



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

**RBGEA**  
**REVISTA BRASILEIRA DE**  
**GEOLOGIA DE ENGENHARIA**  
**E AMBIENTAL**



**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**

**REVISTA BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL**

*Publicação Científica da Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*

**EDITORES**

Alessandra Cristina Corsi - IPT  
Prof. Dr. Emílio Velloso Barroso - UFRJ  
Prof. Dra. Kátia Canil - UFABC  
Prof. Dra. Malva Andrea Mancuso - UFSM  
Prof. Me. Marcelo Denser Monteiro - Metrô - SP / UAM

**REVISORES**

Adalberto Aurélio Azevedo - IPT	José Domingos Gallas - USP
Alberto Pio Fiori - UFPR	José Eduardo Rodrigues - USP
Aline Freitas da Silva - DRM-RJ	José Eduardo Zaine - UNESP
Alessandra Cristina Corsi - IPT	José Luiz Albuquerque Filho - IPT
Angelo José Consoni - TSAP	Kátia Canil - UFABC
Antonio Cendrero - Univ. da Cantabria (Espanha)	Leandro Eugênio da Silva Cerri - UNESP
Antonio Manoel Santos Oliveira - UNG	Lídia K. Tominaga - IG/SMA
Candido Bordeaux Rego Neto - IPUF	Luis de Almeida Prado Bacellar - UFOP
Clovis Gonzatti - CIENTEC	Luiz Nishiyama - UFU
Denise de la Corte Bacci - USP	Luiz Fernando D'Agostino - Nucleo
Diana Sarita Hamburger - UFABC	Malva Andrea Mancuso - UFSM
Dirceu Pagotto Stein - Geoexec	Marcelo Fischer Gramani - IPT
Edilson Pissato - USP	Marcilene Dantas Ferreira - UFSCar
Eduardo Brandau Quitete - IPT	Marcelo Denser Monteiro - Metrô - SP / UAM
Eduardo Goulart Collares - UEMG	Marcia Pressinotti - IG/SMA
Eduardo Soares de Macedo - IPT	Marcio A. Cunha - Consultor
Emilio Velloso Barroso - UFRJ	Maria Cristina Jacinto Almeida - IPT
Eraldo L. Pastore - Consultor	Maria Heloisa B.O. Frascá - Consultora
Fábio Soares Magalhães - Vogbr	Maria José Brollo - IG/SMA
Flávio Almeida da Silva - Engecorps	Marta Luzia de Souza - UEM
Frederico Garcia Sobreira - UFOP	Nelson Meirim Coutinho - GEORIO
Ginaldo Campanha - USP	Newton Moreira de Souza - UnB
Guido Guidicini - Geoenergia	Noris Costa Diniz - UnB
Helena Polivanov - UFRJ	Oswaldo Augusto Filho - USP
Jair Santoro - IG/SMA	Reinaldo Lorandi - UFSCar
João Francisco Alves Silveira - Consultor	Renato Luiz Prado - USP
Jorge Kazuo Yamamoto - USP	Ricardo Vedovello - IG/SMA
José Alcino Rodrigues de Carvalho - Univ. Nova de Lisboa (Port.)	Yociteru Hasui - Consultor
José Augusto de Lollo - UNESP	

**APOIO EDITORIAL**

Luciana Marques, Nill Cavalcante, Renivaldo Campos

**PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO**

Rita Motta - Editora Tribo da Ilha

---

**Volume 5 - Número 1**

2015

ISSN 2237-4590

---

## DIRETORIA ABGE GESTÃO 2016/2018

---

**Presidente:** Adalberto Aurélio Azevedo  
**Vice Presidente:** Lídia Keiko Tominaga  
**Diretor Secretário:** Alessandra Cristina Corsi  
**Diretor Secretário Adjunto:** Deyna Pinho  
**Diretor Financeiro:** José Luiz Albuquerque Filho  
**Diretor de Cursos:** Ivan José Delatim  
**Diretora de Eventos:** Fábio Augusto Gomes Vieira Reis  
**Diretora de Eventos Adjunto:** Renata Augusta Rocha N. de Oliveira  
**Diretor de Comunicação:** Marcelo Denser Monteiro  
**Diretor de Comunicação Adjunto:** Tiago Antonelli  
**Diretor de Publicação:** Andrea Bartorelli  
**Diretor de Publicação Adjunto:** Edilson Pissato

### CONSELHO DELIBERATIVO

Adalberto Azevedo, Alessandra Corsi, Andrea Bartorelli, Deyna Pinho, Edilson Pissato, Fábio Reis, Flávio Almeida, Glaucia Cuchierato, Ivan Delatim, José Luiz Albuquerque Filho, Leandro Castro, Lídia Tominaga, Luiz Fernando, Marcelo Denser, Mateus Delatim, Renata Rocha, Silvia Kitaraha e Tiago Antonelli.

### NÚCLEO RIO DE JANEIRO - Aline Freitas das Silva

**Conselho Deliberativo:** Aline Freitas Silva, Hugo Machado, Rodrigo França, Rodney Nascimento, Rúbia Azevedo e Thiago Santos

### NÚCLEO MINAS GERAIS - Fábio Magalhães

**Conselho Deliberativo:** Alberto Amaral, Fábio Magalhães, Gilvan Sá, Luis Bacellar, Maria Giovana Parizzi, Sandra Fernandes e Thiago Teixeira

### NÚCLEO SUL - Malva Andrea Mancuso

**Conselho Deliberativo:** Alberto P. Fiori, Andrea V. Nummer, Débora Lamberty, Eduardo C.B. Carvalho, Erik Wunder, Hermann Vargas, Juan Antonio A. Flores, Luiz A. Bressani e Malva Andrea Mancuso.

### NÚCLEO CENTRO OESTE - Ingrid Lima

**Conselho Deliberativo:** Bruno Diniz, Dário Peixoto, Getúlio Ezequiel, Ingrid Lima, João Armelin, Kurt Albrecht, Juliana Sobreira e Ricardo Vilhena

### NÚCLEO NORTE - Cláudio Szlafstein

**Conselho Deliberativo:** Dianne Danielle Farias Fonseca, Lenilson José Souza de Queiroz, Luciana de Jesus P.P. Miyagawa, José Antonio da Silva, Renato R. Mendonça, Jubal C. Filho e Nilton de Souza Campelo, Loury Bastos, Patrícia Mara Lages Simões, Raimundo Almir C. da Conceição, Sheila Gatinho Teixeira, Túlio A. de Araújo Mendes.

### NÚCLEO NORDESTE - Carlos Henrique Medeiros

**Conselho Deliberativo:** Edval Lopes da Silva, Fagner França, Francisco Said Gonçalves, Heitor Neves Maia, José Braz Diniz Filho, Kleiton Cassimiro, José Vitoriano de Britto Neto, Marcos Paulo Souza Novais, Olavo Santos Junior, Ubiratã Maciel, Ricardo Farias do Amaral e Vanildo Fonseca



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA  
DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

### SECRETARIA EXECUTIVA

**Secretária Executiva:** Luciana Marques  
Av. Profº Almeida Prado, 532 - Prédio 11 -  
Cidade Universitária - São Paulo - SP  
Telefone: (11) 3767-4361 / (11) 3719-0661  
Email: abge@abge.org.br - Home Page: www.abge.org.br

---





A ABGE apresenta mais um número da Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) para compartilhar com pesquisadores, profissionais e estudantes que atuam na área de geologia de engenharia e o meio ambiente. Neste número, são apresentados os artigos que abordam estudos e pesquisas aplicadas à cartografia geotécnica e geoambiental.

No primeiro artigo, Luiz Antônio Bressani e Eli Antônio da Costa, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), apresentam uma proposta para a elaboração de cartas geotécnicas voltadas para o planejamento territorial. Os autores abordam tópicos como a relação entre suscetibilidade natural e induzida de terrenos sujeitos a escorregamentos, a necessidade de análises qualitativas de perigos e o papel educativo que as cartas geotécnicas possuem junto à sociedade.

O artigo de Alessandra Cristina Corsi, Marcelo Fisher Gramani e Agostinho Tadashi Ogura, ambos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), aborda o desenvolvimento de um método em ambiente SIG, para delimitação de bacias de drenagem suscetíveis à ocorrência de corridas de massa e enxurradas. O método utiliza o Índice de Melton e dados morfométricos das bacias. O artigo apresenta a sua aplicação em 111 municípios situados em regiões serranas de cinco estados do Brasil.

Cláudio José Ferreira, do Instituto Geológico de São Paulo (IG), e coautores apresentam um modelo de monitoramento para emissão de alertas de desastres, que combina o mapeamento de risco de escorregamentos planares com o tratamento de índices pluviométricos, por meio do desenvolvimento de um algoritmo compatível com a plataforma computacional TerraMA<sup>2</sup>.

Ainda com foco no tema de gerenciamento de áreas de riscos de escorregamentos, César Falcão Barella e Frederico Garcia Sobreira, da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), apresentam os resultados de uma abordagem estatística para avaliação de áreas suscetíveis, por meio da técnica do fator de certeza. A análise de acurácia do método é realizada pela avaliação da taxa de sucesso e predição. O método permite que cada área de risco seja avaliada com as particularidades de seus condicionantes, reduzindo a subjetividade dos processos preditivos associados aos riscos de escorregamentos.

A abrangência e aplicação de cartas de suscetibilidade, perigo e risco à inundação fluvial, no contexto da prevenção de desastres naturais, como ferramenta de planejamento e gestão territorial é foco do estudo de Sofia Julia Alves Macedo Campos e colaboradores, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Aspectos como objetivos, escala de trabalho e aplicações das cartas são abordados, apresentando e discutindo os principais métodos para a elaboração das mesmas.

O mapeamento geológico é uma etapa fundamental do processo de elaboração de cartas geotécnicas associadas à ocorrência de riscos naturais. Neste contexto, Saulo Borsatto e colaboradores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) apresentam os resultados de um detalhado processo de coleta de dados de campo e reinterpretação de dados existentes de geologia e geomorfologia, tratados em ambiente SIG, que permitiram uma melhor compreensão das propriedades e características geológicas da área urbana do município de Caxias do Sul, Estado do Rio Grande do Sul.

No último artigo deste número da RBGEA, Leonardo Andrade de Souza e colaboradores de consultorias de Belo Horizonte - MG e Vitória - ES, além do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), apresentam o Plano Municipal de Redução do Risco (PMRR) do município de Santa Maria de Jetibá, Estado do Espírito Santo. O artigo aborda, no âmbito do PMRR, a realização de estudos relacionados ao mapeamento do risco geológico e hidrológico bem como as propostas de intervenções estruturais e não estruturais, para a gestão desses riscos. Os autores indicam o PMRR como uma importante ferramenta para a orientação de

políticas públicas de gestão que visem a redução de desastres naturais.

Estamos certos de que os artigos que compõem este número da RBGEA trazem uma importante contribuição aos profissionais que atuam em temas relacionados à Geologia de Engenharia e Ambiental, refletindo o estado da arte e novas técnicas de abordagem a partir da cartografia para a avaliação dos riscos de desastres naturais, bem como na aplicação de ferramentas para o planejamento territorial. Desejamos a todos uma ótima leitura!



- 9** CARTAS GEOTÉCNICAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO TERRITORIAL – ALGUNS AJUSTES NO INSTRUMENTO  
*Luiz Antônio Bressani*  
*Eli Antônio da Costa*
- 21** DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA DELIMITAÇÃO DE BACIAS DE DRENAGEM SUSCETÍVEIS A CORRIDA DE MASSA E ENXURRADA EM REGIÕES SERRANAS  
*Alessandra Cristina Corsi*  
*Marcelo Fisher Gramani*  
*Agostinho Tadashi Ogura*
- 37** INTEGRAÇÃO DE MAPEAMENTO DE RISCO E ÍNDICES PLUVIOMÉTRICOS NO MONITORAMENTO E ALERTA DE RISCO DE ESCORREGAMENTOS PLANARES NO LITORAL NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO  
*Cláudio José Ferreira*  
*Denise Rossini-Penteado*  
*Celia Regina de Gouvêia Souza*  
*Glaucio Almeida Rocha*  
*Lorena de Souza*  
*Antonio Carlos Moretti Guedes*
- 55** ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS USANDO A ABORDAGEM ESTATÍSTICA DO FATOR DE CERTEZA NO MUNICÍPIO DE MOEDA, MINAS GERAIS  
*Cesar Falcão Barella*  
*Frederico Garcia Sobreira*
- 67** MAPEAMENTO DE ÁREAS SUJEITAS À INUNDAÇÃO PARA PLANEJAMENTO E GESTÃO TERRITORIAL: CARTAS DE SUSCETIBILIDADE, PERIGO E RISCO  
*Sofia Julia Alves Macedo Campos*  
*Fausto Luis Stefani*  
*Nivaldo Paulon*  
*Luiz Gustavo Faccini*  
*Omar Yazbek Bitar*

**83**

MAPEAMENTO GEOLÓGICO DA ÁREA URBANA DE CAXIAS DO SUL COMO ETAPA DA CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

*Saulo Borsatto*

*Norberto Dani*

*Luiz A. Bressani*

*Nelson A. Lisboa*

**93**

PLANO MUNICIPAL DE REDUÇÃO DE RISCO DE SANTA MARIA DE JETIBÁ – ES - BRASIL

*Leonardo Andrade de Souza*

*Marco Aurélio Costa Caiado*

*Fillipe Tesch*

*Gilvimar Vieira Perdigão*

*Larissa Tostes Leite Belo*

# CARTAS GEOTÉCNICAS APLICADAS AO PLANEJAMENTO TERRITORIAL – ALGUNS AJUSTES NO INSTRUMENTO

GEOTECHNICAL MAP APPLIED TO TERRITORIAL  
PLANNING – SOME ADJUSTMENTS IN THE INSTRUMENT

LUIZ ANTÔNIO BRESSANI  
PPGEC/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.  
E-mail: bressani@ufrgs.br

ELI ANTÔNIO DA COSTA  
UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.  
E-mail: eli.costa@ufrgs.br

## RESUMO ABSTRACT

O objetivo deste trabalho é sugerir algumas alterações no processo de estudo e apresentação das Cartas Geotécnicas no âmbito do seu uso no Planejamento Territorial (ou Urbano), salientando as grandes vantagens de seu uso, mas discutindo alguns dos seus condicionantes atuais. Um aspecto que é levantado é a suscetibilidade dos terrenos aos movimentos de massa, aqui denominada *suscetibilidade natural* e os problemas com a avaliação prospectiva da *suscetibilidade induzida*, isto é, aquela que ocorrerá pela ocupação. O artigo discute também a necessidade de que as Cartas Geotécnicas para Planejamento Urbano devem expressar, de alguma forma, o potencial destrutivo dos eventos, indicando uma avaliação qualitativa do perigo. Embora isto apresente dificuldades de avaliação, é este fator que acaba sendo levado em conta pela Sociedade e os atores interessados (população, incorporadores, legisladores, representantes do Poder Público) quando tomam decisões sobre a ocupação ou não das áreas disponíveis. Por último é realçado o papel educativo que o próprio processo de elaboração das Cartas Geotécnicas pode ter na Sociedade, pela compreensão dos condicionantes que são estudados, e isto deve ser incentivado em todos os trabalhos de elaboração das Cartas.

**Palavras-chave:** Cartografia geotécnica; suscetibilidade; encostas; deslizamentos.

The objective of this paper is to suggest some modifications on the study process and in the presentation of Geotechnical Maps for Territorial (or Urban) Planning, highlighting the great advantages of its use but discussing some of its current constraints. One aspect is the susceptibility to mass movements of the area, here called *natural susceptibility*, and problems with the prospective evaluation of *induced susceptibility*, that is the real one due to occupation. The article also discusses that Geotechnical Maps for Urban Planning should express, somehow, the destructive potential of the events, indicating a qualitative assessment of hazard. Although this presents difficulties of evaluation, it is the factor that will be taken into account by the Society and the stakeholders (population, developers, legislators, representatives of the government) when they take decisions about the occupation, or not, of available areas. Finally, it is highlighted the educational role that the preparation of the Geotechnical Maps may have in the Society, and this should be encouraged.

**Keywords:** Geotechnical mapping; susceptibility; slopes; landslides.

## 1 INTRODUÇÃO

As Cartas Geotécnicas Aplicadas ao Planejamento Territorial foram fortemente incentivadas pelo Governo Federal nos últimos anos, principalmente através de medidas tomadas pelo Ministério das Cidades (Carvalho & Galvão 2013). O principal objetivo foi contribuir para a redução de desastres, principalmente pela prevenção, através do incentivo no Planejamento Urbano e pela disseminação do conhecimento e uso das Cartas Geotécnicas (CG).

Na Cartografia Geotécnica o objetivo é determinar como o ambiente é afetado pelos diversos processos de interesse (deslizamentos, inundações, enxurradas, erosões, afundamentos de terreno), e como será afetado no futuro, especialmente em função da ocupação. Este conhecimento é construído a partir de observações, indicadores e inferências obtidas pelo estudo sistemático dos atributos da paisagem geomorfológica. O estudo é feito do geral para o particular, analisando-se diversos mapas básicos (geologia, topografia do terreno, de solos, ocupação, declividades) e reunindo-se inventários dos eventos de interesse.

O grande desafio do meio técnico é que as Cartas Geotécnicas sejam capazes de representar um mapeamento adequado da área fornecendo informações sobre possíveis acidentes relacionados a movimentos de massa (deslizamentos de terra, tombamentos, rolamento e quedas de blocos de rocha), inundações e enxurradas, erosões, solapamentos de margens, recalques acentuados (argilas moles), afundamentos e subsidências (solos colapsíveis ou cársticos).

Neste artigo vamos nos concentrar na discussão dos aspectos ligados aos movimentos gravitacionais de massa (escorregamentos ou deslizamentos *latu sensu*). Na Engenharia Geotécnica, onde os autores têm mais experiência e fizeram sua formação profissional, o objetivo normalmente é solucionar casos específicos, como a estabilização de um deslizamento, fazendo as investigações para obter os dados mínimos necessários à compreensão do problema e seus condicionantes. A análise do problema e sua solução são feitas na escala da obra, lote ou encosta, geralmente concentrando-se os esforços na investigação local (sondagens e topografia de detalhe). Tipicamente

estudam-se áreas entre 500 e 5.000 m<sup>2</sup> e profundidades de até 20 m.

O objetivo principal deste trabalho é discutir as Cartas Geotécnicas no âmbito do seu uso no Planejamento Territorial (ou Urbano), salientando seu enorme potencial de prevenção, mas salientando alguns dos seus limites que não são normalmente apresentados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existe uma extensa literatura sobre Cartas Geotécnicas (CG) elaboradas por diversos autores e pesquisadores brasileiros e boas revisões podem ser encontradas nos anais dos eventos da ABGE. Este artigo não pretende revisar esta farta literatura, apenas fazer um breve relato dos conceitos mais difundidos, e geralmente aceitos, comentando as suas bases e dificuldades de utilização, além dos problemas enfrentados na efetiva aplicação das Cartas geradas.

### 2.1 Definições de Cartas Geotécnicas (CG)

Em trabalho recente encomendado pelo Ministério das Cidades, Diniz & Freitas (2013) definem que a Carta Geotécnica (CG): “*sintetiza o conhecimento sobre o meio físico e seus processos atuantes (geo) em uma determinada área, de modo a subsidiar o estabelecimento de medidas para a adequada ocupação do solo (técnica). Geralmente é composta por uma carta síntese, quadro-legenda e texto explicativo.*” Além disto apresentam um ótimo resumo das bases conceituais, tipos de cartas, procedimentos para sua obtenção e diretrizes para o inventário de cicatrizes, entre outros assuntos.

Naquele texto, os autores definem que “por meio da análise dos dados geológicos do meio-físico (relevo, material inconsolidado, rocha, hidrogeologia e clima) *prevê-se o comportamento dos terrenos em face da ocupação antrópica*” (grifo nosso). Santos (2014) define a CG como “*um documento cartográfico que informa sobre o comportamento dos diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos homogêneos de uma área frente às solicitações típicas de um determinado tipo de intervenção, e complementarmente indica as melhores opções técnicas para que esta intervenção se dê com pleno sucesso técnico-*

-econômico”. Verifica-se que, na essência, são definições semelhantes. Santos (2014) enfatiza o caráter de cunho preventivo da CG, referido como instrumento básico de planejamento urbano.

Segundo Diniz & Freitas (2013) “a delimitação de unidades do terreno deve ter em conta as diferenças de atributos ou parâmetros do meio ambiente (físico, biótico e antrópico), os quais induzem ou condicionam o desenvolvimento de processos e fenômenos (...). Assim, até para expressar a suscetibilidade a processos do meio físico, sua abordagem deve envolver também aspectos dos meios biótico e antrópico, relativos à ocupação (...)”.

Em seu livro, Santos (2014) diz que a representação na mesma Carta Geotécnica do comportamento do terreno frente a diversos fenômenos problemáticos para a ocupação, tais como deslizamentos, inundações, erosões, abatimentos de terreno ou solapamentos de margem, pode dificultar a visualização. Por isto, sugere a produção de Cartas independentes, como uma CG para deslizamentos e erosões e outra para contaminação de solos e águas subterrâneas.

## 2.2 Escalas de mapeamento

A finalidade da Carta Geotécnica determina a escala e os detalhamentos necessários. O zoneamento básico para produzir as Cartas Geotécnicas pode ser realizado para o planejamento regional, local ou de uma área específica (Fell *et al.* 2008). No caso da CG para Planejamento Territorial, as escalas seguem a seguinte lógica geral (Diniz & Freitas, 2013):

- A Carta Geotécnica de Suscetibilidade voltada ao Planejamento (Municipal) deve permitir, em escala até 1:25.000, a ponderação do grupo gestor municipal na determinação de metas e ações de desenvolvimento, (...) fornecendo dados que contribuam para as ações de planejamento municipal.
- A Carta Geotécnica de Aptidão Urbanística frente aos Desastres Naturais é um instrumento para estimular o desenvolvimento urbano em locais seguros, combatendo a ocupação de áreas ambientalmente vulneráveis e de risco. A fim de se estabelecer normas de ocupação, trata-se de cartografia geotécnica em escala 1:10.000 ou maior.

Embora Santos (2014) seja mais exigente, sob o argumento de que as CG devem permitir decisões de campo muito precisas, com definição de fronteiras entre diferentes compartimentos geotécnicos com precisão da ordem de metros (escalas >1:5.000), este artigo vai discutir a escala de Planejamento Territorial (1:25.000).

## 2.3 Suscetibilidade

Existem pequenas nuances entre as definições para a suscetibilidade nos textos sobre mapeamento. Em geral, a suscetibilidade reflete o potencial de ocorrência de um fenômeno geológico em certa área, sendo determinada a partir de evidências e similaridades com outras regiões ou a partir de inventário de ocorrências. Segundo o trabalho de compilação de informações e conceitos de um grupo internacional (Fell *et al.* 2008, e tradução da ABGE - Macedo & Bressani 2013), suscetibilidade é a avaliação quantitativa ou qualitativa do tipo, do volume (ou área) e da distribuição espacial de deslizamentos que existem ou potencialmente podem ocorrer em uma área. Conforme os autores, embora seja esperado que os deslizamentos ocorram com mais frequência em áreas mais suscetíveis, na análise de suscetibilidade o período de tempo (frequência) não é considerado de forma explícita.

Bressani & Costa (2013) destacam que a suscetibilidade representaria uma expectativa técnica de quais áreas são mais sujeitas a sofrer com certos tipos de eventos adversos, baseada em análise crítica de eventos históricos e dados do geoambiente (topografia, geologia, ocupação, forma do terreno). A suscetibilidade é adimensional, podendo ser definida em termos qualitativos (como alta, média ou baixa) ou quantitativa (em termos de probabilidade de ocorrência de um processo de instabilização com características definidas). Destacam ainda que a avaliação da suscetibilidade é obtida pela análise de diversos fatores que condicionam a ocorrência de um fenômeno adverso (inundações, escorregamentos, secas, etc.) e, assim como o risco, deve ser determinada para cada um dos eventos de forma isolada. No caso de movimentos de massa, a suscetibilidade será função do processo de instabilização considerado e seus fatores condicionantes (como queda de blocos,

escorregamentos lentos ou corrida de detritos), e sua avaliação sempre necessita vir acompanhada da questão: “suscetível a quê?”.

Sobreira *et al.* (2014) descrevem a suscetibilidade como “a potencialidade de processos geológicos (...) causarem transformações do meio físico, independentemente de suas consequências para as atividades humanas. (...) A possibilidade de ocorrência de processos geodinâmicos é condicionada pela predisponência natural do meio físico ao seu desenvolvimento, *podendo em alguns casos ter como um elemento adicional as práticas de uso e ocupação (grifo nosso).*”

Os estudos de suscetibilidade devem avaliar os processos possíveis em áreas mais abrangentes e com agentes deflagradores de maior magnitude, *independentemente da sua ocupação.* Como resultado obtém-se avaliações gerais dos terrenos quanto ao seu comportamento frente aos processos envolvidos representados em cartas. De caráter quase sempre qualitativo, os estudos da suscetibilidade são mais eficazes no planejamento em um nível mais macro, indicando as áreas mais propícias aos diversos usos e ocupações, assim como as restrições existentes nos demais locais. Zuquette & Gandolfi (2004) denominam os produtos cartográficos destas análises como carta de eventos e consideram que, uma vez determinadas a intensidade e probabilidade de ocorrência dos processos acima de um limite crítico pode-se proceder a análise dos perigos (*hazard*) ou eventos perigosos naturais em um determinado intervalo de tempo.

## 2.4 Como são executadas as Cartas Geotécnicas

Segundo Diniz & Freitas (2013), as cartas geotécnicas partem de um inventário com planejamento e levantamento orientado de dados e, posteriormente, são realizadas análises e investigações de campo, para identificação dos problemas (existentes e previstos) decorrentes da interação entre os meios físico, biótico e antrópico (socioeconômico e cultural). Por último estabelece-se a síntese com proposição de alternativas de solução ou de evitar a instalação (ou ocorrência) desses problemas. Segundo Diniz & Freitas (2013), pode-se aplicar os seguintes procedimentos básicos, apoiados em propostas de Prandini *et*

*al.* (1995), complementadas e implementadas por sugestões de outros profissionais especializados em cartografia geotécnica, do Instituto Pesquisas Tecnológicas (IPT) e de diferentes instituições que atuam nessa área no Brasil, e em autores internacionais:

1. **Formulação de um modelo inicial orientador**, com identificação objetiva dos recursos e problemas existentes ou esperados, pelo conhecimento do meio físico e da dinâmica da ocupação local. Para tanto, devem-se buscar informações do meio físico (um esboço fisiográfico primário dos terrenos) e sua relação com o seu uso, resultando em um primeiro ensaio de compartimentação ante os problemas e recursos esperados.
2. **Análise fenomenológica e de desempenho**, identificando as causas do desenvolvimento de processos ou situações geradoras de problemas previamente detectados, estabelecendo as características fisiográficas de interesse para a ocupação (geologia, geomorfologia e parâmetros geotécnicos locais) e as solicitações e transformações inerentes às formas de uso do solo, incluindo questões do meio biótico.
3. **Mapeamento e compartimentação**, estabelecendo-se as principais evidências acessíveis à investigação das características de interesse, fixando critérios de correlação, extrapolação e interpolação das diversas áreas de conhecimento, resultando na configuração espacial da distribuição de tais características.
4. **Orientação das informações e expressões geográficas das características de interesse**, por meio de operações de coleta e análise das informações; reconhecimento/ mapeamento, tanto por sensoriamento remoto, quanto por levantamentos de campo, investigações laboratoriais e *in situ*.
5. **Compartimentação homogênea**, segundo a maior probabilidade de ocorrência de problemas, ou as características de interesse, ou as homogeneidades quanto à aptidão a determinadas formas de uso e ocupação, bem como à minimização de possíveis efeitos.
6. **Representação**, para expor os resultados de modo que facilite o acesso ao público interessado.

Esses procedimentos apresentados por Diniz & Freitas (2013) podem ser estruturados em três fases: **inventário**, **análise** e **síntese**, resumidos na (Figura 1).

Segundo esses autores, as cartas geotécnicas devem levar em conta os seguintes aspectos, dentre outros:

- O histórico da área em estudo e sua evolução em termos de uso do solo devem ser

cuidadosamente levados em conta, pois atividades humanas podem modificar o ambiente de estabilidade dos terrenos (...) e também a suscetibilidade e probabilidade da ocorrência de um ou mais processos (...); (grifo nosso);

Esses procedimentos metodológicos para elaboração da carta geotécnica (...) permitirão a delimitação dos terrenos de acordo com a variação dos processos (Tabela 1).

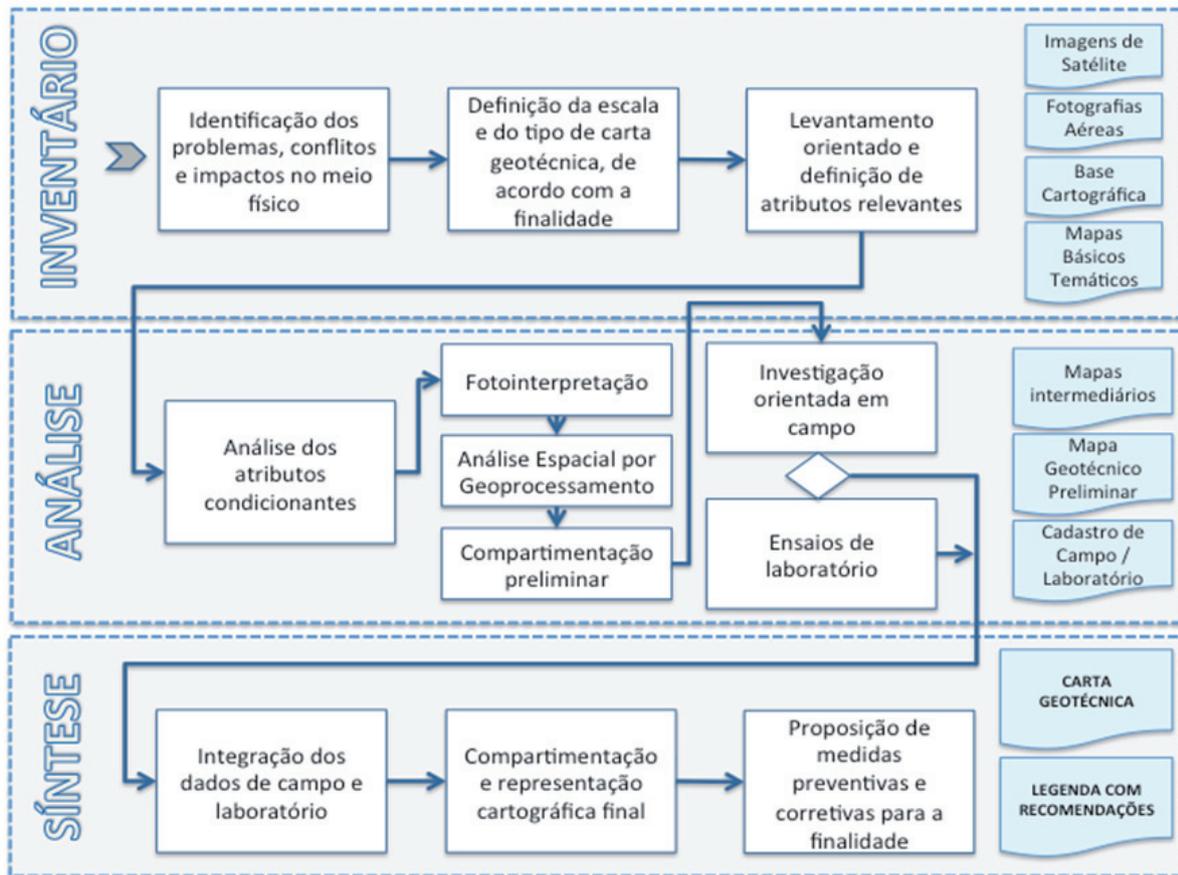


Figura 1 - Fases de uma Carta geotécnica (Diniz & Freitas, 2013).

Em seu relatório final do projeto de elaboração da Carta Geotécnica de Ouro Preto, Sobreira *et al.* (2014), e em Souza & Sobreira (2014), é apresentada uma descrição detalhada das metodologias utilizadas para obtenção da Carta de Suscetibilidade (escala 1:25.000), dividindo-a em etapas, das quais os itens principais estão relacionados a seguir. Segundo estes autores, o produto final a ser obtido será o resultado síntese das suscetibilidades aos processos naturais ou induzidos, associados às condições geomorfológicas e

geotécnicas dos terrenos, com orientações gerais para o seu uso e ocupação.

O inventário de processos é gerado a partir de registros ou cadastro de ocorrências da Defesa Civil/Corpo de Bombeiros (áreas urbanas) e interpretação de imagens/fotos aéreas e trabalhos de campo (áreas urbanas e rurais) - feições indicativas de processos de movimentos de massa e eventos de natureza hidrológica. Segundo os autores, a preparação do inventário de processos geodinâmicos deve envolver o local, a classificação do processo, o estado de atividade e data de

ocorrência em uma área. Entretanto, o inventário de cicatrizes de movimentos de massa pretéritos deve ser baseado no mapeamento direto das cicatrizes e dos depósitos associados, por meio

de imagens de última geração, mas também as antigas, tanto em estudos de detalhe (escalas maiores que 1:10.000) como em estudos mais regionais (escalas 1:25.000 ou menores).

**Tabela 1** – Aspectos gerais para elaboração da Carta Geotécnica de Planejamento (Diniz & Freitas, 2013).

Etapas	Atividades	Produtos	
1. Planejamento da carta	<ul style="list-style-type: none"> <li>Objetivos específicos</li> <li>Escala de representação</li> <li>Equipe interdisciplinar</li> <li>Compilação de dados</li> </ul>	Material secundário disponível	
2. Reconhecimento dos principais processos existentes ou potenciais	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entendimento dos processos</li> <li>Identificação dos fatores condicionantes</li> </ul>	Carta Geotécnica Preliminar	
3. Realização de estudos temáticos dirigidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Informações necessárias do meio físico e da ocupação do solo</li> <li>Tratamento ou elaboração do mapa planialtimétrico e de mapas temáticos (geologia, geomorfologia, drenagem, ocupação do solo, unidades de conservação, outros) na escala necessária</li> </ul>	Informações complementares	
4. Compartimentação geotécnica	<ul style="list-style-type: none"> <li>Análise integrada dos dados temáticos e processos</li> <li>Delimitação das unidades geotécnicas</li> </ul>	Produto Cartográfico	CARTA GEOTÉCNICA DE PLANEJAMENTO
5. Estabelecimento de diretrizes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recomendações de ocupação diferenciadas para cada unidade do terreno, segundo a probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de processo</li> </ul>	Quadro-Legenda	
6. Elaboração do texto do estudo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relatório</li> </ul>	Descrição	

Mapa geomorfológico – validação das unidades de compartimentação do relevo. Diferentemente do substrato, cujas unidades estão já pré-estabelecidas pelos mapas básicos, no caso das coberturas as unidades devem ser definidas conforme seu perfil (textura, espessura, horizontes ou níveis) e seus limites nem sempre são de fácil determinação.

Integração de dados e análise e diagnóstico do meio físico - Os autores descrevem este objetivo como o de “elaborar um documento que represente setores na paisagem que têm condicionantes naturais que indiquem a possibilidade de ocorrência de um processo, assim como as áreas sob influência (atingimento) destes processos”. Os autores discutem no seu texto que “as bases temáticas têm importância diferenciada em relação ao processo analisado e a questão de ponderações e adoção de valores ou índices para as unidades temáticas é um ponto em aberto”. A partir desta discussão, sugerem a elaboração das cartas de suscetibilidades por processos envolvidos e que o zoneamento de unidades de terreno deve levar em conta os diferentes tipos de processos e indicar a adequabilidade da ocupação em cada unidade de terrenos.

Síntese das cartas de suscetibilidades - com a indicação das áreas com restrições à ocupação urbana. Como as cartas de suscetibilidade devem ser compreendidas e utilizadas por um público mais amplo, as cartas dos diversos processos devem ser integradas e simplificadas (Sobreira *et al.* 2014). Para isto, as áreas de suscetibilidade a cada processo devem ser avaliadas em conjunto com os outros processos que podem também afetar o local, ou parte deste, e seu grau (alto, médio ou baixo). No caso do trabalho de Sobreira *et al.* (2014), a carta final deve representar a adequação (aptidão) à urbanização dos terrenos em três classes: (a) áreas consolidáveis; (b) áreas não consolidáveis (ou inapropriadas) e (c) áreas consolidáveis com restrições – necessitam práticas de ocupação ajustadas às condições (com possíveis intervenções de engenharia).

### 3 UMA DISCUSSÃO DOS FUNDAMENTOS PELA VISÃO DA ENGENHARIA GEOTECNICA

Neste item serão discutidos alguns aspectos intrínsecos aos trabalhos de mapeamento, mas que sob o ponto de vista da engenharia, podem

assumir papel e importância diversa de acordo com a região avaliada e os processos nela identificados. Também há conceitos que necessitam ser mais bem sedimentados, adaptados ou observados sob pontos de vista mais práticos e funcionais.

### 3.1 Os processos mapeados

Existem diversos processos geotécnicos de interesse para a Cartografia Geotécnica, com respeito ao Planejamento Regional, cujas áreas de ocorrência e *influência* devem ser mapeadas. As Cartas Geotécnicas devem mapear *todos* os fenômenos presentes na área avaliada, porém o presente artigo foca a discussão nos fenômenos de escorregamentos (*latu sensu*).

Os movimentos gravitacionais de massa (deslizamentos, lato senso) incluem quedas e tombamentos (em geral em rochas), rolamento de blocos rochosos, deslizamentos em cunhas/prismas (rochas e solos saprolíticos), deslizamentos translacionais (rápidos ou não), deslizamentos rotacionais, deslizamentos complexos, escoamentos (ou espraiaamentos), fluxos de detritos/lama/blocos (corridas).

Estes fenômenos apresentam grande variação de velocidades e volumes, em alguns casos na mesma região. De forma bem concisa, é preciso estudar suas causas (redução da resistência ao cisalhamento, aumento da poro-pressão, mudanças geométricas), suas velocidades esperadas (que indicam seu perigo às pessoas) e os volumes envolvidos (que tem relação com o custo de mitigação/estabilização). As Figuras 2 a 5 mostram alguns movimentos de massa onde estas diferenças de comportamento e velocidades ficam evidenciadas (estes são alguns casos nacionais – o leitor é estimulado a comparar com fenômenos das regiões em que novas Cartas Geotécnicas serão feitas).

### 3.2 A suscetibilidade natural a deslizamentos x suscetibilidade induzida

Embora em geral exista uma boa compreensão da suscetibilidade no meio técnico, há dois fatores que os autores gostariam de enfatizar. Em primeiro lugar, a definição de terreno suscetível é fundamentalmente ligada ao processo em análise

(*suscetível ao quê?*). Em segundo lugar, a suscetibilidade é adequada para o estudo de condições intrínsecas ao terreno, ao ambiente, para as condições naturais, como discutido abaixo.

