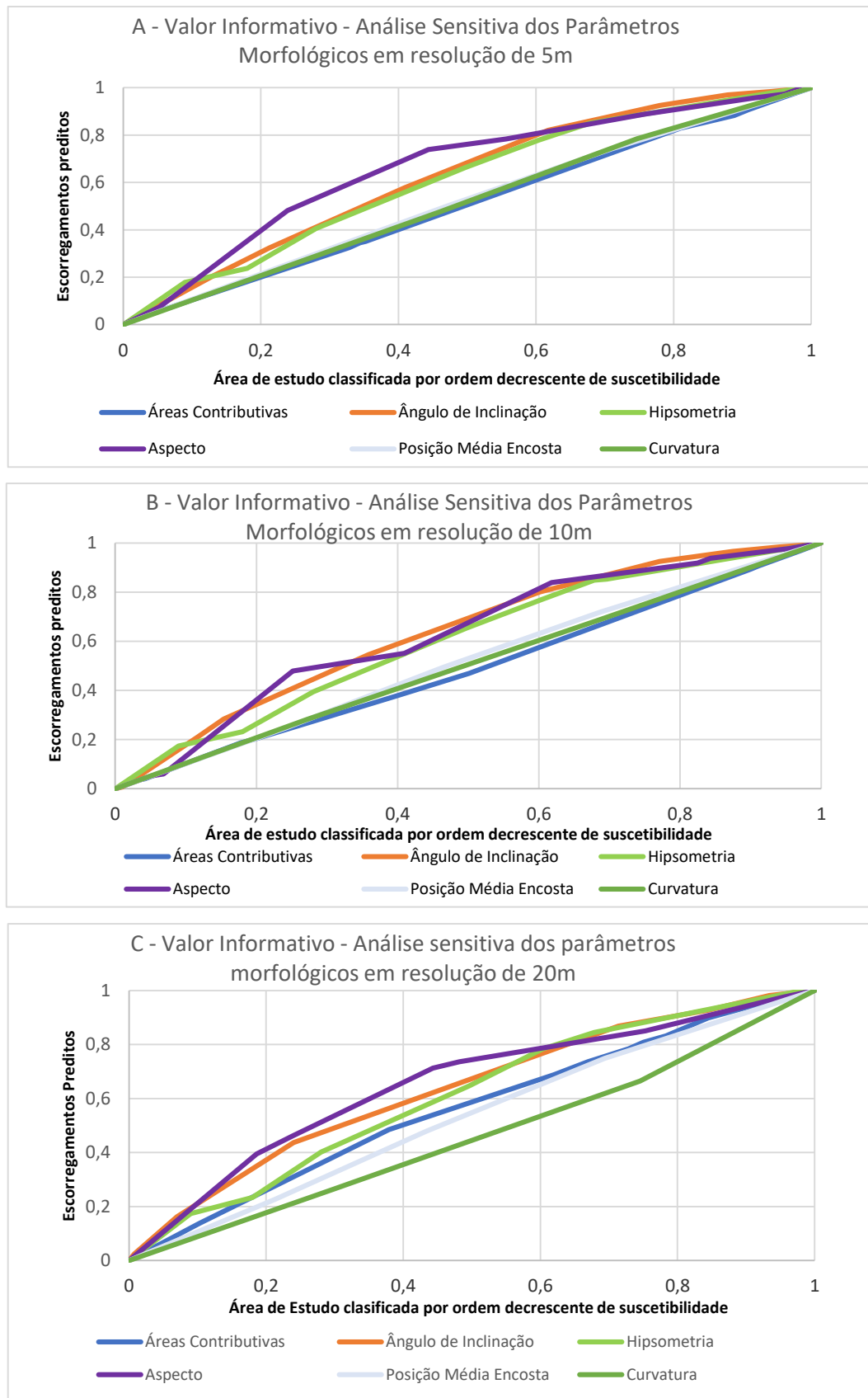


Figura 22: Gráficos das análises sensitivas dos parâmetros morfológicos nas três resoluções. (A) parâmetros derivados de MDT em resolução de 5m; (B) parâmetros derivados de MDT em resolução de 10m; (C) parâmetros derivados de MDT em resolução de 20m.

Os cenários gerados para avaliar se todos os parâmetros são úteis para a modelagem têm seus valores de Taxa de Sucesso para os Grupos de Modelagem e Validação apresentados na **Tabela 5**. Nesta nota-se que os cenários 01 e 02 de cada uma das resoluções apresentaram os melhores resultados, tendo sido estes escolhidos para a validação com a matriz de contingência. Adicionalmente, houve uma queda geral das taxas de sucesso com a redução da resolução e um aumento na qualidade das predições com a retirada do parâmetro de posição da média encosta. Entretanto, optamos por validar e analisar tais dados com o parâmetro Posição da Média Encosta, mesmo sendo constatado tal aumento.

Tabela 5 – Modelagens com o Valor Informativo e suas taxas de sucesso em três resoluções distintas

Resolução	Nº do Cenário	Parâmetros utilizados na Análise	Taxa de Sucesso (Grupo de Modelagem)	Taxa de Sucesso (Grupo de Validação)
5m	1*	Áreas Contributivas; Curvatura; Hipsometria; Aspecto; Ângulo de Inclinação; Posição da Média Encosta	0,761446	0,688719
	2*	Áreas Contributivas; Curvatura; Hipsometria; Aspecto; Ângulo de Inclinação	0,762531	0,692473
	3	Áreas Contributivas; Curvatura; Aspecto; Ângulo de Inclinação	0,725965	0,682988
	4	Áreas Contributivas; Curvatura; Ângulo de Inclinação	0,689288	0,615032
	5	Áreas Contributivas; Ângulo de Inclinação	0,689289	0,615652
10m	1*	Áreas Contributivas; Curvatura; Hipsometria; Aspecto; Ângulo de Inclinação; Posição da Média Encosta	0,730642	0,677698
	2*	Áreas Contributivas; Curvatura; Hipsometria; Aspecto; Ângulo de Inclinação	0,730388	0,685227
	3	Áreas Contributivas; Curvatura; Aspecto; Ângulo de Inclinação	0,681833	0,671499
	4	Áreas Contributivas; Curvatura; Ângulo de Inclinação	0,692389	0,624784
	5	Áreas Contributivas; Ângulo de Inclinação	0,693818	0,623663
20m	1*	Áreas Contributivas; Curvatura; Hipsometria; Aspecto; Ângulo de Inclinação; Posição da Média Encosta	0,76053	0,671972
	2*	Áreas Contributivas; Curvatura; Hipsometria; Aspecto; Ângulo de Inclinação	0,771541	0,68372
	3	Áreas Contributivas; Curvatura; Aspecto; Ângulo de Inclinação	0,726414	0,667492
	4	Áreas Contributivas; Curvatura; Ângulo de Inclinação	0,712183	0,626212
	5	Áreas Contributivas; Ângulo de Inclinação	0,711618	0,629761

***Cenários selecionados para comparação com o modelo SHALSTAB**

Para essa segunda etapa de validação, foi necessário classificar os mapas em classes de suscetibilidade (Figura 23), determinadas de acordo com as quebras na geometria da curva da taxa de sucesso (Apêndice D) de acordo com o que sugere Pereira (2009). Os índices de validação pela matriz de contingência são apresentados na **Tabela 6** as curvas ROC de cada cenário na **Figura 24**.