Uma área definida como suscetível tem que ser suscetível a (pelo menos) um tipo de fenômeno bem definido e que tenha seus indicadores, ou fatores predisponentes, igualmente bem ajustados. Assim, as áreas próximas de escarpas rochosas serão suscetíveis a quedas de blocos ou tombamentos e rolamentos de blocos. Áreas de grandes depósitos de materiais coluvionares são tipicamente suscetíveis a movimentos do tipo rastejo sazonais ou rupturas semi-rotacionais (respectivamente de pequena magnitude e velocidade, cumulativos; com trincamentos claros e movimentos importantes). Portanto, estas 2 áreas, com características geomorfológicas muito diferentes, podem apresentar suscetibilidades similares a estes processos distintos. É preciso deixar isto bem claro nos mapas finais.



**Figura 2** – Deslizamentos rasos em encosta vegetada devido à chuva intensa (Gaspar, SC, 2008) – movimento rápido, interrupção da via, pequena frequência (foto de L.A. Bressani).

Outra questão é que a suscetibilidade a um processo deveria ser avaliada para condições naturais, intrínsecas ao ambiente, isto é, deveria refletir a potencialidade daquele ambiente a um determinado tipo de evento. É reconhecido que esta suscetibilidade geralmente vai mudar com a ocupação humana, mas a avaliação regional (escala 1:25.000), só permitirá avaliar esta suscetibilidade quando a intervenção causar mudanças de grande porte. Eventos isolados, como deslizamentos de cortes e aterros, dificilmente podem ser avaliados corretamente nesta escala. E estes acidentes podem ser produzidos em regiões que originalmente

não eram muito suscetíveis, mas cuja ocupação inadequada tenha alterado este quadro.



**Figura 3** – Deslizamento potencial de blocos de rocha ao longo de descontinuidades (Caxias do Sul, 2005) – estável até o momento (2016), frequência (??) – (foto de L.A. Bressani).



**Figura 4** – Escorregamento semi-rotacional, grande área, pequeno aterro sobre depósito de solo (aluviões), movimento de baixa velocidade após longo período de chuvas (Luis Alves, SC) – (foto de L.A. Bressani).



**Figura 5** – Escorregamento semi-rotacional em ambiente construído. Movimento rápido durante chuvas intensas (Blumenau, SC, 2008). Suscetibilidade induzida (foto de autor desconhecido, disponível na web).

Então, para ser comparável, a avaliação da suscetibilidade deveria ser feita com base em uma situação *mais ou menos* natural, isto é, onde a intervenção humana ainda não tenha alterado de maneira importante os condicionantes, os fatores predisponentes do processo analisado.

Mas é importante observar que o grau de preservação destes condicionantes naturais dependerá do processo analisado, como exemplificado a seguir:

1. A suscetibilidade média a alta a escorregamentos de grande porte (por exemplo, grandes corpos de colúvio) é pouco modificada pela ocupação urbana tradicional. E existem casos em que a ocupação pode ser estabilizante;
2. A suscetibilidade alta a quedas de blocos é pouco influenciada pela ocupação (mesmo acentuada) das áreas de atingimento inferiores (ocupação junto das encostas rochosas da serra fluminense, por exemplo);
3. Por outro lado, a suscetibilidade (natural) a escorregamentos é profundamente afetada em ambientes de morrotes de solo quando ocorre a ocupação desordenada tipo corte-aterro (uma área inicialmente pouco suscetível altera para uma *área de perigo* – muitos exemplos no Sudeste brasileiro);
4. No caso hidrológico, a suscetibilidade a enxurradas é profundamente afetada pela ocupação de pequenas bacias íngremes devido aos fenômenos associados à impermeabilização (há muitos exemplos em várias drenagens urbanas com aumento das vazões de pico).

Entretanto, como visto na revisão, os textos sobre Cartas Geotécnicas propõem que o mapeamento seja apresentado na condição de uma suscetibilidade inferida futura, isto é, como o terreno *naturalmente suscetível se comportaria sob a intervenção humana*. Esta projeção futura implica em estimar qual será a *suscetibilidade induzida* pela ocupação. Considerando a grande experiência brasileira com ocupações desordenadas das periferias íngremes das grandes cidades, onde áreas não muito (naturalmente) suscetíveis foram ocupadas com vias irregulares e lotes com platôs de cortes e aterros, gerando diversos e sérios acidentes, esta projeção futura é legítima e relevante nestes casos. Porém, esta inferência implica em que o mapeamento tem que “*pressupor o tipo de ocupação*”. Mais

ainda, a proposta atual das Cartas Geotécnicas, é de propor alternativas técnicas para a ocupação, o que pode ser uma fonte de conflitos técnicos como explicado adiante.

### 3.3 Importância do tipo de deslizamentos no mapeamento final – a avaliação empírica do Perigo (experiência com a mitigação)

O objetivo final da Carta Geotécnica para Planejamento Territorial é a orientação indicativa das áreas mais adequadas para ocupação e, por exclusão, das áreas inadequadas. Mas, em geral, o que realmente importa ao planejador urbano (e sociedade em geral) é saber quais são os perigos da ocupação e quais os custos decorrentes desta ocupação; não valores, mas ordens de grandeza. Lembrando que o perigo segue as definições apresentadas em Fell *et al.* (2008), Macedo & Bressani (2013) e Bressani & Costa (2013), onde o perigo é uma condição com potencial para causar consequência indesejável, ou a probabilidade que uma ameaça específica (portanto, com danos) ocorrer em um dado período de tempo. O perigo é adimensional, e pode ser definido em termos qualitativo (alto, médio ou baixo) ou quantitativo, onde representará a probabilidade de ocorrência de um processo de instabilização que venha a causar algum dano, ainda que avaliado de forma simplificada, para um intervalo de tempo ou por área.

Como os terrenos são suscetíveis a diferentes processos, os valores envolvidos na urbanização segura serão, geralmente, também diferentes. Entre as medidas clássicas de mitigação, a primeira é justamente a evitação (*avoidance*), através de legislações de planejamento de uso ou diretamente restritivas (principal objetivo das Cartas Geotécnicas). Mas existem diversas áreas atualmente ocupadas que tem perigos bem identificados, e que tem medidas de mitigação bem definidas. Estas medidas geralmente são drenagens, obras de contenção, mudanças geométricas, reforços pontuais, impermeabilizações localizadas, etc. Em muitos

destes locais, a remoção da população, mesmo em casos muito claros de instabilidade, e de alto custo de mitigação, tem sido uma decisão difícil porque há muitos outros fatores em jogo (sociais, político-legais, econômicos e culturais, além dos técnicos). A definição da melhor medida de estabilização/mitigação, ou conjunto de medidas, é normalmente um processo longo que envolve investigações geotécnicas, entendimento dos problemas e equacionamento de diversas variáveis, onde a geotécnica é uma importante ferramenta, mas não a única.

Quando há uso adequado das técnicas disponíveis para mitigação, mesmo em áreas problemáticas, a própria ocupação pode trazer resultados adequados: redução ou eliminação de acidentes, aumento da densidade populacional em certas áreas e investimentos privados e públicos ao longo dos anos (arruamentos, praças, edifícios, escolas, comércio). Como pode ser observado em diversos locais, a urbanização é adequada onde a equação (investimento / benefícios) for favorável. A avaliação dos benefícios é bastante complexa e envolve a localização das moradias em relação às fontes de renda, ao acesso à saúde e a educação, além da adequada segurança geotécnica (entre outras) que depende da adoção de medidas corretas de estabilização da área.

Dada a complexidade das intervenções necessárias, há muitas soluções possíveis, mas raramente há soluções semelhantes para locais diferentes. Deste modo, o papel do Geotécnico na elaboração das Cartas Geotécnicas deve ser o de alertar sobre os possíveis mecanismos instabilizantes presentes em certa área, detalhar tanto quanto possível os volumes, velocidades e probabilidades (perigos), mas evitar indicar soluções técnicas muito detalhadas, conforme exemplos citados na Tabela 2. Em síntese, as indicações da Tabela 2 são decisões de projeto, que na prática podem não ser as mais adequadas, necessitando-se estudar caso a caso. Assim, é preferível mencionar apenas as recomendações.

**Tabela 2** – Alguns exemplos de recomendações que devem ser feitas e as indicações que não devem se feitas numa Carta Geotécnica.

Processos	Recomendações indicadas	Indicações a evitar
Rolamento de blocos	Evitar áreas de atingimento. (ou) Estabilizar / remover blocos.	Utilização de grampos de aço. Uso de redes de contenção. Construção de muros de espera.
Deslizamentos translacionais rápidos	Não construir nas áreas fonte ou nas áreas de atingimento. (ou) Estudar obras de estabilização.	Construir muros de arrimo. Efetuar drenagem na área. Utilizar solo grampeado.
Deslizamento rotacional profundo	Estudar medidas de estabilização da área. (ou) Evitar construções até estabilização.	Construir drenagem profunda. Construir contenção com tirantes.

### 3.4 Educação da população sobre os perigos durante o processo de mapeamento das áreas

Um aspecto interessante que é preciso realçar é o **papel educativo** que o próprio processo de elaboração das Cartas Geotécnicas pode ter na Sociedade (população, técnicos municipais, Poder Público, empresários). Na experiência obtida durante o trabalho de mapeamento de Igrejinha, apoiado pelo convênio com o Ministério das Cidades/CEPED-RS-UFRGS (Bressani 2014), foram estabelecidos diversos arranjos de um processo participativo. Assim, os técnicos municipais, agentes da Defesa Civil, vereadores e agentes do Poder Público participaram de diversas reuniões e discussões técnicas sobre os resultados parciais e providências que seriam necessárias, tanto técnicas quanto de natureza geral (legislação, obras, restrições à ocupação, etc.). E à medida que estes dados e conclusões parciais foram sendo obtidos, a população foi sendo informada dos resultados e suas consequências.

Ao final, quando as Cartas Geotécnicas consolidadas foram apresentadas em uma ampla Audiência Pública, não só elas já não eram algo desconhecido ou inesperado, mas já eram entendidas como uma efetiva representação da sua cidade, dos processos de instabilização presentes, bem como de quais seriam os indicativos de ordenamento urbano, um dos principais objetivos destas cartas.

Observou-se ainda que a percepção do perigo destes vários atores em relação à sua cidade e ambiente geológico do entorno havia mudado. Esta nova postura dos diversos atores na aplicação e aceitação de regras e limites de ocupação, o

entendimento das restrições e a mudança de paradigmas em loteamentos, entre outras, se tornou um ponto fundamental para a implantação de medidas mais corretas de ocupação, sejam legais, de fiscalização e controle, ou do interesse imobiliário.

Na opinião dos autores, este processo participativo e educativo deve ser incentivado durante os trabalhos de criação das Cartas Geotécnicas. Ao participar das discussões, descobrir e entender os perigos a que está exposta, com suas causas e consequências, a população altera a sua percepção dos perigos e aceita com mais facilidade as restrições daí decorrentes, inclusive ajudando na sua implantação e fiscalização. O conhecimento dos perigos leva a uma mudança de atitude e a uma maior responsabilidade sobre o uso do solo.

Naturalmente as decisões mais técnicas sobre os tipos de intervenção ou obras necessárias, ou sobre os limites ou áreas afetadas por um deslizamento, continuarão sendo de responsabilidade dos técnicos treinados. Não há contradição entre estas responsabilidades, elas se complementam num ambiente de colaboração e entendimento.

## 4 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O principal objetivo das Cartas Geotécnicas é o de contribuir para a redução de desastres, principalmente pela prevenção, através do incentivo do seu uso no Planejamento Urbano. Felizmente isto tem sido obtido em vários casos, pela utilização adequada destes instrumentos e seu uso deve ser incentivado.

Nas proposições para a execução das Cartas, grande parte dos autores propõe uma *avaliação prospectiva* da suscetibilidade induzida, isto é, a

suscetibilidade que possa vir a ocorrer em uma região ao ser ocupada com a urbanização. O texto discute as diferenças da suscetibilidade dos terrenos não-ocupados, aqui denominada suscetibilidade natural, e a suscetibilidade induzida, isto é, aquela que ocorrerá pela ocupação, a qual só pode ser feita por uma avaliação prospectiva (futura) da ocupação e seus efeitos.

Devido ao histórico recente de ocupações desordenadas nas grandes metrópoles brasileiras (São Paulo, Rio de Janeiro, Salvador, Recife, ABC paulista), esta previsão tem sido baseada nos tipos convencionais de ocupação urbana problemáticas em encostas: a) ocupação com ruelas e caminhos estreitos; b) construção em patamares horizontais com cortes e aterros; c) construções sem técnica adequada de execução (fundações, paredes, muros e porões). Mas esta não é, necessariamente, a utilização futura da área se sua ocupação for bem orientada. E uma ocupação bem orientada pode ter um papel estabilizante, como demonstrado no texto.

Outro fator importante é a necessidade das Cartas Geotécnicas para o Planejamento Urbano irem além da suscetibilidade, ou seja, ao menos expressarem, de alguma forma, o potencial destrutivo dos eventos através de uma **avaliação qualitativa do perigo**. A percepção do perigo (probabilidade de ocorrência de um tipo específico de movimento que cause dano, com velocidade e volume definidos) ou mesmo do risco (a probabilidade de perda financeira associada ao evento, dentro de um período de tempo), mesmo que entendidos qualitativamente, geralmente comandam as decisões das populações medianamente educadas e informadas. Portanto, associados aos fenômenos, é preciso ter em conta uma ordem de grandeza dos perigos (estimativa das consequências) associados aos eventos (frequência de ocorrência, tamanho e velocidade dos movimentos). Isto permitirá aos interessados (incorporadores, população, Poder Público) uma avaliação mais realista dos riscos associados a uma urbanização e as necessidades de investimentos em projeto/obras para garantir a segurança.

Embora esta indicação do perigo apresente grandes dificuldades de avaliação às equipes envolvidas no mapeamento, em última análise são estes fatores que acabam sendo considerados pela Sociedade e os atores interessados (população,

incorporadores, legisladores, representantes do Poder Público) quando fazem o balanço das informações para tomar decisões sobre a urbanização ou não das áreas disponíveis.

Uma alternativa mais simples é a de relacionar claramente a suscetibilidade aos processos. As decisões de planejamento devem levar isto em conta, pois uma área com alta suscetibilidade a movimentos lentos será considerada de maneira diferente de uma área com alta suscetibilidade a movimentos rápidos, porque as mitigações possíveis, quando necessárias, serão muito diferentes, técnica e economicamente. Recomenda-se, portanto, que os relatórios anexos à Carta Geotécnica devam conter uma detalhada descrição das evidências coletadas, das hipóteses adotadas e dos condicionantes utilizados, uma vez que o mapa final tem uma componente de utilização futura, a qual pode ter que ser reavaliada.

Estes aspectos devem ser considerados com cautela pelos órgãos de Governo e técnicos envolvidos com o mapeamento quando da utilização das Cartas Geotécnicas. Ao serem estabelecidas restrições ou proibições à ocupação urbana de certas áreas é porque existem condicionantes geotécnicos fortes, sem dúvida, e eles devem ser identificados e divulgados. À classe geológico-geotécnica cabe fazer parte da discussão sobre a urbanização com o melhor do nosso conhecimento. Entretanto, há outros fatores que intervêm no complexo processo decisório que leva eventualmente ao tipo de uso da região, e eles são legítimos e podem ou não levar a boas soluções.

Por último, é preciso realçar o **papel educativo** que o próprio processo de elaboração das Cartas Geotécnicas pode ter na Sociedade (população, técnicos municipais, Poder Público, empresários), e isto deve ser incentivado, pois são estes os principais entes de transformação e ocupação do meio físico. A pequena experiência no município de Igrejinha serviu de base para o argumento neste artigo, mas há muitos exemplos desse processo de aprendizado, muitas vezes não formalmente relatados.

## AGRADECIMENTOS

Ao grupo de pesquisadores e alunos do LAGEOtec/UFRGS, aos colegas do projeto de Igrejinha/

RS e CEPED-RS, a vários colegas e diretores da CPRM por discussões e debates, à CAPES e CNPq por apoio a projetos de pesquisa e bolsa ao primeiro autor.

## REFERÊNCIAS

- Bressani L.A. (Coord.) 2014. Elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais no município de Igrejinha, RS: Relatório Final. Porto Alegre: CEPED/RS-UFRGS, 2014. Disponível em: <<http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo>>. Acessado em: 23 jan. 2014.
- Bressani L. A., Costa E. A. 2013. Mapeamento Geotécnico - Suscetibilidade, Perigo, Vulnerabilidade, Risco Instalado e Risco. In: Congresso Brasileiro de GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 14, CBGE, Rio de Janeiro, 2013. Anais... Rio de Janeiro, 2013, 10p. PAP014166, 8º SBCGG - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, ST2 - Cartografia Geotécnica e Geoambiental e a Prevenção de Riscos e Desastres Naturais.
- Carvalho C. S. & Galvão, T. 2013. Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais: a Atuação do Ministério das Cidades. VI Congresso CONSAD Gestão Pública, Brasília, abril 2013.
- Diniz N.C & Freitas C.G.L. 2013. Cartografia Geotécnica, Coord. Capítulo 7 in: Parâmetros para cartografia geotécnica e diretrizes para medidas de intervenção de áreas sujeitas a desastres naturais. Coordenação Geral e Organização: Coutinho, R.Q.. Ministério das Cidades - Programas Urbanos, Cartografia Geotécnica/ UFPe - GEGEP/ DECivil. Documento Técnico. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/index.php/carta-geotecnica/5233.html>.
- Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102, pp. 83-98, Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (JTC-1). Disponível em [http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/2008\\_Guidelines.pdf](http://www2.etcg.upc.edu/asg/Talussos/pdfs/2008_Guidelines.pdf). Acessado em: 11 jul. 2013.
- Macedo E. S. & Bressani L.A. (Org.) 2013. Diretrizes para o zoneamento da suscetibilidade, perigo e risco de deslizamento para planejamento do uso do solo. 1a. ed. São Paulo: ABGE/ABMS, 2013. 88p (traduzido por Luiz A. Bressani, Fábio Bertuol e Eli A. da Costa). ISBN 978-85-7270-063-4.
- Prandini F.L., Nakazawa V.A., Freitas C.G.L., Diniz, N.C. 1995. Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais. In: BITAR, O.Y. (Coord.). *Curso de geologia aplicada ao meio ambiente*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) e Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), cap. 4.4, p.187-202.
- Santos A.R. dos (Eds.) 2014. Manual Básico para a Elaboração e Uso da Carta Geotécnica. São Paulo. Ed. Rudder, 103pp.
- Sobreira F. G. *et al.* 2014. Elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais no município de Ouro Preto, MG., Relatório Final.
- Souza L. A. & Sobreira, F. G. 2014. Guia para elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais. 68 pag., il. 210x297mm inclui ilustrações ISBN: 978-85-917793-0-7. Disponível em <http://www.abge.org.br/uploads/imgfck/>

# DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA DELIMITAÇÃO DE BACIAS DE DRENAGEM SUSCETÍVEIS A CORRIDA DE MASSA E ENXURRADA EM REGIÕES SERRANAS

METHOD TO DEFINE DRAINAGE BASINS SUSCEPTIBLE TO DEBRIS FLOW/FLASH FLOOD AND FLASH FLOOD (OR HYPERCONCENTRATED FLOW) IN HILLY AREAS

ALESSANDRA CRISTINA CORSI

*Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, São Paulo, São Paulo, Brasil*  
E-mail: accorsi@ipt.br

MARCELO FISHER GRAMANI

*Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, São Paulo, São Paulo, Brasil*  
E-mail: mgramani@ipt.br

AGOSTINHO TADASHI OGURA

*Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, São Paulo, São Paulo, Brasil*  
E-mail: atogura@ipt.br

## RESUMO ABSTRACT

O método adotado para delimitação de bacias de drenagem com alta susceptibilidade a geração de corrida de massa e enxurrada baseou-se em critérios morfométricos adequados à escala de análise. A análise das bacias de drenagem foi dividida em duas etapas, ambas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas. Na primeira etapa, realiza-se uma análise dos padrões de relevo e da carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa. Se as premissas são aceitas (relevo serrano e mar de morros, e alta suscetibilidade) segue-se para a segunda etapa. A segunda etapa consiste na delimitação e análise das bacias de drenagem geradas a partir do modelo digital de terreno com a obtenção da área e amplitude dessas bacias. As bacias com amplitude maior que 300 m são classificadas como de enxurrada e para as com amplitude maior que 500 m efetua-se o cálculo do Índice de Melton. Se o Índice de Melton for maior que 0,3 estas bacias são classificadas como de corrida de massa caso contrário como de enxurrada. O método foi aplicado em 111 municípios distribuídos nos estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e São Paulo. Desses, 59 possuem bacias de drenagem suscetíveis à geração de corrida de massa/enxurrada e 21 apenas de enxurrada. A utilização do Sistema de Informação Geográfica mostrou-se uma ferramenta útil, pois permite uma variada gama de análises tornando o procedimento ágil.

**Palavras-chave:** Corrida de Massa; Enxurrada, Parâmetro Morfométrico; Bacia de drenagem; Índice de Melton

The method adopted for delimitation of watersheds with high susceptibility to debris flow and flash flood was based on morphometric parameters in appropriate scale analysis. The watershed analysis was divided into two steps, both in Geographic Information System. In the first step performs an analysis of the relief patterns and the susceptibility mass movements' maps. If the premises are accepted (mountain relief and high susceptibility) follows for the second stage. The second step is the definition and analysis of watersheds which is generated from the digital terrain model with getting the area and amplitude of these basins. The basins with range greater than 300 m are classified as flash flood and the range with greater than 500 m performs the calculation of Melton Index. If the Melton index is greater than 0.3 these basins are classified as debris flow otherwise as flash flood. The method was applied in 111 the municipalities in Espírito Santos, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e São Paulo State. Those 59 municipalities have drainage basin susceptible to deflagrate debris flow/flash flood and 21 with flash flood. The use of Geographic Information System proved to be a useful tool as it allows a wide range of analyzes making the agile procedure.

**Keywords:** Debris flow; Flash flood; Morphometric Parameter; Drainage Basin; Melton Index

## 1 INTRODUÇÃO

Os desastres naturais ocorridos nos últimos anos em diferentes locais no sul e sudeste do Brasil, associados a eventos pluviométricos intensos, atestam a necessidade do desenvolvimento de métodos para identificação de bacias sujeitas a geração de corrida de massa e enxurrada.

Nas regiões serranas o conhecimento da dinâmica dos processos hidrogeomorfológicos (*flash flood* e corrida de massa) é de suma importância para estabelecer as estratégias adequadas para o gerenciamento do risco. A análise das bacias de drenagem para a identificação do tipo de fluxo que ocorrem nas mesmas faz-se necessário para definir as medidas de mitigação adequadas. Existem inúmeros trabalhos que diferenciam corridas de massa (*debris flow*) de “*debris flood*” ou fluxo hiperconcentrado (Costa 1988, Wilford et. al. 2004, Jakob & Hungr 2005, Pierson 2005). Para tanto utilizaram as variáveis morfométricas para esta diferenciação (Kostaschuck et. al. 1986, Jackson et. al. 1987, De Scally & Owens 2004, Wilford et. al. 2004, Rowbotham et. al. 2005, Welsh & Davis 2010, Chevalier et. al. 2013). Parâmetros morfométricos tais como, área da bacia, comprimento da bacia e Índice de Melton foram identificados por vários autores como confiáveis para a diferenciação entre bacias com predomínio de corridas de massa das que não predominam corridas de massa (Jackson et. al. 1987, Bovis & Jakob 1999, Wilford et. al. 2004, Welsh 2008, Welsh & Davis 2010).

A corrida de massa é um processo que pode ocorrer em vários locais, das zonas polares às zonas tropicais. Quando ocorrem em áreas montanhosas isoladas, raramente causam desastre, mas em áreas densamente povoadas, no sopé de montanha, promove destruição. As perdas monetárias em função desses eventos são de aproximadamente 5% do total de perdas por desastres naturais no mundo, sem contar com a perda de vidas (Takahashi, 1981). A ocorrência e a recorrência de corrida de massa deixam traços na paisagem que permitem a delimitação das áreas de ocorrência e de atingimento das mesmas. Geralmente ocorrem em áreas montanhosas e com alta declividade (Chevalier et. al. 2013).

Em 2013 foi estabelecida uma parceria técnica entre o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e

o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) para o desenvolvimento de metodologia para elaboração de cartas de suscetibilidade a movimentos de massa e inundação. Os processos do meio físico analisados compreendem os principais tipos de movimentos gravitacionais de massa (deslizamentos; rastejos; quedas, tombamentos, deslocamentos e rolamentos de rochas; e corridas de massa) e de processos hidrológicos (inundações e enxurradas), os quais estão frequentemente associados a desastres naturais ocorridos no País. A premissa para a realização do mapeamento de áreas suscetíveis compreende a necessidade de elaboração de um modelo básico aplicável em nível nacional, com as adaptações necessárias a cada região, bem como em condições de propiciar a comparabilidade entre os municípios mapeados, de modo a subsidiar a formulação e implantação de políticas públicas municipais, estaduais e federais voltadas à prevenção de desastres naturais (Bitar 2014).

O objetivo deste trabalho é apresentar e discutir aspectos do método desenvolvido para delimitação de bacias com alto potencial para gerar corridas de massa/enxurrada e enxurradas em escala 1:25.000, utilizando parâmetros morfométricos. Este modelo pode ser aplicado em áreas com poucas informações sobre o meio físico, onde o modelo digital de elevação esteja disponível. Outro ponto foi produzir um resultado de fácil compreensão por não experts na área.

## 2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PROCESSOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS

A identificação de processos hidrogeomorfológicos (inundação, enxurrada ou corrida de massa) que atuam em uma dada bacia de drenagem é importante, em razão das consequências associadas a cada processo.

Wilford et. al. (2004) distingue os conceitos de inundação, “*debris floods*” e corrida de massa, baseado na concentração de sedimentos na água. A concentração de sedimento em um evento de “*debris floods*” varia de 20 a 47% e para a inundação é menor que 20%.

Os fluxos de alta descarga (muitas vezes indiscriminadamente referidos como “*flash flood*”) em bacias com área de contribuição < 20 km<sup>2</sup>, em

terrenos com inclinação alta, são fenômenos que podem envolver misturas de água e sedimento em proporção variada. A concentração de sedimentos em suspensão desempenha um papel importante no comportamento do fluxo. Três processos básicos de fluxos são reconhecidos nessas drenagens (Pierson 2005), conforme segue:

- Fluxo de água (*Water flow*): a quantidade de sedimento em suspensão é insuficiente para afetar o comportamento do fluxo (5 a 10% de sedimento/volume). As propriedades newtonianas do fluxo são preservadas. A água nesse caso de uma aparência lamosa, mas a maior parte dos sedimentos em suspensão são transportados próximos ao fundo, podendo incluir material até tamanho "boulder";
- Fluxos hiperconcentrados (*Hyperconcentrated Flow*): a quantidade de sedimento é suficiente para alterar as propriedades do fluido e os mecanismos de transporte de sedimentos (40 - 60% de sedimento/volume). Volumes significativos de areias são transportados em suspensão ao longo da coluna de água, apesar da manutenção de cargas elevadas de sedimentos dependerem da velocidade e turbulência do fluxo. Esse tipo de fluxo pode ser altamente erosivo; e
- Debris flow: quantidade de água e sedimento (> 65% de sedimento) capaz de reter partículas do tamanho de cascalho em suspensão quando fluindo lentamente ou parado. Pode atingir altas velocidades, transportando blocos de dimensão variada em suspensão, e causando danos pelo impacto ou soterramento. Em canais de declividade baixa e em leques aluviais o fluxo pode ser lento, mas pode entulhar rapidamente o canal, desviar cursos d'água e destruir veículos, edifícios e infraestrutura.

Segundo Gramani (2001) as corridas de massa ou de detritos (*debris flow*) constituem-se em um dos mais expressivos tipos de movimentos gravitacionais de massa, em termos de volume de material mobilizado, raio de alcance e potencial destrutivo. O termo *debris flow* é utilizado para caracterizar processos de corrida de detritos compostos por água com solos finos, cascalhos, blocos de rochas e troncos de árvores. Já o *debris flood* é definido como um fluxo repentino e temporário de água com alto teor de

sedimentos finos que ocorrem em drenagens de encostas serranas. O aumento no nível de água da drenagem favorece a remoção de materiais do pé das encostas, porém sua capacidade erosiva é menor do que os *debris flow*. As corridas de massa (*debris flow*) caracterizam-se por uma movimentação na forma de escoamento viscoso, as quais envolvem um fluido geralmente denso, composto por uma mistura de blocos de rocha, solo (cascalho, areia e lama), material orgânico (galhos e troncos de árvores) e quantidades variáveis de água. Durante o início e a fase de aceleração, os *debris flows* são extremamente erosivos, e geram grandes forças de impacto. Na sua desaceleração e consequente deposição, os *debris flows* inundam e cobrem áreas com grande volume de material e com espessuras variáveis. Essas corridas de massa são consideradas como um dos mais expressivos mecanismos para transportar materiais provindos de escorregamentos nas encostas, em termos de volume mobilizado, velocidade e distância atingida.

Segundo Hungr (2005) as corridas de detritos podem ser definidas como:

- Corrida de Detritos (*Debris Flow*): movimento rápido a extremamente rápido de detritos saturados, não plásticos, em locais confinados ou não, com índice de Plasticidade (IP) inferior a 5% na fração solo;
- Corrida de Lama (*Mud Flow*): movimento rápido a extremamente rápido de lama (material fino) saturada, em locais confinados ou não, com muita água envolvida e alta plasticidade;
- Fluxo de Detritos (*Debris Flood*): movimento rápido, a partir do movimento de água, com elevada quantidade de detritos, em local confinado ou não; e
- Avalanche de Detritos (*Debris Avalanche*): movimento rápido ou extremamente rápido de material superficial, saturado ou parcialmente saturado, em local confinado ou não.

Takahashi (2007) propõe uma classificação, a partir de eventos chineses e japoneses, na qual as corridas de detritos são diferenciadas pela natureza da massa escorregada:

- Corrida de Detritos Grosseiros (*Stony-type Debris Flow*): fluxo com presença elevada de grandes blocos rochosos e materiais mais grossos;
- Fluxo Turbulento de Lama (*Turbulent-muddy-type Debris Flow*): fluxo proveniente de

erupções vulcânicas, quando há deposição das cinzas em finas camadas de fácil erosão e transporte por meio de chuva; e

- Corrida de Detritos Viscosos (*Viscous Debris Flow*): fluxo característico de depósitos em lugares com atividade intermitente. Atividades constantes levam a uma suavização do relevo e o depósito atinge o equilíbrio.

Jakob (2010), por sua vez, prefere uma definição híbrida para *debris flow* a partir das definições de Hungr et. al. (2005) e Iverson (2009) que definem o processo como “um fluxo de minerais não plásticos, saturados, e algumas vezes com detritos orgânicos, em canais íngremes, que incluem 50-70 % de grãos sólidos por volume, que podem atingir velocidades de 10 m/s e podem variar entre 10 e 109 m<sup>3</sup> em volume.

## 2 MÉTODO PARA DELIMITAÇÃO DE BACIAS DE DRENAGEM COM ALTA SUSCETIBILIDADE

A ocorrência desses processos é favorecida por um conjunto de condicionantes do meio físico que permitem a sua formação e o seu desenvolvimento. Inicialmente, reconhecem-se aspectos relacionados às condições geológicas, geomorfológicas, hidráulicas e climáticas, que contribuem simultaneamente para a deflagração e continuidade dos processos. Alguns fatores ou condições especiais tendem a ser favoráveis para a ocorrência das corridas de massa, destacando-se:

- Geológico: abundante fonte de partículas e detritos de solos e/ou rocha inconsolidados (ou passíveis de mobilização);
- Geomorfológico: encostas íngremes (geralmente acima de 25°);
- Hidrológico: fonte abundante de água atingindo os materiais suscetíveis à escorregamentos (hidrodinâmica: chuvas, degelo, rompimento de lagos, outros); e
- Vegetação: esparsa.

Várias pesquisas foram desenvolvidas nos últimos anos para a identificação de áreas suscetíveis as corridas de massa utilizando métodos quantitativos, tais como, regressão logística e análise discriminante em adição ao uso de Sistema de Informações Geográficas e sensoriamento remoto (De Scally & Owens 2004, De Scally et. al. 2010, Wilford et. al. 2004, Rowbotham et. al. 2005, Chen & Yu 2011, Santangelo et. al. 2012, Crosta &

Frattini 2004, Griffiths et. al. 2004, Kostaschuk 1986, Patton & Baker 1976, Bertrand et. al. 2013, entre outros).

No Brasil, mapas de suscetibilidade a movimentos de massa e corridas de detritos também foram desenvolvidos considerando parâmetros morfométricos ou modelagem matemática, assim temos os trabalhos de Avelar et. al. (2003), Alvarado (2006), Coelho Neto et. al. (2007), Lopes (2006), Lopes & Reidel (2007); Lopes et. al. (2007), Gomes et. al. (2008), Monguilhott (2008), Strieder et. al. (2008), Lacerda (2012), Silveira et. al. (2012), Vanacôr & Rolim (2012), Arruda Junior & Lopes (2013), Coelho Neto et. al. (2013), Gomes et. al. (2013) entre outros.

Segundo uma gama de autores os processos de corrida de massa desenvolvem-se em áreas montanhosas e com alta declividade (Wilford 2004, Jakob & Hungr 2005, Welsh & Davis 2010, Chevalier et. al. 2013).

Os movimentos gravitacionais de massa formam-se geralmente nas cabeceiras de drenagens, primárias e/ou secundárias, associadas à concentração de sedimentos, mais água, numa quantidade crítica para o seu desenvolvimento no canal. Jackson et. al. (1987) adota para análise morfométrica, bacias de 1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> ordem. Dentro desse contexto optou-se por adotar as bacias de 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> ordem seguindo a classificação proposta por Strahler (1957) para a rede de drenagem.

Apesar da corrida de massa ser gerada por vários mecanismos, em diferentes países, envolvendo fluxos piroclásticos e derretimento de geleiras ou por fluxos abruptos de água com sedimentos, predomina mobilização a partir de deslizamentos. Os deslizamentos podem ser completamente ou parcialmente mobilizados para a forma de corridas de massa, e em condições específicas devem existir para que essa mobilização ocorra (Iverson, Reid, LaHusen, 1997).

A região montanhosa do Rio de Janeiro é altamente suscetível a deslizamentos e fluxo de detritos. Em função das interações locais de vários fatores que controlam os processos, as ocorrências não são espacialmente uniformes. Coelho Neto et. al. (2010) apresentou uma metodologia para subdivisões morfométricas do terreno com base em parâmetros hidrogeomorfológicos. Os parâmetros incluem a densidade *hollow* (*Hd*) e densidade

de drenagem de Strahler (Dd) multiplicado pelo gradiente da bacia (Gb) gerando o Índice de Eficiência de Drenagem (DEI). Os polígonos obtidos foram superpostos aos mapas de declividade e aos ângulos de inclinação crítica produzindo o mapa hidrogeomorfológico. Posteriormente este mapa foi integrado com o mapa geológico-geotécnico, de vegetação e de uso da terra gerando o mapa de suscetibilidade na escala 1:10.000.

Rogelis & Werner (2014) desenvolveram um indicador de suscetibilidade composto por dados morfométricos e uso e ocupação do solo. O método foi aplicado em 106 bacias localizadas nas áreas montanhosas periurbanas de Bogotá (Colômbia). As análises mostraram que os parâmetros morfométricos identificam as bacias com alto potencial a ocorrência de *debris flow*, enquanto os dados de uso e ocupação podem reduzir as suscetibilidades para as mesmas bacias. A combinação de ambos os dados proporcionou resultados, mas confiáveis para a área de estudo.

O Índice de Melton foi considerado pela relação morfométrica entre a amplitude e a área da bacia, sendo um indicador de fácil utilização e que permite diferenciar entre bacias com suscetibilidade à geração de corrida de massa daquelas que geram enxurradas. Este índice foi utilizado primeiramente por Jackson et. al. (1987) para diferenciar fluxos de detritos de inundação em bacias de drenagem nas montanhas costeiras do sudoeste da Columbia Britânica, no Canadá. Obtendo Índices para bacias de inundação  $< 0,3$  e para corrida de massa  $> 0,3$ . Por outro lado, Bovis & Jakob (1999) obtiveram um Índice de Melton  $> 0,53$  para bacias de drenagem com fluxo de detritos. Segundo Wilford et. al. (2004), o Índice de Melton mostrou-se aplicável para separar bacias de drenagem com potencial de gerar corrida de massa daquelas suscetíveis apenas aos processos de inundação. O Índice de Melton  $< 0,3$  bacias com potencial de inundação;  $0,3$  a  $0,6$  potencial de "debris flood"; e  $> 0,6$  corridas de detritos. Adotou-se utilizar o Índice de Melton  $> 0,3$  por questões de segurança, sem diferenciar entre os processos de *debris flood* e corrida de detrito.

Dessa maneira, com base no levantamento bibliográfico e no conhecimento da equipe de pesquisadores do IPT, adotaram-se para este procedimento metodológico os seguintes pressupostos

básicos para seleção e definição de critérios e parâmetros de análise em terrenos naturais suscetíveis aos processos de corridas de massa e de enxurradas: bacias hidrográficas onde ocorrem corridas de massa apresentam atributos físicos que possibilitam também a geração de enxurradas; por outro lado, nem todas as bacias hidrográficas e respectivos cursos d'água onde podem ocorrer enxurradas têm atributos que possam gerar também corridas de massa; e corridas de massa ocorrem necessariamente em bacias que compreendem terrenos de alta suscetibilidade a deslizamentos (Bitar 2014).

Além dos autores acima citados também foram considerados, para a obtenção de critérios e parâmetros de análise, os trabalhos de Gramani & Kanji (2000), Ogura & Gramani (2000), Gramani & Kanji (2001), Kanji & Gramani (2001), Gramani (2001) e Gramani & Augusto Filho (2004).

Os parâmetros considerados neste método para corrida de massa compreendem:

- Unidades de relevo serrano;
- Terrenos com alta suscetibilidade a deslizamentos;
- Amplitude  $> 500$  metros para corridas de massa (R);
- Bacias de drenagem de 1ª, 2ª e 3ª com Área  $< 10 \text{ km}^2$ ; e
- Índice de Melton (M) que expressa a relação entre amplitude e área da bacia, onde  $M = \text{Amplitude} / \text{raiz quadrada da Área}$ .

Os pressupostos acima também são válidos para as enxurradas em ambiente natural. No presente trabalho a definição utilizada foi: enchente ou inundação brusca e de curta duração, desenvolvida em bacias de drenagem restritas no contexto de relevo serrano ou morros altos, por ocasião de chuvas intensas. Caracteriza-se por alta energia de transporte e capacidade de arraste, com elevado potencial de impacto destrutivo. Pode induzir a instabilização e solapamento de taludes marginais ao longo do curso d'água. Os parâmetros considerados neste método para enxurrada compreendem:

- Unidades de relevo serrano e/ou de morros altos;
- Amplitude  $> 300$  metros;
- Bacias de drenagem de 1ª, 2ª e 3ª com Área  $< 10 \text{ km}^2$ .

As Figuras 1 e 2 apresentam o fluxograma adotado para a delimitação das bacias suscetíveis à geração de corrida de massa e enxurrada em ambiente de Sistema de Informação Geográfica.

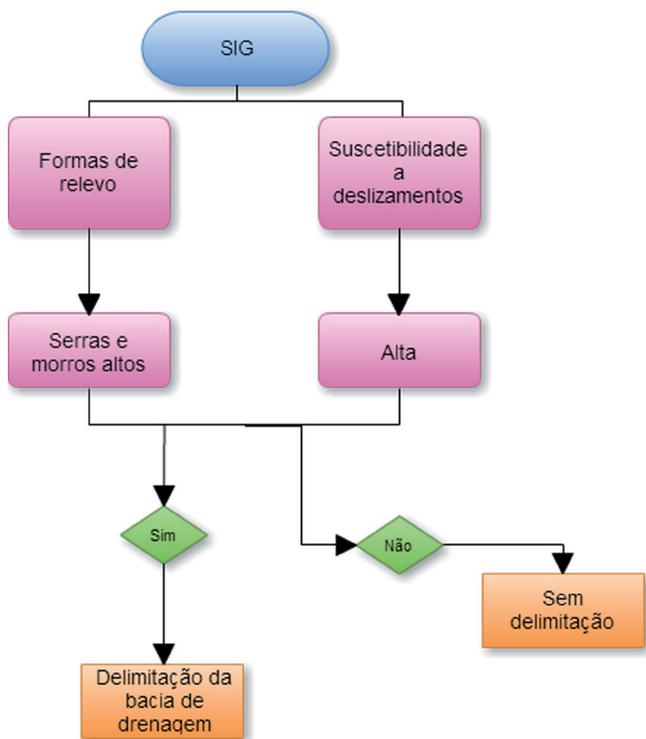


Figura 1 - Fluxograma para análise dos condicionantes básicos e delimitação de bacias de drenagem (Fonte: CORSI et. al, 2015 a e b).

A aplicação do método de delimitação de bacias com alto potencial para gerar corridas de massa e enxurrada está diretamente ligada ao modelo digital de elevação (MDE). Os MDEs foram obtidos juntos aos órgãos responsáveis em cada estado. O modelo digital de terreno para o estado de Santa Catarina foi fornecido pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável na escala 1:2000. Para o estado de São Paulo utilizou-se os modelos digitais de superfície fornecido pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A. (EMPLASA) na escala 1:25.000 e modelos digitais de terreno gerados a partir dos dados planialtimétricos fornecidos pelos municípios. Para os estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Paraná os modelos digitais de terreno foram gerados a partir dos dados planialtimétricos. Minas Gerais as bases foram disponibilizadas pela Geobases na escala 1:50.000. Os dados do estado de Minas Gerais os dados foram fornecidos pela Funcate/ IEF nas

escalas 1:100.000 e 1:50.000. Para os estado do Paraná as bases foram fornecidas pela SUDERHA, AGRITEC, PARANACIDADE e IBGE nas escalas 1:50.000, 1:10.000 e 1:2.000.

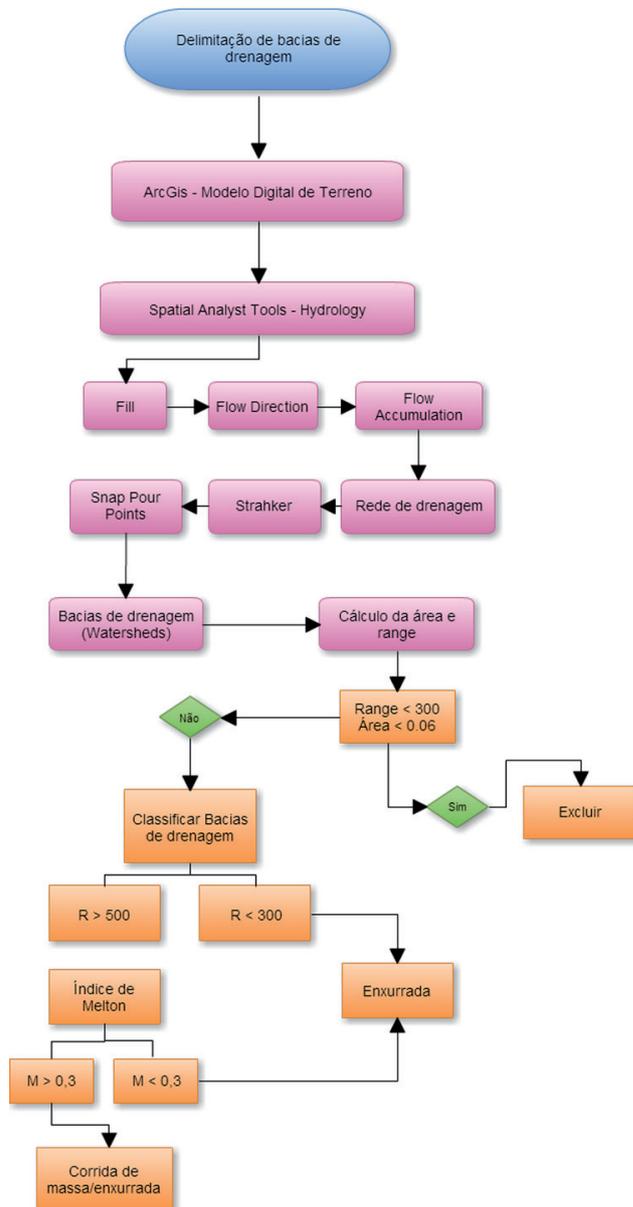


Figura 2 - Fluxograma para delimitação e análise das bacias de drenagem, utilizando o ArcGis (Fonte: Corsi et. al, 2015 a e b).

### 3 RESULTADO E DISCUSSÃO

O método proposto foi aplicado em 111 municípios dos estados do Espírito Santo, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina e São Paulo. A Figura 3 apresenta a localização dos municípios analisados no contexto do presente trabalho.

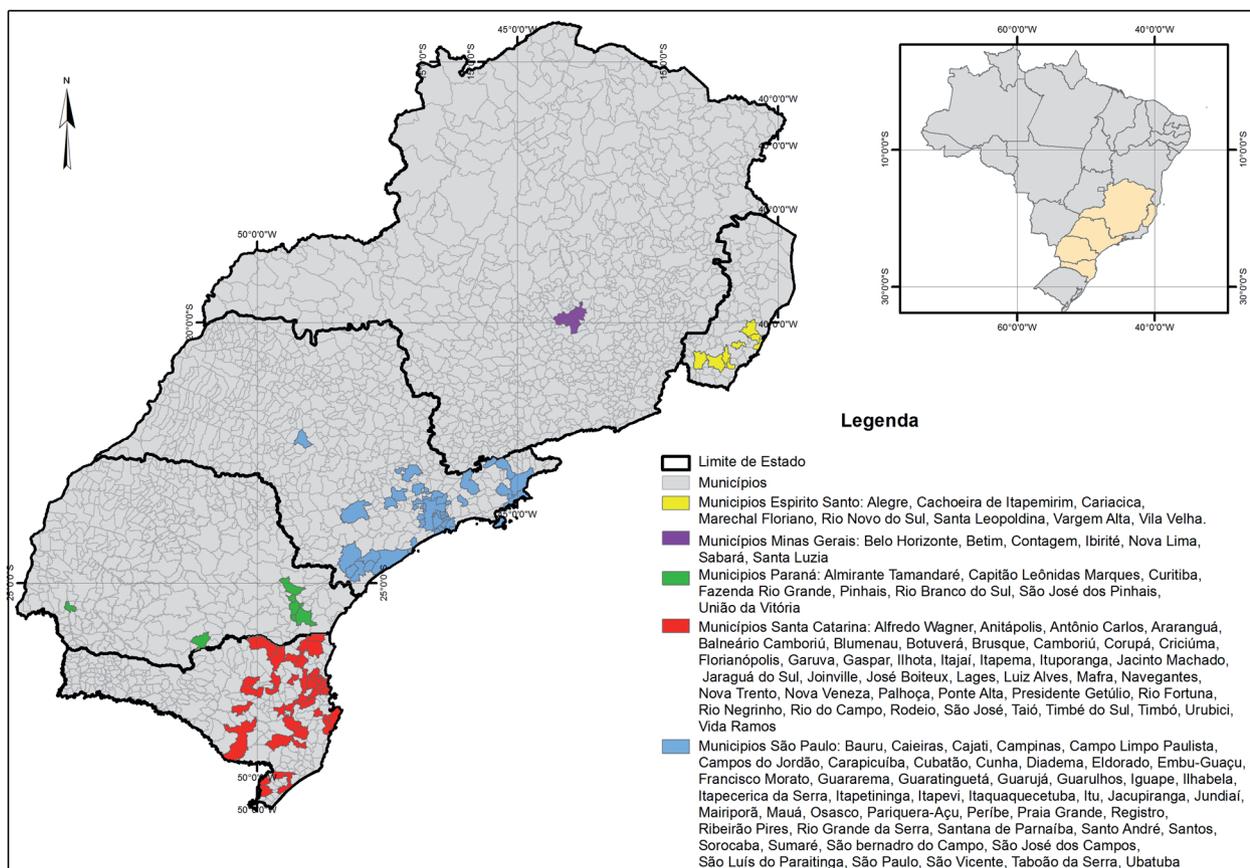


Figura 3 – Localização dos municípios mapeados.

Dentre os 111 municípios mapeados, 59 possuem bacias de drenagem com alta suscetibilidade à geração de corrida de massa/enxurrada e 23 possuem de enxurrada, conforme pode ser observado nas Tabelas 1 e 2. O estado de Santa Catarina

possui o maior número de municípios com bacias suscetíveis a corrida de massa/enxurrada e de enxurrada, dentro do universo de análise considerado neste trabalho.

Tabela 1 - Relação dos municípios com bacias suscetíveis a geração de corrida de massa/enxurrada, dentre os 111 mapeados.

Estado	Município
Espírito Santo	Alegre, Cachoeira do Itapemirim, Cariacica, Rio Novo do Sul, Santa Leopoldina, Vargem Alta, Vila Velha
Minas Gerais	Nova Lima, Sabará
Paraná	São José dos Pinhais
Santa Catarina	Alfredo Wagner, Anitópolis, Antonio Carlos, Blumenau, Botuverá, Brusque, Camboriú, Corupá, Florianópolis, Garuva, Gaspar, Ilhota, Itapema, Jacinto Machado, Jaraguá do Sul, Joinville, José Boiteux, Luiz Alves, Nova Trento, Nova Veneza, Palhoça, Presidente Getúlio, Rio do Campo, Rio Fortuna, Rodeio, Timbé do Sul, Timbó, Urubici, Vidal Ramos
São Paulo	Cajati, Campos do Jordão, Cubatão, Cunha, Eldorado, Guaratinguetá, Guarulhos, Iguape, Ilhabela, Jacupiranga, Peruíbe, Praia Grande, Santo André, Santos, São Bernardo do Campo, São José dos Campos, São Luis do Paraitinga, São Paulo, São Vicente, Ubatuba

**Tabela 2** – Relação dos municípios com bacias de drenagem suscetíveis a geração de enxurrada, dentre os 111 mapeados.

Estado	Município
Espirito Santo	Marechal Floriano
Minas Gerais	Belo Horizonte, Betim e Santa Luzia
Paraná	Curitiba, Rio Branco do Sul e União da Vitória
Santa Catarina	Balneário Camboriú, Itajaí, Ituporanga, Lages, Navegantes, Ponte Alta, São José e Taió
São Paulo	Caieiras, Campo Limpo Paulista, Guarujá, Jundiá, Mairiporã, Pariquera-Açu, Registro e Santana do Parnaíba

O Índice de Melton  $> 0,3$  adotado no método foi eficaz para a distinção entre bacias de drenagem com alta suscetibilidade à geração de corrida de massa/enxurrada das que geram apenas enxurrada, em diferentes ambientes geológicos. No entanto, deve-se ressaltar que a ocorrência desses fenômenos está diretamente relacionada com a intensidade da chuva e a disponibilidade de material nas encostas e nos canais de drenagem. O método não fornece informações sobre a frequência e a magnitude dos eventos nas bacias de drenagem delimitadas, sendo necessários estudos detalhados para obtenção dessas informações.

Os eventos de corridas de massa registrados na literatura ocorreram principalmente nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Santa Catarina, Minas Gerais e Ceará (Tabela 03).

O universo dos municípios mapeados no presente trabalho (Tabela 01) quando comparados com os dados históricos (Tabela 03), demonstra que o método aplicado foi eficaz na identificação das bacias com potencial para gerar o processo, uma vez que nesses municípios com ocorrência pretéritas as mesmas foram delimitadas, sendo estes no estado de São Paulo: Cubatão e São Bernardo do Campo; e de Santa Catarina: Timbé do Sul, Jacinto Machado, Luiz Alves, Ilhota e Gaspar.

No trabalho de campo foi possível identificar o sucesso do método na delimitação de bacias de drenagem com ocorrência de corrida de massa/enxurrada e de enxurrada constatadas nos municípios de Corupá (SC), Joinville (SC) e Cubatão (SP). Em 2010 ocorreu um fluxo de detritos na área rural do município de Corupá (SC), sem danos ou vítimas fatais (Figuras 4, 5 e 6). A bacia de drenagem palco do evento foi delimitada pelo

método. Na área rural de Joinville (SC) em 2008 ocorreu um deslizamento que evoluiu para uma corrida de massa atingindo moradias (Figuras 7, 8 e 9). No município de Cubatão em 1994 ocorreu uma corrida de massa na bacia de drenagem do ribeirão das Pedras, situada a montante da Refinaria Presidente Bernardes (Figuras 10, 11 e 12).

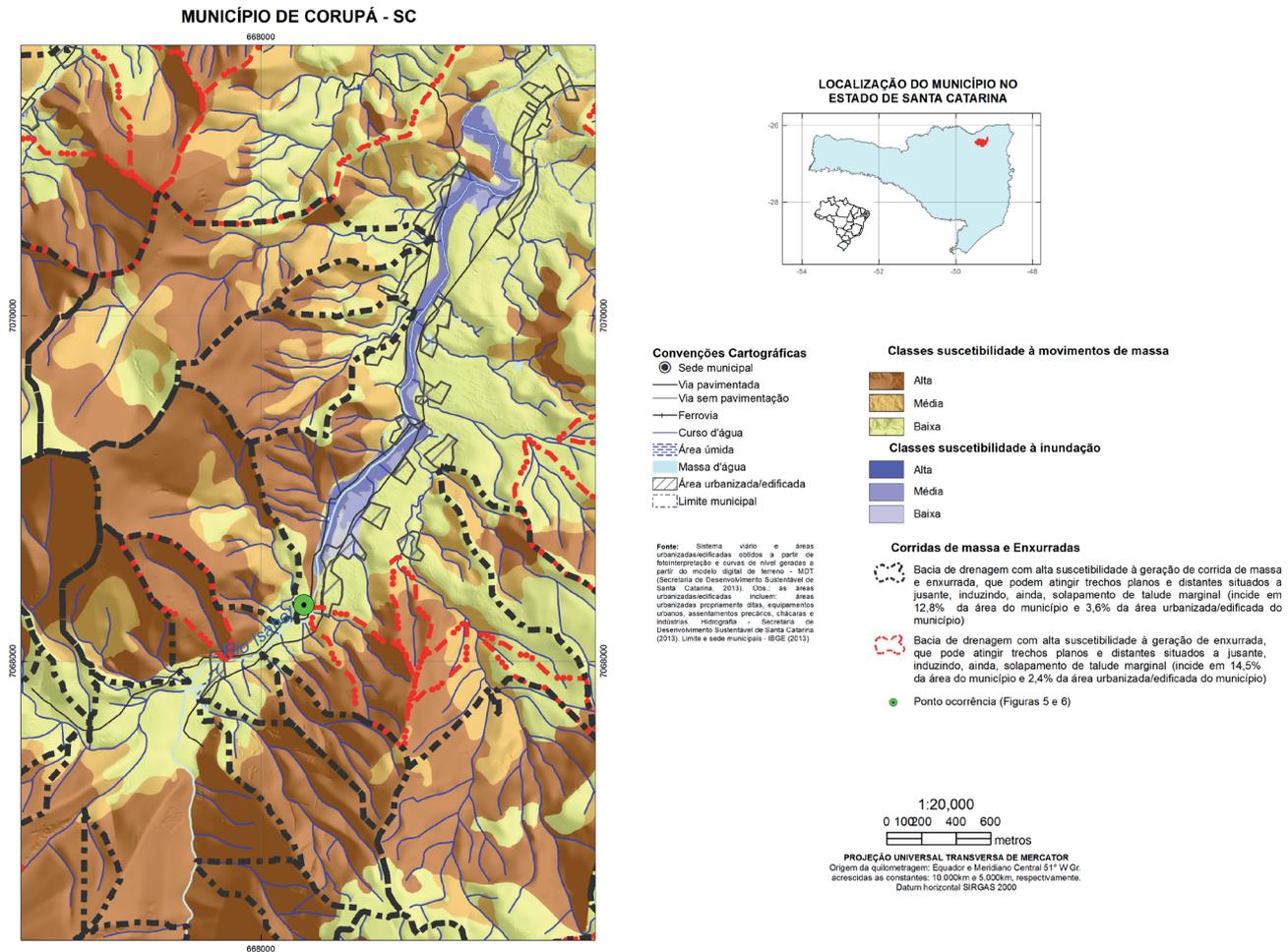
**Tabela 3** – Relação dos registros de ocorrência de corridas de massa (Modificado de Motta, 2014 e Gramani, 2015)

Local	UF	Data
Região de Leopoldina	MG	1948
Caraguatatuba	SP	1967
Serra das Araras	RJ	1967
Urussanga – Serra de Tubarão	SC	1974
Laguna – Serra de Tubarão	SC	1974
Tubarão	SC	1974
Serra de Maranguape	CE	1975
Cubatão – Grota Funda	SP	1975-1976
Cubatão – Rio Cachoeira	SP	1976
Cubatão – Braço Norte	SP	1976
Lavrinhas	SP	1986
Petrópolis	RJ	1988
Cubatão – Córrego das Pedras (Refinaria Presidente Bernardes)	SP	1994
Timbé do Sul e Jacinto Machado	SC	1995
Cubatão – Córrego das Pedras	SP	1996
Bacia do rio Quitete	RJ	1996
Bacia do rio Papagaio	RJ	1996
Rio de Janeiro – Jacarepaguá – Pau da Fome	RJ	1996
Via Anchieta km 42	SP	1999
Região de Lavrinhas	SP	2000
Complexo do Bauú (municípios de Luiz Alves, Gaspar e Ilhota)		2008
Região Serrana do Rio de Janeiro	RJ	2011
Antonina e Paranaguá	PR	2011
Mirim Doce	SC	2011
Cubatão – afluentes do rio Pilões	SP	2013
São Bernardo do Campo – TA 10/11 – Imigrantes	SP	2013
Itaoca – córrego Guarda-Mão	SP	2014

Análises em ambiente de Sistema de Informações Geográficas de dados topográficos geram rapidamente os parâmetros morfométricos necessários para a aplicação do método. No entanto, a qualidade do modelo digital de elevação tem forte influência na qualidade das análises, sendo ideal o *input* de modelo digital de terreno onde os

efeitos da vegetação e de construções não estejam presentes. Neste trabalho a dificuldade encontrada foi exatamente ligada à qualidade dos modelos digitais fornecidos pelos órgãos responsáveis de cada estado. Os Modelos Digitais de Superfície

(MDSs) resultaram na obtenção de um produto com muitas incertezas, não inviabilizando a aplicação do método, porém, o processo de validação tornou-se mais trabalhoso.



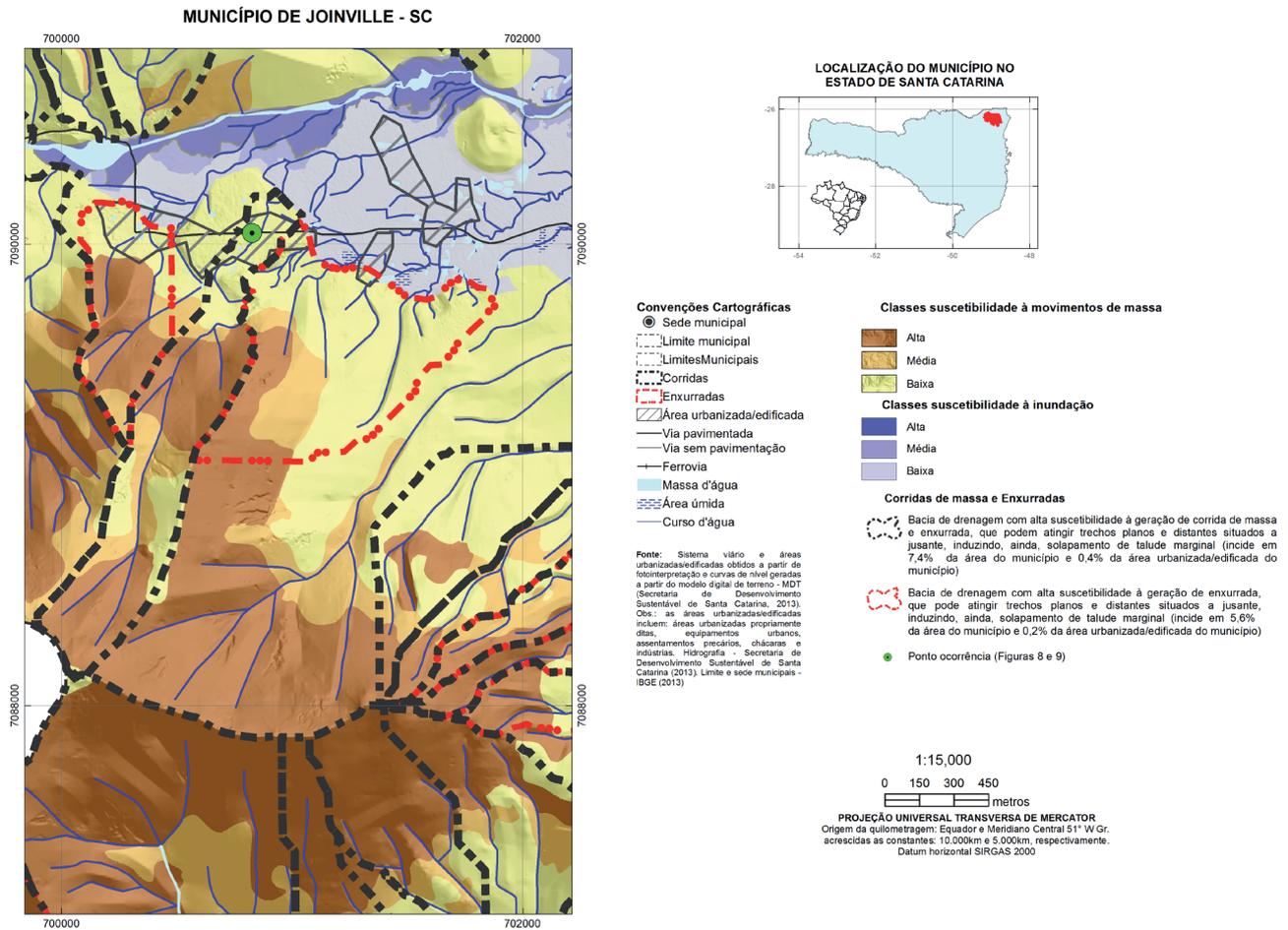
**Figura 4** - Bacia de drenagem com alta suscetibilidade à geração de corrida de massa/enxurrada e enxurrada delimitada para o município de Corupá (SC). Esse município registrou a ocorrência de um fluxo de detritos em 2010 (Fonte: IPT).



**Figura 5** - Observar a amplitude do relevo e o canal de passagem do fluxo de detritos (Fonte: IPT).



**Figura 6** - Notar o tamanho dos blocos mobilizados no fluxo de detritos, no município de Corupá (Fonte: IPT).



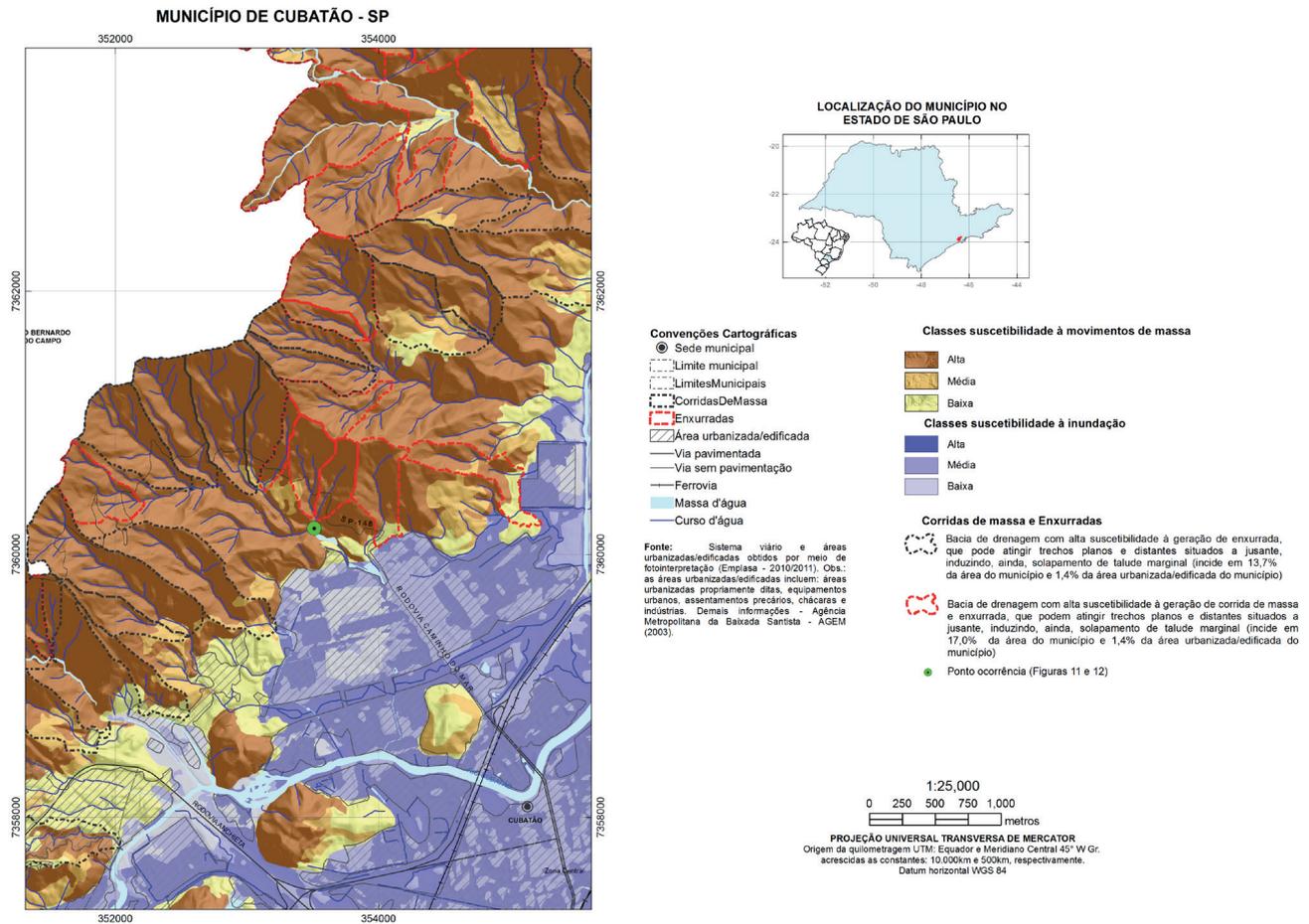
**Figura 7** – Bacia de drenagem com alta suscetibilidade à geração de corrida de massa/ enxurrada e enxurrada delimitada para o município de Joinville (SC). Esse município registrou a ocorrência de um fluxo de detritos em 2008 (Fonte: IPT).



**Figura 8** – Deslizamento em encosta com declividade alta que evoluiu para um fluxo de detritos em 2008 no município de Joinville (SC) (Fonte: IPT).



**Figura 9** – Área de passagem do fluxo de detritos que ocorreu em 2008 no município de Joinville (SC) (Fonte: IPT).



**Figura 10** – Bacia de drenagem com alta suscetibilidade à geração de corrida de massa/enxurrada e enxurrada delimitada para o município de Cubatão (SP). Esse município registrou a ocorrência de um fluxo de detritos em 1994 (Fonte: IPT).



**Figura 11** – Notar o tamanho dos blocos mobilizados na corrida de massa ocorrida na bacia de drenagem do ribeirão das Pedras, no município de Cubatão (Fonte: IPT).



**Figura 12** – Ao fundo cicatrizes nas encostas da bacia de drenagem do ribeirão das Pedras. Notar os blocos e troncos de árvores (Fonte: IPT).

## 4 CONCLUSÃO

Os perigos hidrogeomorfológicos devem ser identificados para o desenvolvimento de estratégias de gestão adequadas. Para tanto, foi desenvolvido em ambiente SIG um método simples para delimitação de bacias de drenagem suscetíveis à geração de corrida de massa/enxurrada e enxurrada. O método utiliza o Índice de Melton  $> 0,3$  para distinção entre bacias de drenagem com corrida de massa/enxurrada das de enxurrada e dados morfométricos das bacias como amplitude e área.

A modelagem morfométrica para delimitação de bacias de drenagem suscetíveis à geração de corrida de massa/enxurrada e enxurrada mostrou-se eficaz e passível de aplicação em todo o território nacional, uma vez que considera aspectos de morfometria dos terrenos. Quando o método foi aplicado em bacias de drenagem com histórico de ocorrências essas foram classificadas com alta suscetibilidade à geração de corrida de massa/enxurrada e enxurrada, corroborando para a aplicabilidade do método.

O método foi aplicado em 111 municípios, destes 59 possuem bacias de drenagem suscetíveis à geração de corridas de massa/enxurrada e 21 à enxurrada. Dentre os estados analisados, o de Santa Catarina destaca-se pela maior número de municípios com alta suscetibilidade a ocorrência de corrida de massa/enxurrada e enxurrada em função da localização dos mesmos em regiões serranas.

Nos trabalhos de campo efetuados nos municípios mapeados foi possível identificar depósitos de eventos pretéritos, coincidentes com as bacias de drenagem delimitadas. Além disso, relatos dos moradores e dos técnicos das Defesas Civas municipais contribuíram para aumentar a confiabilidade do método. No entanto, como o método adotado delimita bacias com alta suscetibilidade, não se pode descartar a possibilidade de um dado evento ocorrer em bacias de média e baixa suscetibilidade, pois a chuva, que é o desencadeador dos eventos, não foi considerada diretamente na proposta metodológica.

Outro ponto que merece destaque está ligado à qualidade do modelo digital. Quando os modelos refletem o terreno os trabalhos de escritório pós-campo são praticamente nulos. Porém quando o modelo digital é de elevação nas bacias com

ocorrência de reflorestamento ou mata de grande porte os trabalhos pós-campo são extremamente necessários.

Cabe ressaltar que trabalhos de campo específicos para estes municípios com bacias suscetíveis à geração de corridas de massa/enxurrada e enxurrada são necessários, pois pelo método utilizado delimita-se somente a área de geração e não a trajetória e o alcance.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CPRM e ao IPT pelo suporte ao trabalho, bem como aos técnicos das Defesas Civas dos municípios visitados pelo apoio no trabalho de campo.

## REFERENCIAS

- Alvarado L. A. S. 2006. "Simulação bidimensional de corridas de detritos usando o método de Elementos Discretos". Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC - RIO), 154p.
- Arruda Junior E.R.; LOPES E.S.S. 2013. Análise morfométrica em sub-bacias hidrográficas para monitoramento do risco potencial a corridas de massa (Debris flow) na região serrana do Rio de Janeiro. In: 14º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, *Anais*, 2013. 10p.
- Augusto Filho O., Magalhães F.S., GRAMANI, M.F. 2005. Mass movements susceptibility map of a highway system using GIS technology: a case study in Brazil. In: Geoline, 2005, Lyon. Proceedings. Lyon: BRGM.
- Avelar A.S., Lacerda W.A., Coelho Netto A.L. A2002. Análise de susceptibilidade a movimentos de massa no Maciço da Tijuca (RJ) utilizando SIG. In: Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas - COBRAE III, 2002, Rio de Janeiro. *Anais*, p. 133-140.
- Bertrand M., Liébault F., and Piégay H. 2013. Debris-flow susceptibility of upland catchments, *Nat. Hazards*, 67: 497-511.

- Bitar O. Y. (Coord.) 2014. *Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000 - Nota técnica explicativa*. São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. (Publicação IPT, 3 016).
- Bovis M. J. & Jakob M. 1999. The role of debris supply conditions in predicting debris flow activity. *Earth Surf Process Landforms*, 24:1039-1054.
- Chen C.-Y. & Yu, F.-C.: Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS. *Geomorphology*, 129: 387-397.
- Chevalier G.G. et al 2013 Debris-flow susceptibility analysis using fluvio-morphological parameters and data mining: application to the Central-Eastern Pyrenees. *Nat Hazards*, 67:213-238.
- Coelho Netto A.L., Avelar A.S., Sato A.M., Fernandes M.C., Oliveira R.R.; Cintra R.V., Barbosa L., Lima P.H., Lacerda W.A. 2013. Metodologia para Elaboração de Cartas de Suscetibilidade e Risco a Movimentos de Massa (escala 1:5.000): Aplicação na Área Central de Angra dos Reis/RJ. In: COBRAE, Angra dos Reis, ABMS ABGE, *Anais*, v.1, p.203-210.
- Coelho Netto A.L., Avelar, A.S.; Fernandes M.C., Lacerda, W.A. 2007. Landslide Susceptibility in a Mountainous Geocossystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The role of Morphometric subdivision of the terrain. *Geomorphology*, v.87: p.120-131.
- Corsi A. C., Gramani M. F., Ogura A. T. 2015 (a). Método para delimitação de bacias suscetíveis a corrida de massa e enxurrada em regiões serranas. In: Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Ambiental, 9, Anais, Cuiabá: ABGE.
- Corsi A. C., Gramani M. F., Ogura A. T., Bitar O. Y. 2015 (b). Corroboração de campo para o método de delimitação de bacias de drenagem com alta suscetibilidade à geração de corrida de massa e enxurrada. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 15, Anais, Bento Gonçalves: ABGE (no prelo).
- Costa J. E. 1988. Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris flows. In: Baker VR, Kochel RC, Patton PC (eds.) *Flood geomorphology*. Wiley, New York.
- Crosta G. B. & Frattini P. 2004. Controls on modern alluvial fan processes in the central Alps, northern Italy, *Earth Surf. Proc. Land.*, 29: 267-293.
- De Scally F.A. & Owens I.F. 2004. Morphometric controls and geomorphic response on fans in the Southern Alps, New Zealand. *Earth surface processes and landforms*, 29: 311-322
- De Scally F., Owens I. & Louis J. 2010. Controls on fan depositional processes in the schist ranges of the Southern Alps, New Zealand, and implications for debris-flow hazard assessment, *Geomorphology*, 122: 99-116.
- Gomes R.A.T., Guimarães R.F., Carvalho Júnior O.A., Fernandes N.F., Vargas Junior E.A., Martins E.S. 2008. 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.
- Gomes R., Guimarães R., Carvalho O., Fernandes N., Amaral E. 2013. Combining Spatial Models for Shallow Landslides and Debris-Flows Prediction. *Remote Sensing*, v.5: p. 2219-2237.
- Gramani M. F. 2001 Caracterização geológico-geotécnica das corridas de detritos ("Debris Flows") no Brasil e comparação com os casos internacionais. Dissertação de Mestrado, Departamento de Estruturas e Fundações, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 385 p.
- Gramani M. F. 2015. A corrida de massa no córrego Guarda-Mão, município de Itaoca (SP): impacto e observações de campo. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental - CBGE, 15, Anais, Bento Gonçalves: ABGE.
- Gramani M. F. & Augusto Filho O. 2004. Analysis of the triggering of debris flow potentiality and the run-out reach estimative: an application

- essay in the Serra do Mar mountain range. In: International Symposium on Landslides, 9, Rio de Janeiro. Proceedings... Londres: Balkema, v. 2. p. 1477-1483.
- Gramani M.F. & Kanji M. A. 2001. Inventário e análise das corridas de detritos no Brasil. In: III Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas - COBRAE, 3, Rio de Janeiro, Anais, Rio de Janeiro: ABMS - NRRJ.
- Griffiths P. G., Webb R. H. & Melis, T. S. 2004. Frequency and initiation of debris flows in Grand Canyon, Arizona, J. Geophys. Res., 109: F04002.
- Iverson R. M., Reid M. E., LaHusen, R. G. 1997. Debris-flow mobilization from landslides. Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 25:85-138.
- Jackson L.E., Kostaschuk R.A., Macdonald G.M. 1987. Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains. In: COSTA, J.E., WIECZOREK, G.F. (eds) *Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation*. Rev Eng Geol vol. VII. Geol Soc Am.
- Jakob, M. & Hungr, O. (Eds) 2005. Debris-flow hazards and related phenomena. Springer, Berlin.
- Jakob M. 2010. State of the art in debris - flow research: the role of dendrochronology. In: Stoffel M., Bollschweiler M., Butler D. R. & Luckman B. H. (eds.) *Tree Rings and Natural Hazards: a State of Art*. Springer, p. 183-192.
- Kanji, M. A., Gramani, M. F. 2001. Metodologia para determinação da vulnerabilidade a corridas de detritos em pequenas bacias hidráulicas. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas - COBRAE, 3, Anais, Rio de Janeiro: ABMS - NRRJ, p. 75-82.
- Kostaschuk RA, Macdonald GM, Putnam PE 1986. Depositional process and alluvial fan - drainage basin morphometric relationships near Banff, Alberta, Canada. Earth Surf Process Land, 11:471-484
- Lacerda W.A. 2012. Catastrophic events in Rio de Janeiro 2010-2011: new approaches for susceptibility mapping of landslides during heavy rains. In: IV Simposio Panamericano de Deslizamientos, IVSPD, *Anais*, v. 1. p. 2-1-2-14.
- Lopes E.S.S. & Reidel, P.S. 2007. Simulação da corrida de massa do Km42 ocorrido na Rodovia Anchieta. In SIBRADEN, 2, *Anais*.
- Lopes E.S.S. et. al. 2007. Simulação de corrida de detritos na bacia do Rio das Pedras que afetou a Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão-SP. *INPE ePrint*: sid.inpe.br/mtdcm17@80/2007/06.28.12.48 v1 2007-06-29.
- Monguilhott M., Saldanha D.L., Sebem E., Souza S.F. 2008. Estudo de áreas suscetíveis a movimentos de massa na rodovia RS/486 - Rota do Sol. *Pesquisas Florestais Brasileiras*, v.30: n.61, p. 61-69.
- Mota, H. P. G. da 2014. Avaliação de corridas de detritos para a previsão de eventos futuros. Tese de doutorado, Engenharia Civil, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 254p.
- Ogura, A. T., Gramani, M. F. 2000. The debris flow in Lavrinhas: stratigraphical and sedimentological features for debris flow risk assessment. In: International Geological Congress, 31, Proceedings, Rio de Janeiro: International Union of Geological Sciences - IUGS; Sociedade Brasileira de Geologia - SBG, 1 CD-ROM.
- Patton, P. & Baker, V. 1976. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls, *Water Resour. Res.*, 12: 941-952.
- Pierson, T. C. 2005. Distinguishing between Debris Flows and Floods from Field Evidence in Small Watersheds. Disponível em: [http://walrus.wr.usgs.gov/infobank/programs/html/factsheets/pdfs/2004\\_3142.pdf](http://walrus.wr.usgs.gov/infobank/programs/html/factsheets/pdfs/2004_3142.pdf). Acessado em Fevereiro de 2015.
- Rogelis M. C. & Werner M. 2014. Regional debris flow susceptibility analysis in mountainous peri-urban areas through morphometric and land cover indicators. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 14: 3043 - 3064.