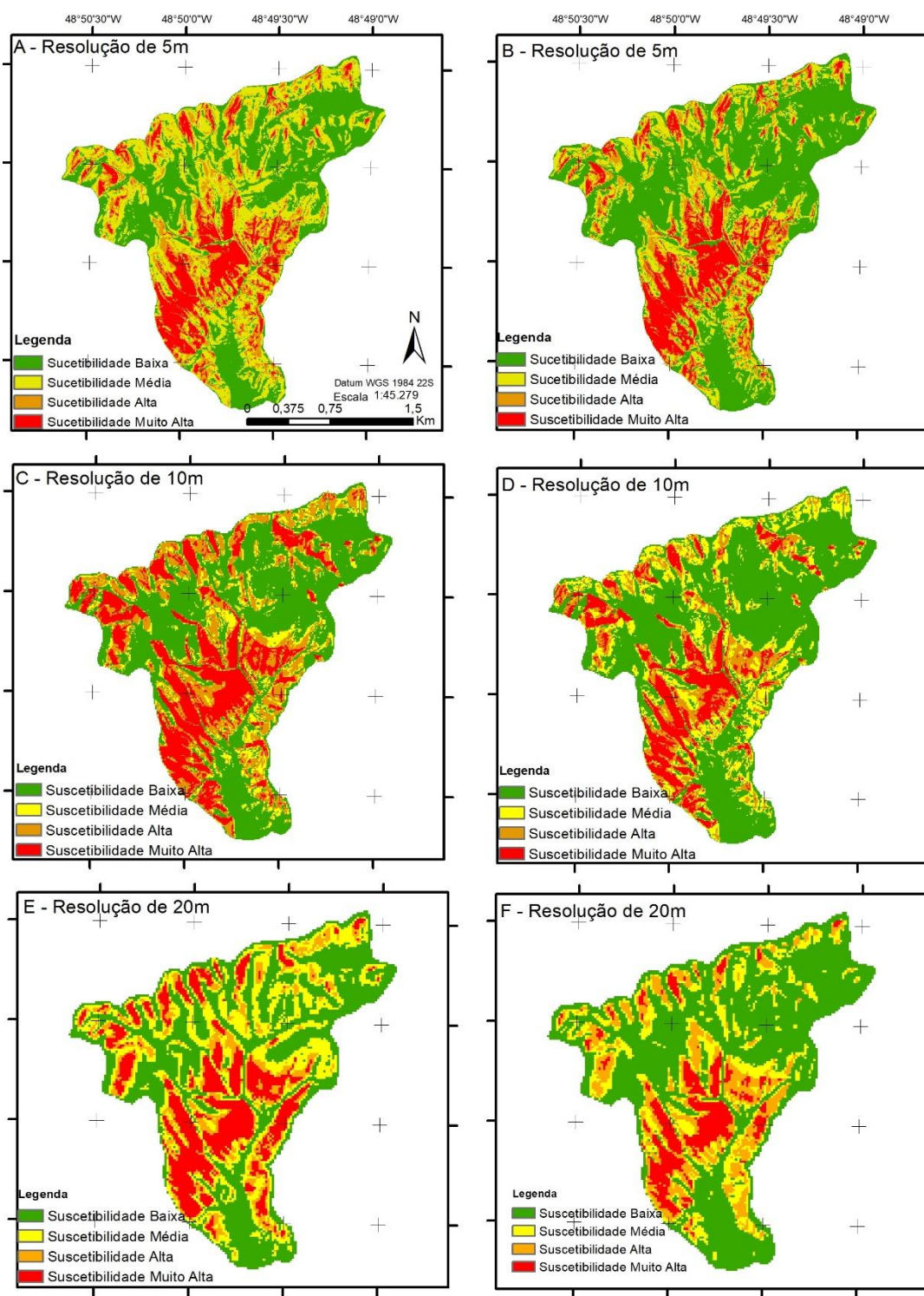


Figura 23: Mapas de suscetibilidade a escorregamentos rasos gerados pela metodologia do Valor Informativo e classificados em cinco classes de suscetibilidade. (A) Cenário Um em resolução de 5m; (B) Cenário Dois em resolução de 5m; (C) Cenário Um em resolução de 10m; (D) Cenário Dois em resolução de 10m; (E) Cenário Um em resolução de 20m; (F) Cenário Dois em resolução de 20m

Tabela 6 - Índices de validação pela matriz de contingência para os seis cenários

Resolução; número do cenário	Índices de Validação									
	Grupo de Modelagem					Grupo de Validação				
	TPR	FPR	ACC	Precisão	TPR/FPR	TPR	FPR	ACC	Precisão	TPR/FPR
5m; 1	0,662579	0,288	0,711065	0,037252	2,299672	0,57222	0,29	0,707829	0,028866	1,97231
5m; 2	0,654407	0,276	0,722539	0,038298	2,368329	0,569424	0,278	0,719492	0,029902	2,046464
10m; 1	0,793011	0,437	0,56718	0,029228	1,816487	0,684444	0,439	0,563082	0,022887	1,560023
10m; 2	0,61828	0,272	0,726042	0,036286	2,271647	0,533333	0,274	0,723171	0,028398	1,946621
20m; 1	0,732984	0,323	0,678321	0,037234	2,272049	0,616766	0,325	0,67394	0,027394	1,896511
20m; 2	0,65445	0,26	0,738871	0,041132	2,520105	0,580838	0,262	0,736067	0,031918	2,220098

Na **Figura 24**, podemos apontar como nossa melhor modelagem o cenário 02 (resolução de 20m), que apresentou o melhor índice de TPR/FPR tanto no Grupo de Modelagem quanto no Grupo de Validação. O cenário 01 (resolução 10m) apresentou o pior índice de TPR/FPR em ambos os grupos. De um modo geral, o cenário 01 nas três resoluções apresentou índices de validação inferiores aos do cenário 02, diferença que pode ser inteiramente atribuída a presença na modelagem, no cenário 01, do parâmetro morfológico de Posição da Média Encosta.

De acordo com Guzzetti (2006), valores de taxa de sucesso de entre 0,75 e 0,8 (75-80%) correspondem a uma avaliação aceitável, mas que ainda pode ser melhorada, já que taxas acima de 0,8 (80%) são consideradas boas ou excelentes. Afungang *et al.* (2017), aplicaram o modelo do valor informativo na região de Bamenda (Camarões), com resultados considerados excelentes, apresentando taxas de sucesso da ordem de 0,9 (90%), com índices de TPR e FPR de 0,87 e 0,21, respectivamente. Este trabalho tem valores de FPR similares para o melhor cenário (0,26)., embora não tenha apresentado TPR elevadas como o de Afungang *et al.* (2017)

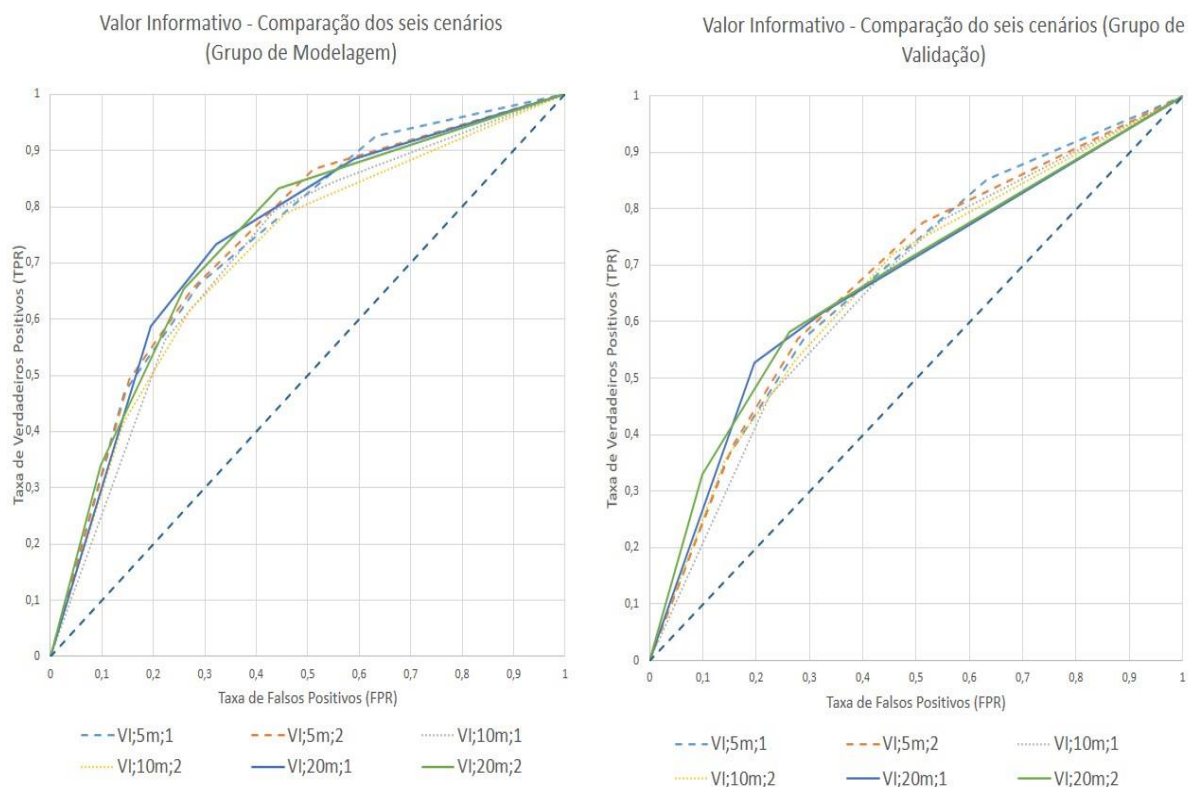


Figura 24: Curvas ROC para cada os seis cenários selecionados do Valor Informativo, nos Grupos de Modelagem e de Validação. No eixo das abcissas temos a taxa de falsos positivos e, no eixo das ordenadas, a taxa de verdadeiros positivos

5.4 Comparação SHALSTAB x Valor Informativo

Com base nas validações executadas foi possível selecionar dentre as análises de suscetibilidade aquelas que apresentavam um melhor resultado (Tabela 7) A TPR mais elevada foi atingida pelo cenário 01 (resolução de 20m) do modelo SHALSTAB, seguido pelo cenário 01 (resolução de 5m) também do SHALSTAB e do cenário 01 (resolução de 20m) do Valor Informativo.

Mesmo no caso do Grupo de Validação do Valor Informativo, a relação TPR/FPR foi superior ao SHALSTAB, com valores de TPR em média 10% piores que o do SHALSTAB. É verdadeiro que as FPR do SHALSTAB foram mais elevadas que do Valor Informativo, sendo que o método estatístico também apresenta uma acurácia, precisão e relação TPR/FPR superiores ao modelo de bases físicas. A Figura 25 traz a curva ROC destes cenários selecionados.