- Rowbotham D., De Scally F., Louis J. 2005. The identification of debris torrent basins using morphometric measures derived within a GIS. *Geogr Ann*, 87A:527-537.
- Santangelo N., Daunis-i Estadella J., Di Crescenzo G., Di Donato V., Faillace P. I., Martín-Fernández J. A., Romano P., Santo A. & Scorpio, V.2012. Topographic predictors of susceptibility to alluvial fan flooding, Southern Apennines. *Earth Surf. Proc. Land.*,v. 37, p. 803 - 8017.
- Silveira, C.T.; Fiori, A.P.; Marcos Ferreira, A.; ZAI, C.; Massulini, N.E.B.; Silveira, R.M.P.; Leonardi, T.; Kepel Filho, J.L. Mapeamento de susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do Rio Jacarei, estado do Paraná. In: 9º SINAGEO, *Anais*, 2012.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. New Haven: Transactions: American Geophysical Union, 38: 913-920.
- Strieder A.J., Buffon S.A., Quadros T.F.P., Oliveira H.R. 2008. Predicting debris flow susceptible areas through GIS modelling in Aparados da Serra (Brazil). In: Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows II, pp.89-97
- Takahashi, T. 1981. Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster. *J Nat Disaster Sci*, 3:57-89.
- Takahashi, T. 2007. "Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures". Taylor and Francis Group, Londres, 448p.
- Vanacôr R.N., Rolim S.B.A. 2012. Mapeamento da susceptibilidade a deslizamentos usando técnicas de estatística bivariada e sistema de informações geográficas na região nordeste do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 13, n.1: p.15-28.
- Welsh A.J. 2008. Delineating debris-flow hazards on alluvial fans in the Coromandel and Kaimai regions, New Zealand using GIS. MSc thesis, University of Canterbury, New Zealand, 169p.
- Welsh A. & Davies T. 2011. Identification of alluvial fans susceptible to debris-flow hazards. *Landslides*, 8:183-194.
- Wilford, D. J. et. al. 2004. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, v. 1, p. 61-66.



# INTEGRAÇÃO DE MAPEAMENTO DE RISCO E ÍNDICES PLUVIOMÉTRICOS NO MONITORAMENTO E ALERTA DE RISCO DE ESCORREGAMENTOS PLANARES NO LITORAL NORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO

COMBINATION OF RISK MAPPING AND RAIN INDEX FOR PLANAR LANDSLIDES  
RISK MONITORING AND WARNING IN NORTH COAST OF STATE OF SAO PAULO

CLÁUDIO JOSÉ FERREIRA

*Instituto Geológico, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: cferreira@sp.gov.br*

DENISE ROSSINI-PENTEADO

*Instituto Geológico, São Paulo, SP, Brasil, drossinisp@gmail.com*

CELIA REGINA DE GOUVEIA SOUZA

*Instituto Geológico, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: celiagouveia@gmail.com*

GLAUCIO ALMEIDA ROCHA

*Consultor em Geotecnologia, Salvador, BA, Brasil. E-mail: glaucio.rocha@gmail.com*

LORENA DE SOUZA

*ThoughtWorks Brazil, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: lcsouza@thoughtworks.com*

ANTONIO CARLOS MORETTI GUEDES

*Instituto Geológico, São Paulo, SP, Brasil. E-mail: acmguedes@sp.gov.br*

## RESUMO ABSTRACT

Modelos de gerenciamento de risco, geralmente, destacam as etapas de análise e monitoramento para uma eficiente redução e mitigação de desastres. Este trabalho desenvolveu modelo de monitoramento de risco de escorregamentos planares em áreas residenciais-comerciais-serviço, em tempo quase real, para emissão de alertas de desastres, combinando dados de mapeamento de risco com índices pluviométricos de chuva acumulada e prevista. A área de estudo abrangeu os municípios de Ubatuba, Caraguatatuba, São Sebastião e Ilhabela, do Litoral Norte do Estado de São Paulo. A organização, tratamento e análise dos dados foi feita na plataforma TerraMA<sup>2</sup> desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. A análise de risco fundamentou-se na definição de unidades espaciais de análise, denominadas de Unidades Territoriais Básicas - UTB resultantes da intersecção de planos de

Risk management models usually point out the importance of risk analysis and monitoring for an effective disaster reduction and mitigation. This work developed a model of monitoring landslide risk over housing-commercial-service areas, in near real-time, applied to disasters warning communication, combining landslide risk data and both pluviometric index of past and future rain. The studied area comprised the municipalities of Ubatuba, Caraguatatuba, São Sebastião and Ilhabela, on the North Coast of the State of São Paulo. The organization, treatment and analysis of data was made on the TerraMA<sup>2</sup> computational platform developed by the National Spatial Research Institute - INPE. The risk analysis was based on the landscape characterization expressed by Basic Territorial Units - UTB, resulting of intersection of layers of the basement and the land

unidades do embasamento geológico-geomorfológico e do uso e ocupação da terra. Os dados dinâmicos de chuva acumulada foram obtidos a partir do satélite GOES ou radar meteorológico e a chuva prevista pelo modelo ETA 5km. A forma matricial proposta correlaciona quatro classes de risco que representam situações cada vez mais críticas quanto à ocorrência de danos com nove intervalos do índice pluviométrico de 24 horas. O índice pluviométrico utilizado sintetiza dois aspectos fundamentais na deflagração de processos perigosos e de seu gerenciamento: a chuva acumulada ou antecedente em 22 horas e a chuva futura ou prevista nas próximas 2 horas. Cada célula da matriz é enquadrada em um dos quatro níveis de alerta, denominados observação, atenção, alerta e alerta máximo, que indicam um aumento da complexidade do gerenciamento das situações de risco, desde o nível de observação até o nível de alerta máximo. O modelo proposto tem como premissa a utilização das áreas de risco como fator fundamental para a definição dos níveis de alerta, apresentando o mesmo nível de influência que os índices pluviométricos.

**Palavras-chave:** TerraMA<sup>2</sup>, chuva, plano de contingência, desastre.

## 1 INTRODUÇÃO

Diversos modelos de gerenciamento de risco sejam eles específicos para eventos geodinâmicos (ONU 2004), ou genéricos (ISO 2009), destacam a importância das etapas de análise e monitoramento para uma eficiente avaliação dos impactos, redução de risco e implantação de sistemas de alerta.

Risco pode ser definido como a combinação da probabilidade de ocorrência de um evento e suas consequências negativas. Em geral, a análise de risco é realizada a partir da caracterização de três variáveis: perigo, vulnerabilidade e dano potencial (Tominaga *et al.* 2004, Ferreira & Rossini-Penteado 2011) ou exposição (Varnes 1984, Remondo *et al.* 2008).

A abordagem sintética ou de paisagem representa uma concepção metodológica aplicada em mapeamentos de risco baseada na delimitação prévia de unidades de análise que, de forma integrada, guardam correspondência com elementos ou representações identificáveis em determinada porção do território, ora enfocando suas dimensões naturais geológicas-geotécnicas (Vedovello 2000, Fernandes da Silva *et al.* 2010, Fernandes da Silva & Cripps 2011), ora enfatizando as relações

cover units. The dynamic data of rainfall were obtained from GOES satellite or radar and the forecast rain from ETA 5km model. The matrix form proposed model correlates, in columns, four risk classes indicative of increasing losses, and in the lines, nine intervals of the pluviometric index. The proposed pluviometric index meet two aspects that matters for triggering hazardous processes and their management: the past rainfall in the last 22 hours and the future rainfall in the next 2 hours. The intersection cells indicate one among the four warning levels, named observation, attention, alert and maximum alert, that indicates increasing complexity for risk management from observation to maximum alert levels. Such model stress the role of risk mapping besides pluviometric index to define warning levels.

**Keywords:** TerraMA<sup>2</sup>, rain, contingency plan, disaster.

destas com processos antrópicos (Cendrero *et al.* 1992, Ferreira & Rossini-Penteado 2011, Ferreira *et al.* 2013).

Cendrero *et al.* (2004) propõe o uso de unidades geoambientais integradas para o diagnóstico e monitoramento de indicadores ambientais. O autor combina a utilização destas unidades com uma série de índices e indicadores de qualidade ambiental com o propósito de tornar os mapas geotécnicos-geoambientais um instrumento mais adequado para representar as condições atuais de uma área e também para monitorar mudanças na qualidade ambiental.

A principal causa de instabilidade de encostas e escorregamentos no Estado de São Paulo é a chuva. O clima tropical a subtropical, com acumulados anuais que, nas regiões mais chuvosas, atingem médias de 200 mm/mês, com máximos absolutos entre 300 a 600 mm/mês e médias anuais locais de até 4500 mm/ano (Rolim *et al.* 2007), provocam, anualmente, a ocorrência de, pelo menos, uma centena de acidentes e desastres relacionados a escorregamentos (Ferreira *et al.* 2011, São Paulo 2015).

A definição dos índices pluviométricos deflagadores de escorregamentos constituem a base para emissão de alertas em planos preventivos

e de contingência, sendo esta correlação alvo de diversas pesquisas, como sintetizado em Soares (2006) e Parizzi et al. (2010). Estes trabalhos destacam, via de regra, a importância das relações entre diversos índices de chuva acumulada, quer sejam índices anuais (Cerri et al. 1996), mensais (DRM 2015), de quatro dias (Tatizana et al. 1987a, b, DRM 2015), de três dias (Macedo et al. 1999), de dois dias (Soares 2006, Soares & Martan 2006), de um dia (DRM 2015) ou horários (Tatizana et al. 1987a, b, Cerri 1993, Soares 2006, Soares & Martan 2006, Parizzi et al. 2010, DRM 2015).

Por outro lado, em nível internacional, existem vários exemplos de monitoramento direto de encostas sujeitas a escorregamentos em tempo real ou quase real que utilizam serviços WEB. Reid et al. (2012) caracterizam os fundamentos do monitoramento realizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) em doze sítios selecionados. Allasia et al. (2013) apresentam um sistema que inclui a aquisição de dados e execução de protocolos de transferência, análise, envio de mensagens de alerta por SMS e ou endereços eletrônicos e publicação automática dos resultados numa página da WEB. Anh et al. (2016) desenvolveram um sistema que utiliza a transferência de dados do pluviômetro por meio de protocolo de comunicação de celular 3G/2G. Os dados de chuva são utilizados para cálculo dos fatores de segurança que são comparados com limiares de níveis de alerta. Os dados monitorados podem ser observados em website e mensagens de alerta podem ser enviadas para telefones celulares.

Adicionalmente, a previsão meteorológica constitui outro elemento essencial para a emissão de alerta em tempo efetivo para a tomada de ações de gerenciamento de risco. No Plano Preventivo de Defesa Civil, específico para Escorregamentos nas Encostas da Serra do Mar - PPDC (São Paulo 1997, Macedo et al. 1999), a previsão meteorológica, juntamente com os índices pluviométricos e as vistorias de campo, é uma das variáveis para previsão dos processos de escorregamentos e estabelecimento dos níveis operacionais de Observação, Atenção, Alerta e Alerta Máximo. Cerri (1993) já destacava a importância da previsão meteorológica ao introduzir o conceito de Coeficiente de Precipitação Potencial que usa o valor da intensidade horária potencial com a precipitação acumulada nas 84 horas anteriores, a semelhança do Coeficiente de Precipitação Crítica de Tatizana et al. (1987a, b) para os valores acumulados de chuva.

Ainda que a chuva seja o principal deflagrador de escorregamentos no Estado de São Paulo,

o comportamento geológico-geotécnico dos terrenos, expresso pela suscetibilidade, perigo ou risco de escorregamentos, igualmente deve ser considerado nos modelos de correlação entre chuva e processos de escorregamentos.

Embora a premissa acima seja reconhecida em diversos trabalhos, a exemplo de Tatizana et al. (1987a,b), cujo modelo considera uma constante K dependente das condições geotécnicas das encostas e da intensidade dos escorregamentos, e de Parizzi et al. (2010), que descrevem as diferentes suscetibilidades do material geológico da região de Belo Horizonte, sua utilização, no Brasil, raramente é observada na elaboração de modelos de alerta ou na prática operacional de planos preventivos e de contingência de defesa civil.

Em nível nacional, um dos raros exemplos é o trabalho de Arruda Jr & Lopes (2013), que comparam os resultados de alertas para corridas de massa em sub-bacias considerando, ou não, o potencial de corrida e concluem que, quando as análises consideram o peso do potencial de corrida, os resultados são mais adequados do que aqueles que só utilizam os dados de chuva.

A plataforma TerraMA<sup>2</sup>, desenvolvida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (Lopes et al. 2011, Arruda Jr & Lopes 2014) é um sistema computacional para organização, análise, monitoramento e alerta de riscos de desastres. Ela é baseada em uma arquitetura de serviços aberta e disponibiliza a infraestrutura tecnológica necessária para a estruturação de um sistema operacional de monitoramento e alerta, podendo atender diversas aplicações em áreas como qualidade do ar, qualidade da água, gasodutos, barragens de rejeito em área de mineração, incêndios florestais, e estiagens. A permissão para sua redistribuição e/ou modificações encontra-se sob os termos da Licença Pública Geral do GNU (GPL), publicada pela Free Software Foundation.

O objetivo do trabalho é apresentar modelo de protótipo de sistema de monitoramento, em tempo quase real, para emissão de alertas de desastres, combinando o mapeamento de risco de escorregamento planar, desenvolvido com base em unidades espaciais de análise, com índices de chuva acumulada e chuva prevista, deflagradores de processos perigosos de escorregamentos planares.

A área de abrangência do trabalho inclui os municípios de Ubatuba, Caraguatatuba, São Sebastião e Ilhabela, do Litoral Norte do Estado de São Paulo (Figura 1).

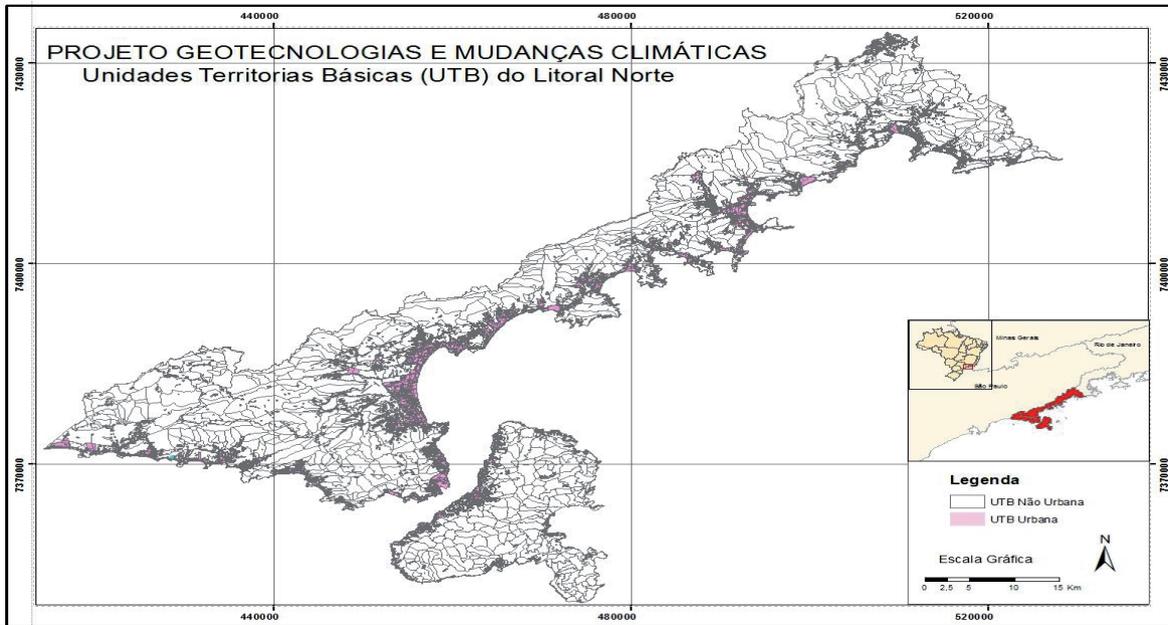


Figura 1 - Localização e abrangência da área de estudo e distribuição das unidades espaciais de análise, com destaque para aquelas de uso urbano.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A organização, tratamento e análise dos dados foi feito com base na plataforma TerraMA<sup>2</sup> e seus programas computacionais de apoio ou dependências. Este sistema apresenta a potencialidade de coletar, em tempo real, dados meteorológicos

dinâmicos disponíveis em servidores de acesso conectados à internet e realizar análises a partir da sobreposição desses com os objetos monitorados e outros dados adicionais, que constituem a base de dados estáticos. A Figura 2 apresenta a estrutura e os atributos utilizados para organização e análise dos dados estáticos e dinâmicos.

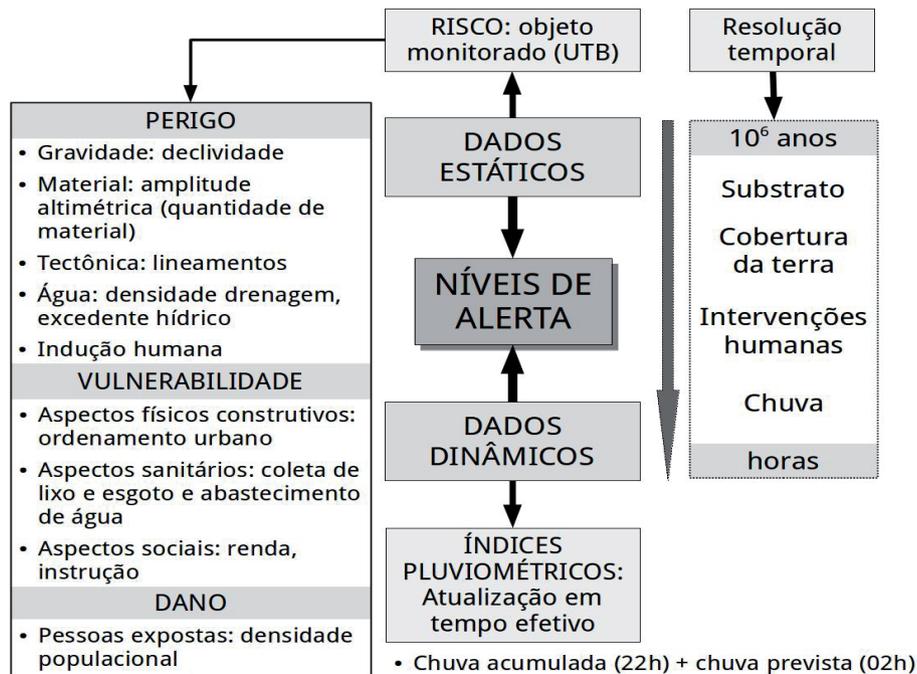


Figura 2 - Estrutura e atributos utilizados para organização e análise dos dados estáticos e dinâmicos.

## 2.1 Plataforma TerraMA<sup>2</sup>

A plataforma TerraMA<sup>2</sup> constitui uma base tecnológica que permite integrar informações geoambientais e modelagem para o monitoramento, análise e alerta de riscos ambientais e que inclui cinco tipos de serviços: a) busca de dados atuais através da internet e seu carregamento na base de dados do sistema de alerta; b) tratamento e análise em tempo real de dados novos e verificação da existência de situações de risco, através de uma comparação com mapas de risco ou de um modelo definido; c) serviço responsável pelo objeto monitorado; d) serviços para executar, editar e criar novos modelos de risco e alerta; e) criação e notificação de alerta para os usuários do sistema em operação (INPE 2013a).

O sistema possui três módulos principais (INPE 2013a). O módulo de Administração é responsável pela configuração de cada serviço da plataforma, incluindo a definição do endereço e a porta de cada serviço, o local em que as imagens com o resultado das análises serão armazenadas, definição do banco de dados, local de armazenamento dos dados coletados, configuração do servidor de email, definição dos arquivos de log e outras informações. O módulo de Configuração é responsável pela definição de como os dados são obtidos dos servidores externos, a definição das análises, e quais alertas serão enviados. O módulo de Apresentação WEB é responsável pela apresentação de alertas quando uma situação de risco é detectada pelo módulo de análise. O módulo consiste em uma aplicação web que está conectada ao banco de dados TerraLib. É capaz de apresentar as camadas associadas à análise, seus dados, histórico de alertas e metadados.

O ambiente tecnológico planejado para o desenvolvimento deste projeto apresenta a instalação da plataforma em ambiente local, em um computador *desktop* utilizado para construção da base de dados e teste das regras e outra instalação em ambiente de computação em nuvem para hospedar uma versão do algoritmo de análise e realizar as atividades de monitoramento - com download das informações necessárias, análise a partir das regras estabelecidas no algoritmo e envio de informações para os operadores do alerta, os quais terão acesso aos mapas gerados na simulação a partir da web.

Para utilização do TerraMA<sup>2</sup> é necessário instalar dependências, todas disponíveis gratuitamente. As dependências são: Servidor de Banco de Dados PostgreSQL ou Servidor de Banco de Dados MySQL, Servidor Http Apache, Java 7, Apache Web Java Tomcat, Aplicativo TerraView e Servidor WEB TerraOGC (INPE 2013b).

## 2.2 Definição da Base de Dados Estáticos - Análise de Risco

A base de dados estáticos foi estruturada a partir da avaliação de risco de escorregamento fundamentada na abordagem de paisagem. O mapeamento de risco em escala regional 1:50.000 foi realizado com base na metodologia descrita em Ferreira & Rossini-Penteado (2011).

Esta abordagem implica na definição de unidades espaciais de análise resultantes da integração dinâmica de componentes relativamente homogêneos de suporte e cobertura, compreendendo elementos físicos (processos geológicos, pedológicos, geomorfológicos e climatológicos), biológicos (vegetação) e antrópicos (sistemas socioeconômicos e de infraestrutura) que descrevem e qualificam os processos perigosos em análise.

Neste trabalho, a unidade de paisagem recebeu a denominação de Unidade Territorial Básica (UTB), seguindo a terminologia de Lucena (1998) e BRASIL (2006). As UTB, que representam as menores unidades de análise na escala adotada, expressando o conceito geográfico de zonalidade, resultam da intersecção dos planos de informação de Unidades Básicas de Compartimentação do Meio Físico (UBC) e de Unidades Homogêneas do Uso e Cobertura da Terra e padrão da Ocupação Urbana (UHCT).

As UBC refletem as características do substrato geológico-geomorfológico-pedológico. O substrato resulta da evolução de processos geodinâmicos endógenos e exógenos. O estudo de suas características permite identificar e caracterizar os fenômenos perigosos e suas relações com os padrões de uso e ocupação do solo na definição dos impactos e vulnerabilidades do cenário de risco.

As UBC foram definidas a partir da fotointerpretação de imagem Landsat TM5, de resolução 30m e de imagem de relevo sombreado obtida a partir de modelo digital de superfície, de

resolução 5m (EMPLASA, 2010b). A escala de interpretação foi em torno de 1:50.000. Esta etapa baseou-se no processo de observação, identificação e delimitação visual de regiões homogêneas com base em variações de elementos texturais das imagens, como densidade, padrão ou arranjo espacial, tropia e forma, conforme descrito em Vedovello (2000), Tominaga et al. (2004, 2008), Oliveira et al. (2007), Cardoso et al. (2009), Fernandes da Silva et al. (2010), Ferreira & Rossini-Penteado (2011), Ferreira et al. (2013).

As diversas atividades humanas implicam em ações sobre o meio físico que modificam a paisagem. Os diferentes tipos de uso e cobertura da terra, resultantes deste processo, imprimem padrões espaciais de ocupação que atuam como elementos intrínsecos à análise e mapeamento de risco, condicionando as três variáveis da equação de risco (perigo, vulnerabilidade e dano potencial). As UHCT, definidas por processos de classificação automática e interpretação visual de produtos de sensoriamento remoto de média e alta resolução espacial (EMPLASA 2010a), foram obtidas a partir da setorização ou parcelamento do território em áreas com características semelhantes quanto a determinados aspectos físicos, forma e textura referentes à ocupação e que se destacam no nível de detalhamento da escala de trabalho (Rossini-Penteado et al. 2007, 2008, Ferreira & Rossini-Penteado 2011).

O plano de informação representativo das UTB inclui um conjunto de polígonos georreferenciados associados a um banco de dados alfanumérico que contém os atributos descritivos de cada unidade relacionados aos aspectos físicos, socioeconômicos e de infraestrutura, os quais constituem a base para o cálculo dos índices aplicados ao modelo de risco adotado (Ferreira & Rossini-Penteado 2011, Ferreira et al. 2013). O processo de obtenção das informações e dos produtos derivados inclui consultas, seleção e combinação dos atributos de interesse. Foram calculados os índices relacionados às variáveis: perigo (P) de escorregamento, vulnerabilidade (V), dano potencial (D) e risco (R) como mostra a Figura 2.

Neste projeto, a metodologia numérica aplicada à análise de risco de escorregamento, baseada no estabelecimento de regras de classificação,

fórmulas e cálculo dos índices relacionados aos fatores de análise considerados para cada variável da equação do risco, viabilizou a definição dos setores de risco vinculados a cada unidade gráfica de uso urbano do tipo residencial, comercial e serviços, com diferentes graus de riscos divididos em cinco classes de risco, variando de Muito Baixo ou Nulo (R0) até Muito Alto (R4) risco de escorregamento.

### 2.3 Definição da Base de Dados Dinâmicos - Índices Pluviométricos

A base de dados dinâmicos requeridos no sistema inclui as informações relacionadas às condições das variáveis em determinado período de tempo. A definição do modelo indicou a necessidade de coletar informações de previsão de chuva e do total de chuva observado. A carga dos dados dinâmicos é feita a partir do serviço de coleta, e os parâmetros de funcionamento são definidos no módulo de configuração.

Os dados de observação são de responsabilidade da DSA - Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais e do SINDA - Sistema Integrado de Dados Ambientais, ambos do INPE e os de previsão numérica do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC do INPE (INPE 2013a, 2014).

Os dados de observação disponíveis e selecionados para utilização na plataforma TerraMA<sup>2</sup> são: precipitação estimada por satélite GOES (resolução aproximada de 4km) e pelo radar meteorológico de São Roque, ambos com capacidade de atualização de 15 minutos.

A plataforma TerraMA<sup>2</sup> utiliza o modelo Hidroestimador que é um método inteiramente automático de cálculo das taxas de precipitação em tempo real. O Modelo Hidroestimador produz estimativas da taxa de chuva para cada imagem do satélite GOES recebida no CPTEC/INPE (Vila et al. 2003, Avila 2006, INPE 2014).

Os dados de previsão derivam do modelo ETA 5km (Projeto Serra do Mar) que disponibiliza os valores da previsão de chuva horária, em mm, para as 72h seguintes para cada célula de informação de 5km. O arquivo contendo o resultado do modelo de previsão de chuva é atualizado a cada 12h no servidor FTP do CPTEC/INPE com o

conjunto de células abrangendo a região sudeste do Brasil (INPE 2013a, 2014).

A configuração dessas fontes de dados dinâmicos habilita o serviço de coleta a verificar novos dados, baixar as informações para um diretório local e dar a carga no banco de dados na forma de planos de informação no formato matricial ou grade numérica com os acumulados de chuva em 22 horas e a previsão de chuva nas próximas duas horas. Foi criado um filtro espacial dado pelo polígono delimitador do projeto para pré-processamento dos dados e descarte dos situados fora da área de interesse. Os diretórios para armazenamento temporário dos dados, bem como os arquivos de log dos serviços (para ajuda na resolução de eventuais falhas de funcionamento) são configurados no módulo de administração.

## 2.4 Configuração e Implementação do Modelo de Análise

O desenvolvimento do modelo de análise e elaboração do seu algoritmo pressupôs a definição inicial do objeto a ser monitorado; além da identificação das variáveis dinâmicas de chuva relevantes para o processo de análise e da definição das regras e dos pesos atribuídos a cada variável que implicam na mudança de estado dos alertas.

Para a definição do algoritmo de análise, inicialmente foi efetuada a integração da informação estática, representada pelo plano de informação contendo os diferentes níveis ou graus de risco de ocorrência de escorregamento, com as variáveis do monitoramento dinâmico das condições meteorológicas, definidas anteriormente.

A base de dados estáticos foi carregada com a plataforma no aplicativo TerraView e implantada no Banco de Dados PostgreSQL.

As unidades ou elementos gráficos definidos pelas Unidades Territoriais Básicas (UTB) do tipo residencial-comercial-serviços foram definidas como o objeto a ser monitorado, pois considerou-se a população como elemento em risco. Desta forma, as áreas não edificadas foram

desconsideradas na avaliação de risco devido à inexistência do elemento em risco adotado.

Para a configuração do algoritmo de análise automatizada foram utilizadas quatro classes de risco: R1 - Baixo; R2 - Médio; R3 - Alto e R4 - Muito Alto. A classe de risco R0 - Muito Baixo a Nulo não foi considerada no algoritmo, pois a probabilidade de ocorrência do processo é praticamente nula.

No modelo de análise foi considerado um único índice pluviométrico indicativo da chuva em 24 horas que combina tanto a chuva acumulada como a chuva futura para disparar um alerta em cada UTB. Inicialmente foi testada a soma do total de chuva acumulada de 23 horas com o total de chuva prevista em uma hora.

Posteriormente, para a obtenção do índice de análise foi considerada a soma do acumulado de chuva das últimas 22 horas e a previsão de chuva para as próximas 2 horas. A expansão para duas horas proporciona um período de tempo maior para que medidas preventivas e de contingência possam ser tomadas adequadamente e em tempo hábil. Este índice, combinado com as diferentes situações de risco expressas em cada UTB, define as condições de cada nível de alerta.

Para operacionalizar o modelo e viabilizar a definição das regras e dos pesos de cada variável considerada, foi construída uma matriz de correlação entre os intervalos de chuva (dados em mm) e os graus de risco de escorregamento da área de estudo. Cada célula desta matriz, representada na Figura 4, apresenta os níveis de alerta em cada UTB de uso residencial-comercial-serviços, tendo em vista os parâmetros de chuva fornecidos pelas variáveis dinâmicas do sistema.

A Figura 3 apresenta um exemplo da estrutura básica do código efetuada em Lua, a linguagem de programação nativa da plataforma e descreve a lógica do modelo de análise. A Figura 4 exibe o código completo elaborado para a programação da análise utilizada. Os valores numéricos resultantes de cada análise são entregues à plataforma para emissão de boletins e alertas para usuários cadastrados.

```

Para cada poligono de UTB com risco variando de R1 a R4
chuva_acum_dia = Maximo_valor_chuva_na_UTB_acumulado(22h)
Max_previsao_chuva = máxima_chuva_celula_dentro_UTB(previsão 2h)
Soma_chuva = (chuva_acum_dia + Max_previsao_chuva)
Se (soma_chuva > 0mm) e (soma_chuva <= 40mm)
    Se risco = R1
        Status = observação
    Se risco = R2
        Status = observação
    Se risco = R3
        Status = observação
    Se risco = R4
        Status = observação
Fim do Se
/* teste continua sendo aplicado a cada faixa de valores de chuva na matriz */
Fim do Para cada poligono
    
```

Figura 3 - Exemplo da estrutura básica do código, descrevendo o método lógico de programação da análise.

```

-- Script: Alerta para a análise de risco de escorregamento
-- Matriz de regras (Mínimo e Máximo da faixa e quatro níveis de alertas associados)
matriz = {
    {min=0, max=40, R={0,0,0,0} },
    {min=40, max=60, R={1,1,1,2} },
    {min=60, max=80, R={1,2,2,2} },
    {min=80, max=100, R={1,2,2,3} },
    {min=100, max=120, R={2,2,3,3} },
    {min=120, max=140, R={2,3,3,4} },
    {min=140, max=160, R={3,3,4,4} },
    {min=160, max=180, R={3,4,4,4} },
    {min=180, max=999, R={4,4,4,4} }
}
-- Parâmetros
local PERIODO_ACUMULADO = 22 -- horas de acumulação de chuva
local PERIODO_PREVISAO = 2 -- horas de previsão
-- Valores
local max_h_h = prec_max_historico_grid('hidro', PERIODO_ACUMULADO) or 0
local max_e_p = maximo_eta('Prec_eta5km', PERIODO_PREVISAO) or 0
local idx
-- soma da chuva das ultimas 22h acumuladas e as próximas duas horas
local soma = max_h_h + max_e_p
-- Aplicação das regras
-- idx representa o índice em faixa.R[]
-- r_esc_cl é o atributo do poligono de risco com a classe RI, RII, RIII ou RIV
for n_faixa in ipairs(matriz) do
    if (faixa.min <= soma) and (soma < faixa.max) then
        if r_esc_cl == "RI" then
            idx = 1
        elseif r_esc_cl == "RII" then
            idx = 2
        elseif r_esc_cl == "RIII" then
            idx = 3
        elseif r_esc_cl == "RIV" then
            idx = 4
        end
        -- retorna o indicador de nível de alerta de acordo com a matriz de regras.
        return faixa.R[idx]
    end
end
end
    
```

Figura 4 - Estrutura completa do código de programação na linguagem de análise Lua.

A plataforma TerraMA2 possui quatro níveis de alerta predefinidos, representados por valores numéricos (1, 2, 3 e 4) que indicam, respectivamente, os estados de observação, atenção, alerta e alerta máximo. Estas classes e terminologia foram mantidos no presente trabalho, pois compõem os níveis operacionais vigentes do PPDC-Serra do Mar (São Paulo 1997, Macedo et al. 1999).

O modelo proposto tem estrutura matricial que correlaciona nas colunas, as quatro classes ou graus de risco e, nas linhas, os intervalos do índice pluviométrico de 24 horas, dividido em nove intervalos (Figura 5). Cada célula da matriz representa os diferentes níveis de alerta com os seguintes significados:

SOMA DA CHUVA ACUMULADA E FUTURA EM 24H (mm)	CLASSES DE RISCO			
	R1	R2	R3	R4
0<=S<40	N1	N1	N1	N1
40<=S<60	N1	N1	N1	N2
60<=S<80	N1	N2	N2	N2
80<=S<100	N1	N2	N2	N3
100<=S<120	N2	N2	N3	N3
120<=S<140	N2	N3	N3	N4
140<=S<160	N3	N3	N4	N4
160<=S<180	N3	N4	N4	N4
S>=180	N4	N4	N4	N4

**NÍVEIS DE ALERTA**

**N1 - Observação**   **N2 - Atenção**   **N3 - Alerta**   **N4 - Alerta Máximo**

**Figura 5** – Correlação entre classes de risco (dados estáticos) e chuva acumulada e futura em 24 horas (dados dinâmicos) para definição dos níveis de alerta. Convenções Classes de Risco: R1 - Baixo; R2 - Médio; R3 - Alto e R4 - Muito Alto.

O nível de alerta 1 (Observação) é aquele onde a ocorrência de escorregamentos não é esperada, podendo raramente ocorrer escorregamentos induzidos. Além disso, destacam-se as situações de vulnerabilidade muito baixas, o que representa baixa complexidade no gerenciamento do risco por parte do poder público local. A Figura 5 mostra que para um índice pluviométrico menor que 40mm, o nível de alerta 1 (Observação) é deflagrado em todas as situações ou graus de risco. Entretanto, com o aumento gradual do índice pluviométrico ocorre uma consequente variação no nível de alerta, ou seja, nos casos em que o índice pluviométrico varia entre 40-60mm, o nível de alerta 1, permanece apenas para as situações de risco R1, R2 e R3; nos casos em que o índice pluviométrico varia entre 60-100mm, o nível de alerta 1 permanece apenas para as situações de risco R1. Acima de 100mm de chuva em 24 horas, essa situação deixa de ocorrer, sendo deflagrados níveis de alerta mais altos, que indicam situações mais complexas para o gerenciamento.

O nível de alerta 2 (Atenção) representa os casos onde se espera a ocorrência de escorregamentos induzidos de forma esparsa, normalmente movimentando pequenos volumes de material,

caracterizados pelas condições de vulnerabilidade baixa a moderada, representando um aumento da complexidade no processo de gerenciamento do risco, mas ainda dentro das capacidades institucionais locais de gerenciamento da situação. Este nível de alerta começa a ser deflagrado nos casos em que se verifica um índice pluviométrico variando entre 40-60mm e situações de risco R4; estende-se às classes de risco R2 e R3 com o aumento do índice pluviométrico para o intervalo de 60-100mm e às áreas de risco R1 em intervalos de chuva entre 100-140mm. Acima de 140mm de chuva em 24 horas essa situação deixa de existir em decorrência da deflagração de níveis de alerta mais complexos.

No nível de alerta 3 (Alerta) espera-se a ocorrência de escorregamentos esparsos a generalizados, alguns de magnitude variando de moderada a alta em áreas onde as condições de vulnerabilidade variam de moderada a alta, ocasionando um consequente aumento da complexidade de gerenciamento do risco, muitas vezes acima da capacidade do poder público local. Observa-se que este nível de alerta (Figura 5) ocorre nas classes de risco R4, entre os índices pluviométricos 80-120mm e entre os níveis pluviométricos

100-140mm, 120-160mm e 140-180mm, respectivamente para as situações de risco R3, R2 e R1. Acima de 180mm de chuva em 24 horas essa situação deixa de ocorrer em detrimento da deflagração de nível de alerta mais complexo.

No nível 4 (Alerta Máximo) espera-se a ocorrência de escorregamentos generalizados, muitos de magnitude variando de alta a muito alta e em condições de vulnerabilidade alta a muito alta, onde destaca-se o aumento proporcional da complexidade de gerenciamento do risco, em níveis acima da capacidade do poder público local. Este nível de alerta ocorre nos casos de índice pluviométrico acima de 120mm, 140mm, 160mm e 180mm, respectivamente para as situações de risco R4, R3, R2 e R1.

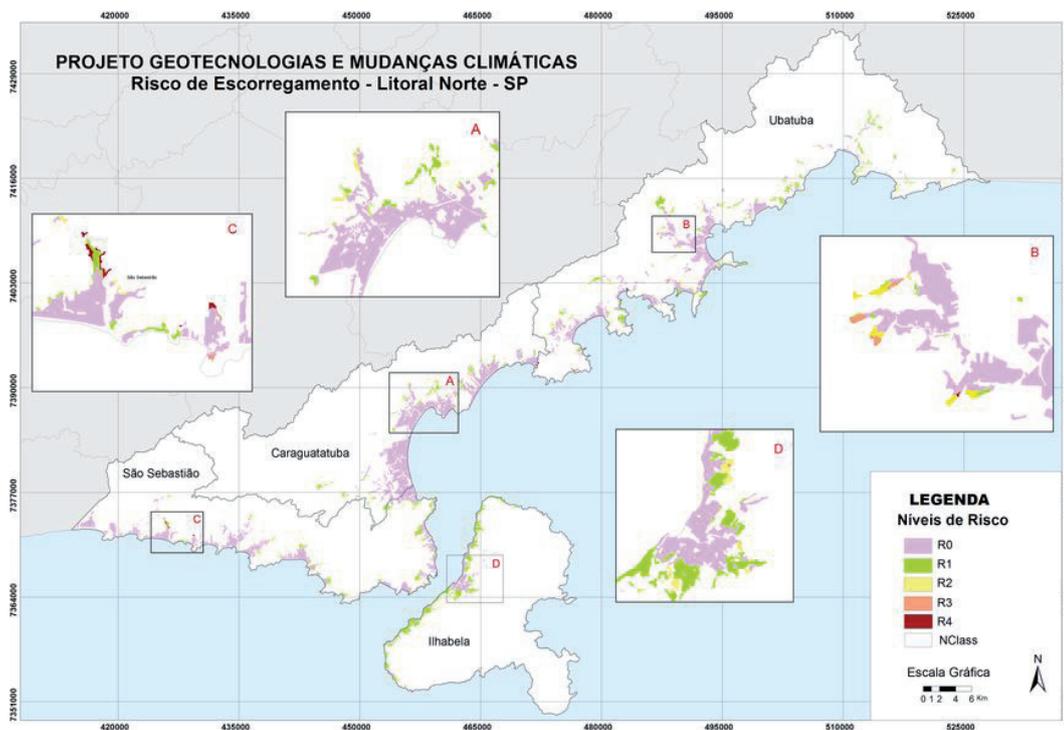
A versão inicial para homologação do sistema foi implantada na plataforma de Cloud Computing da Amazon utilizando um servidor Microsoft Windows 2012 e um banco de dados PostgreSQL 9.0. A versão final do sistema está implantada em um servidor físico, no ambiente de TI do Instituto Geológico, rodando sob Windows Server 2012 e utilizando como servidor web o software Apache Tomcat. O banco de dados PostgreSQL, versão 9.0 de 32 bit, com a extensão espacial PostGIS 1.5, foi adotado após diversos testes concluírem ser esta a

melhor compatibilidade para o sistema. Um endereço IP fixo fornece o acesso à aplicação, por meio dos navegadores de mercado.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa de risco de escorregamentos planares do Litoral Norte (Figura 6) reflete as variações nos cenários de perigo de escorregamentos planares rasos, vulnerabilidade de áreas residenciais-comerciais-serviço e dano potencial (expresso pela densidade populacional e sua exposição frente aos perigos).

As unidades territoriais de uso do tipo residencial-comercial-serviços, que constituem os elementos em risco para os quais foram calculados os graus de risco, representam 6% da área total do Litoral Norte, ou seja, 120km<sup>2</sup>. A maior parte dos elementos em risco analisados ocorre nas planícies litorâneas, onde é pouco provável que sejam deflagrados processos de escorregamentos, o que justifica o fato de aproximadamente 78% da área de estudo ter sido classificada como de risco muito baixo a nulo (R0). Cerca de 19% das áreas foram classificadas como sendo de risco baixo (R1), 2% como sendo de risco médio (R2) e apenas 1% como sendo de risco alto e muito alto (classes R3 e R4).



**Figura 6** – Mapa de risco de áreas residenciais-comerciais-serviços a escorregamentos planares rasos do Litoral Norte do Estado de São Paulo. R0-R4: classes de risco (ver texto). NClass: áreas não classificadas pela inexistência do elemento em risco.

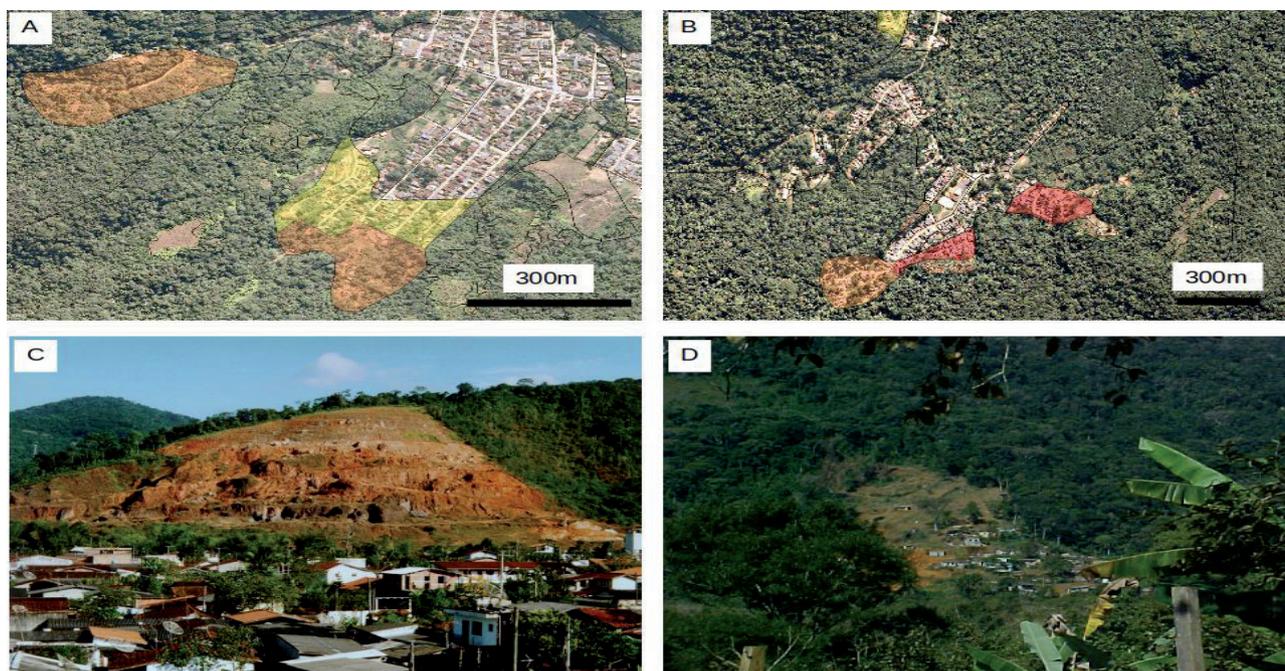
As áreas classificadas como de risco muito alto (R4) correspondem a aproximadamente 0,16% da área urbana de uso residencial/comercial/serviços e apresentam maior concentração no município de São Sebastião e, secundariamente, em Ubatuba. Não foi observada a ocorrência de áreas de risco muito alto nos municípios de Caraguatatuba e Ilhabela. Nesta classe espera-se a ocorrência de escorregamentos esparsos mesmo com índices de chuva baixos que vão aumentando de frequência e magnitude assim que ocorre o aumento dos níveis pluviométricos, causando escorregamentos severos e cada vez mais generalizados, geralmente em áreas de vulnerabilidade alta a muito alta e com grande número de pessoas expostas.

O risco alto (R3) corresponde a 0,64% da área urbana de uso residencial/comercial/serviços do Litoral Norte. Há um predomínio desta classe no município de Ubatuba, seguido por São Sebastião, Ilhabela e Caraguatatuba. Nesta classe a ocorrência

de escorregamentos esparsos ocorre com níveis de chuvas mais altos que a classe R4 que vão aumentando de frequência e magnitude assim que ocorre o aumento dos índices pluviométricos de chuva, geralmente em áreas de vulnerabilidade moderada a alta e com alto a médio número de pessoas expostas.

As áreas com graus de risco médio (R2) e baixo (R1) e, portanto, menos críticas ou suscetíveis a ocorrência de processos perigosos, representam cerca de 21% das áreas de uso residencial/comercial/serviços. Nestas classes, escorregamentos esparsos ocorrem apenas com altos níveis pluviométricos e somente evolui para escorregamentos severos e generalizados em condições de chuva excepcionais, sob condições de vulnerabilidade moderada a baixa e com baixos números de pessoas expostas.

A Figura 7 mostra exemplos do mapeamento de risco sobre ortofotos digitais e fotos de campo.



**Figura 7** - Exemplos do mapeamento de risco sobre ortofotos digitais (A; B) e fotos de campo (C; D). A, C: bairro Ipiranguinha, Ubatuba. C, D: bairro Sesmarias, Ubatuba. Convenções: Risco Muito Alto (R4) - polígonos de cor vermelha; Risco Alto (R3) - polígonos de cor laranja; Risco Médio (R2) - polígonos de cor amarela.

Os mapas de risco em escala regional aplicam-se principalmente ao planejamento e implantação de políticas públicas de convivência e redução do risco, seja para o planejamento de obras, redução da vulnerabilidade, implantação de planos de contingência ou priorização de áreas para

estudos de detalhe local. No presente trabalho, o mapa de risco obtido pelas UTB, em combinação com os índices pluviométricos, foi utilizado como objeto monitorado para o estabelecimento de níveis de alerta ao risco de escorregamentos. Esta abordagem, reconhecida em diversos trabalhos, a

exemplo de Tatizana et al. (1987a, b), raramente é utilizada no Brasil para a elaboração de modelos de alerta ou na prática operacional de planos preventivos e de contingência de defesa civil, os quais optam por utilizar essencialmente os dados de chuva.

A abordagem proposta difere das atualmente em uso, as quais consideram a correlação entre dois índices pluviométricos, geralmente a intensidade horária acumulada versus o acumulado de um dia (Kay & Chen 1995, DRM 2015), ou de dois dias (Soares 2006, Soares & Martan 2006), ou de quatro dias (Tatizana et al. 1987a, b).

O modelo desenvolvido tem como premissa a utilização das áreas de risco como fator fundamental para a definição dos níveis de alerta, apresentando o mesmo nível de influência que os índices pluviométricos para deflagrar o alerta, o que difere dos modelos anteriores que somente consideram os índices pluviométricos. O presente trabalho procura incorporar o conhecimento decorrente do avanço dos métodos de mapeamentos de risco na última década (São Paulo 2015) para aperfeiçoar os modelos de correlação entre chuva e escorregamentos, como já destacado nos trabalhos de Tatizana et al. (1987a, b).

No processo de gerenciamento de risco a previsibilidade de eventos é indispensável para a redução dos danos. Portanto, outro aspecto relevante do modelo preconizado que deve ser destacado corresponde à associação do indicador de chuva antecedente ou acumulada e de chuva futura ou prevista em um único índice pluviométrico.

Esta abordagem foi proposta por Cerri (1993) que introduziu o conceito de Coeficiente de Precipitação Potencial e retomada por Soares (2006). A diferença é que, nos trabalhos propostos, foi utilizada uma razão entre os índices de chuva prevista e acumulada, ao invés da soma.

Atualmente a previsão numérica do tempo é realizada por meio de modelos atualizados a cada 12 horas e que avançam até 72 horas (INPE 2014). Os dados gerados pelo CPTEC-INPE já estão configurados para uso na plataforma TerraMA<sup>2</sup>. O algoritmo elaborado é facilmente ajustável, permitindo a reconfiguração do modelo, seja através de novas combinações entre os índices de chuva acumulada e prevista, seja através da atribuição de novos pesos às variáveis, conforme o interesse e necessidade.

No modelo utilizado foi adotada a proporção de 22 horas de chuva acumulada e de 2 horas de chuva prevista; entretanto, outros arranjos podem ser testados e avaliados. O índice pluviométrico de 24 horas foi adotado devido à forte correlação entre chuvas de alta intensidade e de pequena duração com os escorregamentos planares rasos (Mendes & Valério Filho 2015), modelados na análise de risco e por incorporar rapidamente a intensidade de chuva horária. Reconhece-se, no entanto, que para processos de escorregamentos mais complexos, o papel de acumulados de chuva maiores que 24 horas pode ser importante. Nesses casos, o sistema de monitoramento apresentado é flexível o suficiente para modelar diferentes cenários de influência de chuva acumulada em intervalos de tempo maiores, seja de três, quatro, quinze ou trinta dias e combiná-los com o modelo de 24 horas proposto, conforme necessário.

O modelo apresentado utiliza nove intervalos para o índice pluviométrico, os quais são correlacionados com as quatro classes de risco. Como limite inferior foi considerado um índice 24 horas de 40mm e um aumento sucessivo de 20mm para cada novo intervalo até a faixa maior que 180mm.

O valor inicial definido se aproxima do valor de 39,6mm/h de intensidade de chuva obtido por Mendes & Valério Filho (2015) para a correlação entre chuva e escorregamentos em Ubatuba. No modelo operado pelo Departamento de Recursos Minerais para o sistema de alerta a escorregamentos do Estado do Rio de Janeiro (DRM 2015), o valor de 35mm/h de intensidade de chuva, está bem próximo ao utilizado. Outra correlação utilizada para o estabelecimento do valor de 40mm para o índice pluviométrico decorre do índice de 120mm/72horas utilizado no PPDC-Serra do Mar (São Paulo 1997, Macedo et al. 1999), o que resulta em um valor médio acumulado de 40mm/dia.

Em relação ao limite superior, considera-se que um índice pluviométrico acima de 180mm/24horas já é suficiente para deflagrar escorregamentos planares em qualquer condição de risco. Esse limite situa-se em torno da inflexão da alta inclinação para a quase horizontalidade das curvas envoltórias de Tatizana et al. (1987a, b), indicando a ocorrência de escorregamentos para qualquer intensidade de chuva horária. Esse limite já contém, também, a maioria dos eventos da

classe de escorregamentos severos, apresentado por Kay & Chen (1995).

A variação constante de 20mm de chuva entre os limites mínimo e máximo foi selecionada arbitrariamente, a exemplo da prática operacional do PPDC-Serra do Mar que adota os limites de 120mm, 100mm e 80mm para diferentes regiões do Estado (São Paulo 1997, Macedo et al. 1999).

Dentre as vantagens do modelo desenvolvido na forma de matriz, destacam-se: a maior facilidade de visualização e entendimento dos critérios de entrada e saída de cada nível operacional de alerta, quando comparado ao uso de fórmulas e gráficos, além de tornar mais simples o processo de modificação e atualização do algoritmo por meio da linguagem Lua. Esta estrutura matricial evidencia que, à medida que aumentam os índices pluviométricos, ocorre um gradativo aumento da magnitude dos processos ou da vulnerabilidade, levando a situações de gerenciamento de risco cada vez mais complexas, e também uma ampliação progressiva das áreas de risco que podem ser atingidas pelos eventos perigosos.

Um possível problema associado ao modelo proposto corresponde à eventual subestimação da chuva pelo satélite GOES, especialmente em situações em que não há formações frias com cristais de gelo como apontado por Avila (2006) e Arruda Jr & Lopes (2013). Para dimensionar este efeito pode-se configurar o recebimento de dados de chuva por meio de Plataformas de Coleta de Dados (PCD) que são equipamentos automáticos que dispõem de sensores eletrônicos capazes de realizar medições periódicas de precipitação. Atualmente, a plataforma TerraMA<sup>2</sup> já utiliza algumas PCD de responsabilidade do CPTEC/INPE, sendo uma delas situada em Picinguaba, no município de Ubatuba (INPE 2013a).

Deve-se destacar que o sistema desenvolvido abrange um monitoramento em escada regional, quer seja pela fonte dos dados pluviométricos (satélite GOES), quer seja pelo mapeamento de risco. O sistema não monitora sítios específicos de escorregamentos ativos como descrito internacionalmente (Reid et al., 2012; Allasia et al., 2013, Anh et al., 2016).

O protótipo do sistema elaborado deverá, no decorrer do tempo, ser avaliado por meio da comparação com eventos de escorregamentos

registrados na região e discutido sua aplicabilidade na gestão de risco da região.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de monitoramento, em tempo quase real, para emissão de alertas de desastres que combinou o mapeamento de risco de escorregamento planar, efetuado a partir de unidades espaciais de análise com índices de chuva acumulada e chuva prevista, deflagradores dos processos perigosos.

O algoritmo definido e implementado para o monitoramento de riscos se mostrou compatível com a arquitetura da plataforma TerraMA<sup>2</sup>. A utilização de polígonos com índices pré-calculados, resultantes da avaliação e estabelecimento de critérios desenvolvidos, viabiliza uma abordagem mais eficiente e adequada à automatização. A utilização de uma estrutura de dados em forma de matriz de regras, associando as faixas de chuva com as classes de riscos, tornou o algoritmo altamente flexível e com amplas possibilidades de modificação e atualizações, a partir de pequenas variações no script desenvolvido.

O modelo exposto tem como premissa a utilização das áreas de risco como fator fundamental para a definição dos níveis de alerta, apresentando a mesma relevância que os índices pluviométricos para deflagrar o alerta. Além disso, o modelo incorpora o conhecimento decorrente do avanço dos métodos de mapeamentos de risco verificado na última década no Estado de São Paulo.

O índice pluviométrico utilizado sintetiza dois aspectos fundamentais necessários para a deflagração de processos perigosos e seu gerenciamento: a chuva acumulada (ou antecedente) e a chuva futura (ou prevista).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pelo apoio financeiro ao projeto *Aplicação de geotecnologias na orientação do uso da terra com base nos impactos das mudanças climáticas globais: sub-bacias hidrográficas litorâneas do Estado de São Paulo e do Estado do Rio de Janeiro* (Processo FAPESP 2011/50219-3).

## REFERÊNCIAS

- ALLASIA P., MANCONI A., GIORDAN D., BALDO M., LOLLINO G. 2013. ADVICE: A New Approach for Near-Real-Time Monitoring of Surface Displacements in Landslide Hazard Scenarios. *Sensors*, v. 13, p. 8285-8302; doi:10.3390/s130708285.
- ANH G.Q., DINH-CHINH N., DUC-NGHIA T., DUC-TAN T. 2016. Monitoring of Landslides in Mountainous Regions Based on FEM Modelling and Rain Gauge Measurements. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, v. 6, n. 5, p. 2106-2113. ISSN: 2088-8708, DOI: 10.11591/ijece.v6i5.10482.
- ARRUDA JR E.R., LOPES, E.S.S. 2013. Análise morfológica em sub-bacias hidrográficas para monitoramento do risco potencial a corridas de massa (debris flows) na região serrana do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 14, Rio de Janeiro. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. CDROM.
- AVILA A.M.H. 2006. Estimativa de precipitação em regiões tropicais utilizando imagens do satélite GOES 12. Tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade De Engenharia Agrícola, 2006. Disponível em: [http://www.cpa.unicamp.br/producao/teses-de-doutorado/2006/tese\\_final\\_ana.pdf/download.pdf](http://www.cpa.unicamp.br/producao/teses-de-doutorado/2006/tese_final_ana.pdf/download.pdf). Acessado em: 03 fev. 2015.
- BRASIL 2006. Diretrizes Metodológicas para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 3a Edição.
- CARDOSO D., RIEDEL P.S., VEDOVELLO R., BROLLO M.J., TOMINAGA L.K. 2009. Compartimentação fisiográfica do município de Peruíbe, litoral de São Paulo - uma abordagem metodológica como subsídio à avaliação geotécnica de terrenos. *Pesquisas em Geociências*, v.36, n.3, p. 251-262.
- CENDRERO A., FRANCES E., DIÁZ DE TERAN J.R. 1992. Geoenvironmental units as a basis for the assessment, regulation and management of the Earth's surface. In: CENDRERO, A.; LÜTTIG, G.; WOLFF, F.C. (editors): *Planning the use of the Earth's surface*. New York: Springer Verlag.
- CENDRERO A., FRANCES A., DEL CORRAL D. 2004. Environmental quality indices: a tool for assessing and monitoring geoenvironmental map units. In: PEJON, O.; ZUQUETTE, L. (eds.): *Cartografia Geotécnica e Geoambiental - Conhecimento do Meio Físico: Base para a Sustentabilidade*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 5, São Carlos, Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. p. 525 -564.
- CERRI L.E.S. 1993. Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para a prevenção de acidentes. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP.
- CERRI L.E.S., MACEDO E.S., OGURA A.T., NUNES C.M., CARNEIRO S.R., MODESTO R.P. 1990. Plano preventivo de defesa Civil para a minimização das consequências de escorregamentos em municípios da Baixada Santista e Litoral Norte do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1: 396-408.
- DRM (Departamento de Recursos Naturais) 2015. Correlação chuvas x escorregamentos no Estado do Rio de Janeiro no mês de março de 2015. Relatório Técnico. Disponível em: <http://www.drm.rj.gov.br/index.php/downloads/category/45-correlao-chuvas-x-escorregamentos-nade>. Acessado em: 29 jun 2015.
- EMPLASA 2010a. Arquivos digitais das ortofotos do Projeto de Atualização Cartográfica do Estado de São Paulo - "Projeto Mapeia São Paulo. Produtos de levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011. Titularidade: Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A - EEMPLASA. Contrato de Licença de Uso 038/12, estabelecido entre EEMPLASA e SMA.

EMPLASA 2010b. Arquivos digitais do modelo digital de superfície do Projeto de Atualização Cartográfica do Estado de São Paulo - "Projeto Mapeia São Paulo". Produtos de levantamento aerofotogramétrico de 2010-2011. Titularidade: Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A - EMLASA. Contrato de Licença de Uso 038/12, estabelecido entre EMLASA e SMA.

FERNANDES-DA-SILVA P.C. & CRIPPS J.C. 2011. Geo-environmental Terrain Assessments Based on Remote Sensing Tools: A Review of Applications to Hazard Mapping and Control. In: BRONIEWICZ, E. (Ed.): Environmental Management in Practice. Rijeka: InTech. Disponível em: <[http://cdn.intechopen.com/pdfs/16284/InTechGeo\\_environmental\\_terrain\\_assessments\\_based\\_on\\_remote\\_sensing\\_tools\\_a\\_review\\_of\\_applications\\_to\\_hazard\\_mapping\\_and\\_control.pdf](http://cdn.intechopen.com/pdfs/16284/InTechGeo_environmental_terrain_assessments_based_on_remote_sensing_tools_a_review_of_applications_to_hazard_mapping_and_control.pdf)>. Acessado em: 19 nov. 2012.

FERNANDES-DA-SILVA P.C., VEDOVELLO R., FERREIRA C.J., BROLLO M.J., FERNANDES A.J., CRIPPS J.C. 2010. Geo-environmental mapping using physiographic analysis: constraints on the evaluation of land instability and groundwater pollution hazards in the Metropolitan District of Campinas, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 61 (8): 1657-1675.

FERREIRA, C.J.; ROSSINI-PENTEADO. D. 2011. Mapeamento de risco a escorregamento e inundação por meio da abordagem quantitativa da paisagem em escala regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 11, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. CD-ROM. Disponível em: <https://docs.google.com/open?id=0B0J5AK7cID0aZTU3OTBiNDctZWZjMS00NTE5LTgyNDEtMjQwNDMxM2YzYjUy>. Acessado em: 16 nov. 2012.

FERREIRA C.J., ROSSINI-PENTEADO D., GUEDES A.C.M. 2013. O uso de sistemas de informações geográficas na análise e mapeamento de risco a eventos geodinâmicos. In: LOMBARDO, M.A. & FREITAS, M.I.C. (org.): Riscos e Vulnerabilidades: Teoria e prática no contexto Luso-Brasileiro. Cultura Acadêmica- Editora UNESP, São Paulo, p. 155-188.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2013a. TerraMA2 - Monitoramento, Análise e Alerta. Manual do Usuário. Versão 3.0.2, setembro de 2013. Disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/terrama2/lib/exe/fetch.php?media=docs:manual:manual\\_usuario\\_terrama2\\_302.pdf](http://www.dpi.inpe.br/terrama2/lib/exe/fetch.php?media=docs:manual:manual_usuario_terrama2_302.pdf). Acessado em: 01 jul. 2015.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2013b. TerraMA2 - Plataforma de Monitoramento, Análise e Alerta a extremos ambientais. Manual de Instalação. Versão 3.0.1, agosto de 2013. Disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/terrama2/lib/exe/fetch.php?media=docs:manual:manual\\_instalacao\\_terrama2\\_301.pdf](http://www.dpi.inpe.br/terrama2/lib/exe/fetch.php?media=docs:manual:manual_instalacao_terrama2_301.pdf) Consultado em: 01jul2015.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2014. TerraMA2 - Monitoramento, Análise e Alerta. Dados dinâmicos disponíveis para usuários TerraMA2. Versão 3.0.2, fevereiro de 2014. Disponível em: [http://www.dpi.inpe.br/terrama2/lib/exe/fetch.php?media=docs:manual:caracteristicas\\_dados\\_cptec.pdf](http://www.dpi.inpe.br/terrama2/lib/exe/fetch.php?media=docs:manual:caracteristicas_dados_cptec.pdf) Acessado em: 01 jul. 2015.

ISO (International Organization for Standardization). 2009. Iso 31.000:2009 - Risk management --Principles and guidelines. Genebra: International Organization for Standardization.

KAY J.N. & CHEN T. 1995. Rainfall-landslide relationship for Hong Kong. *Proceedings of the ICE-Geotechnical Engineering*, v. 113, n. 2, p. 117-118, 1995.

LOPESE.S.S., NAMIKAWA L.M., REIS J.B.C. 2011. Risco de escorregamento: monitoramento e alerta de áreas urbanas nos municípios no entorno de Angra dos Reis - Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 11, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. CD-ROM.

LUCENA I.S. 1998. Projeto de Interfaces para Álgebra de Mapas em Geoprocessamento no Ambiente SPRING. Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada Espaciais - INPE, São José dos Campos.

- MACEDO E.S., OGURA A.T., SANTORO J. 1999. Defesa Civil e escorregamentos: o plano preventivo do litoral paulista. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA, 9, São Pedro. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.
- MENDES R.M. & VALERIO FILHO M. 2015. Real-Time Monitoring of Climatic and Geotechnical Variables during Landslides on the Slopes of Serra do Mar and Serra da Mantiqueira (São Paulo State, Brazil). *Engineering*, 7, 140-159. <http://dx.doi.org/10.4236/eng.2015.73012>
- OLIVEIRA T.A., RIEDEL P.S., VEDOVELLO R., SOUZA C.R.G., BROLLO M.J. 2007. Utilização de técnicas de fotointerpretação na compartimentação fisiográfica do município de Cananéia, SP: apoio ao planejamento territorial e urbano. *Geociências (São Paulo)*, 26: 55-65.
- ONU. 2004. Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives - 2004 version. New York: United Nations, 2004. Disponível em: <http://www.unisdr.org/we/inform/publications/657>. Acessado em: 02 dez. 2012.
- PARIZZI, M.G.; SEBASTIÃO, C.S.; VIANA, C.S.; PFLUEGER, M.C.; CAMPOS, L.C.; CAJAZEIRO, J. M. D.; TOMICH, R.S.; GUIMARÃES, R.N.; ABREU, M.L.; SOBREIRA, F.G.; REIS, R. 2010. Correlações entre chuvas e movimentos de massa no município de Belo Horizonte, MG. *Geografias (UFMG)*, 6(2): 49-68.
- REID M.E., LAHUSEN R.G., BAUM R.L., KEAN J.W., SCHULZ W.H., HIGHLAND L.M. 2012. Real-Time Monitoring of Landslides. U.S. Geological Survey, Fact Sheet 2012-3008, 4p. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3008/>. Acessado em: 01 fev. 2017.
- REMONDO J., BONACHEA J., CENDRERO A. 2008. Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences. *Geomorphology*, 94: 496 – 507.
- ROLIM G.S., CAMARGO M.B.P., LANIA D.G., MORAES J.F.L. 2007. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. *Bragantia, Campinas*, 66(4): 711-720.
- SÃO PAULO. 1997. Decreto Nº 42.565, de 1º de dezembro de 1997 - Redefine o Plano Preventivo de Defesa Civil - PPDC específico para Escorregamentos nas Encostas da Serra do Mar, e dá outras providências. *Diário Oficial do Estado, São Paulo, SP, Seção I*, 107(231): 1-2.
- SÃO PAULO. 2015. Meio Ambiente Paulista - Relatório de Qualidade Ambiental 2015. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo.
- SOARES E.P. 2006. Caracterização da precipitação na região de Angra dos Reis e a sua relação com a ocorrência de deslizamentos de encostas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 145p.
- SOARES E.P. & MARTON E. 2006. Relação entre precipitação e deslizamentos de encostas na região de Angra dos Reis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14, Florianópolis. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia. Disponível em: <http://www.cbmet.com/cbm-files/14-521b8abc40054f93efb2e1a59761ffd.pdf>. Acessado em: 29 jun. 2015.
- TATIZANA C., OGURA A.T., CERRI L.E.S., ROCHA M.C.M. 1987a. Análise de Correlação entre Chuvas e Deslizamentos - Serra do Mar - Município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA, 5, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2: 225-236.
- TATIZANA C., OGURA A.T., CERRI L.E.S., ROCHA M.C.M. 1987b. Modelamento Numérico da Análise de Correlação entre Chuvas e Deslizamentos aplicados à Encosta da Serra do Mar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA, 5, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2: 237-248.
- TOMINAGA L.K., FERREIRA C.J., VEDOVELLO R., TAVARES R., SANTORO J., SOUZA C.R.

de G. 2004. Cartas de perigo a escorregamentos e de risco a pessoas e bens do Litoral Norte de São Paulo: conceitos e técnicas. In: PEJON, O.; ZUQUETTE, L. (eds.): SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 5, São Carlos. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. p. 205-216. CD-ROM.

VARNES D. J. 1984. Landslides hazard zonation: a review of principles and practice. Paris: Unesco. 63Pp, 1984. Disponível em: <http://www.bib.ub.edu/fileadmin/fdocs/landslidehazard.pdf>. Acessado em: 24 de agosto de 2012.

VEDOVELLO R. 2000. Zoneamentos geotécnicos aplicados à gestão ambiental, a partir de Unidades Básicas de Compartimentação - UBCs. Tese de Doutorado. IGCE, UNESP, Rio Claro. 154p.

VILA D. A., SCOFIELD R. A., KULIGOWSKI R. J., DAVENPORT J. C.; Satellite rainfall estimation over South America: Evaluation of two major events. NOAA Technical Reports n. 114, US Department of Commerce, Washington, D.C, June 2003.



# ANÁLISE DA SUSCEPTIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS USANDO A ABORDAGEM ESTATÍSTICA DO FATOR DE CERTEZA NO MUNICÍPIO DE MOEDA, MINAS GERAIS

LANDSLIDES SUSCEPTIBILITY ANALYSIS USING STATISTICAL APPROACH OF CERTAINTY FACTOR IN THE MOEDA COUNTY, MINAS GERAIS

CESAR FALCÃO BARELLA

*Universidade Federal de Ouro Preto. E-mail: cesarbarella@gmail.com*

FREDERICO GARCIA SOBREIRA

*Universidade Federal de Ouro Preto. E-mail: sobreira@degeo.ufop.br*

## RESUMO ABSTRACT

Nas últimas décadas vêm sendo observada uma intensificação dos processos geodinâmicos com consequências desastrosas, fruto da expansão irregular e desordenada dos centros urbanos. Para minimizar as implicações desses eventos, em 2012, foi instituída a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, que visa, entre outras premissas, estabelecer estudos de identificação e avaliação de áreas susceptíveis, ou seja, o mapeamento de susceptibilidade a eventos geológico-geotécnicos. Dentre as diferentes abordagens existentes, as técnicas estatísticas têm-se destacado por minimizar a subjetividade imposta pelo operador e permitir a validação do próprio modelo preditivo. Assim, com o foco nos escorregamentos, esse trabalho buscou testar a aplicabilidade da técnica do fator de certeza e avaliar sua acurácia por meio da taxa de sucesso e predição. Aplicado em uma área piloto, que se localiza no município de Moeda-MG, o modelo, integrado pela declividade, geologia, geomorfologia e perfil e orientação das vertentes foi considerado um instrumento promissor na elaboração do mapa de susceptibilidade. Os resultados foram agrupados em zonas de acordo com o número de escorregamentos previstos. A classe mais susceptível conseguiu evidenciar 70% dos deslizamentos, ocupando apenas 29% do território, alcançando, dessa forma, o objetivo de restringir uma elevada quantidade de futuros movimentos numa pequena porção do terreno.

**Palavras-chave:** Susceptibilidade, Escorregamentos, Técnicas Estatísticas, Fator de Certeza.

An intensification of geodynamic processes with disastrous consequences as a result of irregular and disorderly expansion of urban centers has been observed in the last decades. To minimize the implications of these events, the National Policy for Protection and Civil Defense was instituted in 2012, which aims, among other assumptions, to conduct studies to identify and assess susceptibility areas, i.e., to draw susceptibility maps. Among the various approaches, statistical techniques have been used to reduce the subjectivity imposed by the operator, allowing the validation of the predictive model. Thus, focusing on landslide, this study tested the applicability of the certainty factor technique and evaluated its accuracy by the success and prediction rate. Applied in a pilot area located in the region of Moeda-MG, the model, integrated by the slope, geology, geomorphology, profile and orientation of the hillside, was considered a promising tool in the preparation of the susceptibility map. The results were grouped into zones according to the number of predicted landslides. The most susceptible class forecasted 70% of landslides, occupying only 29% of the territory, thus reaching the goal of restricting a high amount of future movements in a small portion of land.

**Keywords:** Susceptibility, Landslides, Statistical Techniques, Certainty Factor.

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de expansão dos centros urbanos brasileiros ao longo das últimas décadas, fruto do êxodo rural, trouxe consigo, quando aliado às disparidades de renda, uma intensa urbanização de áreas com características desfavoráveis à ocupação (Novaes, 2000). As consequências mais evidentes e graves da omissão do poder público frente ao crescimento caótico dos centros urbanos é a tendência mundial de intensificação de prejuízos associados à ocorrência de desastres naturais.

De acordo com os dados publicados no Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, o país experimentou mais de 31 mil desastres nos últimos 22 anos, uma média de mais de 1.400 catástrofes por ano (CEPED-UFSC, 2012). Com a função de cobrir uma demanda por instrumentos legais capazes de balizar esse ordenamento foi promulgada em abril de 2012 a Lei 12.608, que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC. A PNPDEC prioriza ações preventivas relacionadas à minimização de desastres naturais, enfatizando, entre outras premissas, a realização de estudos de identificação e avaliação de áreas susceptíveis a eventos geológico-geotécnicos, ou seja, a elaboração da carta municipal de susceptibilidade (Brasil, 2012).

Na literatura geotécnica, geomorfológica e de geologia de engenharia, a análise da susceptibilidade muitas vezes é referida como estudos de previsão de áreas instáveis (Tominaga, 2007), que refletem a variação, em forma e grau, da capacidade dos terrenos em desenvolver determinado evento (Freitas, 2000). Corresponde basicamente ao mapeamento da expectativa espacial de ocorrência de um fenômeno, sob influência de um determinado conjunto de condicionantes ambientais. Esse tipo de produto tem o anseio por avaliações mais gerais, buscando indicar as áreas mais favoráveis aos diversos usos em função das restrições impostas pelos processos envolvidos (Sobreira & Souza, 2012).

De acordo com Julião *et al.* (2009), essa abordagem permite, além da representação da incidência espacial do processo, identificar e classificar as áreas com maior propensão de serem afetadas em um tempo indeterminado. Seu desenvolvimento se dá em diversas escalas, normalmente mais

abrangentes, com base na seleção de uma série de agentes condicionantes ao processo, sem levar em consideração seus impactos sobre o meio ambiente, a sociedade e a economia. O produto final visa orientar o crescimento urbano do município de forma sustentável, podendo, ainda, assinalar áreas mais propensas às avaliações de risco ou de aptidão a urbanização.

Diversos métodos têm sido desenvolvidos a partir de meados da década de 70 até a atualidade, porém as diferentes abordagens existentes não podem ser igualmente aplicadas (Soeters & Van Western, 1996). Isso se deve à escala trabalhada, à área cartografada, à qualidade dos dados de entrada disponíveis e os custos envolvidos. Apesar da classificação das metodologias ser algo subjetivo, que pode variar de acordo com a ênfase dada às características dos procedimentos adotados, na grande maioria das vezes, as técnicas aplicadas se enquadram nos enfoques geomorfológicos, heurísticos, estatísticos ou determinísticos. Entretanto, de modo geral, a evolução no desenvolvimento metodológico do mapeamento de susceptibilidade tem buscado o aperfeiçoamento da precisão gráfica do produto final gerado e a diminuição da intervenção do profissional ao longo do trabalho.

Internacionalmente, os métodos estatísticos vêm sendo amplamente difundidos (Van Westen, 1993; Zêzere, 1997; Chung & Fabbri, 1999; Lee, 2004; Guzzetti, 2005; entre outros), uma vez que “minimizam” a subjetividade imposta pelo operador, quando comparado aos procedimentos geomorfológicos e heurísticos. São adequados, segundo Soeters & van Westen (1996), à escala 1:25.000 e constituem abordagens indiretas e quantitativas que estabelecem correlações espaciais entre os processos e os parâmetros causadores de instabilidade que estão sendo analisados (Guzzetti *et al.*, 1999). De acordo com Fernandes *et al.* (2001), esse ferramental é baseado em padrões mensurados a partir de observações de campo, ao invés da simples experiência do pesquisador, sendo de suma importância a disponibilidade de extensos bancos representativos dos processos, fato ainda raro na realidade brasileira.

Múltiplos artifícios estatísticos têm sido empregados na elaboração das análises de susceptibilidade, como, por exemplo, *Likelihood Ratio*, Valor Informativo, Pesos de Evidência, Probabilidade

Bayesiana, Análise Discriminante, Regressão Logística, Lógica Fuzzy, etc. Dentre uma gama variada de modelos possíveis, este trabalho selecionou o método do Fator de Certeza para a investigação, já que essa técnica foi considerada menos difundida comparativamente a outras modalidades. Nesse contexto, a análise desenvolvida visa testar, em uma área piloto, a aplicabilidade dessa concepção metodológica e avaliar sua adequabilidade como instrumento eficaz de elaboração de mapas de susceptibilidade a escorregamentos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada na construção dessa análise foi estabelecida de acordo com a aproximação genérica de Aleotti & Chowdhury (1999), porém adaptada ao estudo em questão, tendo as seguintes etapas: (1) elaboração do mapa de inventário; (2) seleção e mapeamento dos parâmetros condicionantes ao processo e subdivisão de cada parâmetro em um número de classes relevantes; (3) sobreposição dos diferentes mapas de parâmetros ao mapa de inventário; (4) aplicação das equações matemáticas da técnica do Fator

de Certeza em cada classe, de cada parâmetro, a fim de se determinar os pesos de ponderação; (5) análise sensitiva dos parâmetros utilizados; (6) cruzamento dos mapas de parâmetros seguindo a ordem estipulada pela etapa anterior; (7) determinação do grau de ajuste dos dados em cada modelo integrado; (8) seleção do modelo mais robusto e determinação de sua capacidade preditiva; e (9) classificação do modelo final elegido em 3 classes: alta média e baixa susceptibilidade a movimentos de massa, em função da capacidade preditiva individual de cada classe.

### 2.1 Localização e acesso

A área selecionada para a aplicação do método proposto compreende o município de Moeda, Minas Gerais, distante, aproximadamente, 58 km da capital Belo Horizonte. O acesso é feito pela rodovia BR-040, na altura do km 575. Parte da região integra a borda oeste da unidade geológica Sinclinal Moeda, definida por Dorr II (1969), que contempla a serra homônima, com amplitudes de relevo muito elevadas e vertentes íngremes (Figura 1), sustentadas por quartzitos e itabiritos.