Tabela 7 – Índices de validação pela matriz de contingência para os melhores cenários modelados com cada um dos dois modelos aplicados

Método; Resolução; número do cenário	Índices de Validação									
	Grupo de Modelagem					Grupo de Validação				
	TPR	FPR	ACC	Precisão	TPR/FPR	TPR	FPR	ACC	Precisão	TPR/FPR
VI; 5m; 2	0,654407	0,276	0,722539	0,038298	2,368329	0,569424	0,278	0,719492	0,029902	2,046464
VI; 20m; 1	0,732984	0,323	0,678321	0,037234	2,272049	0,616766	0,325	0,67394	0,027394	1,896511
VI; 20m; 2	0,65445	0,26	0,738871	0,041132	2,520105	0,580838	0,262	0,736067	0,031918	2,220098
SHALSTAB; 5m; 1	0,743352	0,532	0,476669	0,043228	1,397278	-	-	-	-	-
SHALSTAB; 20m; 1	0,78273	0,533	0,477305	0,045558	1,468537	-	-	-	-	-

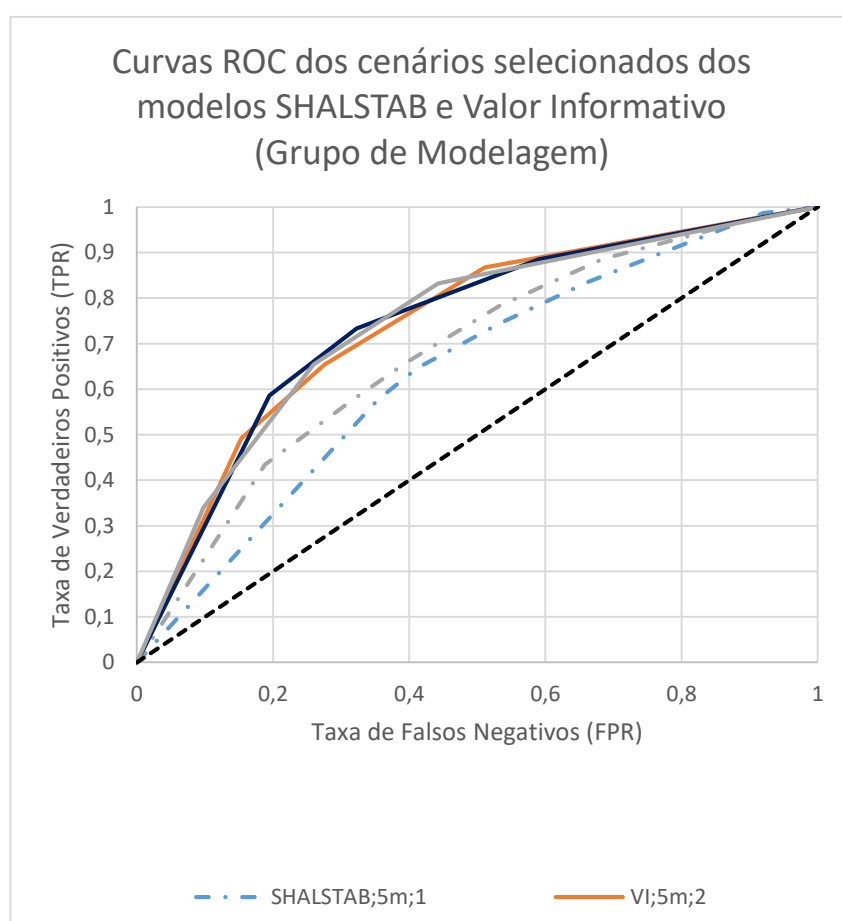


Figura 25: Curvas ROC para os cenários selecionados dos dois modelos. No eixo das abcissas temos a taxa de falsos positivos e, no eixo das ordenadas, a taxa de verdadeiros positivos

Embora o SHALSTAB tenha apresentado taxas de acerto altas (Figura 25) as altas taxas de falsos positivos fazem com que as predições tenham um desempenho abaixo do obtido pelos cenários do modelo estatístico. Há uma superestimação de áreas instáveis nas modelagens com o SHALSTAB, que é mais reduzida no Valor

Informativo, sendo que uma das causas prováveis é a ausência de dados para alimentar o modelo de bases físicas que sejam específicos para a área de estudo.

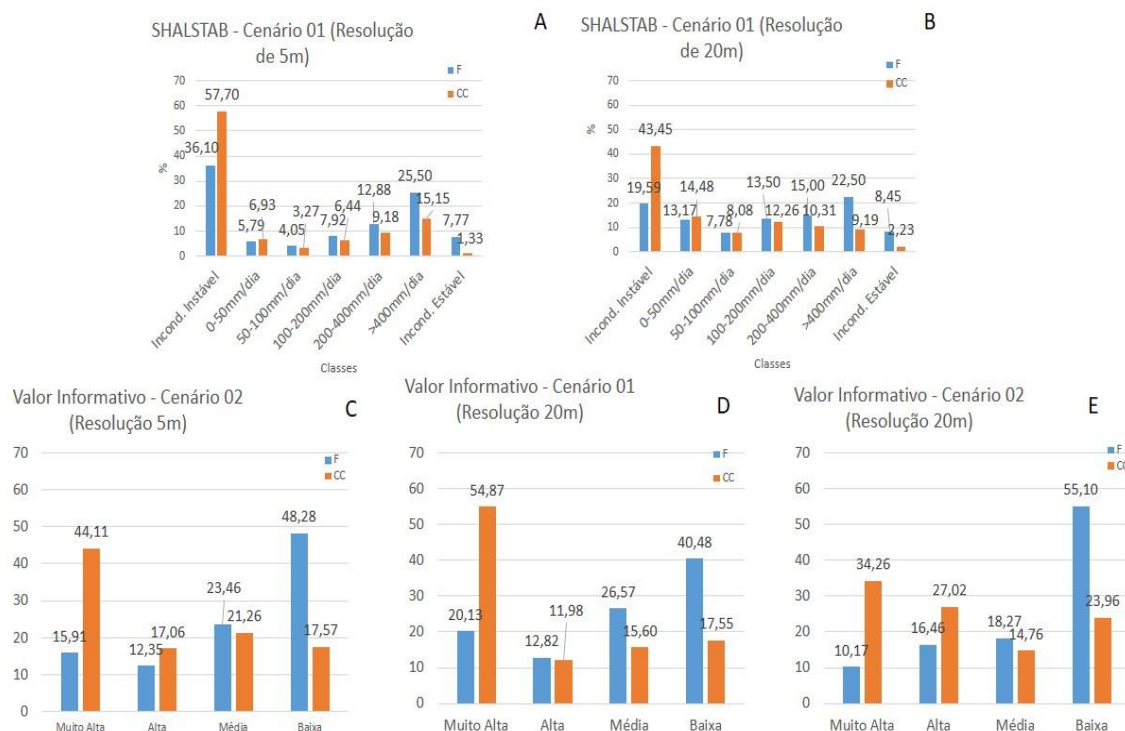


Figura 26: Gráficos de F e CC para os cenários selecionados para comparação. (A) Índices de F e CC para o cenário 01 do SHALSTAB (resolução de 5m); (B) cenário 01 do SHALSTAB (resolução de 20m); (C) cenário 02 (resolução de 5m) do Valor Informativo; (D) cenário 01 (resolução de 20m) do Valor Informativo; e (E) cenário 02 (resolução de 20m) do Valor Informativo.

O cenário 01 (resolução de 5m) do SHALSTAB (Figura 26A), apresentou, em sua classe mais instável (Incondicionalmente instável) um CC de 57,70% numa área que representa 36,10% da área total da bacia. Este índice mantém-se baixo até a classe de total de chuva >400mm/dia para desencadear os processos, considerada estável, mas que concentra 15,15% das cicatrizes. Já o cenário 01 (resolução de 20m) do SHALSTAB (Figura 26B) possui uma classe incondicionalmente instável consideravelmente menor que o anterior, mas que concentra 43,45% das cicatrizes do evento de 2014, o que indica uma superestimação menor de áreas instáveis. Nas classes consideradas estáveis e na incondicionalmente estável, o índice CC decai juntamente com F, reforçando a indicação de uma superestimação de áreas instáveis por parte do modelo.

O cenário 02 (resolução de 5m) do Valor Informativo (Figura 26C), apresentou em sua classe de suscetibilidade Muito Alta (15,91% da bacia) um CC de 44,11%. Neste cenário a classe de suscetibilidade Baixa tem a maior extensão (48,28%) e o segundo menor CC (17,57%). Para o cenário 02 (resolução de 20m) do Valor Informativo (Figura 26D), 20% da área foi classificada com suscetibilidade Muito Alta e 40,48% com suscetibilidade Baixa, com CC de 54,87% e 17,55%, respectivamente.

No cenário 02 (resolução de 20m) do Valor Informativo (Figura 26E), fica evidente o motivo da melhor relação TPR/FPR desta modelagem, que apresentou CC de 34,26% na classe de suscetibilidade Muito Alta, que tem o menor índice de F entre todas as modelagens feitas com o Valor Informativo (10,17%). Já a classe de suscetibilidade Baixa perfaz 55,10% da área total, com CC de 23,96%.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fica claro que o modelo do Valor Informativo teve melhor performance na análise de suscetibilidade a escorregamentos rasos para bacia do Rio Gurutuba. Também podemos apontar que, para este modelo e área de estudo, os produtos derivados de MDTs com 5 e 20m de resolução são mais adequados.

O modelo SHALSTAB não apresentou resultados que fossem tão satisfatórios quanto o Valor Informativo, mas isso não significa que o modelo seja inadequado para avaliações de suscetibilidade na área de estudo. É possível que novos trabalhos nesta bacia hidrográfica concluam que o SHALSTAB tem melhor performance, chance esta que é elevada caso estes trabalhos utilizem parâmetros calculados especificamente para a área de estudo e que sejam distribuídos e variáveis espacialmente, uma das funcionalidades disponíveis no SAGA GIS, não utilizada aqui devido à grande quantidade de dados necessários para realizar as interpolações.

A ausência dos dados hidrológicos e geotécnicos para o SHALSTAB específicos para a área de estudo, uma das dificuldades possíveis apontadas no início do trabalho, foi encontrada aqui. Porém a ausência destes dados não comprometeu a pesquisa. Conforme apontado anteriormente, há poucos trabalhos deste tipo para a região estudada, o que reafirma a importância da pesquisa.

Para trabalhos futuros com o modelo do Valor Informativo, é interessante que sejam incluídos como fatores condicionantes os parâmetros referentes a litologia, densidade de falhas, vegetação e uso da terra, que são apontados por diversos dos autores citados neste trabalho como possuidores de correlação significativa com a ocorrência de escorregamentos rasos.