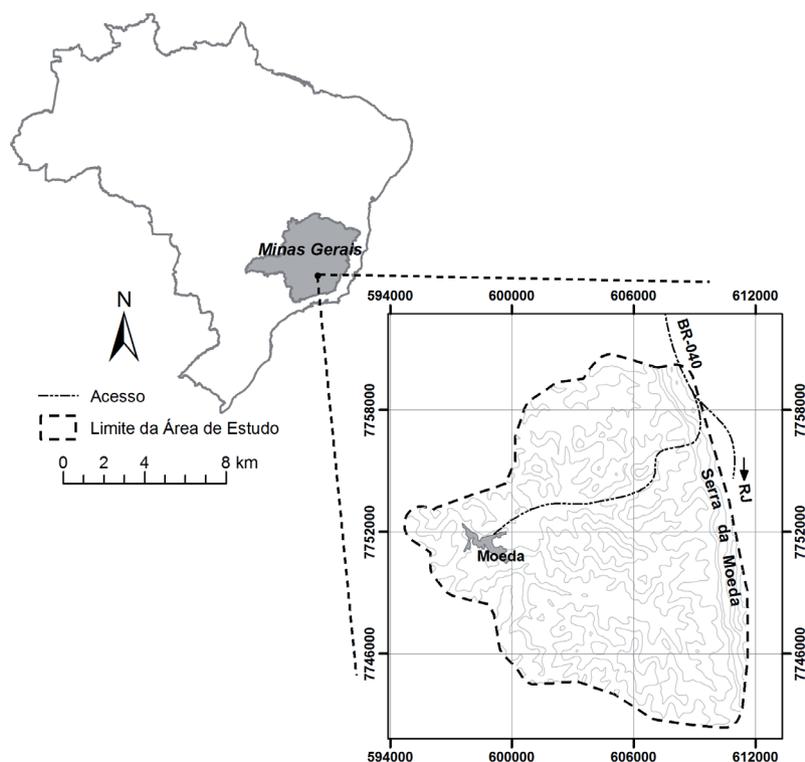


Figura 1 - Localização da região selecionada para a aplicação da metodologia proposta.

## 2.2 Inputs do modelo

Apesar de existir um amplo acervo de temas influentes na previsão de escorregamentos, a seleção dos fatores condicionantes para a elaboração dos mapas de susceptibilidade vai depender do tipo de movimento que está sendo investigado, das características do terreno, da disponibilidade de dados e informações existentes, dos custos envolvidos na análise e da escala que está sendo utilizada (Van Westen *et al.*, 2008). Em função do exposto acima foram selecionados para a investigação os seguintes parâmetros, todos definidos por uma unidade cartográfica baseada no pixel de 5 metros de resolução: declividade, orientação e curvatura das vertentes, unidades litológicas e geomorfológicas.

Muitas vezes considerada a principal fonte de informação utilizada na construção dos modelos de previsão, a topografia utilizada teve origem na elaboração do modelo digital de elevação (MDE-TIN), derivado da interpolação de curvas de nível vetorizadas das cartas topográficas 1:25.000 da Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG), dando origem a uma série de parâmetros como segue: (i) declividade, classificada em grupos com amplitude de 5°; (ii) orientação das vertentes, classificada em pontos cardeais (N, S, L e O) e colaterais (NL, NO, SL e SO). Sua utilização teve o intuito de contemplar indiretamente a influência de estruturas geológicas identificadas, porém não utilizadas no mapeamento devido à falta de informação compatível com a escala, gerando, dessa forma, um modelo mais conservativo. Ainda, esse parâmetro permite refletir diferenças na umidade do solo e na vegetação (Van Westen *et al.*, 2008); (iii) curvatura total das vertentes, elaborada a partir da combinação entre os perfis transversais e longitudinais decompostos em formas côncavas, lineares e convexas. Foi arquitetada, inicialmente, a partir de *pixels* de 50 metros, convertidos, posteriormente, em 5 metros, uma vez que resoluções espaciais mais abrangentes geram acuidades visuais das formas mais evidentes ao operador. Escalas de maior detalhamento tornam complexa a caracterização do tipo de perfil da vertente, além de delinear as facetas da triangulação efetuada para se obter o MDE (Garcia, 2012).

A geologia utilizada seguiu as observações de Varnes *et al.* (1984). Isto é, foi agrupada em

unidades litológicas, não preservando, necessariamente, a ordem estratigráfica, mas estabelecendo um agrupamento com base em observações ou inferências de estabilidade. Como a geologia é diversificada, a área investigada foi desmembrada em duas grandes porções, uma situada no Sinclinal Moeda, extremo leste do território, com o predomínio de rochas metamórficas, como, por exemplo, itabiritos, filitos e quartzitos, muitas intensamente estruturadas, e outra, à medida que se avança para o interior (sentido oeste), composta por gnaisses, granodioritos e tonalitos, representando a segunda porção do território. Assim, a elaboração do cartograma de unidades litológicas foi derivada da combinação entre as Cartas do Quadrilátero Ferrífero (Lobato *et al.*, 2005) e o Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais (Heineck *et al.*, 2003), sendo que essa abordagem só foi aceita devido ao fato da porção com escala em menor detalhe ser formada por uma geologia homogênea, que pouco se modifica ao longo da região analisada e que não deve ser indutora de movimentos. Por fim, as litologias foram agregadas segundo suas características predominantes, formando os seguintes grupos: Unidade Litológica de Filito - ULF, Unidade Litológica de Xisto - ULX, Unidade Litológica de Itabirito - ULI, Unidade Litológica de Quartzito - ULQ, Unidade Litológica de Gnaise - ULG, Unidade Litológica de Granodiorito e Tonalito - ULGT, Unidade Litológica de Diabásio - ULD e Unidade Litológica Elúvio-Colúvial - ULEC

A geomorfologia foi inserida nas análises de susceptibilidade por meio do agrupamento de unidades de relevo com características semelhantes. Teve por base o sistema de classificação definido pela concepção de Ponçano *et al.* (1979), porém adaptada ao limiar de declividade média de 15° (Tabela 1). A menor unidade de análise utilizada na definição das amplitudes locais foi a delimitação das bacias hidrográficas geradas a partir do modelo digital de elevação invertido.

Partindo do postulado básico de que os eventos geodinâmicos se sucedem na paisagem sob a influência das mesmas condições, a inventariação de movimentos passados é um dos parâmetros de entrada mais importantes nas metodologias estatísticas de mapeamento. Tem por princípio o reconhecimento e a cartografia de sinais deixados

por antigos escorregamentos. Em geral, esses sinais refletem mudanças morfológicas, tais como, variação da forma, inclinação, posição, aparência e topografia das encostas, que podem ser corroboradas por alterações da paisagem (solo exposto/vegetação, presença de depósitos, etc.) (Guzzetti *et al.*, 2012). Para tal, foram utilizadas as imagens

do *Google Earth Pro* justapostas às curvas de nível e sobrepostas ao modelo 3D com exagero vertical, tudo com o intuito de facilitar a interpretação. Campanhas de campo foram realizadas em sítios específicos, selecionados aleatoriamente, objetivando calibrar o processo de fotointerpretação e validar “*in loco*” o inventário produzido.

**Tabela 1** – Critérios adotados na identificação de sistemas de relevo (adaptado de Ponçano *et al.*, 1979).

Unidades Geomorfológicas	Declividade da Vertente	Amplitude Local
Relevo Colinoso	< 15°	< 100 m
Relevo de Morros com Vertentes Suavizadas	< 15°	100 - 300 m
Relevo de Morrotes	> 15°	< 100 m
Relevo de Morros	> 15°	100 - 300 m
Relevo Montanhoso	> 15°	> 300 m

## 2.2 Método do fator de certeza

Inicialmente desenvolvida com o intuito de auxiliar diagnósticos médicos (Shortliffe & Buchanan, 1975), a técnica do Fator de Certeza foi posteriormente incorporada ao espectro das

metodologias estatísticas de mapeamento de susceptibilidade a escorregamentos (Chung & Fabbri, 1993; Binaghi *et al.*, 1998; Luzi & Pergalani, 1999; Long, 2008; Sujatha *et al.*, 2012; Devkota *et al.*, 2013). Pode ser matematicamente formulada a partir da equação (1) (Heckerman, 1986).

$$CF_{ij} = \begin{cases} \frac{P(S|N_{ij}) - P(S)}{P(S|N_{ij}) \cdot (1 - P(S))} \rightarrow P(S|N_{ij}) \geq P(S) \\ \frac{P(S|N_{ij}) - P(S)}{P(S) \cdot (1 - P(S|N_{ij}))} \rightarrow P(S|N_{ij}) < P(S) \end{cases} \quad (1)$$

Onde,  $N_{ij}$  representa a classe  $i$  de um tema cartográfico  $j$  utilizado no mapeamento ( $i, j = 1, 2, 3, 4, \dots, n$ ) e  $S$  faz referência aos escorregamentos inventariados. Logo,  $P(S|N_{ij})$  é a probabilidade de um acontecimento  $S$  se realizar condicionado à  $N_{ij}$ , que nada mais é que a relação entre os escorregamentos cartografados em alguma classe  $i$ , de algum cartograma  $j$ , e a área ocupada por essa mesma classe, e  $P(S)$  é a probabilidade à priori de um escorregamento ocorrer ao longo da área de estudo, ou seja, é a relação entre todos os escorregamentos cartografados e a região investigada.

Cada  $CF_{ij}$  é concebido como um valor numérico compreendido entre +1 e -1, onde valores positivos significam o aumento da certeza de encontrar um escorregamento e valores negativos a

diminuição da mesma (Luzi & Pergalani, 1999). Assim, quanto maior a magnitude dos valores positivos maior é a influência do parâmetro analisado sobre o processo, ao passo que quanto maior a magnitude dos valores negativos menor é essa influência. Valores próximos a zero significam que a probabilidade condicionada é muito similar à probabilidade à priori, não sendo possível afirmar nada sobre a certeza da proposição (Binaghi *et al.*, 1998).

Determinada a influência singular de todas as variáveis explicativas consideradas, a sobreposição dos dados é feita em pares, obedecendo a regra de integração verificada em Devkota *et al.* (2012) e Long (2008), apresentada pela equação (2).

$$\begin{aligned}
 & CF_{i1} + CF_{i2} - (CF_{i1} \cdot CF_{i2}) \rightarrow CF_{i1}, CF_{i2} \geq 0 \\
 & \quad \square \\
 CF = & \frac{CF_{i1} + CF_{i2}}{1 - \min(|CF_{i1}|, |CF_{i2}|)} \rightarrow CF_{i1}, CF_{i2}: \text{ sinal oposto} \\
 & \quad \square \\
 & CF_{i1} + CF_{i2} + (CF_{i1} \cdot CF_{i2}) \rightarrow CF_{i1}, CF_{i2} < 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

$CF$  representa o resultado da integração de dois parâmetros ( $CF_{i1}$  e  $CF_{i2}$ ), como, por exemplo, declividade e perfil das vertentes. Esse resultado ( $CF$ ) deve ser novamente integrado a outro tema qualquer, até que todos os cartogramas explicativos sejam incorporados, sempre dois a dois e obedecendo as regras de agrupamento expostas na equação (2).

### 2.3 Análise de sensibilidade

Durante a composição de uma análise estatística de susceptibilidade, diversos são os fatores de predisposição que podem ser incorporados, cada qual com sua parcela de influência no desencadeamento do evento. Visto que o aumento no número de parâmetros não se traduz, necessariamente, num aumento de qualidade (Zêzere *et al.*, 2005; Sterlacchini *et al.*, 2011; Piedade *et al.*, 2011), é importante compreender a influência que cada parâmetro tem sobre o evento investigado.

Nesse sentido, para a realização dessa etapa, cada mapa de parâmetro foi, de forma individual, avaliado a partir da Curva de Sucesso, ferramenta que será abordado mais à frente, no tópico que envolve a validação dos modelos de susceptibilidade. Com base nos resultados alcançados por esse procedimento, os diversos cartogramas explicativos foram hierarquizados de acordo com seu grau de relevância sobre o processo, de forma a garantir que a regra de integração representada pela equação (2) obedeça à ordem estipulada pela análise de sensibilidade.

### 2.4 Validação do modelo de susceptibilidade

A validação é a etapa metodológica destinada à avaliação do grau de confiança nos resultados encontrados. É um instrumento importante durante a transferência dos produtos ao usuário

final, uma vez que decisões podem ser tomadas levando-se em consideração a qualidade dos mapas produzidos, o que pode ser acessado através de sua acurácia e poder preditivo (Beguería, 2006). Visto a inviabilidade de se esperar por futuras instabilizações de vertente na paisagem para assegurar a previsibilidade de um modelo, procedimento conhecido como “*wait and see*” (Soeters & Van Westen, 1996). Chung & Fabbri (2003) propuseram artifícios para a produção de amostras de escorregamentos autônomos. Para isso é necessário restringir a utilização dos movimentos cartografados e particionar o inventário de forma que parte dos eventos seja utilizada na modelagem e a outra na avaliação dos resultados.

Assim, para assegurar a envergadura do modelo de susceptibilidade empregado no município de Moeda, uma divisão aleatória foi aplicada aos escorregamentos inventariados, sendo que metade dos eventos cartografados foi utilizada na construção da abordagem matemática do Fator de Certeza. A metade restante foi utilizada, com um evento independente, para a certificação da capacidade preditiva dos resultados obtidos.

Os métodos utilizados para estimar a qualidade dos mapas gerados foram as Curvas de Sucesso e Predição. A grande diferença entre ambas as técnicas reside na parcela do inventário utilizada. A Curva de Sucesso faz uso da parcela do inventário empregada na modelagem, logo, avalia o grau de ajuste do modelo aos dados. A Curva de Predição utiliza a parte restante do inventário, ainda não utilizada, e seu resultado tende a avaliar a capacidade do modelo em prever futuras manifestações de instabilidade (Pereira, 2009; Piedade *et al.*, 2010). Em resumo, a Curva de Sucesso avalia o resultado entre o modelo e os dados que o originaram, ao passo que a Curva de Predição, a partir do momento que decorre de um processo de validação independente, apresenta capacidade de prever um acontecimento num

horizonte temporal indefinido (Zêzere, 2006). Devido ao exposto acima, deve-se esperar que a curva de sucesso seja sempre superior à de predição (Chung & Fabbri, 2003). Para facilitar a interpretação dos resultados, foi calculada a Área Abaixo da Curva (AAC) de todos os gráficos utilizados na estimativa da qualidade do produto final gerado.

Dessa forma, cada vez que um mapa de parâmetro era adicionado ao modelo pelas leis de integração adotadas na equação (2), seguindo a hierarquia determinada na análise de sensibilidade, a área abaixo da curva de sucesso era calculada. O objetivo era avaliar se a integração proposta melhoraria ou pioraria o grau de ajuste do modelo aos dados inventariados. Todos os modelos gerados foram analisados comparativamente, de forma que o melhor resultado, ou seja, o modelo mais correto, foi selecionado para a análise subsequente, que envolveu a determinação da Curva de Predição.

### 3 RESULTADOS

A partir de uma abordagem comparativa entre os resultados da análise de sensibilidade (AAC) explicitados na Tabela 2, é possível perceber que a declividade é um parâmetro altamente influente, com destaque para as classes de declividade situadas no intervalo de 20° a 70°. Apesar da faixa localizada entre 45° e 70° apresentar os valores mais elevados de *CF*, o que eleva o grau de certeza de sua influência sobre os eventos, sua distribuição na região investigada é extremamente limitada, se restringindo a uma área inferior a 1,5 km<sup>2</sup>, isto é, a poucos *pixels* que possivelmente podem, numa análise subsequente, ser englobados em numa única classe acima de 45°. Nesse contexto, o intervalo de 20 a 45° assume grande responsabilidade na análise, uma vez que apresenta coeficientes de *CF* positivos que abrangem aproximadamente 33% do município estudado.

A avaliação dos resultados referentes ao perfil das vertentes evidenciou que as formas capazes de concentrar o fluxo de água são as mais atuantes na identificação dos escorregamentos. Isso demonstra que o perfil horizontal está comandando o processo, fato que é facilmente observado pelos índices positivos dos valores de ponderação de *CF* para as formas das vertentes Convexa-Côncava, Linear-Côncava e Côncava-Côncava (Tabela 2).

No que diz respeito às unidades litológicas, os grupos compostos, predominantemente, por filitos, itabiritos e depósitos elúvio-colúviais são os que mais se destacaram no reconhecimento dos movimentos (Tabela 2). Partindo do pressuposto de que, via de regra, os itabiritos apresentam uma resistência considerável, uma explicação plausível para seu elevado *CF* pode estar na coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero (Alkmim & Marshak, 1998), uma vez que podem ser encontrados sobrepostos aos filitos. Desta forma, o problema não estaria na unidade rochosa em questão, mas no contato entre as camadas, gerando um zona de fluxo subsuperficial que culminaria na diminuição do atrito entre ambas, ocasionado a geração de uma possível superfície de ruptura. Os depósitos são, na sua grande maioria, compostos por canga, que constituem crostas superficiais lateríticas de grande resistência. Estão distribuídos pontualmente ao longo dos itabiritos, atingindo menos de 0,001% da área de estudo. Isso permite supor que essa unidade litológica pode ter sido englobada por eventos terceiros, podendo, numa análise subsequente, ser agrupada na Unidade Litológica de Itabirito - ULI.

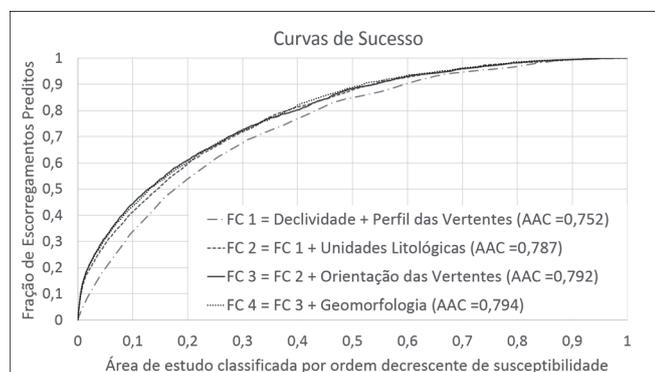
A orientação das vertentes demonstrou que as encostas direcionadas para os sentidos sudeste, sul e leste apresentaram relações com os eventos cartografados (Tabela 2). A direção leste representa a orientação preferencial das camadas geológicas do flanco oeste do Sinclinal Moeda, o que ajuda a corroborar a hipótese atrelada aos elevados índices de *CF* para os itabiritos. No interior da área investigada, a oeste da Serra da Moeda, são observadas foliações nas direções predominantes sul e sudeste, provavelmente, resultado de gnaissificação. Como dados estruturais não foram levados em conta, a utilização dessas orientações podem gerar um modelo conservativo de análise, uma vez que encostas similares, porém não estruturadas, apresentaram pesos de ponderação mais elevados no resultado final.

Por último, as unidades geomorfológicas apresentaram-se relevantes principalmente no Relevo Montanhoso (Tabela 2), onde as amplitudes e declividades são mais acentuadas, podendo atingir valores superiores a ordem de 300 metros e 15 graus. Essa região estende-se ao longo de toda a Serra da Moeda, sendo também circunscrita numa parcela interiorana do município.

**Tabela 2** - Valores de ponderação atribuídos às classes de todos os parâmetros explicativos por meio da técnica estatística do Fator de Certeza e avaliação do grau de relevância de cada fator predisponente.

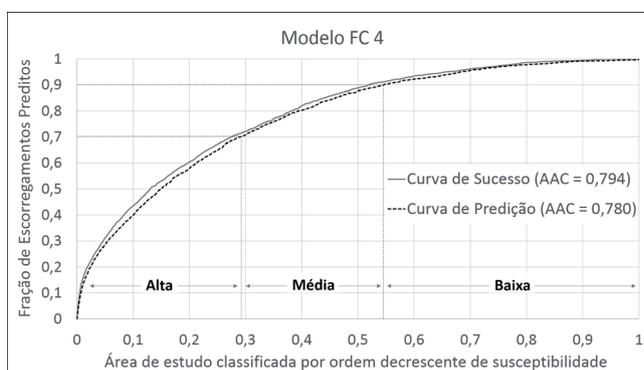
Parâmetro Analisado	Classes de Intervalo	CF <sub>ij</sub>	Análise Sensitiva (AAC)
Declividade	0 - 5	-0,69	0,715
	5 - 10	-0,89	
	10 - 15	-0,57	
	15 - 20	-0,11	
	20 - 25	0,31	
	25 - 30	0,48	
	30 - 35	0,61	
	35 - 40	0,68	
	40 - 45	0,73	
	45 - 50	0,77	
	50 - 55	0,79	
	55 - 60	0,74	
	60 - 65	0,65	
	65 - 70	0,82	
	70 - 75	-0,36	
	75 - 80	-0,02	
80 - 85	-1,00		
85 - 89,1	-1,00		
Perfil das vertentes (Curvatura)	Convexo - Convexo	-0,36	0,663
	Convexo - Linear	-0,12	
	Convexo - Côncavo	0,55	
	Linear - Convexo	-0,52	
	Linear - Linear	-0,79	
	Linear - Côncavo	0,29	
	Côncavo - Convexo	-0,45	
	Côncavo - Linear	-0,57	
	Côncavo - Côncavo	0,44	
Unidades Litológicas	Unidade Litológica de Filito	0,51	0,649
	Unidade Litológica de Itabirito	0,88	
	Unidade Litológica de Xisto	-1,00	
	Unidade Litológica de Quatzito	-0,03	
	Unidade Litológica de Granodiorito e Tonalito	-0,37	
	Unidade Litológica de Diabásio	-0,98	
	Unidade Litológica de Gnaiss	0,06	
	Unidade Litológica Elúvio-Coluvial	0,85	
Orientação das vertentes	Plano - Flat	-0,67	0,642
	Norte - N	-0,34	
	Nordeste - NE	-0,23	
	Leste - E	0,34	
	Sudeste - SE	0,51	
	Sul - S	0,46	
	Sudoeste SO	0,08	
	Oeste - O	-0,35	
	Noroeste - NO	-0,25	
Unidades Geomorf.	Relevo Colinoso	-0,52	0,594
	Relevo de Morros com Vertentes Suavizadas	-0,52	
	Relevo de Morrotes	-1,00	
	Relevo de Morros	0,07	
	Relevo Montanhoso	0,26	

Determinado o grau de relevância de cada fator predisponente na investigação, procedeu-se a hierarquização dos parâmetros com base na análise sensitiva, com o objetivo de alimentar a expressão de integração determinada pela equação (2). O resultado encontrado é apresentado na Figura 2, onde é possível observar quatro curvas de sucesso, uma para cada modelo. Pode-se perceber que a curva do modelo FC 4 está ligeiramente mais elevada que as demais, fato que é corroborado pelo cálculo da área abaixo da curva até o eixo das abscissas (AAC = 0,794). Isso demonstra que para uma mesma porcentagem do território, os modelos conseguem capturar diferentes porcentagens de escorregamentos. Por exemplo, em 20% do território, o modelo FC 1 consegue identificar, aproximadamente, 53% dos escorregamentos, ao passo que o modelo FC 4 consegue, para os mesmos 20%, modelar 60% dos movimentos. Assim, dentre os quatro modelos analisados, o que englobou todos os temas foi considerado mais robusto, uma vez que apresentou maior capacidade de individualizar as áreas mais propensas aos eventos.

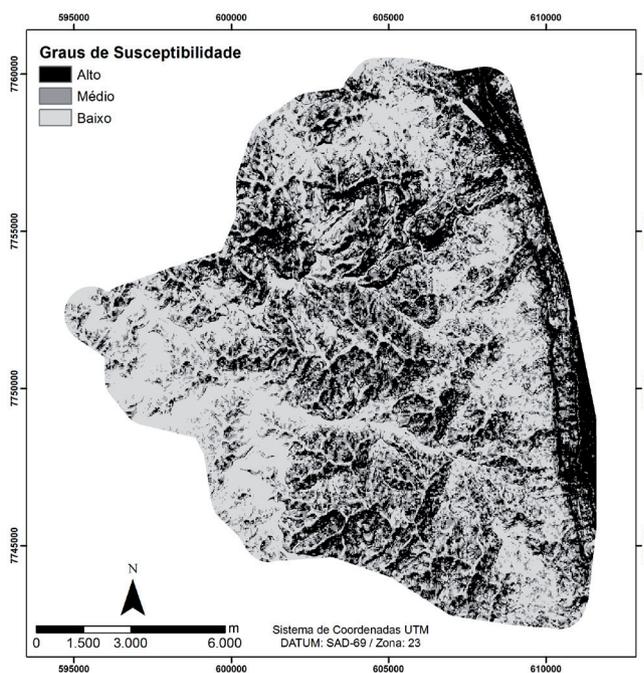


**Figura 2** – Análise da taxa de sucesso dos diferentes modelos desenvolvidos pela combinação progressiva dos parâmetros.

A segunda etapa constou em avaliar a taxa de predição do Modelo FC 4, considerando a outra metade dos dados inventariados, ainda não utilizada na análise, logo, independente, simulando a ocorrência de novos eventos na paisagem (Figura 3). É notável uma queda na curva de predição quando comparada a de sucesso, fato que se deve ao modelo ser construído com um inventário (grupo de treino) e ser validado com outro (grupo de teste).



**Figura 3** – Comparação entre as Curvas de Sucesso e de Predição para o Modelo FC 4.



**Figura 4** – Mapa de susceptibilidade a escorregamentos elaborado pelo método do Fator de Certeza.

Assim, com base na curva de predição, o território foi compartimentado em três zonas, alta, média e baixa susceptibilidade, tendo como base a previsibilidade de novos eventos em cada classe (Figura 3). A zona de alta susceptibilidade foi definida como a área que irá receber 70% dos futuros escorregamentos, correspondendo a 29% da região estudada, situada, predominantemente, ao longo da Serra da Moeda. A zona de média susceptibilidade foi definida como a área que irá sediar 20% dos novos movimentos, ocupando 25% do território. Por último, a zona de baixa susceptibilidade foi definida como a porção que será atingida por 10% dos futuros eventos e cobre cerca de 46% da região mapeada. Com base nessa proposta, os índices resultantes da integração

entre declividade, perfil e orientação das vertentes e unidades litológicas e geomorfológicas foram reagrupados para comportar as três classes discriminadas anteriormente, cada qual com sua capacidade preditiva, dando origem ao mapa de susceptibilidade a escorregamentos conforme é apresentado na Figura 4.

#### 4 CONCLUSÃO

A abordagem estatística aplicada permitiu a identificação dos parâmetros mais influentes sobre o processo investigado. Em suma, as encostas situadas em áreas montanhosas, compostas por terrenos predominantemente filíticos e itabiríticos, direcionadas para leste, sul e sudeste, com declividade superior a 20 graus e morfologia capaz de concentrar o fluxo de água, apresentam os atributos mais propensos ao desencadeamento de deslizamentos num futuro ainda indeterminado, porém capaz de ser setorizado espacialmente. Vale ressaltar que essa combinação de fatores serve para descrever, em particular, a região alvo do estudo.

Dessa maneira, a técnica empregada permitiu identificar e integrar as características mais relevantes presentes em cada cartograma explicativo utilizado no processo de mapeamento, ao passo que, os métodos de validação empregados aferiram a robustez e a capacidade preditiva do modelo, além de permitir que o mesmo fosse classificado de forma menos subjetiva, com base na previsibilidade aferida a cada classe de susceptibilidade.

À vista do exposto acima pode-se concluir que a utilização do enfoque estatístico, que no caso específico desse trabalho foi o do Fator de Certeza, permitiu reconhecer as peculiaridades do local, as quais podem sofrer mutações de acordo com o ambiente que está sendo investigado. Essa é uma das grandes vantagens da aplicação desse tipo de metodologia, onde cada área mapeada é tratada na particularidade de seus condicionantes, minimizando a subjetividade imposta pelo operador, principalmente, quando métodos diagnósticos da capacidade preditiva são incorporados na análise.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), bem como ao Núcleo de Avaliação e Gestão de Perigosidades e Risco Ambiental (RISKam), do Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa (IGOT-UL), onde foi desenvolvido parte do estudo.

#### REFERÊNCIAS

- Aleotti, P. & Chowdhury, R. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58: 21-44.
- Alkmim, F.F. & Marshak, S. 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90: 29-58.
- Beguiría, S. 2006. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37: 315-329.
- Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Pergalani, F. & Rampini, A. 1998. Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy dempster - shafer approaches. *Natural Hazards* 17: 77-97.
- Brasil. 2012. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 11 p.
- CEPED-UFSC 2012. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010: Volume Brasil. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres/Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 94 p.

- Chung, C.F. & Fabbri, A.G. 1993. The representation of geoscience information for data integration. *Nonrenewable Resources*, 2: 122-139.
- Chung, C.F. & Fabbri, A.G. 1999. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65: 1389-1399.
- Chung, C.F. & Fabbri, A.G. 2003. Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30: 451-472.
- Devkota, K.C., Regmi, A.D., Pourghasemi, H.R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I.C., Dhital, M.R. & Althuwaynee, O.F. 2013. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. *Natural Hazards*, 65: 135-165.
- Dorr II, J.V.N. 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Development of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS/DNPM, Professional Paper 641-A, Washington, USA, 110 p.
- Fernandes, N.F., Guimarães, R.F., Gomes, R.A.T., Vieira, B.C., Montgomery, D.R. & Greenberg, H. 2001. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2: 51-71.
- Freitas, C.G.L. 2000. Cartografia Geotécnica de Planejamento e Gestão Territorial: Proposta Teórica e Metodológica. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, USP, São Paulo, SP, 230 p.
- Garcia, R.A.C. 2012. Metodologias de avaliação de perigosidade e risco associado a movimentos de vertente: Aplicação na bacia da ribeira de Alenquer. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 437 p.
- Guzzetti, F. 2005. Landslide Hazard and Risk Assessment: Concepts, Methods and Tools for the Detection and Mapping of Landslides, for Landslides Susceptibility Zonation and Hazard Assessment, and for Landslide Risk Evaluation. PhD Thesis, Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät, Universität Bonn, Bonn, Germany, 373 p.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. & Reichenbach, P. 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy, *Geomorphology*, 31: 181-216.
- Guzzetti, F., Mondini, A.C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M. & Chang, K. 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112: 42-66.
- Heckerman, D. 1986. Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factors. In: L.N. Kanal & J.F. Lemmer (eds.). *Uncertainty in Artificial Intelligence*. Elsevier, New York, USA, p.:298-311.
- Heineck, C.A., Leite, C.A.S., Silva, M.A. & Vieira, V.S. 2003. Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais. CPRM, CODEMIG e Governo do Estado de Minas Gerais.
- Julião, R.P., Nery, F., Ribeiro, J.L., Branco, M.C. & Zêzere, J.L. 2009. Guia Metodológico para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de Base Municipal. Autoridade Nacional de Protecção Civil – ANPC, Portugal, 91 p.
- Lee, S. 2004. Application of likelihood ratio and logistic regression models to landslide susceptibility mapping using GIS. *Environmental Management*, 34: 223-232.
- Lobato, L.M., Baltazar, O.F., Reis, L.B., Achtschin, A.B., Baars, F.J., Timbó, M.A., Berni, G.V., Mendonça, B.R.V. & Ferreira, D.V. 2005. Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. CODEMIG, Belo Horizonte, CD-ROM.
- Long, N.T. 2008. Landslide Susceptibility Mapping of the Mountainous Area in a Luoi District, Thua Thien Hue Province, Vietnam. PhD Thesis, Department of Hydrology and Hydraulic

- Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium, 229 p.
- Luzi, L. & Pergalani, F. 1999. Slope instability in static and dynamic conditions for urban planning: The 'Oltre Po Pavese' case history (Regione Lombardia - Italy). *Natural Hazards* 20: 57-82.
- Novaes, W., Ribas, O. & Costa Novaes, P. 2000. Agenda 21 Brasileira - Bases para Discussão. MMA/PNUD, Brasília, DF, 191 p.
- Pereira, S.S. 2009. Perigosidade a Movimentos de Vertente na Região Norte de Portugal. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 370 p.
- Piedade, A., Zêzere, J.L., Garcia, R.A.C. & Oliveira, S.C. 2010. Avaliação e validação de modelos de susceptibilidade a deslizamentos em áreas homogêneas na região a Norte de Lisboa. In: Congresso da APDR - Regiões de Charneira, Canais de Fronteira e Nós, 16, Funchal, Portugal, Atas, p. 1305-1319.
- Piedade, A., Zêzere, J.L., Garcia, R. & Oliveira, S. 2011. Modelos de susceptibilidade a deslizamentos superficiais translacionais na Região a Norte de Lisboa. *Finisterra*, 46: 9-26.
- Ponçano, W.L., Carneiro, C.D.R., Almeida, M.A., Pires Neto, A.G. & Almeida, F.F.M. 1979. O conceito de sistemas de relevo aplicado ao mapeamento geomorfológico do estado de São Paulo. In: SBG, Simpósio Regional de Geologia, 2, Rio Claro, Atas, p. 253-262.
- Shortliffe, E.H. & Buchanan, B.G. 1975. A model of inexact reasoning in medicine. *Mathematical Biosciences*, 23: 351-379.
- Sobreira, F.G. & Souza, L.A. 2012. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 2: 79-97.
- Soeters, R. & van Westen, C.J. 1996. Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: A.K. Turner & R.L. Shuster (eds.). *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, p.: 129-177.
- Sterlacchini, S., Ballabio, C., Blahut, J., Masetti, M. & Sorichetta, A. 2011. Spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps. *Geomorphology*, 125: 51-61.
- Sujatha, E.R., Rajamanickam, G.V. & Kumaravel, P. 2012. Landslide susceptibility analysis using Probabilistic Certainty Factor Approach: A case study on Tevankarai stream watershed, India. *Journal of Earth System Science*, 121: 1337-1350.
- Tominaga, L.K. 2007. Avaliação de Metodologias de Análise de Risco a Escorregamentos: Aplicação de um Ensaio em Ubatuba, SP. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, USP, São Paulo, SP, 220.
- van Westen, C.J. 1993. Application of Geographic Information Systems to Landslide Hazard Zonation. PhD Thesis, Technical University Delft, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, the Netherlands, 245 p.
- van Westen, C.J., Castellanos, E. & Kuriakose, S.L. 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102: 112-131.
- Varnes, D.J. & IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements. 1984. *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*. United Nations Educational, UNESCO, Paris, France, 63 p.
- Zêzere, J. L. 1997. Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, 575 p.
- Zêzere, J.L. 2006. Predição probabilística de movimentos de vertente na escala regional. Actes de les Jornades sobre Terrasses i Prevenció de Riscos Naturals, Department de Medi Ambient, Mallorca, Espanha: 17-30.
- Zêzere, J.L., Garcia, R.A.C., Oliveira, S.C. & Reis, E. 2005. Análise sensitiva na avaliação da susceptibilidade a deslizamentos na região a norte de Lisboa. In: APG, Colóquio Ibérico de Geografia, X, Évora, Portugal.

# MAPEAMENTO DE ÁREAS SUJEITAS À INUNDAÇÃO PARA PLANEJAMENTO E GESTÃO TERRITORIAL: CARTAS DE SUSCETIBILIDADE, PERIGO E RISCO

*FLOOD MAPPING AREAS FOR LAND USE PLANNING:  
SUSCEPTIBILITY, HAZARD AND RISK ZONING*

*SOFIA JULIA ALVES MACEDO CAMPOS*  
*Eng., Mestre, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de*  
*São Paulo - IPT, 11-37674432. E-mail: scampos@ipt.br*

*FAUSTO LUIS STEFANI*  
*Geól., Mestre, IPT, 11-37674934. E-mail: fstefani@ipt.br;*

*NIVALDO PAULON*  
*Tecg., IPT, 3767-4765. E-mail: niva@ipt.br*

*LUIZ GUSTAVO FACCINI*  
*Geógr., IPT, 11-37674765. E-mail: lgfaccini@ipt.br*

*OMAR YAZBEK BITAR*  
*Geól., Dr., IPT, 11-37674489. E-mail: omar@ipt.br*

## RESUMO ABSTRACT

Este trabalho aborda conceitos relacionados ao mapeamento e elaboração de cartas de suscetibilidade, perigo e risco ao processo hidrológico de inundação fluvial gradual, apresentando a abrangência e aplicação de cada uma das respectivas cartas no contexto de prevenção de desastres naturais frente à expansão urbana e no auxílio ao planejamento e gestão territorial. A partir de revisão bibliográfica, identificam-se os diferentes enfoques e os principais fatores relacionados à elaboração e ao conteúdo das cartas de suscetibilidade, perigo e risco ao processo de inundação fluvial gradual. Os resultados indicam que, de modo geral, os mapeamentos referentes a esse processo aplicam-se a cartas de suscetibilidade, perigo ou risco e têm correspondência com distintos objetivos e escalas de trabalho envolvidas. Assim, para o mapeamento da inundação fluvial gradual, tem-se que a suscetibilidade está mais associada às condições naturais do terreno que favore-

This paper approaches concepts related to mapping and formulation maps of susceptibility, hazard and risk to gradual river flooding hydrologic process, with the scope and application of each map in the prevention of natural disasters in the urban expansion and aid territorial management contexts. From literature review, it shows the different approaches and the main factors related to the preparation and content of susceptibility, hazard and risk maps to gradual flood. The results indicate that, in general, the maps relating to this process apply to susceptibility, hazard or risk have correspondence with different objectives and work scale involved. Thus, to map gradual river flood, it follows that the susceptibility is associated with natural terrain conditions that favor water level rise in the drainage channel with overflow, reaching floodplains and river terraces. Hazard is associated with the event occurrence probability in a given area

cem a elevação do nível d'água no canal de drenagem com transbordamento, atingindo as planícies aluviais e os terraços fluviais. O perigo se associa à probabilidade de ocorrência do evento em determinada área e tempo. Para risco, incorpora-se o uso e ocupação do solo, ponderando-se a vulnerabilidade associada aos danos nas áreas atingíveis. No âmbito de planejamento e ordenamento territorial, busca-se evitar ou mitigar problemas e potencializar ações necessárias. A gestão se configura como a efetivação das condições e requisitos que o planejamento realizado ajudou a elaborar. Assim, o tipo de carta depende do objetivo, podendo ser planejamento ou gestão, bem como da escala, que pode ser de detalhe, semidetalhe ou regional e, ainda, de suas possíveis aplicações. Apresentam-se e discutem-se os principais métodos para elaboração dessas cartas.

**Palavras-chave:** processo hidrológico; inundação fluvial gradual; carta de suscetibilidade; carta de perigo, carta de risco.

## 1 INTRODUÇÃO

O mapeamento de áreas sujeitas a inundações reveste-se de extrema importância no planejamento territorial, particularmente sob a perspectiva de subsidiar a prevenção de desastres naturais frente à expansão urbana, assim como auxiliar na gestão das áreas ocupadas. Existem áreas naturalmente sujeitas à inundação, compreendendo o leito menor e o leito maior dos rios e que, com determinada periodicidade, são atingidas pelas águas. Entretanto, a impermeabilização gerada pela urbanização altera as condições de escoamento natural nos terrenos, diminuindo o tempo de concentração nas bacias de drenagem, aumentando progressivamente as vazões e os danos ocasionados pelas inundações. Nesse contexto, merece destaque a utilização diferenciada dos termos suscetibilidade, perigo e risco quando da solicitação e/ou elaboração de cartas para planejamento ou gestão territorial, tanto por técnicos quanto por gestores públicos, muitas vezes sem o devido entendimento do alcance de cada um desses instrumentos.