Referências

- ARISTIZÁBAL, E.; GARCÍA, E.; MARTÍNEZ, C. **"Susceptibility assessment of shallow landslides triggered by rainfall in tropical basins and mountainous terrains"**. Natural Hazards, v.78, 621-634, 2015.
- AFUGANG, R. N.; BATEIRA, C.V.M.; NKWEMOH, C.A. **Assessing the spatial probability of landslides using GIS and informative value model in the Bamenda Highlands**. Arabian Journal of Geosciences, 10, 2017.
- AUGUSTO FILHO, O. **O estudo das corridas de massa em regiões serranas tropicais: um exemplo de aplicação no município de Ubatuba, SP**. Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 7, Poços de Caldas. ABGE. Volume 2, p. 63 – 70, 1993.
- BIERMAN, P.R. & MONTGOMERY, D.R. **Hillslope**. In: Key Concepts in Geomorphology. New York: Freeman and Company Publishers, 145-178, 2014
- BIGARELLA, J.J. **Eventos Catastróficos no Brasil**. In: BIGARELLA, J.J. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. Florianópolis: Editora UFSC, v.3, 1994.
- BONINI, J.E.; VIEIRA, B.C.; MARTINS, T.D.; e GRAMANI, M. **Parâmetros morfológicos e os escorregamento na bacia do rio Gurutuba, Vale do Ribeira (SP)**. Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada – XVII SBGFA, Campinas, São Paulo, Brasil, 2017.
- BROLLO, M. J.; SANTORO, J.; PENTEADO, D. R.; SILVA, P. C. F.; RIBEIRO, R. R. **Itaóca (SP): Histórico de acidentes relacionados a perigos geológicos**. 14º Simpósio de Geologia do Sudeste / 8º Simpósio do Cretáceo do Brasil, Campos do Jordão (SP), 2015.
- CARRARA, A.; CARDINALLI, M.; DETTI, R.; GUZZETTI, F.; PASQUI, V.; e REINCHENBACH, P. **GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard**. Earth Surface Processes and Landforms, v. 16, n.5, p. 427-445, 1991.
- CAROU, C. B.; VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D.; GRAMANI, M. F.. **Inventário dos escorregamentos da Bacia do rio Gurutuba, Vale do Ribeira (SP)**. Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada – XVII SBGFA, Campinas, São Paulo, Brasil, 2017.
- CHUNG-JO, F.C.; e FABBRI, A.G. **Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping**. Natural Hazards, v.30, 451-472, 2003
- COELHO NETTO, Ana Luiza; SATO, Anderson Mululo; AVELAR, André de Souza; VIANNA, Lílian Gabriela G.; ARAÚJO, Ingrid S.; FERREIRA, David L. C.; LIMA, Pedro H.; SILVA, Ana Paula A.; & SILVA, Roberta P. **January 2011: the extreme**

- landslide event in Brazil.** Proceedings of the Second World Landslide Forum, Roma (Itália), 2011.
- CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; e BÖHNER, J. **System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4.** Geosci. Model Dev., v. 8, p. 1991-2007, 2015.
- COSTA, J.E. **Physical geomorphology of debris flows.** In: COSTA, J.E. e FLEISHER, J.P. (orgs.), Developments and applications of geomorphology. Nova Iorque: Springer-Verlag, p.268-317.
- CROSTA, G.B. e FRATTINI, P. **Distributed Modelling of Shallow Landslides Triggered by Intense Rainfall.** Natural Hazards and Earth System Science, v. 3, p. 81-93, 2003.
- CROZIER, M.J. **Classification of Slope Movement.** In: Landslides: Causes, Consequences & Environment. Routledge London & New York, p. 3-31, 1986.
- DIAS, V. C. **Corridas de Detritos na Serra do Mar Paulista: Parâmetros morfológicos e índice de potencial de magnitude e suscetibilidade.** Dissertação (Mestrado). São Paulo. Universidade de São Paulo. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Geografia. 2017, 129p.
- DIETRICH, W. e MONTGOMERY, D.R. **SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential.** NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), p. 29, 1998.
- DE PLOEY, J.; CRUZ, O. **Landslides in the Serra do Mar, Brazil.** CATENA, v.6, p. 111-122, 1979
- FALEIROS, F.M. **Evolução de terrenos tectono-metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR).** Tese (Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2008.
- FALEIROS, F. M. *et. al.* **Geologia e recursos minerais da Folha Apiaí – SG.22-X-B-V, Estados de São Paulo e Paraná, Escala 1:100.000.** São Paulo: CPRM, 107 P. 2012.
- FARIA, A.; BATEIRA, C.; LAURA, S.; FERNANDES, J.; GONÇALVES, J.; e MARQUES, F. **Landslide susceptibility evaluation on agricultural terraces of Douro Valley (Portugal), using physically based mathematical models.** Geophysical Research Abstracts, v.18, 2016.
- FARIA, A.; BATEIRA, C.V.M; OLIVEIRA, S.; FERNANDES, J.; MARQUES, F. **Avaliação de suscetibilidade a Movimentos de Vertente em Terraços Agrícolas pela aplicação de modelos matemáticos de base física.** Revista do Departamento de Geografia, v. 33, pp. 1-11, 2017.
- FAWCETT, T. **An introduction to ROC analysis.** Pattern Recognition Letters, v.27, 861-874, 2006.
- FERNANDES, J.; BATEIRA, C.; FONSECA, B.; e MOURA, R. **Electrical resistivity and spatial variation in agriculture terraces: statistical correlation between ERT and flow direction algorithms.** Open Agriculture, 2: 329-340, 2017.
- FERNANDES, N.F., GUIMARÃES, R.F, GOMES, R.A.T. VIEIRA, B.C., MONTGOMERY, D.R. e GREENBERG, H. **Topographic Controls of Landslides**

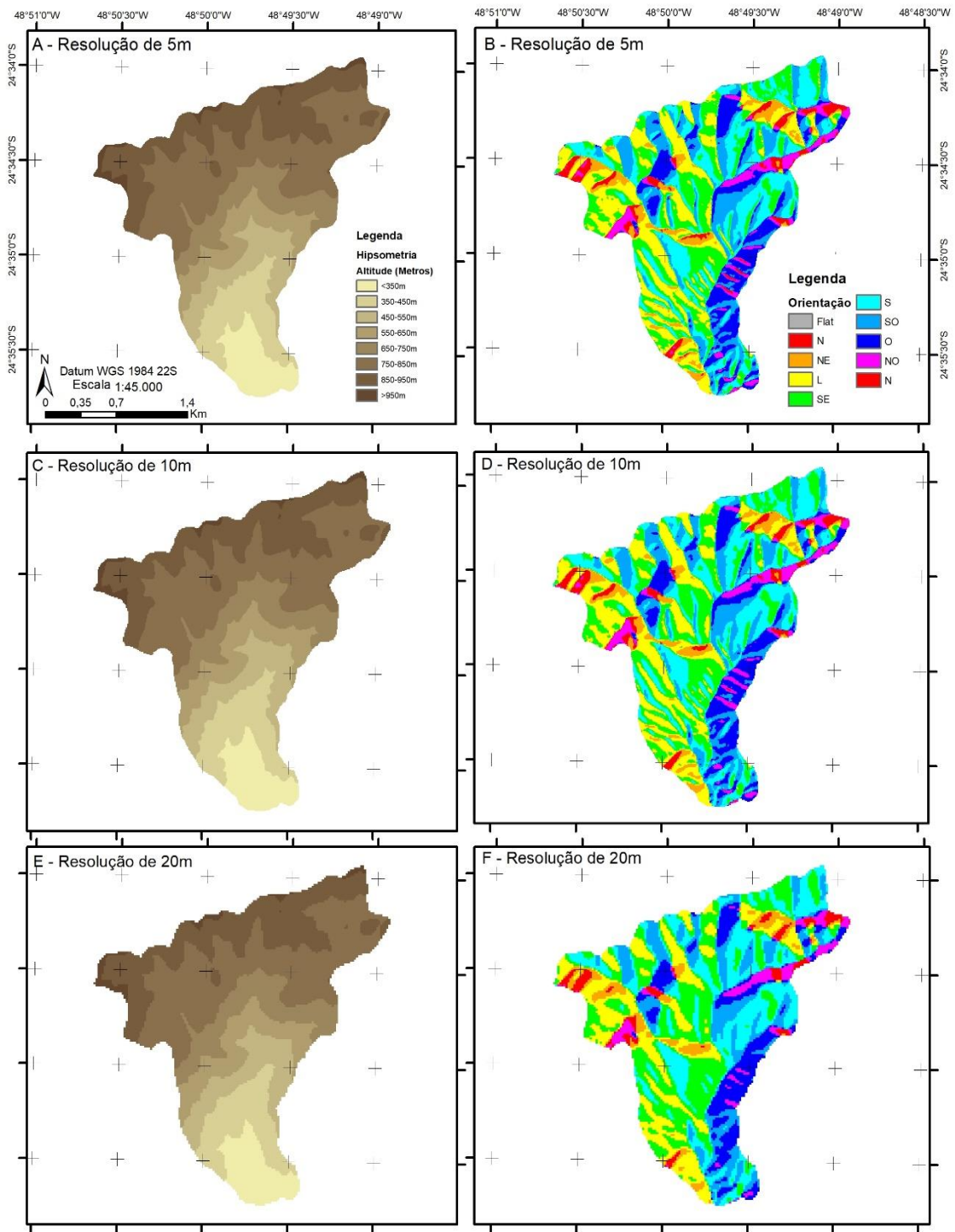
- in Rio de Janeiro: Field Evidence and Modeling. CATENA, v. 55, p. 163-181, 2004.
- FRATTINI, P.; CROSTA, G.; CARRARA, A. **Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models**. Engineering Geology, v. 111, p. 62-72, 2010.
- GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JR., O. A.; FERNANDES, N. F.; VARGAS JR., E.; MARTINS, E. S. **Identification of the affected areas by mass movement through a physically based model of landslide hazard combined with an empirical model of debris flow**. Natural Hazards, v. 45, p. 197-209, 2008.
- GOMES, M.C.V. e VIEIRA, B.C. **Saturated Hydraulic conductivity of soils in a Shallow Landslide Area in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil**. Zeitschrift für Geomorphologie, n. 60, p. 53-65, 2016.
- GRAMANI, M.F.; ARDUIN, D.H. **Morfologia da drenagem e dos depósitos de debris flow em Itaóca, São Paulo**. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Anais, 15, Bento Gonçalves, 2015.
- GRAMANI, M.F. **A corrida de massa no córrego Guarda-Mão, município de Itaóca (SP): Impactos e observações de campo**. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Anais, 15, Bento Gonçalves, 2015.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. Segunda Ed. São Paulo: Editora Blucher, 1983.
- GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.; ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; e GALLI, M. **Estimating the quality of landslide susceptibility models**. Geomorphology, 81 (1-2), 166-184, 2006.
- HAGGET, P. e CHORLEY, R. "Modelos, paradigmas e a Nova Geografia". In: CHORLEY, R. e HAGGET, P. **"Modelos Integrados em Geografia"**. 1967. Rio de Janeiro: EDUSP, 1974.
- HARVEY, D. "Modelos da evolução dos padrões espaciais na geografia humana". In: CHORLEY, R. e HAGGET, P. **"Modelos Integrados em Geografia"**. 1967. Rio de Janeiro: EDUSP, 1974.
- HUNGR, O.; EVANS, S.G.; BOVIS, M. **A review of the classification of landslides of the flow type**. Environmental & Engineering Geoscience, v. VII, nº3, p. 221-238, 2001.
- IETTO, F.; PERRI, F.; CELLA, F. **Geotechnical and landslide aspects in weathered granitoid rock masses (Serre Massif, southern Calabria, Italy)**. Catena, v. 145, p. 301-315, 2016.
- JADE, S. e SARKAR, S. **Statistical models for slope instability classification**. Engineering Geology, 36, p.91-98, 1993.
- KIM, M.S.; ONDA, Y.; KIM, J. K.; KIM, S.W. **Effect of topography and soil parametrization representing soil thicknesses on shallow landslide modelling**. Quaternary International, v. 384, p. 91-106, 2015.
- KRANK, K.D.; WATTERS, R.J. **Geotechnical properties of weathered Sierra Nevada Granodiorite**. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 20, v. 2, p. 173-184, 1983.

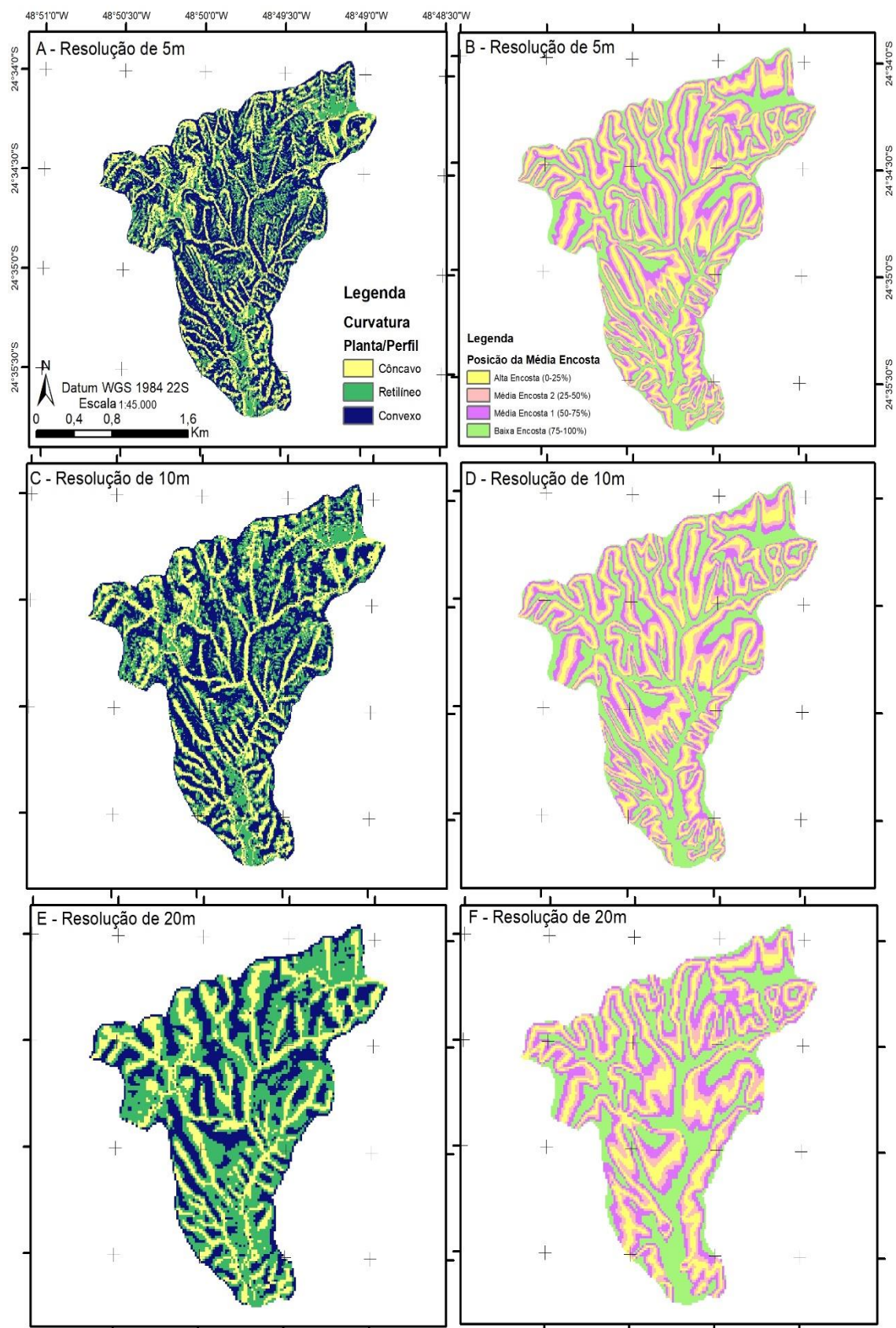
- LAN, H. X.; ZHOU, C. H.; WANG, L. J.; ZHANG, H. Y.; LI, R. H. **Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China**. Engineering Geology, v. 76, p. 109-128, 2004.
- LIN, C.C.; GRAMANI, M.F.; CAMPOS, A. B. **Levantamento das cicatrizes de deslizamentos na bacia do Rio Gurutuba (SP) e correlações com parâmetros físicos**. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Belo Horizonte – MG, 2016.
- LISTO, F. L. R. e VIEIRA, B. C. **Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil**. Geomorphology, v. 69, p. 30-44, 2012.
- LOPEZ-VICENTE, M.; BIELSA, C.P.; LOPEZ-MONTERO, T.; LAMBAN, L.J.; NAVAS, A. **Runoff simulation with eight different flow accumulation algorithms: Recommendations using a spatially distributed and open-source model**. Environmental Modelling & Software, v. 62, p. 11-21, 2014.
- MANTOVANI, F.; GRACIA, F.J.; COSMO, P.D.; SUMA, A. **A new approach to landslide geomorphological mapping using Open Source software in the Olvera Area (Cadiz, Spain)**. Landslides, v. 7, n. 1, p. 69-74, 2010.
- MEIS, M. R. M. & SILVA, J. X. **Considerações geomorfológicas a propósito dos movimentos de massa ocorridos no Rio de Janeiro**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 30, n.1, 1968.
- MEISINA, C. e SCARABELLI, S. **A Comparative Analysis of Terrain Stability Models for Predicting Shallow Landslides in Colluvial Soils**. Geomorphology, v. 87, p. 207-223, 2007.
- MELLO, I.S.C.; BETTENCOURT, J.S. **Geologia e Gênese das Mineralizações associadas ao Maciço Itaoca, Vale do Ribeira, SP e PR**. Revista Brasileira de Geociências, v. 28, n. 3, p. 269-284, 1998.
- MONTGOMERY, D.R. e DIETRICH, W.E. **A physically based model for topographic controls on shallow landsliding**. Water Resources Research, v. 30, p. 1153-1171, 1994.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E.; SULLIVAN, K. **The Role of GIS in Watershed Analysis. Landform Monitoring, Modelling and Analysis**. John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- NERY, T. D.; VIEIRA, B.C. **Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model**. Bull. Eng. Geol. Environ, v. 74, p. 369-378, 2015.
- O'LOUGHLIN, E.M.O. **Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis**. Water Resources Research, v. 22, n. 5, p. 794-804, 1986.
- ORLOV, T.V.. SADKOV, S.A. **Studying karst relief in Eastern Lago-Naki Plateau using LIDAR and high-resolution aerial photographs**. Water Resources, v. 43, n. 7, p. 1023-1033, 2016.
- PEREIRA, S.S. **“Perigosidade a movimentos de vertente na região Norte de Portugal”** Tese (Doutorado em Geografia Física). Faculdade de Letras, Universidade do Porto, 2009.