O mapeamento de áreas sujeitas à inundação fluvial gradual envolve uma temática abrangente e sem fórmulas definitivas, podendo-se empregar duas abordagens dependendo da aplicação pretendida. A primeira envolve análises descritivo-

and time. Risk incorporates the use and occupation, considering the vulnerability associated with damage to the achievable areas. As part of territorial planning, we seek to avoid or mitigate problems and extend necessary actions. The management is configured as the fulfillment of the conditions the planning done in the past helped to build. The map type depends on the purpose that may be planning or management, as well as the scale, which can be of detail, intermediate detail or regional, and also of their possible applications. The main methods to the elaboration of these maps are discussed.

**Keywords:** hydrologic process; gradual river flooding; susceptibility map; hazard map, risk map.

quantitativas dos múltiplos aspectos de um determinado ambiente, como o tipo de solo, a conformação do relevo e a influência da cobertura vegetal. A segunda, associada às engenharias, envolve conceitos de hidrologia e hidráulica, com elaboração de modelos chuva-vazão e simulação do comportamento dos escoamentos. Assim, cada carta está diretamente relacionada a seus objetivos, o que também determina a abordagem adotada para sua elaboração.

## 2 OBJETIVOS, MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho objetiva sintetizar os resultados de levantamentos, análises e discussões acerca de conceitos básicos relacionados ao mapeamento de suscetibilidade, perigo e risco ao processo hidrológico de inundação fluvial gradual e apresentar algumas cartas típicas para cada uma das abordagens, considerando a variedade de perspectivas de diferentes campos de conhecimento. Visa também analisar a abrangência e aplicação de cada uma das correspondentes cartas geradas no contexto de prevenção de desastres naturais frente à expansão urbana e no auxílio à gestão territorial.

O trabalho se fundamenta em revisão bibliográfica, na qual se busca identificar os principais fatores relacionados a cada uma dessas cartas para o estudo do processo hidrológico e hidráulico

da inundação fluvial gradual. Utilizam-se, ainda, resultados de experiências práticas na elaboração de cartas de suscetibilidade em municípios, considerando a interação com técnicos das prefeituras, tendo em conta os trabalhos relatados em Bitar (2014). Associam-se, para fins de análise, as tipologias de cartas aos diferentes instrumentos de planejamento e gestão territorial que as demandaram, bem como se verificam as escalas de mapeamento geralmente utilizadas e as possíveis aplicações dos produtos gerados em mapeamentos executados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De uma maneira geral, sobretudo em bacias hidrográficas rurais, parte das águas pluviais é retida pela cobertura vegetal, outra parte infiltra-se no subsolo e o restante tende a escoar sobre a superfície de forma gradual, produzindo um hidrograma com variação lenta de vazão e com picos de enchentes moderados. As enchentes naturais extravasam a calha menor ocupando o leito maior dos rios com certa periodicidade. Conhecidos os processos e suas consequências, é necessário planejar a ocupação do espaço urbano com infraestrutura e condições que possam evitar impactos econômicos e sociais.

É imprescindível considerar que a existência de perigos naturais é uma função do ajustamento humano a eles, posto que sempre envolvam iniciativa e decisão humana, ou seja, em princípio, “enchentes não seriam danosas se o homem evitasse as planícies de inundação” (MONTEIRO, 1991, p. 08).

A ocorrência de uma inundação é o resultado de vários fatores que interferem na formação dos escoamentos e em sua propagação ao longo da bacia hidrográfica de contribuição (PINHEIRO, 2007). Os fatores que se interrelacionam e são responsáveis pela ocorrência de eventos de inundação podem ser divididos em: *transitórios*, associados à ocorrência de chuvas, taxas de evapotranspiração e grau de saturação do solo; *permanentes*, que correspondem às características morfométricas da bacia de drenagem e à geologia; e *mistos*, que estão relacionados ao tipo de uso e ocupação do solo (COOKE e DOORNKAMP, 1990).

Pode-se, então, afirmar que o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações graduais apoia-se

nos fatores permanentes, ou seja, nas condições predisponentes dos terrenos, principalmente nas características geológicas, topográficas e morfológicas das bacias que tendem a favorecer o transbordamento do nível d'água, por ocasião de chuvas intensas. Quando se considera os fatores transitórios, ou seja, associados à ocorrência de chuvas, associa-se a probabilidade de ocorrência, tratando-se de carta de perigo de inundação ou, ainda, carta de aptidão à urbanização. E, considerando os fatores mistos, que se relacionam ao tipo de uso e ocupação do solo, considera-se, além do perigo, a vulnerabilidade e os possíveis danos associados e, assim, trata-se de carta de risco.

Segundo Monteiro e Kobiyama (2013), há uma diferenciação entre mapa de inundação, mapa de perigo de inundação e mapa de risco de inundação. O mapa de inundação consiste na delimitação das áreas inundadas com a altura da lâmina de água. Este está atrelado a um único período de retorno. De acordo com Moel et al. (2009, *apud* Monteiro e Kobiyama, 2013), o mapa de perigo de inundação contém informações sobre a probabilidade e/ou magnitude de um evento, enquanto o mapa de risco contém informações adicionais sobre as consequências (danos econômicos, pessoas afetadas). Assim, mapas de suscetibilidade a inundação são utilizados para a criação do mapa de perigo de inundação que, junto com fatores de vulnerabilidade e de danos prováveis, é utilizado para criar o mapa de risco de inundação.

#### 3.1 Planejamento e gestão urbana

Segundo Cardoso (2014) há que se esclarecer que planejamento e gestão são conceitos complementares. Planejar remete ao futuro, significando tentar prever a evolução de um fenômeno ou, ainda, tentar simular os desdobramentos de um processo, com o objetivo de melhor prevenir-se em relação a prováveis problemas ou, inversamente, com o intuito de maximizar ou potencializar prováveis benefícios. Por sua vez, gestão trata do presente, significando administrar uma situação dentro dos marcos dos recursos disponíveis e tendo em vista as necessidades imediatas. Noutros termos, o planejamento é a preparação para a gestão futura, buscando-se evitar ou mitigar problemas, enquanto a gestão é a efetivação prática e atual

das condições que o planejamento realizado no passado ajudou a construir.

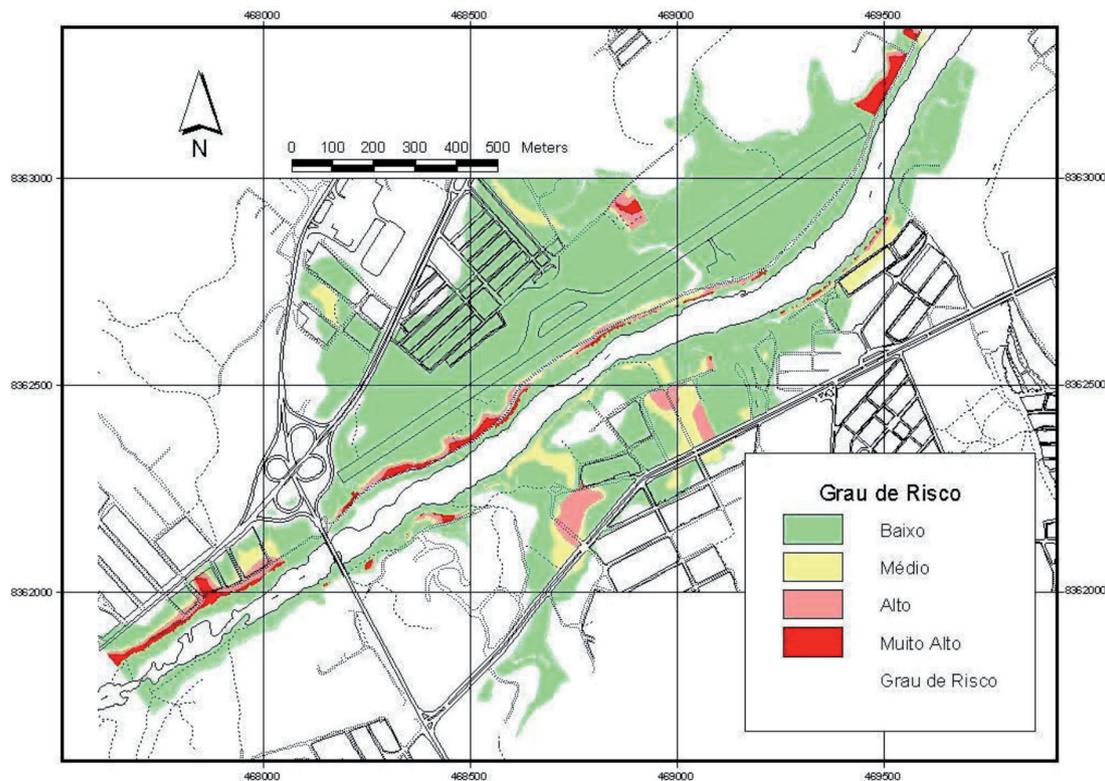
Duarte (2007) conceitua planejamento como um processo cujo resultado, sempre parcial, é o plano. O plano tem partes; o planejamento, etapas. Essas etapas são: diagnóstico; prognóstico; propostas e gestão urbana. Dentre essas partes, a gestão urbana é um conjunto de instrumentos, atividades, tarefas e funções que visam a assegurar o bom funcionamento de uma cidade.

Assim, segundo essas definições, simplificada, o planejamento representaria os cenários de urbanização possíveis de implantar analisando-se como situação inicial a condição natural dos terrenos aos processos de dinâmica superficial, particularmente os hidrológicos e, considerando o planejamento para ocupação urbana, ainda, as probabilidades ou perigo de ocorrência das inundações nos locais a urbanizar. O mapeamento de riscos seria então um dos instrumentos de gestão urbana para assegurar a redução de impactos econômicos e sociais, por meio de zoneamento, quando as áreas já estão ocupadas. O zoneamento propriamente dito é a definição de um conjunto de regras para a ocupação das áreas de risco de inundação, visando à minimização

futura das perdas materiais e humanas em face das grandes cheias.

### 3.2 Escala de trabalho

A escala de trabalho está diretamente relacionada com os objetivos do produto a ser gerado. A medida que o detalhamento aumenta, são necessárias análises e ferramentas diferenciadas. A escala tem grande importância, pois, à medida que se aproxima de uma análise de risco, ou seja, quando há necessidade de avaliar danos em áreas ocupadas, há necessidade de pormenores. Assim, seria inapropriado elaborar mapa de riscos em escalas regionais ou de semidetalhe, sendo necessárias escalas de detalhe, ou seja, escala próxima da de projeto (1:2.000 ou maior). Contudo, na prática, muitas vezes a escala de trabalho pode ser controlada pela escala dos mapas topográficos ou bases disponíveis. Fell et al. (2008) apresentam escalas de mapeamento recomendadas, de acordo com os objetivos, para deslizamentos. Para inundações graduais, pode-se propor uma análise semelhante, conforme discutido em Campos et al. (2015) e apresentado na (Figura 1).



**Figura 1** – Variáveis no mapeamento e zoneamento de inundações fluviais graduais, de acordo com os tipos de zoneamento. (Fonte: Campos et al., 2015)

### 3.3 Aplicação das cartas

As cartas de suscetibilidade e perigo podem auxiliar no planejamento da expansão urbana uma vez que possibilitam antever, no primeiro caso, terrenos naturalmente suscetíveis à inundação, por se localizarem em cotas baixas e próximas aos canais ou pontos de acúmulo de água e, no segundo caso, manchas de inundação associadas a um período de retorno (probabilidade de ocorrência), associando-se também as condições hidrodinâmicas de escoamento nos canais. As modelagens hidrológicas e hidráulicas utilizadas nas cartas de perigo, com elaboração de modelos chuva-vazão e simulação do comportamento dos escoamentos, por meio de análise unidimensional ou bidimensional no canal e planície de inundação, propiciam, após calibração, análises de cenário de ocupação na bacia, assim como a previsão de impacto de instalação de obras de macrodrenagem, considerando-se a probabilidade de ocorrência do evento.

As cartas de risco são instrumentos para gestão urbana. Segundo Andjelkovic (2001), pode-se iniciar a construção de estruturas que previnam os danos, alertar atuais e futuros proprietários de terras sujeitas às inundações, bem como auxiliar as autoridades e tomadores de decisões a desenvolver novas ideias de desenvolvimento sustentável para estas áreas. Shidawara (1999) argumenta que os mapas de risco possuem um grande papel no sistema de prevenção de inundação, pois em municípios pequenos e com poucos recursos econômicos torna-se muito difícil a implantação de

sistemas mais sofisticados, como monitoramento e sistemas de alerta.

### 3.4 Cartas de suscetibilidade, perigo e risco à inundação

A partir dos conceitos discutidos, apresenta-se o conteúdo e principais métodos adotados para a elaboração das cartas de suscetibilidade, perigo e risco à inundação.

#### 3.4.1 Carta de suscetibilidade

Segundo Bitar (2014), a suscetibilidade ou a propensão ao desenvolvimento de um processo em uma dada área, quanto à inundação fluvial gradual, pode ser mapeada de acordo com as seguintes atividades: abordagem quantitativa baseada em índices morfométricos; definição da área de estudo para aplicação dos índices morfométricos segundo a bacia hidrográfica do rio principal em que o município se insere; hierarquização relativizada na bacia hidrográfica quanto à suscetibilidade a inundações de cada uma das sub-bacias contribuintes (ETAPA 1); espacialização da inundação a partir de altura de lâmina d'água em relação à drenagem mais próxima (ETAPA 2), e integração e recorte na área que abrange o conjunto do território formado por planícies e terraços fluviais e/ou marinhos (ETAPA 3). Os procedimentos de análise e classificação consistem de três etapas básicas, conforme apresentado na Figura 2.

Variáveis	Tipo de zoneamento		
	Suscetibilidade	Perigo	Risco
Dados básicos	Fatores permanentes; condições predisponentes dos terrenos	Fatores transitórios, associados à ocorrência de chuvas; considera a probabilidade de ocorrência do evento num determinado período de tempo	Fatores transitórios, associados à ocorrência de chuvas; considera a probabilidade de ocorrência do evento num determinado período de tempo e o uso e ocupação da área
Informações esperadas	Delimitação das áreas inundadas com a altura da lâmina de água	Delimitação das áreas inundadas associadas à probabilidade e/ou magnitude de um evento	Delimitação das áreas inundadas associadas à probabilidade de ocorrência e informações adicionais sobre as consequências (danos econômicos, número de pessoas afetadas)
Aplicações	Planejamento da expansão urbana; subsidiar tomadores de decisões e público em geral	Planejamento com vistas a parcelamento de solo; zoneamento para projeto de construção de estruturas de engenharia de grande porte	Gestão urbana
Escala	1:25.000 até 1:250.000 (regional)	1:5.000 até 1:25.000 (semidetalhe)	1:5.000 até 1:1.000 ou maior (detalhe)

**Figura 2** – Fluxograma das três etapas básicas executadas para fins de análise, classificação e zoneamento da suscetibilidade a inundações. (Fonte: Bitar, 2014)

A análise morfométrica de bacias hidrográficas (ETAPA 1) pode ser definida como a “análise quantitativa das interações entre a fisiografia e a sua dinâmica hidrológica” que propicia um conhecimento da dinâmica fluvial, bem como das relações existentes entre essa dinâmica e os diversos componentes do meio físico e biótico de uma bacia. Analisam-se parâmetros dos terrenos que evidenciam ou favorecem a ocorrência das inundações graduais. O procedimento é executado de forma relativa, hierarquizando, em vista das bacias analisadas, aquelas que possuem maior ou menor grau de suscetibilidade. A Figura 3 apresenta os parâmetros e índices selecionados e extraídos para cada uma das sub-bacias que compõem a bacia hidrográfica em que o território municipal em análise se insere. Os valores correspondentes aos parâmetros são normalizados para fins de comparação de grandeza e elaboração de um índice geral que propicie avaliar a influência de cada sub-bacia na ocorrência de inundações tal que se estabeleça a ordem de grandeza de cada parâmetro ou índice em uma

escala variável entre 1 (menor suscetibilidade) e 5 (maior suscetibilidade).

Para a espacialização da inundação nas planícies e terraços (ETAPA 2), utiliza-se o modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage), desenvolvido por Rennó et al. (2008), que mede a diferença altimétrica entre qualquer ponto da grade do MDE e o respectivo ponto de escoamento na drenagem mais próxima, considerando a trajetória superficial de fluxo (flowpath) que liga topologicamente os pontos da superfície com a rede de drenagem. O resultado é uma grade que representa a normalização do modelo digital de elevação (MDE) em relação à drenagem e indica a área onde uma cheia pode se desenvolver, em caso de haver água em excesso fluindo na superfície (PIRES e BORMA, 2013). Esse modelo apresenta locais mais suscetíveis à inundação por estarem em posições altimétricas mais próximas a uma provável linha de fluxo. O modelo, entretanto, não considera as condições hidrodinâmicas do escoamento que também podem gerar inundações.

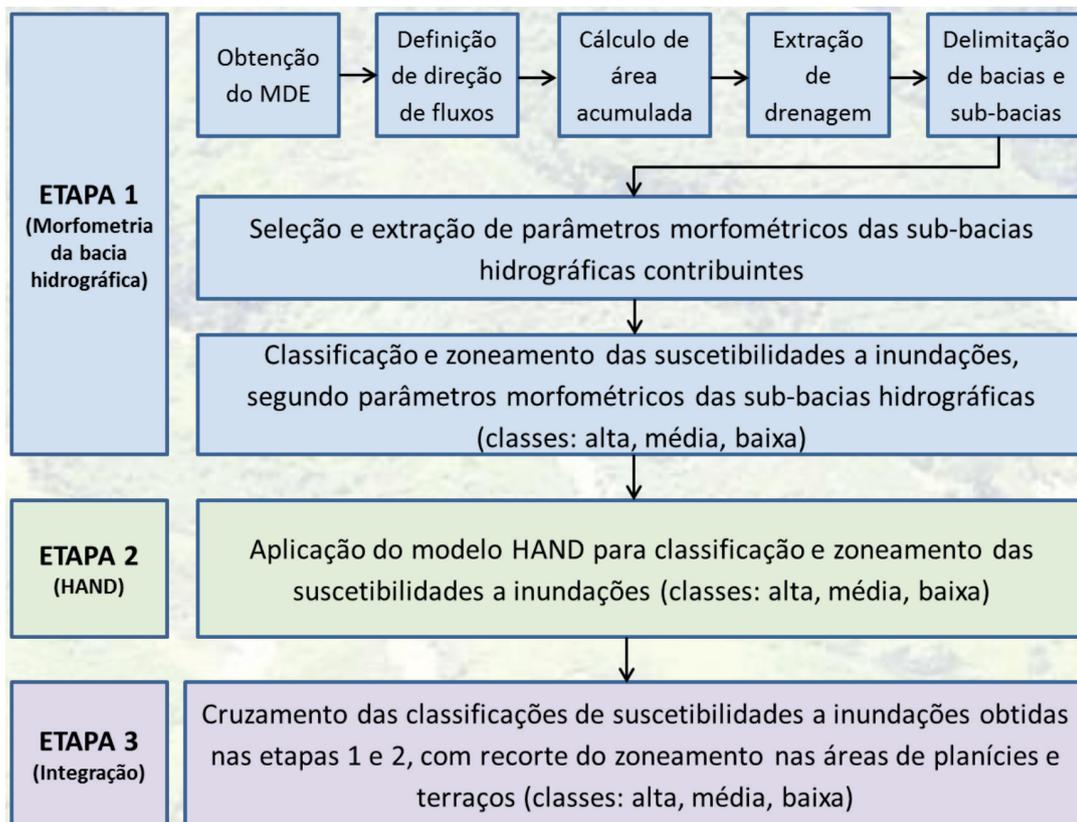


Figura 3 - Parâmetros e índices morfométricos selecionados, contendo referência, modo de cálculo e influência possível acerca da suscetibilidade a inundações. (Fonte: Bitar, 2014)

Após a geração do modelo HAND, procede-se ao fatiamento, ou seja, à escolha das elevações (ou alturas) acima do nível médio da drenagem para as quais serão atribuídos os patamares ou classes de suscetibilidade. Com base nas condições geomorfológicas e pedológicas dos terrenos

atribuem-se as seguintes classes: **Alta** a partir do nível normal da drenagem até o início do baixo terraço (englobando a planície aluvial atual); **Média** do início do baixo terraço até o início do alto terraço; e **Baixa** a partir do início do alto terraço, conforme Figura 4.

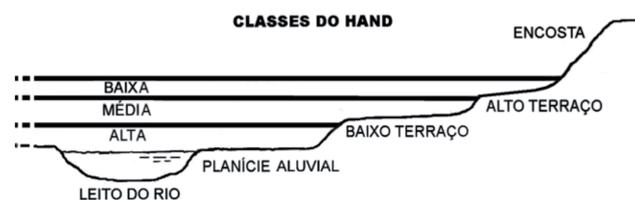
Parâmetro/índice	Cálculo	Influência
Área de contribuição (Ac)	Extração automática em SIG	Associa-se ao volume de água que atinge o rio principal. Quanto maior Ac, maior tende a ser a suscetibilidade
Relação de relevo (Rr) (SCHUMM, 1956)	Relação entre amplitude ( $\Delta a$ ) e comprimento do rio principal da sub-bacia (L); $Rr = \Delta a/L$	Indica velocidade de escoamento. Quanto maior Rr, mais rápido tende a ser o fluxo, reduzindo o acúmulo de água na sub-bacia
Densidade de drenagem (Dd) (HORTON, 1945)	Relação entre comprimento da drenagem (C) c/ área da sub-bacia (A); $Dd = C/A$	Quanto maior Dd, menor é infiltração de água no solo e maior tende a ser a velocidade com que a água atinge o rio
Índice de circularidade (Ic) (MÜLLER, 1953)	Relação entre a área da sub-bacia (A) e a de um círculo de mesmo perímetro (Ac); $Ic = A/Ac$	Quanto maior é o Ic, maior tende a ser a retenção de água na sub-bacia, reduzindo a velocidade de chegada da água no rio
Índice de sinuosidade (Is) (SCHUMM, 1963)	Relação entre o comprimento do canal principal (L) com a distância vetorial entre os extremos do canal (dv); $Is = L/dv$	Quanto maior o Is, menor tende a ser a velocidade do escoamento e chegada da água no rio

**Figura 4** – Classes de fatiamento adotadas no âmbito da aplicação do modelo HAND em planícies e terraços a partir das condições geomorfológicas e pedológicas. (Fonte: Bitar, 2014)

Esses valores, inicialmente atribuídos por meio de análise de seções transversais típicas ao longo das drenagens principais, são avaliados e validados com os trabalhos de campo, incluindo-se a verificação mediante levantamento de perfis topográficos e de dados a respeito de marcas e registros de inundações anteriores, quando disponíveis nos municípios mapeados e, ainda, informações de relatos de moradores locais nas áreas afetadas. Também podem ser elaboradas sondagens a trado para verificar os tipos de solo característicos.

A integração dos resultados obtidos nas Etapas 1 e 2, compreende o cruzamento entre o grau de suscetibilidade calculado por sub-bacia hidrográfica (ETAPA 1) e os resultados do HAND (ETAPA 2). A operação é realizada por meio da lógica booleana, comumente utilizada para a identificação de relações entre distintos tipos de dados geográficos (identificadas por meio de sobreposição de temas ou de mapas temáticos), de acordo com a matriz de correlação indicada na Figura 5, efetuando-se, nos cruzamentos (ETAPA 3), adaptação em favor de um maior equilíbrio

entre as classes resultantes. A Figura 6 apresenta a Carta de Suscetibilidade do município de Ilhota em Santa Catarina.



**Figura 5** – Matriz de correlação entre as duas classificações de suscetibilidade obtidas, segundo os índices morfométricos e o modelo HAND.

Índices Morfométricos \ Modelo HAND	Modelo HAND		
	Alta	Média	Baixa
Alta	Alta	Alta	Média
Média	Alta	Média	Baixa
Baixa	Média	Baixa	Baixa

**Figura 6** – Carta de Suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação para o município de Ilhota - SC. (Fonte: Bitar, 2014).

### 3.4.2 Cartas de Perigo e Risco

Segundo Tucci (2005), os mapas de inundação de cidades são de dois tipos: mapas de planejamento e mapas de alerta. Os mapas de planejamento definem as áreas que podem ser atingidas por cheias de tempo de retorno escolhidos. Enquanto que os mapas de alerta são preparados com valores de cotas em cada esquina da área de risco permitindo o acompanhamento da enchente por parte dos moradores, com base nas observações do nível de água em relação às réguas pré-instaladas. Uniformizando os conceitos discutidos, os mapas de suscetibilidade e perigo seriam os de planejamento e os mapas de risco, os de alerta, ou seja, de gestão.

Conforme destacado por Monteiro e Kobiyama (2013), o mapa de inundação pode ser criado de duas maneiras diferentes, por meio da confecção de uma mancha de inundação a partir de dados observados da inundação ou por meio da modelagem hidrodinâmica. O primeiro método fornece um mapa com mais exatidão, porém é de difícil criação, pois os dados precisam ser adquiridos em pleno evento de inundação. Como ponto negativo tem-se a inflexibilidade em criar mapas com períodos de retorno pré-estabelecidos. No segundo método, referente à modelagem hidrodinâmica, utilizam-se modelos físicos ou matemáticos para a criação dos mapas de inundação, sendo necessário, para a calibração e validação do modelo hidrodinâmico, a utilização de cotas do evento de inundação. Neste segundo, o mapa de inundação sempre está relacionado a um período de retorno que é utilizado diretamente na confecção do mapa de perigo. A qualidade do mapa depende da qualidade dos procedimentos que o antecedem, e é muito sensível ao modelo digital de terreno (MONTEIRO; KOBİYAMA, 2013).

Objetivando ações para planejamento, principalmente frente à expansão urbana, faz-se necessário prever as possíveis áreas atingidas para várias chuvas ou períodos de retorno, sendo mais recomendado utilizar a abordagem da modelagem hidrodinâmica.

Para delimitar as áreas atingidas em cada período de retorno (TR), a modelagem matemática é realizada por meio de simulações hidrológicas e hidrodinâmicas, em escala de maior detalhe.

Segundo Monteiro e Kobiyama (2013), a bacia de estudo deve ser dividida em: sub-bacias de contribuição (BCs) e área inundável (AI). As simulações hidrológicas são realizadas para as BCs e as hidrodinâmicas para a AI. As BCs são diferenciadas da AI pelo elevado potencial de inundação que a segunda possui. Isto ocorre por causa da grande declividade média dos rios principais das BCs e por estas serem bacias de cabeceira. Como auxílio para esta diferenciação, deve-se realizar visitas de campo e obter informações em entrevistas com moradores. As áreas que constituírem o mapa de inundação não podem ser consideradas como BCs. Os mapas de perigo são confeccionados apenas para a AI, visto que não há necessidade deste estudo nas BCs.

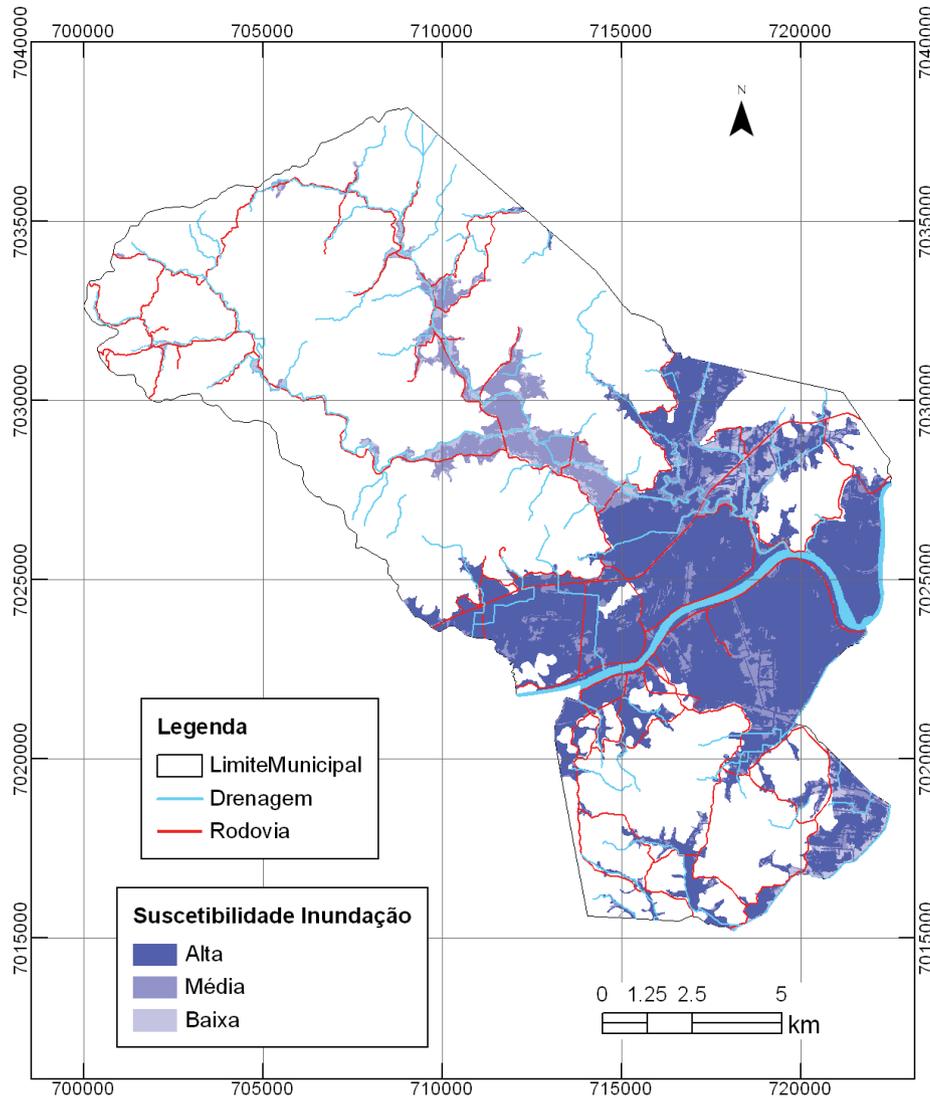
Cabe destacar que algumas vezes as BCs podem estar associadas ao processo de enxurrada ou inundação rápida (flash flood). Independente do modelo matemático a ser utilizado, este deve ser sempre calibrado e validado para o local e condições do problema.

O conceito de perigo relaciona-se com a probabilidade de ocorrência do processo ou evento num dado período de tempo na AI. Assim, relaciona-se com os fatores transitórios, ou seja, a chuva e a sua distribuição temporal na bacia, passíveis de análise estatística.

Monteiro e Kobiyama (2013) propõem quantificar o perigo pois existem diferentes níveis de perigo que podem causar diferentes tipos de dano. O mapa de perigo é apresentado em função da frequência de inundação (período de retorno) e intensidade (índice de perigo), conforme "Equação (1)". O índice de perigo (IP) proposto por Stephenson (2002) corresponde ao produto da profundidade ou altura de inundação em metros (h) e da velocidade do escoamento em m/s (v) tal que:

$$IP = h.v \quad (1)$$

Assim, este índice apresenta-se diretamente relacionado à energia do escoamento, ou seja, ao seu potencial destrutivo, tendo sido criado para indicar locais mais adequados para o desenvolvimento urbano.



**Figura 7** – Níveis de Perigo Discretizado representando Intensidade (IP) x Probabilidade (TR) (Fonte: Prevene, 2001 *apud* Monteiro e Kobiyama 2013).

Para adequar o método à realidade brasileira, onde precipitações com alta intensidade ocorrem com uma frequência elevada, adotam-se os períodos de retorno de 5, 20 e 100 anos. Monteiro e Kobiyama (2013) identificaram que os níveis de perigo são da seguinte maneira: 3 para Perigo Alto (vermelho); 2 para Perigo Médio (laranja); 1 para Perigo Pequeno (amarelo) e 0 para Perigo Inexistente (sem cor). Foram observadas as participações das BCs na área do mapeamento de perigo, quanto à alteração da área e volume inundados. Segundo esses autores, as sub-bacias que possuem vazão de pico menor do que  $2\text{m}^3/\text{s}$  para o período de retorno de 5 anos e menor do que  $5\text{m}^3/\text{s}$  para o período de retorno de 100 anos são consideradas

de baixa importância, uma vez que despreza-se o efeito da sinergia das vazões de contribuição.

Os autores também destacam que para a localização de vias de transporte não se deve adotar nenhum perigo como aceitável, pois em casos de desastres naturais estas devem estar sempre acessíveis para a evacuação de pessoas. As obras de importância pública, como hospitais e escolas, devem ser localizadas em áreas onde existe, no máximo, o perigo baixo. Obras, como parques para lazer, que são utilizadas apenas quando não existe ocorrência da precipitação, podem ser construídas aceitando o perigo alto, desde que após um evento de inundação estes locais sejam reconstituídos. As demais obras devem ser realizadas aceitando o

perigo médio, mas sempre tentando reduzir este ao máximo. A Figura 8 apresenta o mapa de perigo confeccionado por Monteiro e Kobayama (2013) para uma sub-bacia no braço do rio Baú, no município de Ilhota.

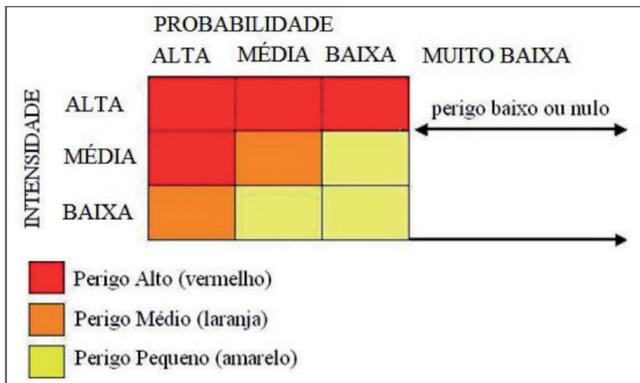


Figura 8 - Ilustração do Mapa de Perigo de Inundação uma bacia de drenagem em Ilhota - SC (Fonte: Monteiro e Kobayama, 2013)

Segundo Westen et al. (2006), uma das melhores definições conceitua o risco decorrente do número previsto de vidas perdidas, de pessoas feridas e desestabilização de atividades econômicas, devido a um fenômeno particular corrente em uma área em um dado período. O risco implica a proximidade de um dano ou adversidade o que pode afetar a vida dos homens. Não existe risco sem que uma população ou indivíduo que o perceba e que poderia sofrer com seus efeitos (VEYRET, 2007). Para Westen et al. (2006) a definição genérica de risco pode ser esquematicamente representado pela seguinte fórmula “Equação(2)”:

$$\text{Risco} = \Sigma (H \Sigma (V * A)) \quad (2)$$

Onde:

**H** é representado pelo perigo expresso em função da probabilidade da ocorrência dentro de um período de frequência;

**V** representa a vulnerabilidade física dos elementos que estão expostos ao risco, sendo atribuído um valor (0 a 1) para cada elemento; e **A** significa os danos causados aos elementos que estão em risco.

Aplicando-se a definição do risco aos principais atributos identificados em áreas ocupadas,

conforme apresentado por Hora e Gomes (2009), quanto à inundação, tem-se a “Equação (3)”:

$$\text{Risco à inundação} = S (TR) * \{ (\text{Vulnerabilidade da Tipologia}) * [ ((\text{Altura de Inundação} * P1) + (\text{Densidade Populacional} * P2) + (\text{Densidade de Habitações} * P3)) / S P ] \} \quad (3)$$

Onde:

(TR) é tempo de retorno (anos) das inundações representado pelas probabilidades:

TR2 = 0,5; TR5 = 0,2; TR10 = 0,1; TR20 = 0,05; TR50 = 0,02 e TR100 = 0,01;

(Vulnerabilidade da Tipologia) é vulnerabilidade das tipologias habitacionais, onde para cada tipo de tipologia foi atribuído um valor de vulnerabilidade;

(Altura da Inundação) correlaciona-se aos danos associados à altura da lâmina d’água;

(Densidade Populacional) são os valores de densidade populacional obtidos das análises; e

(Densidade habitacional) são os valores de densidade habitacional obtidos das análises.

Os valores P1, P2 e P3 são pesos atribuídos aos valores de Altura de Inundação, Densidade Populacional e Densidade Habitacional, respectivamente, 2, 5 e 3.

O método para determinação do risco à inundação proposto por Hora e Gomes (2009) é apresentado no diagrama da Figura 9.

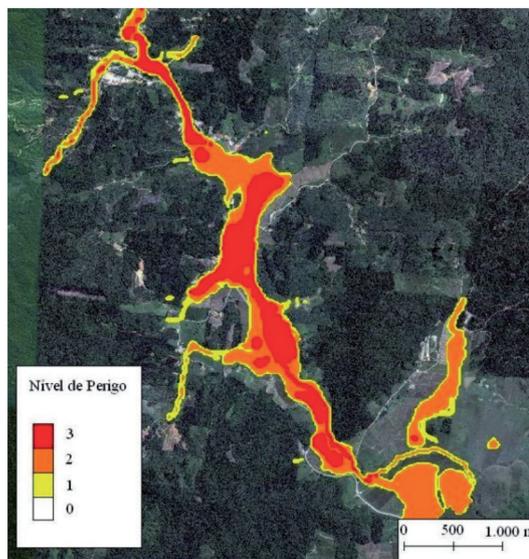


Figura 9 - Diagrama para elaboração do grau de risco à inundação (Fonte: Hora e Gomes, 2009)

Hora e Gomes (2009) apresentam um estudo de caso da cidade de Itabuna-BA, em área que abrange um polígono de 1,72km<sup>2</sup>, localizado na porção sudoeste, que engloba trecho do rio Cachoeira de aproximadamente 2000m de extensão. Dentro desta área localizam-se aglomerados subnormais, ocupações estas reconhecidamente suscetíveis aos fenômenos de inundação do rio (Figura 10).

Conforme o método proposto, quanto ao uso e ocupação elabora-se o levantamento de

distribuição das tipologias de uso e ocupação do solo na área de estudo, ou seja, em escala de detalhe (1:2000 ou maior), conforme Figura 11.

Para a definição das cotas de inundação na área em estudo, associadas aos diferentes tempos de recorrências de cheias, Hora e Gomes (2009) utilizaram os dados de duas seções transversais ao rio, adotando as cotas que representam a média dos valores correspondentes a estas duas seções.