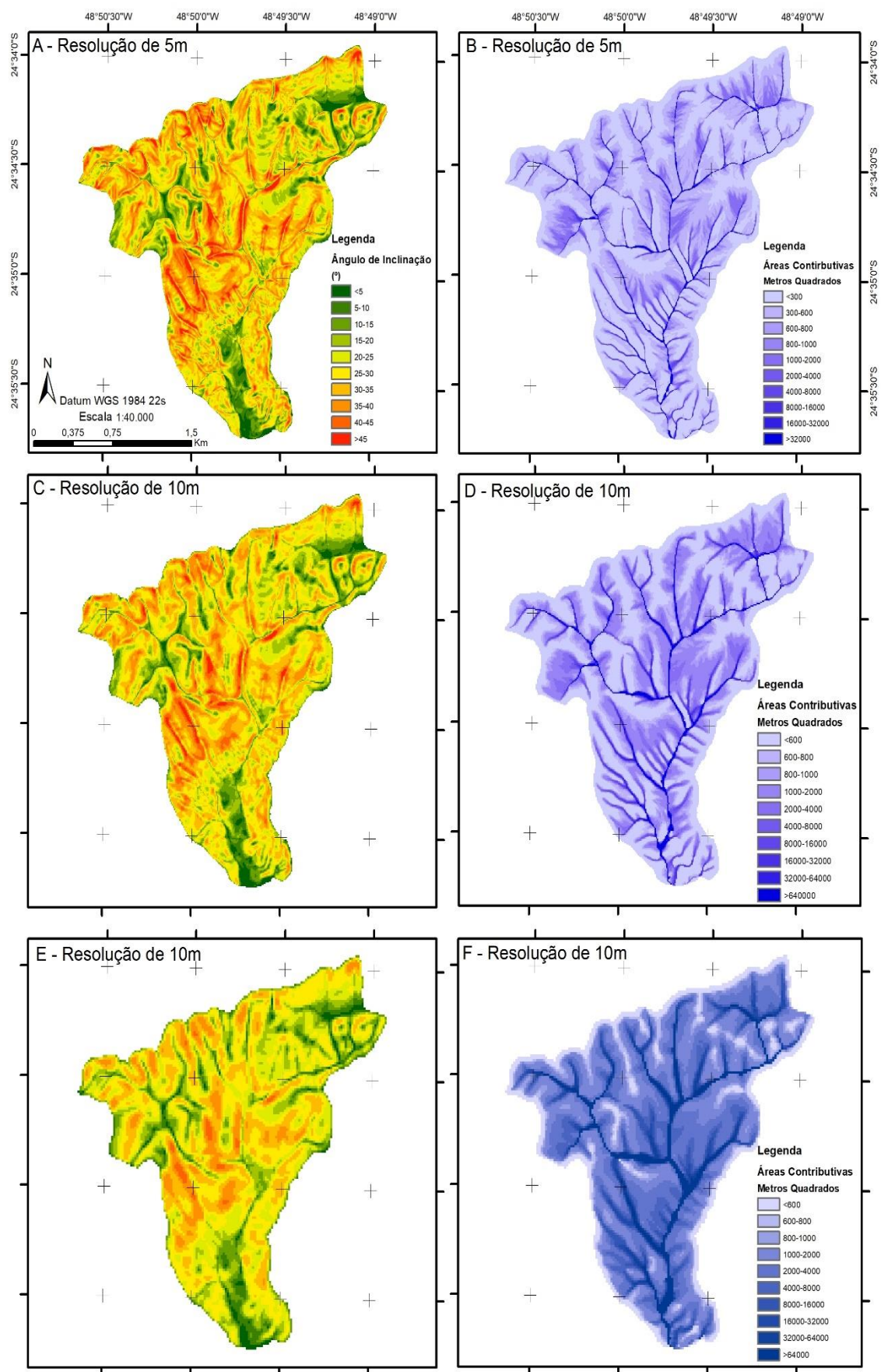
- QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. **"The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models"**. Hydrological Processes, v.5, 59-79, 1991.
- ROSS, J.L.S. **A morfogênese da bacia do Ribeira do Iguape e os Sistemas Ambientais**. GEOUSP – Espaço e Tempo, São Paulo, nº 12, p. 21-46, 2002.
- SELBY, M. J. **Mass Wasting of Soils**. In: Hillslope Materials and Processes. Second Edition. Oxford University Press, Oxford, p. 249-355, 1993.
- SORBINO, G.; SICA, C.; e CASCINI, L.. **Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models**. Natural Hazards, v. 53, p. 313-332, 2010.
- SUMMERFIELD, M.A. **Global Geomorphology: an introduction to the study of Landforms**. New York: Longman Scientific e Technical and John Wiley e Sons Inc. 537p, 1991.
- TAKAHASHI, T. **Debris flow: mechanics, predictions and countermeasures**. Taylor and Francis Group, Londres, Reino Unido, 439p.
- TEIXEIRA, M.; BATEIRA, C.; MARQUES, F.; VIEIRA, B.C. **Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo Catchment, NW of Portugal**. Landslides, v.12, n.3, p. 455-468, 2015.
- THURO, K.; SCHOLZ, M. **Deep weathering and alteration in granites – a product of coupled processes**. [s.l.]. Elsevier Ltd., 2004, v.2.
- VAN WESTEN, C. J.; RENGERS, N.; e SOETERS, R. **Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment**. Natural Hazards, v.30, 399-419, 2003.
- VIEIRA, B. C.; FERREIRA, F. S.; e GOMES, M. C. V. **Propriedades Físicas e Hidrológicas dos Solos e os Escorregamentos Rasos na Serra do Mar Paulista**. Raega – O Espaço Geográfico em Análise, v. 34, p. 269-287, 2015.
- VIEIRA, B.C. e MARTINS, T.D. **Modelos em geografia física: conceitos e aplicações na previsão de escorregamentos**. Geousp – Espaço e Tempo (Online), v. 20, n.1, p. 194 – 206, 2016.
- VIEIRA, B.C. **Previsão de Escorregamentos Translacionais Rasos na Serra do Mar (SP) a partir de Modelos Matemáticos em Bases Físicas**. Tese (Doutorado em Geografia). Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 193p, 2007.
- WANG, L. e LIU, H. **An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling**. International Journal of Geographical Information Science, v.20, n.2, 193-213, 2006.
- WOLLE, C. M e CARVALHO, C. S. **Taludes Naturais**. In: FALCONI, F. F.; JUNIOR, A. N. (Org.), Solos do Litoral de São Paulo. São Paulo: ABMS, p. 180-203, 1994.
- YIN, K.L; e YAN, T.Z. **Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks**. International Symposium on Landslides, Lausanne, 1269-1272, 1988.
- ZÊZERE, J. L.; FERREIRA, A.B.; e RODRIGUES, M.L. **Landslides in the North of Lisbon Region (Portugal): Conditioning and Triggering Factors**. Phys. Chem. Earth, v. 24, n.10, pp. 925-934, 1999.

ZÊZERE, J. L. **Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa.** Lisboa: Dissertação de doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa, 1997.

Apêndice A – Mapas dos parâmetros morfológicos empregados na modelagem do Valor Informativo nas três resoluções







Apêndice B – Cálculos do Valor Informativo para os parâmetros morfológicos nas três resoluções empregadas

Res.	Parâmetro Morfológico		Área da Classe (pixéis)	Área deslizada por classe (pixéis) – Grupo de Modelagem	S_i / N_i	$(S_i / N_i) / (S/N)$	Valor Informativo
5m	Posição da Média Encosta	Alta Encosta	43256	826	0,019096	1,154365	0,14355
		Média Encosta I	42488	796	0,018735	1,132547	0,124469
		Média Encosta II	43862	709	0,016164	0,977163	-0,0231
		Baixa Encosta	52898	688	0,013006	0,786246	-0,24049
	Ângulo de Inclinação das Encostas	<5°	3258	1	0,000307	0,018555	-3,98704
		5-10°	7164	13	0,001815	0,109696	-2,21004
		10-15°	11756	50	0,004253	0,257106	-1,35827
		15-20°	18005	80	0,4443	0,268596	-1,31455
		20-25°	29591	276	0,009327	0,563834	-0,57299
		25-30°	38128	554	0,01453	0,878351	-0,12971
		30-35°	35953	831	0,023114	1,39723	0,334492
		35-40°	23920	797	0,033319	2,014185	0,700214
		40-45°	10071	282	0,028001	1,692695	0,526322
		>45°	4655	135	0,029001	1,753138	0,56140
	Aspecto	N	2993	3	0,001002	0,060593	-2,80357
		NE	9541	291	0,0305	1,843777	0,611816
		E	34002	908	0,026704	1,614324	0,478916
		SE	37378	874	0,023383	1,413259	0,346089
		S	36706	353	0,009617	0,581362	-0,54238
		SW	28874	273	0,009455	0,571564	-0,55938
		W	20634	236	0,011437	0,691413	-0,36902
		NW	8348	63	0,007547	0,456213	-0,7848
		N	4028	18	0,004469	0,270142	-1,30881
	Áreas Contributivas	<300m ²	83526	1265	0,015145	0,915542	-0,08824
		300-600 m ²	56526	1228	0,021725	1,313286	0,272533
		600-800 m ²	14291	190	0,013295	0,803712	-0,21851
		800-1000 m ²	7379	54	0,007318	0,44239	-0,81556
		1000-2000 m ²	9288	78	0,008398	0,50767	-0,67792
		2000-4000 m ²	2782	58	0,020848	1,260318	0,231364
		4000-8000 m ²	1857	51	0,027464	1,660227	0,506955
		8000-16000 m ²	1673	40	0,023909	1,445351	0,368352
		16000-32000 m ²	1436	22	0,01532	0,926142	-0,07673
		>32000 m ²	3746	33	0,008809	0,532544	-0,63009
	Hipsometria	<350m	13458	129	0,009585	0,579453	-0,54567
		350-450m	18272	480	0,02627	1,588051	0,462507
		450-550m	16359	698	0,042668	2,579336	0,947532
		550-650m	16528	546	0,033035	1,997016	0,691654
		650-750m	19582	218	0,011133	0,67299	-0,39602
		750-850m	55449	350	0,006312	0,381578	-0,96344
		850-950m	39564	578	0,014609	0,883155	-0,12425
		>950m	3292	20	0,006075	0,367265	-1,00167
	Curvatura (Planta/Perfil)	Côncavo	52339	890	0,017005	1,027954	0,027571
		Retilíneo	46200	596	0,0129	0,779854	-0,24865
		Convexo	83965	1533	0,018258	1,103705	0,098673

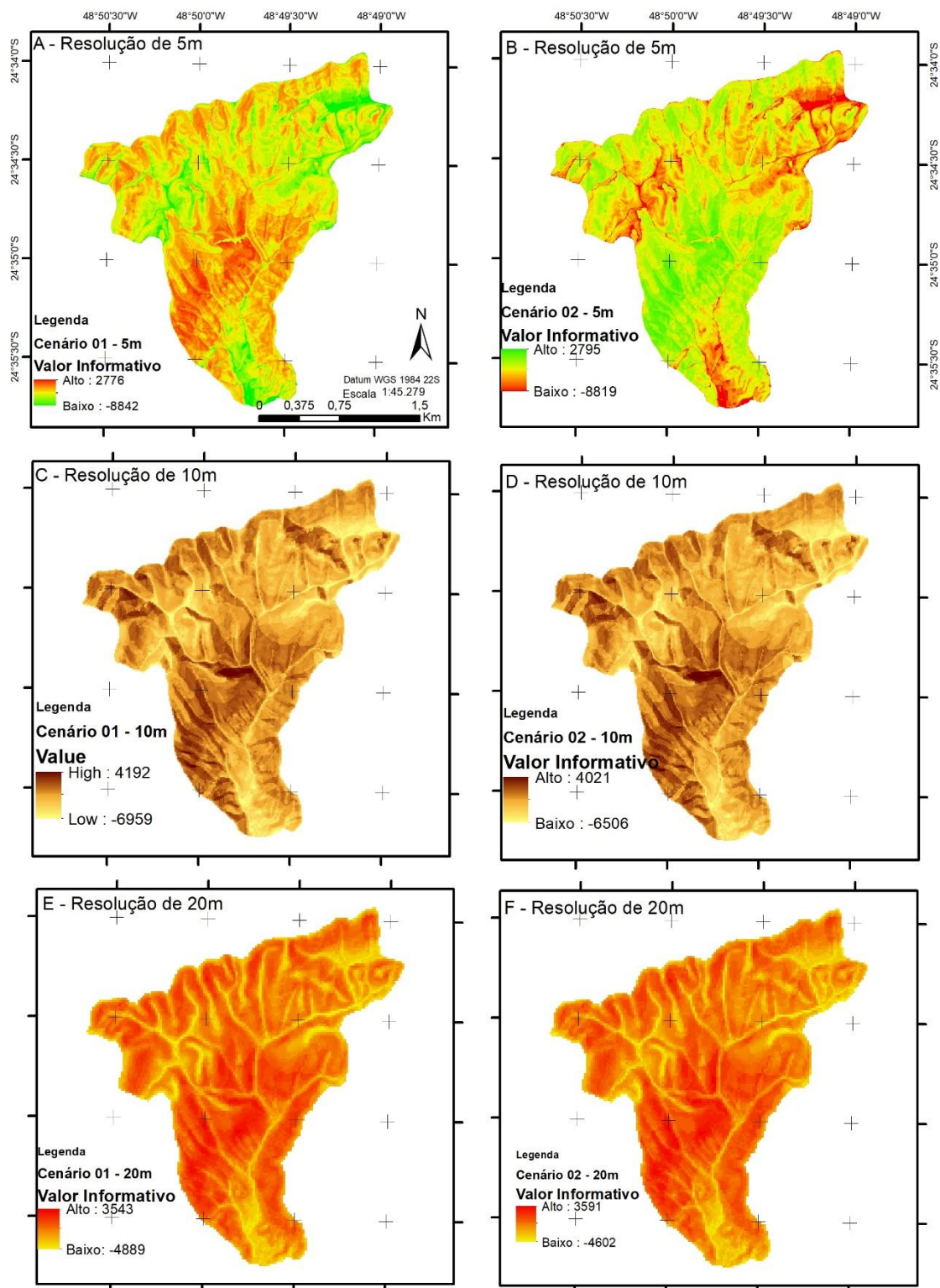
Resolução	Parâmetro Morfológico		Área da Classe m ² (pixéis)	Área deslizada por classe m ² (pixéis)	S _i / N _i	(S _i / N _i)/(S/N)	Valor Informativo
		Classificação					
10m	Posição da Média Encosta	Alta Encosta	10159	190	0,018703	1,147069	0,13721
		Média Encosta I	10138	192	0,018939	1,161545	0,149751
		Média Encosta II	11060	214	0,019349	1,186713	0,171187
		Baixa Encosta	14274	148	0,010369	0,635921	-0,45268
	Ângulo de Inclinação das Encostas	<5º	842	1	0,001188	0,072841	-2,61948
		5-10º	1857	4	0,002154	0,13211	-2,02412
		10-15º	3021	7	0,002317	0,142113	-1,95113
		15-20º	4733	21	0,004437	0,272126	-1,30149
		20-25º	7702	70	0,009089	0,557419	-0,58444
		25-30º	11102	188	0,016934	1,038589	0,037863
		30-35º	9365	200	0,021356	1,309813	0,269884
		35-40º	4829	187	0,038724	2,375043	0,865015
		40-45º	1708	47	0,27518	1,687707	0,523371
		>45º	472	19	0,040254	2,468872	0,903762
10m	Aspecto	N	785	51	0,064968	3,984626	1,382443
		NE	2329	246	0,105625	6,478175	1868439
		E	8362	219	0,02619	1,606279	0,47392
		SE	9508	81	0,008519	0,522496	-0,64914
		S	9427	57	0,006046	0,370842	-0,99198
		SW	7223	67	0,009276	0,568911	-0,5640
		W	5078	15	0,002954	0,18117	-1,70832
		NW	2067	5	0,002419	0,14836	-1,90811
	Áreas Contributivas	N	852	3	0,003521	0,215958	-1,53267
		<600 m ²	18209	269	0,014773	0,906052	-0,09866
		600-800 m ²	6182	130	0,021029	1,289738	0,254439
		800-1000 m ²	4678	78	0,016674	1,022637	0,022384
		1000-2000 m ²	9195	155	0,016857	1,033873	0,033312
		2000-4000 m ²	2729	32	0,011726	0,719173	-0,32965
		4000-8000 m ²	1190	33	0,027731	1,700803	0,531101
		8000-16000 m ²	887	17	0,019166	1,175472	0,16167
		16000-32000 m ²	740	16	0,021622	1,326097	0,28224
		32000-64000 m ²	509	6	0,011788	0,72297	-0,32439
		>64000m ²	1312	8	0,006098	0,373976	-0,98356
	Hipsometria	<350m	3368	31	0,009204	0,564517	-0,57179
		350-450m	4576	119	0,026005	1,594953	0,466845
		450-550m	4087	177	0,043308	2,656169	0,976885
		550-650m	4134	136	0,032898	2,017695	0,701956
		650-750m	4906	50	0,010192	0,625071	-0,46989
		750-850m	13851	79	0,005704	0,349811	-1,05036
		850-950m	9882	145	0,014673	0,899933	-0,10543
		>950m	827	7	0,008464	0,51914	-0,65559
	Curvatura (Planta/Perfil)	Côncavo	12366	213	0,017225	1,056422	0,054888
		Retilíneo	14281	211	0,014775	0,906173	-0,09583
		Convexo	18984	320	0,016856	1,03383	0,033271

Área do pixel de 10x10m: 100m²

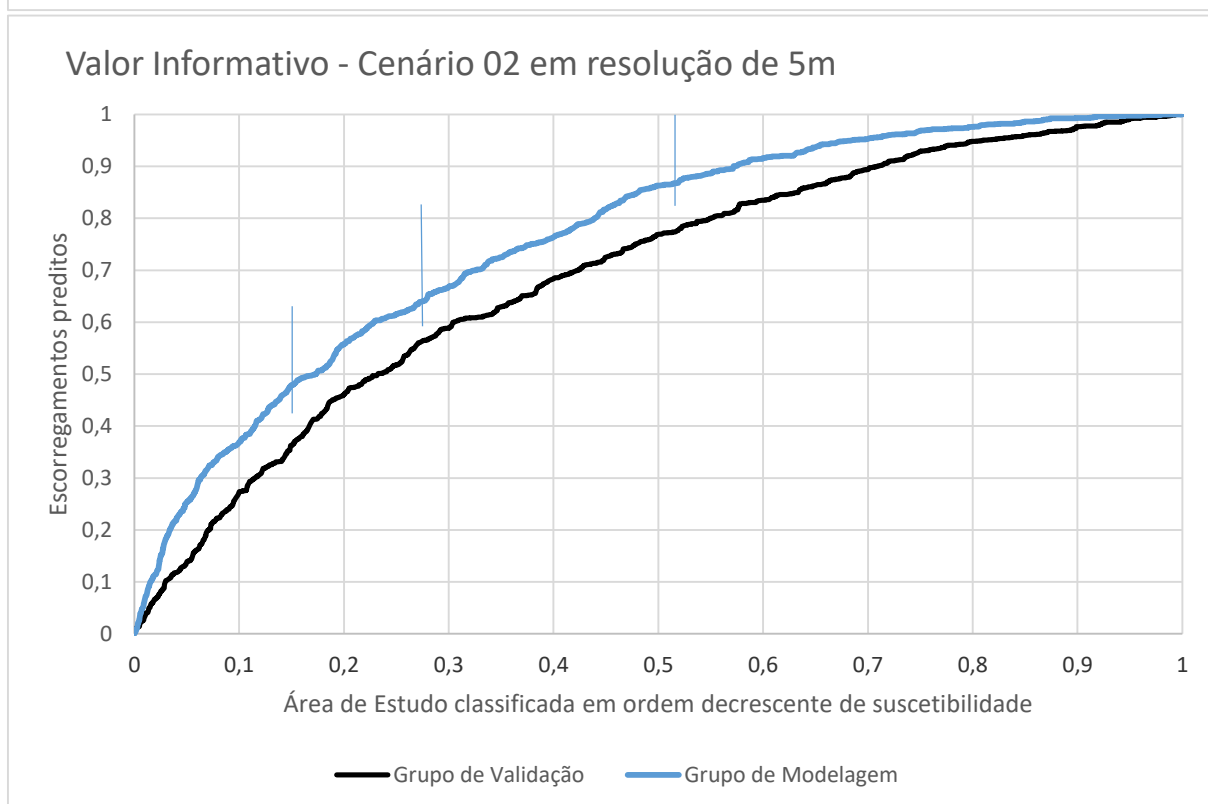
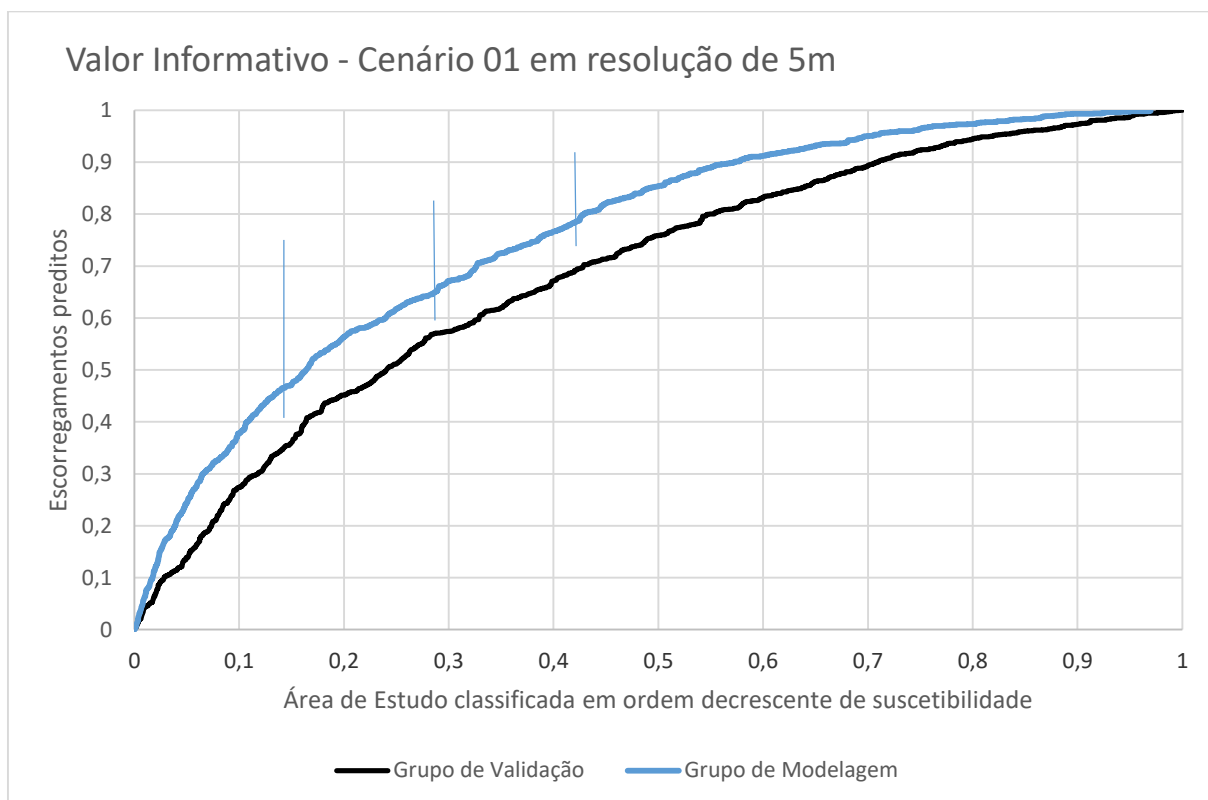
Resolução	Parâmetro Morfológico		Área da Classe m ² (pixéis)	Área deslizada por classe m ² (pixéis)	S _i / N _i	(S _i / N _i)/(S/N)	Valor Informativo
20m	Posição da Média Encosta	Alta Encosta	2439	56	0,02296	1,371844	0,316156
		Média Encosta I	2508	56	0,022329	1,334102	0,288258
		Média Encosta II	2970	44	0,014815	0,885166	-0,12198
		Baixa Encosta	3495	35	0,010014	0,598342	-0,51359
	Ângulo de Inclinação das Encostas	<5º	204	0	0	0	0 (definido como -2)
		5-10º	550	0	0	0	0 (definido como -2)
		10-15º	1007	3	0,002979	0,178	-1,72597
		15-20º	1503	9	0,005988	0,357777	-1,02785
		20-25º	2404	26	0,010815	0,6462	-0,43665
		25-30º	3003	53	0,017649	1,054506	0,053072
		30-35º	1944	59	0,03035	1,81336	0,595182
		35-40º	709	32	0,45134	2,696697	0,992028
		>40º	88	9	0,102273	6,110662	1,810035
	Aspecto	N	183	0	0	0	0 (definido como -1)
		NE	560	5200	0,023214	1,387023	0,32716
		E	1968	22800	0,028963	1,730526	0,548425
		SE	2651	22800	0,021501	1,284676	0,250506
		S	2437	9600	0,009848	0,588416	-0,53032
		SW	1762	9200	0,013053	0,77992	-0,24856
		W	1227	5200	0,010595	0,633034	-0,45723
		NW	448	1600	0,008929	0,53347	-0,62835
	Áreas Contributivas	N	176	0	0	0	0 (definido como -1)
		<600m ²	1197	8	0,006683	0,399323	-0,91798
		600-800 m ²	578	4	0,00692	0,413486	-0,88313
		800-1000 m ²	675	9	0,013333	0,796649	-0,22734
		1000-2000 m ²	3151	67	0,021263	1,270442	0,239365
		2000-4000 m ²	2753	55	0,019978	1,193672	0,177034
		4000-8000 m ²	1172	26	0,022184	1,325483	0,281777
		8000-16000 m ²	562	10	0,017794	1,063144	0,061231
		16000-32000 m ²	373	4	0,010724	0,640737	-0,44514
		32000-64000 m ²	252	3	0,011905	0,711294	-0,34067
		>64000 m ²	696	5	0,007153	0,427387	-0,85007
	Hipsometria	<350m	849	8	0,009423	0,563003	-0,57447
		350-450m	1141	30	0,026293	1,570956	0,451684
		450-550m	1026	47	0,045809	2,737026	1,006872
		550-650m	1029	31	0,030126	1,800009	0,587792
		650-750m	1229	14	0,011391	0,68062	-0,38475
		750-850m	3462	25	0,007221	0,431461	-0,84058
		850-950m	2467	36	0,014593	0,87189	-0,13709
		>950m	209	0	0	0	0 (definido como -1)
	Curvatura (Planta/Perfil)	Côncavo	2906	46	0,015829	0,945781	-0,06674
		Retilíneo	5109	84	0,016442	0,982363	-0,01779
		Convexo	3397	61	0,017957	1,072908	0,070373

Área do pixel de 20x20m: 400m²

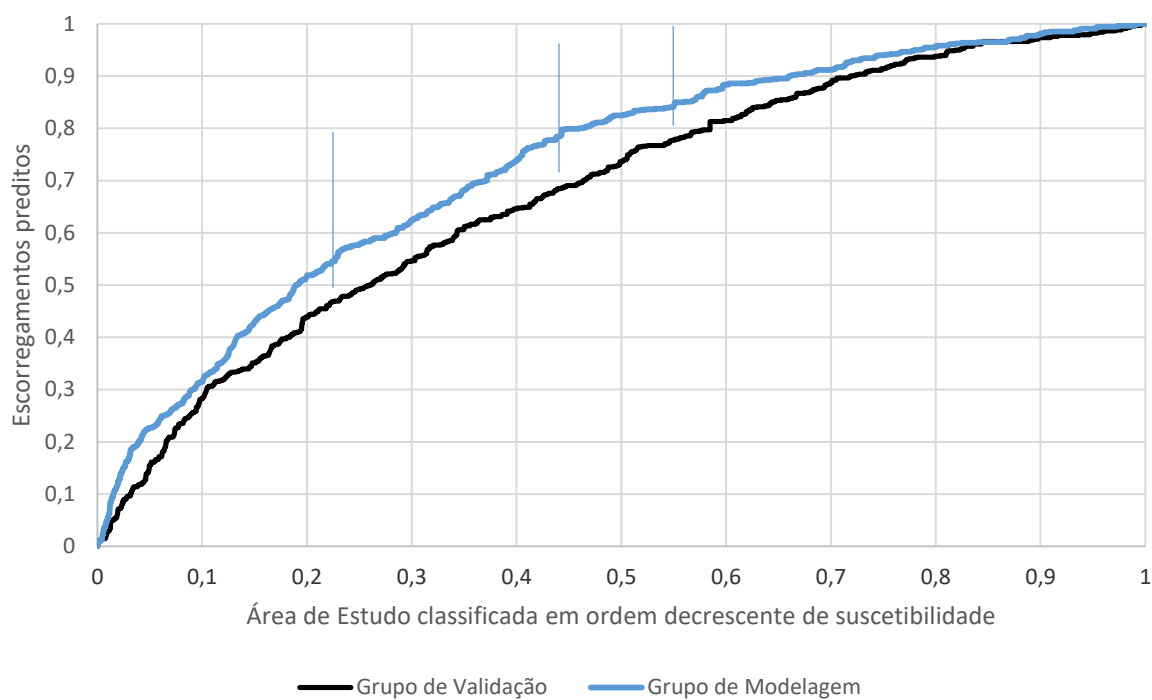
Apêndice C – Mapas de Valor Informativo não classificados



Apêndice D – Gráficos das Curvas de Sucesso dos seis cenários de Valor Informativo, com as quebras na geometria da curva destacadas.



Valor Informativo - Cenário 01 em resolução de 10m



Valor Informativo - Cenário 02 em resolução de 10m