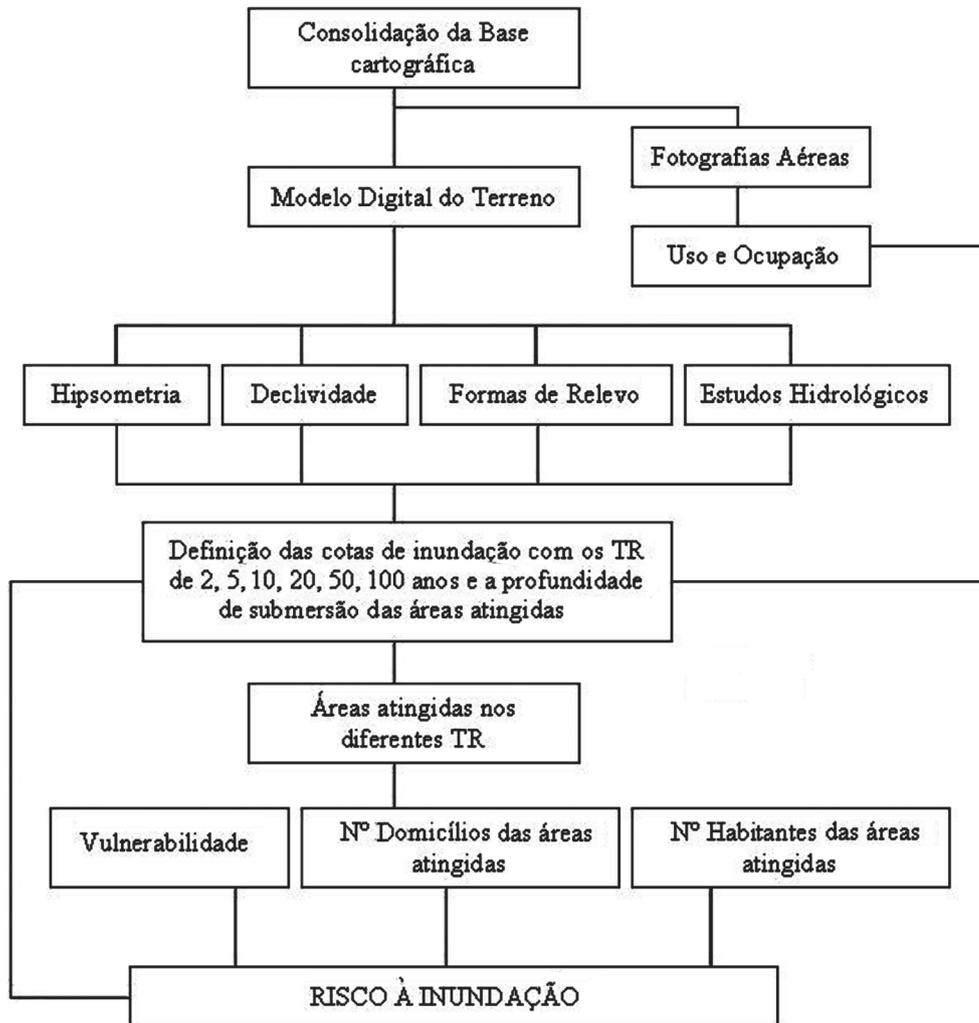


Figura 10 - Localização da área de estudo e ocupação em Itabuna, BA (Fonte: Hora e Gomes, 2009)



**Figura 11** - Distribuição dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo na área de estudo (Fonte: Hora e Gomes, 2009)

Por meio do conhecimento das cotas de inundação nos diferentes tempos de recorrência e da conformação do relevo obtido do modelo digital do terreno (MDT) da área em estudo, obtém-se a distribuição das profundidades de inundação, ou seja, os dados são obtidos por meio da diminuição dos valores das cotas pelos valores da hipsometria.

A estimativa do número de residências e habitantes das áreas atingidas pelas inundações é gerada a partir da observação dos valores dos dados referentes aos setores censitários do IBGE. Dessa maneira, a partir da análise de cada setor,

chega-se a uma média que retrata a sua densidade habitacional e populacional. Com relação à densidade habitacional na área estudada pelos autores citados, os valores variam de 300 a 3.000 domicílios/km<sup>2</sup>, já para a densidade populacional, os dados variam de 6.300 a 12.000 habitantes/km<sup>2</sup>. Por meio dos valores de densidade calculados para a área de estudo, estima-se a quantidade de domicílios e pessoas que são atingidas pelas cheias do rio Cachoeira para cada tipo de uso e ocupação e em cada tempo de recorrência das inundações (Tabela 1).

**Tabela 1** - Quantidade estimada de domicílios e habitantes atingidos pelas cheias (Hora e Gomes, 2013)

Uso e ocupação	Tempo de recorrência (anos)											
	2		5		10		20		50		100	
	Nº (D)	Nº (H)	Nº (D)	Nº (H)	Nº (D)	Nº (H)	Nº (D)	Nº (H)	Nº (D)	Nº (H)	Nº (D)	Nº (H)
Área consolidada	6	24	58	230	174	700	258	1.033	515	2.059	793	3.172
Área subnormal	27	84	63	198	90	285	105	629	126	397	145	459
Área com. em estágio inicial	3	14	8	31	10	40	12	48	16	62	18	73
Área sub. em expansão	2	7	9	28	12	37	14	45	26	82	32	102
População relocada	13	46	16	58	17	63	19	67	20	73	21	76
<b>TOTAL</b>	<b>51</b>	<b>175</b>	<b>154</b>	<b>545</b>	<b>303</b>	<b>1.125</b>	<b>408</b>	<b>1.822</b>	<b>703</b>	<b>2.673</b>	<b>1.009</b>	<b>3.882</b>

Obs: (D) = número de domicílios e (H) = número de habitantes.

O resultado do emprego da Equação (3) na área em estudo é a geração do Mapa de Risco à Inundação (Figura 12).

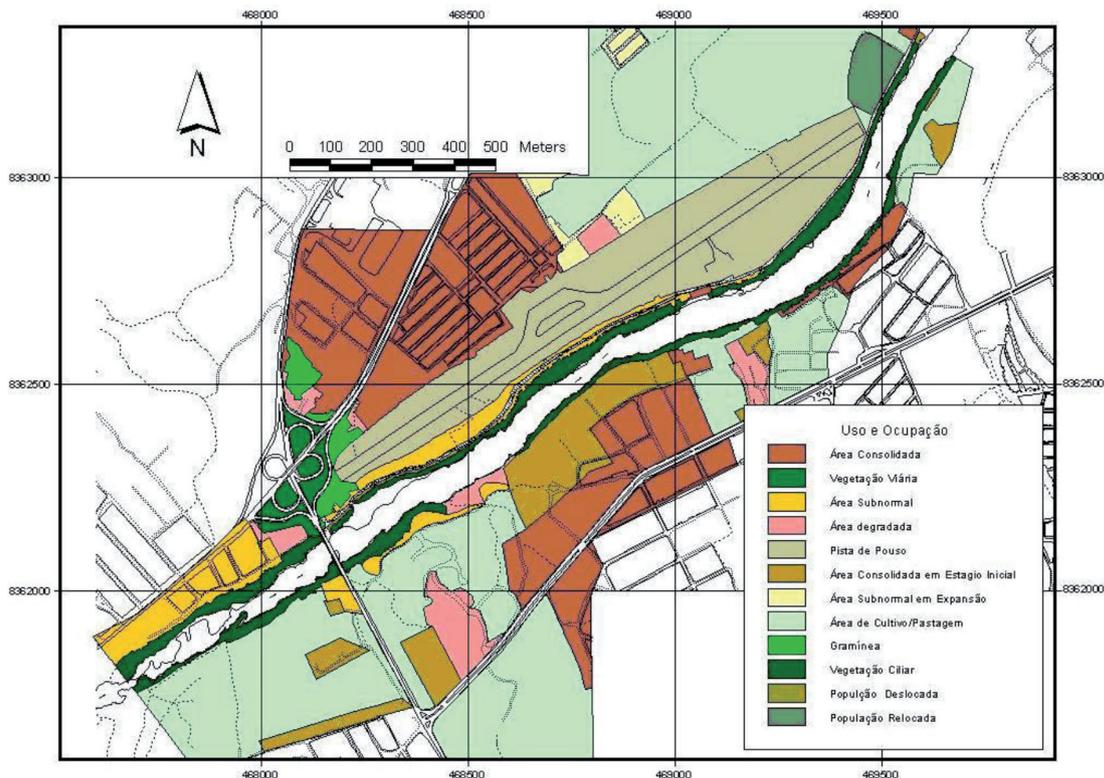


Figura 12 – Mapa de Risco a Inundação do trecho do rio Cachoeira estudado em Itabuna, BA (Fonte: Hora e Gomes, 2009).

Por fim, cada uma das áreas delimitadas terá o seu grau de risco classificado em Muito alto, Alto, Médio ou Baixo em função da adaptação

definida na metodologia sugerida pelo Ministério das Cidades (Tabela 2).

Tabela 2 – Critérios para determinação dos graus de risco (Fonte: Ministério das Cidades, 2007)

Grau de Probabilidade	
<b>Risco Muito Alto</b>	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com alto potencial de causar danos, principalmente sociais, alta frequência de ocorrência (pelo menos 3 eventos significativos em 5 anos) e envolvendo moradias de alta vulnerabilidade.
<b>Risco Alto</b>	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com alto potencial de causar danos, média frequência de ocorrência (registro de 1 ocorrência significativa nos últimos 5 anos) e envolvendo moradias de alta vulnerabilidade.
<b>Risco Médio</b>	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com médio potencial de causar danos, média frequência de ocorrência (registro de 1 ocorrência significativa nos últimos 5 anos).
<b>Risco Baixo</b>	Drenagem ou compartimentos de drenagem sujeitos a processos com baixo potencial de causar danos e baixa frequência de ocorrência (não registro de ocorrências significativas nos últimos 5 anos).

Fonte: (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2005).

## 4 CONCLUSÕES

O mapeamento de áreas sujeitas a inundações tem relevância no planejamento territorial, particularmente sob a perspectiva de subsidiar a prevenção de desastres naturais frente à expansão urbana e no apoio à gestão territorial. O tipo de carta depende do objetivo (planejamento ou gestão), escala (detalhe, semidetalhe ou regional) e aplicação, assim como da disponibilidade de bases para geração de modelos e informações para validação.

Cartas de suscetibilidade e perigo podem auxiliar no planejamento da expansão urbana, uma vez que possibilitam antever terrenos naturalmente suscetíveis à inundação, por se localizarem em cotas baixas, próximas aos canais de drenagem ou permitem que se associem manchas de inundação a uma probabilidade de ocorrência. As modelagens hidrológicas e hidráulicas utilizadas nos mapas de perigo permitem, após validação, que se realizem análises de cenário para a ocupação na bacia. No caso de bacias de drenagem já ocupadas, a mesma abordagem de perigo deve ser reprocessada com maior detalhe, avaliando-se também a vulnerabilidade. Cartas de risco são instrumentos para gestão urbana que servem para orientar a construção de estruturas que previnam os danos, alertar atuais e futuros proprietários de terras sujeitas às inundações e auxiliar as autoridades e tomadores de decisões a desenvolver novas ideias para o desenvolvimento sustentável nessas áreas.

## REFERÊNCIAS

- ANDJELKOVIC, I. **Guidelines on non-structural measures in urban flood management**. IHP, Technical Documents in Hydrology n. 50, UNESCO, Paris. 2001. 87p.
- BITAR, O. Y. (Coord.). **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000** (livro eletrônico): nota técnica explicativa /coordenação Omar Yazbek Bitar. -- São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM -, Serviço Geológico do Brasil, 2014. - (Publicação IPT; 3016) 5 Mb ; PDF.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES / INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios / Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, organizadores - Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 2007.
- CAMPOS, S. J. A. M.; STEFANI, F. L.; PAULON, N. FACCINI, L. G.; BITAR, O. Y. Mapeamento de áreas sujeitas à inundação para planejamento e gestão urbana: cartas de suscetibilidade, perigo e risco. In: 9º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 2015, Cuiabá, MT. **Anais...** Artigo, 51. CD-ROM.
- CARDOSO, L. **Breves Notas sobre o planejamento Físico-Territorial**. Disponível em: <http://www.etg.ufmg.br/tim1/planejamento-urbano-bonsucesso.pdf>. Acesso em: 18 de Novembro de 2014.
- COOKE, R. U.; DOORNKAMP, J. C. **Geomorphology in environmental management**. Oxford: Clarendon Press, 1990. 410 p.
- DUARTE, Fábio. **Planejamento urbano**. Ipbex, Curitiba, 2007
- FELL, R. *et al.* Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v. 102, p. 83-111, 2008.
- HORA, S. B.; GOMES, R. L. Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do Município de Itabuna/BA. *Sociedade & Natureza*, Uberlandia, v. 21, nº 2, Ago. 2009.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.
- MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de

- inundação. **REGA - Revista de Gestão de Água da América Latina**, São Paulo, v. 10, n.2, 2013.
- MONTEIRO, C. A. F. **Clima e excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1991. 241p.
- MÜLLER, V. C. **A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee**. New York: Department of Geology, Columbia University, 1953. 51 p.
- PINHEIRO, A. Enchente e inundação. In: SANTOS, R. F. (Org.). **Vulnerabilidade ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 192p.
- PIRES, E. G.; BORMA, L. S. Utilização do modelo HAND para o mapeamento de bacias hidrográficas em ambiente de Cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p. 5568-5575.
- RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 34693481, 2008.
- SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, n. 67, p. 597-646, 1956.
- SCHUMM, S. A. Sinuosity of alluvial rivers on the great plains. **Geological Society of America Bulletin**, v. 74, n. 9, p. 10891100, 1963.
- SHIDAWARA. M. Flood hazard map distribution. **Urban Water**, v.1, p.125-129, 1999.
- STEPHENSON, D. Integrated flood plain management strategy for the Vaal. **Urban Water**, 4, pp. 425-430, 2002.
- TUCCI, C. E. M. Gestão das inundações urbanas. Global Water Partnership. Edição em arquivo digital. Brasília, 2005.
- VEYRET, Y. Os Riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente. São Paulo: Contexto, 2007.
- WESTEN, C.J.; VAN ASCH, T.W.J.; SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult?, **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2006, p. 167 - 184.



# MAPEAMENTO GEOLÓGICO DA ÁREA URBANA DE CAXIAS DO SUL COMO ETAPA DA CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

GEOLOGICAL MAPPING OF CAXIAS DO SUL URBAN AREA AS AN STEP OF GEOTECHNICAL MAP

SAULO BORSATTO

*Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: sauloborsatto@yahoo.com.br*

NORBERTO DANI

*Departamento de Geodésia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: norberto.dani@ufrgs*

LUIZ A. BRESSANI

*Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: bressani@ufrgs.br*

NELSON A. LISBOA

*Departamento de Geodésia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: nelamorettilisboa@gmail.com*

## RESUMO ABSTRACT

Caxias do Sul apresenta alguns problemas com escorregamentos de terra e problemas de uso e ocupação do solo, decorrentes da dinâmica social, da geomorfologia e também devido às características dos materiais que compõem o subsolo urbano. No município, afloram rochas vulcânicas ácidas pertencentes à Formação Serra Geral, bem como depósitos recentes de talus e colúvios. O objetivo geral desse estudo foi coletar novos dados de campo e de escritório, reinterpretar dados de geologia e geomorfologia para melhor compreender as propriedades e características do subsolo urbano. Todos os dados adquiridos ao longo do desenvolvimento desse trabalho foram organizados em um SIG. Foram feitas (a) análise e interpretação de fotografias aéreas (fotointerpretação geomorfológica e geológica); (b) realização de inspeções campo para um mapeamento geológico; (c) descrição de lâminas petrográficas e análise química das rochas coletadas em campo. Foi mapeada uma unidade geológica neste trabalho, quimicamente

Caxias do Sul has some landslides and land use and occupation problems due to social demands, geomorphology and characteristics of subsoil materials. Volcanic acid rocks from Serra Geral Formation are visible in the region as well as recent deposits of talus and colluviums. The overall objective of this paper is to present the collected data from field and desk work, reinterpretation of existent geology and geomorphology data for a better understanding of the properties and characteristics of the urban subsoil. All data acquired during the development of this work were organized in a GIS. The following steps were taken (a) analysis and interpretation of aerial photographs (geomorphological and geological photo-interpretation); (b) field inspections for a geological mapping; (c) petrographic description and chemical analysis rock samples collected in the field. One geological unit was mapped in this work, chemically classified as Dacite, but presenting marked macro

classificada como Dacito, mas que apresenta características macro e microscópicas tão particulares que permitiu a sua divisão em cinco subtipos: Dacito Forqueta, que apresenta uma estrutura de fluxo bem marcada; Dacito Caxias, que apresenta estratos tabulares sub-horizontais na sua porção basal; Dacito Canyon, com uma estrutura de fluxo subvertical; Dacito Ana Rech, que se caracteriza pela sua marcada estratificação horizontalizada em toda a sua área de ocorrência e Dacito Galópolis, compreendendo dois derrames que ocorrem de forma bem característica sendo um intervalo basal vulcânico e um vidro vulcânico superior, que foram unificados em uma só unidade devido à declividade do local.

**Palavras-chave:** Caxias do Sul. Geologia. Mapeamento geológico.

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado das cidades, ocorrido nas últimas décadas em virtude da busca por melhores condições de vida, tem levado as diferentes populações a migrarem para as áreas urbanas que apresentam melhores perspectivas de crescimento econômico. Estudos geológicos e geotécnicos constituem ótimos instrumentos de análise do meio físico e, para Pejon & Rodrigues (1987), a apresentação de seus resultados sob a forma cartográfica é a melhor maneira de representação das informações adquiridas, pois facilitam os seus entendimentos e usos. Caxias do Sul não teve um planejamento urbano adequado à sua grande expansão demográfica e, principalmente, a população de baixa renda passou a ocupar áreas sujeitas a processos de dinâmica superficial desencadeadores de risco, como as margens e planícies de inundação das drenagens e as encostas de morros. Segundo Nunes (2004), o fato de a cidade estar situada na borda de uma região de topografia acentuada, e substrato geológico em parte desfavorável ao assentamento urbano, gerou situações tais como pequenos deslizamentos de moradias, além de problemas como rupturas em vias urbanas e em obras de engenharia de médio e grande porte.

### 1.1 Área de estudo

O município de Caxias do Sul localiza-se na região denominada Encosta Superior do Nordeste.

and microscopic characteristics which allowed its subdivision into five subtypes: Forqueta Dacite, which has a marked flow structure as evidenced by different color bands; Caxias Dacite presenting tabular sub-horizontal strata in its basal portion; Canyon Dacite with subvertical flow structure; Ana Rech Dacite characterized by a marked horizontal stratification in all its outcrops and Galópolis Dacite comprising two lava flows which have been unified into a single unit due to the slope of the terrain.

**Keywords:** Caxias do Sul. Geology. Geological mapping.

Ocupa uma área territorial de 1.648,60 km<sup>2</sup> e limita-se a noroeste com os municípios de Flores da Cunha, São Marcos, Campestre da Serra e Monte Alegre dos Campos; a leste, com São Francisco de Paula; a sudeste, com Gramado e Canela; a sul, com Nova Petrópolis e Vale Real e a Oeste, com o município de Farroupilha. Os limites extremos do município encontram-se delimitados entre os paralelos 28° 19' e 29° 19' de latitude sul e entre os meridianos 50° 46' e 51° 91' de longitude oeste de Greenwich.

## 2 BASE DE DADOS E MÉTODOS UTILIZADOS

O trabalho de investigação geológica compreendeu o levantamento bibliográfico, a avaliação de mapas geológicos e cartas topográficas, aquisição de produtos de sensoriamento remoto seguidas de atividades de campo e de laboratório. Nunes (2004) realizou o primeiro trabalho de levantamento da geologia da cidade, identificando os diferentes solos encontrados; e Bressani, Flores & Nunes (2005) produziram um Relatório Final para a Prefeitura Municipal de Caxias do Sul referente ao trabalho iniciado por Nunes (2004), no qual foram definidas as litologias que ocorriam na área urbana.

Para a confecção do mapa geológico da área urbana expandida do município, contou-se com duas cartas topográficas em papel na escala 1:50.000 - folhas Caxias do Sul (SH. 22-V-D-III-2) e Farroupilha (SH. 22-V-D-III-1); 1 Mapa Básico

Geológico-Geotécnico da Área Urbana do Município de Caxias do Sul, de setembro de 2005, na escala 1:25.000, digital; 1 Mapa Geológico do Rio Grande do Sul, publicado pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais em 2006, na escala 1:750.000; 4 fotos aéreas na escala 1:110.000 resultantes de um voo de maio de 1975; e 39 fotos aéreas na escala 1:30.000, resultantes de um voo de maio de 1998.

Com as amostras de rochas coletadas em campo foram realizadas análises petrográficas (macroscopia e microscopia) e análises químicas por Fluorescência de Raios X, para identificação das rochas de acordo com a classificação TAS. Para a confecção do mapa geológico foram utilizadas as ferramentas disponíveis no software ArcGis®.

### 3 GEOMORFOLOGIA DO MUNICÍPIO

De acordo com o mapa de Regiões Geomorfológicas do estado do Rio Grande do Sul (Radambrasil 1986), a área estudada situa-se dentro da região geomorfológica denominada Planalto das Araucárias. As características geomorfológicas dessa região são bastante heterogêneas, com formas de relevo que variam desde amplas e aplainadas até níveis mais profundos de entalhamento na área dos Aparados da Serra.

Nessa região são identificadas quatro unidades geomorfológicas: Planalto Dissecado Rio Iguaçu-Rio Uruguai, Serra Geral, Patamares da Serra Geral e Planalto dos Campos Gerais, onde está inserida a área de estudo. O Planalto dos Campos Gerais caracteriza-se a oeste por um relevo relativamente plano e conservado. Desenvolveram-se por extensas áreas interfluviais dos rios Caí e das Antas e deste com o rio Pelotas. As formas de relevo revelam a existência de etapas evolutivas de dissecção, com áreas bastante conservadas de morfologia planar, outras onde a erosão alargou vales, ocasionando muitas vezes, rupturas de declive de pequenos desníveis, e em outras a erosão alargou os extensos vales, deixando resíduos de antigas superfícies de aplainamento.

### 4 GEOLOGIA REGIONAL

A área estudada situa-se na porção sudeste da Bacia do Paraná. A Bacia do Paraná é uma

grande bacia intracratônica, desenvolvida sobre crosta continental sendo preenchida por rochas sedimentares e vulcânicas. Segundo Nardy, Machado & Oliveira (2008) durante o Mesozóico, o supercontinente Gondwana foi palco de intensa atividade magmática fissural, resultando extensos derrames em certas regiões desse continente. Posteriormente, por meio de processos distensivos da litosfera deu-se a separação continental, com o aparecimento de novas bacias oceânicas.

A área de exposição da Formação Serra Geral no Brasil é de 120.000 km<sup>2</sup>, 1.700.000 km<sup>2</sup> em área total, e ocorre na região centro-sul, recobrimdo aproximadamente 75% dos constituintes sedimentares da Bacia do Paraná. Apresenta uma feição alongada com cerca de 1.700 km de extensão na direção nordeste-sudoeste e 900 km na direção leste-oeste. A espessura máxima do pacote vulcânico atinge aproximadamente 1.500 metros superposto aos arenitos eólicos jurássicos da Formação Botucatu (Roisenberg & Viero 2000).

As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral possuem propriedades geoquímicas regionais distintas, o que permite uma divisão em três setores (Roisenberg & Viero 2000): (a) o setor norte é representado por rochas vulcânicas básicas do tipo alto-TiO<sub>2</sub> e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>>0,3%, subordinadamente por intermediárias e ácidas; (b) na porção central ocorrem rochas efusivas básicas alto e baixo-TiO<sub>2</sub> e basaltos transicionais. São registradas também intercalações com derrames ácidos; (c) o setor sul é caracterizado por efusivas básicas do tipo baixo-TiO<sub>2</sub>. Ocorrem também derrames ácidos e em menor abundância derrames intermediários.

As idades das rochas vulcânicas da província, obtidas por meio de datações <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar, revelam que o pico de atividade ígnea ocorreu num curto período, entre 133 e 130 Ma (Renne *et al.* 1996, Turner *et al.* 1994). As idades das rochas vulcânicas na porção sul da Bacia do Paraná situam-se entre 131,4±1,6 e 132,9 Ma, enquanto que as das regiões norte e central entre 129,9±0,1 Ma e 131,9±0,9 Ma (Renne *et al.* 1992).

### 5 GEOLOGIA LOCAL

No município de Caxias do Sul, afloram rochas vulcânicas pertencentes à Formação Serra Geral e depósitos recentes de tálus e colúvios.

Baseados em estudos geoquímicos, as vulcânicas ácidas desta região foram classificadas como do tipo Palmas, sendo estas predominantes na região do município de Caxias do Sul e, as básicas, como do tipo Gramado (Bellieni *et al.* 1986, Peate *et al.* 1992).

Segundo Nardy *et al.* (2008), estudos preliminares de Bellieni *et al.* (1986), Peate *et al.* (1992) e Garland *et al.* (1995) sobre a geoquímica das rochas ácidas do tipo Palmas revelaram que elas não são homogêneas. Puderam-se reconhecer dois grandes grupos: (a) um deles, com baixo teor em Ti ( $TiO_2 \leq 0,87\%$ ), é formado por dois subtipos distintos, denominados Santa Maria ( $P_2O_5 \leq 0,21\%$ ) e Clevelândia ( $0,21\% < P_2O_5 \leq 0,23\%$ ); (b) o outro grupo, com alto teor em Ti ( $TiO_2 \geq 0,90\%$ ), é representado por três subtipos denominados Caxias do Sul ( $0,91\% < TiO_2 < 1,03\%$  e  $0,25\% < P_2O_5 < 0,28\%$ ), Anita Garibaldi ( $1,06\% < TiO_2 < 1,25\%$  e  $0,32\% < P_2O_5 < 0,36\%$ ) e Jacuí ( $1,05\% < TiO_2 < 1,16\%$  e  $0,28\% < P_2O_5 < 0,31\%$ ). O subtipo Caxias do Sul foi inicialmente reconhecido por Peate *et al.* (1992) e recobre uma área total de 16.000 km<sup>2</sup> e ocupa um volume de 4.832 km<sup>3</sup>.

A análise estrutural realizada por Reginato (2003) identificou a presença de fraturas, zonas de fraturas, fraturas com preenchimento, veios e diques na região de Caxias do Sul. Segundo Reginato *op. cit.* na região ocorre um padrão aproximadamente ortogonal de fraturas com uma orientação próxima a Norte-Sul e Leste-Oeste. Os veios e diques estariam alojados em estruturas que diferem do padrão ortogonal, o que corresponderia, provavelmente, a planos de cisalhamento.

Bressani, Flores & Nunes (2005) compartimentaram a área urbana do município em 2 setores, dividindo-os internamente em 8 unidades morfoestruturais. Analisando qualitativamente as formas do relevo e as características do solo de cada unidade puderam avaliar a variação morfológica que ocorre na área estudada. As formas de relevo identificadas foram: Planalto não dissecado, Planalto rebaixado, Mesas dissecadas e Relevo densamente dissecado. Os lineamentos são abundantes nas unidades denominadas como: Matheo Gianella-Ana Rech, São Victor, Nossa Sra. da Conceição e Galópolis.

Com resultados de trabalhos de campo descritos por Bressani, Flores & Nunes (2005) definiram-se as litologias que ocorrem no município de Caxias do Sul (Figura 1), sendo a sequência vulcânica, da base para o topo, a seguinte:

- a) Dacitos Galópolis: originalmente 2 derrames que ocorrem de forma bem característica na região de Galópolis, unificados em uma só unidade devido à declividade do local e semelhança de comportamento dos solos plásticos derivados, o que proporciona uma proximidade em planta baixa.
- b) Dacito Canyon: este material tem grande importância por ser altamente alterável e ocorrer em algumas áreas da cidade. Caracteriza-se pelo predomínio de estruturas de fluxo verticalizadas e granulação fina, o que favorece o desenvolvimento de um solo espesso. Seus afloramentos mais importantes e característicos são no bairro Canyon (no entorno da cota 700 m), junto à entrada do Bairro Santa Corona (cota 680 m) e nos vales ao sul da cidade (em direção a Galópolis e também ao sul do Desvio Rizzo).
- c) Dacito Caxias: é o de maior abrangência na região, ocupando a parte central da cidade e grande parte da área ao sul do centro. Pelo seu aspecto, é também denominado de Dacito Carijó. Geralmente encontra-se desde a cota 700 m até o contato com o Dacito Ana Rech (variável).
- d) Topo do Dacito Caxias: este material se constitui da porção de topo do derrame anterior mas apresenta características vítreas tão importantes que poderia ser identificado como Vitrófiro Forqueta. Sua presença mais característica é na região administrativa de Forqueta, mas ocupa diversas áreas mais planificadas da cidade que são topos de erosão como a região do aeroporto. Devido à origem, as cotas de ocorrência acompanham as do Dacito Caxias.
- e) Dacito Ana Rech: encontra-se na região administrativa de Ana Rech e grande parte da área norte da cidade, geralmente nas cotas superiores na região (podendo atingir a cota 900 m).

PERÍODO	IDADE Ma	UNIDADE LITOES- TRATIGRA- FICA	ROCHAS		ESPESSURA	SOLOS
			T I P O			
CRETÁCIO INF.	128	FORMAÇÃO SERRA GERAL	C A X I A S	DACITO ANA RECH	80m	ANA RECH
				DACITO CAXIAS/ CARIJÓ	170m	FORQUETA CAXIAS/CAR
				DACITO CANYON	70m	CANYON
				DACITO GALÓPOLIS	70m	GALOPOLIS
			BASALTOS E ANDESIBASALTOS TIPO GRAMADO		450m	
JURÁS- SICO	138	FORMAÇÃO BOTUCATU	ARENITOS E ÓLICOS		160	

**Figura 1** – Coluna do arcabouço geológico do município de Caxias do Sul, com indicação da espessura de cada unidade vulcânica e os respectivos solos derivados da alteração destas rochas (Extraído de Bressani, Flores & Nunes, 2005).

## 6 ANÁLISE ESTRUTURAL

A geologia da área de estudo é subordinada, em termos estruturais, a lineamentos de extensões regionais e que são vinculados a eventos tectônicos de natureza distensional. Estes lineamentos são facilmente observáveis em imagens orbitais, como a falha Caxias, que apresenta uma extensão de aproximadamente 70 km no município, com seus extremos nas proximidades da localidade de Vila Cristina (extremo sudoeste) e as proximidades da localidade de Boqueirão (extremo nordeste). A tectônica que afetou a Formação Serra Geral é de idade do Mesozóico Inferior, e que atingiu, tanto o embasamento cristalino pré-cambriano, quanto à sequência sedimentar gonduânica da Bacia do Paraná. Os eventos tectônicos que afetaram esta parte da crosta foram balizados por antigos lineamentos de natureza rúptil (falhas).

Realizou-se uma análise estrutural dos lineamentos da área urbana de Caxias do Sul com base nas fotografias aéreas na escala 1:30.000 e 1:110.000. Esses lineamentos foram traçados durante a etapa de fotointerpretação. Observou-se a ocorrência de lineamentos em diversas direções, ocorrendo um pequeno predomínio dos

lineamentos do quadrante nordeste, com valores predominantes no intervalo N 60° - 80° E, e os lineamentos do quadrante noroeste com valores predominantes no intervalo N 50° - 70° W.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES DAS ANÁLISES

### 7.1 Análise química

Como primeira constatação pode-se observar uma uniformidade na composição química destas rochas, em particular, no que tange aos teores de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ . As rochas ácidas de Caxias do Sul apresentam conteúdos de  $\text{SiO}_2$  entre 63,4% e 68,1%,  $\text{TiO}_2$  entre 0,88% e 1,04% e  $\text{P}_2\text{O}_3$  da ordem de 0,20% e 0,28%. Os valores são semelhantes aos apresentados para as ácidas do tipo Palmas. Considerando-se os teores de  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_3$  podemos agrupar essas rochas como pertencentes ao subtipo Caxias do Sul.

Analisando o diagrama TAS podemos separar essas rochas ácidas em três tipos: Dacito Caxias, representado por triângulos vermelhos no diagrama; Dacito Canyon, representado por círculos verdes; e o Dacito Forqueta, representado

pele retângulo preto. Essas rochas além de possuírem pequenas diferenças em suas composições

químicas apresentam características petrográficas distintas (Figura 2).

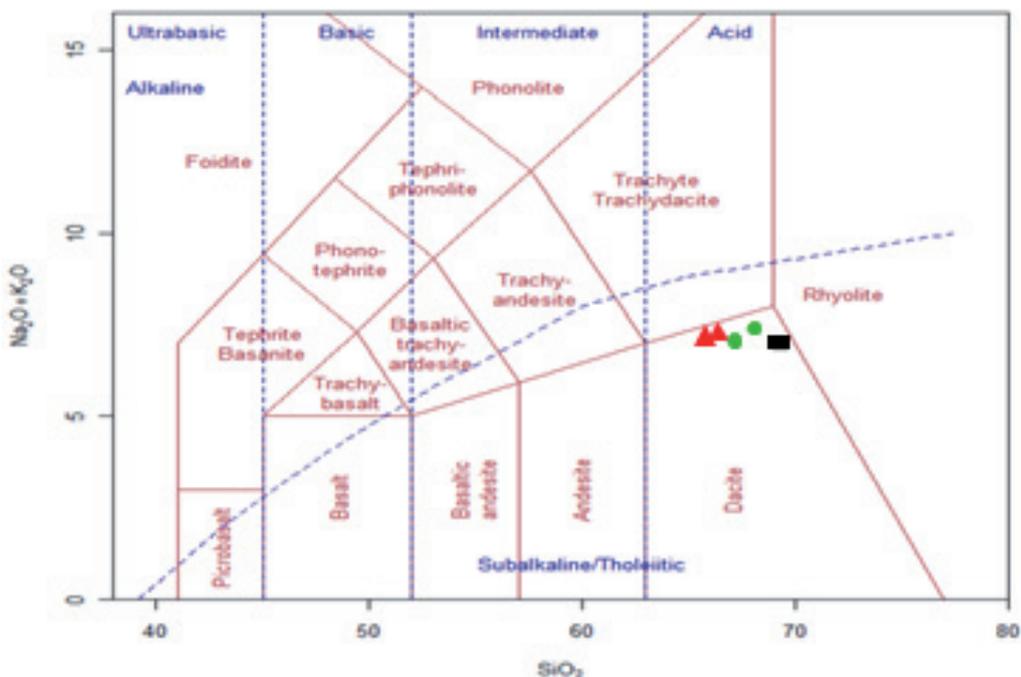


Figura 2 - Diagrama TAS (Alcalis totais x Sílica), (Le Bas et al. 1986). Classificação química das rochas vulcânicas encontradas na área urbana de Caxias do Sul.

## 7.2 Petrografia

### 7.2.1 Dacito Forqueta

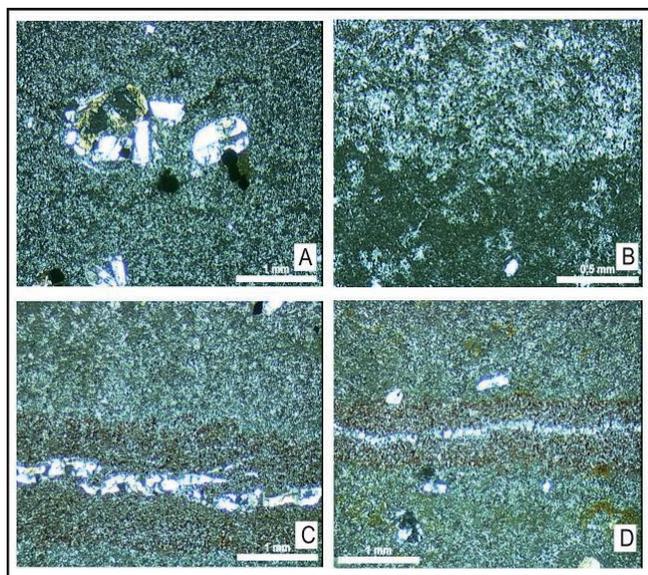
Originalmente denominado por Bressani, Flores & Nunes (2005) como Vitrófiro Forqueta, o Dacito Forqueta é uma unidade litológica que ocorre, com seus aspectos mais característicos, por toda a extensão territorial da Região Administrativa de Forqueta, em cotas comumente superiores a 730 m. O aspecto predominante observado em campo é a existência de uma sutil estrutura de fluxo magmático, que define bandas com coloração que variam de cinza esverdeada a cinza muito escura.

#### Lâmina PTC - 015 A e PTC 032 A

Em lâmina delgada observa-se uma estrutura de fluxo marcada pela orientação dos micrólitos que constituem a matriz, evidenciada por forte alteração. A textura geral da rocha é microporfírica, e de forma muito localizada ocorrem agregados glomeroporfíricos. É constituída por uma matriz fina a semi-vítrea, em um estágio de desvitrificação que confere a rocha uma textura granofírica (Figura 4), composta de micrólitos

ripidiformes de plagioclásio e minerais opacos, por fenocristais de plagioclásio e piroxênio. Ocorrem fraturas paralelas à estrutura de fluxo, preenchidas por quartzo e com alteração ao longo de sua extensão (Figura 3).

A matriz é composta principalmente por micrólitos de plagioclásio com intercrescimento com o quartzo devido ao processo de desvitrificação. Os fenocristais ocorrem de forma disseminada na rocha, são constituídos principalmente por plagioclásio e piroxênio, ocorrendo também alguns opacos. Os fenocristais de plagioclásio possuem em média 0,5 - 1 mm, variam de subédricos a euédricos, e possuem hábito prismático e comumente apresentam macla polissindética. Os fenocristais de piroxênio ocorrem de maneira dispersa, possuem tamanho médio de 0,5 mm, são euédricos, de hábito prismático. Muitas vezes ocorrem alterados, substituídos por clorita. Os opacos ocorrem principalmente como pequenos cristais de hábito cúbico inclusos em alguns fenocristais de plagioclásio e piroxênio. Ocorrem ainda, de forma mais rara, como fenocristais euédricos e fortemente oxidados.



**Figura 3** - Lâmina PTC 015 A; A - fenocristais de plagioclásio e piroxênio; B - porção superior da imagem com maior cristalização e porção superior com desvitrificação incipiente; C e D - fraturas paralelas à estrutura de fluxo, preenchidas por quartzo e com alteração ao longo de sua extensão.

### 7.2.2 *Dacito Caxias*

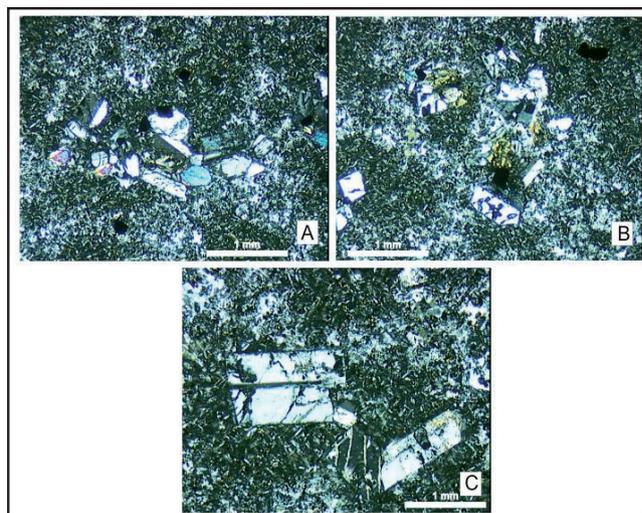
O *Dacito Caxias* ocorre em cotas normalmente superiores a 640 m, sendo assim nomeado por Bressani, Flores & Nunes (2005) por ocorrer em seus aspectos mais característicos na região central da cidade. A rocha tem uma coloração predominantemente cinza oliva clara e granulação média. São observadas ocorrências de estratos tabulares sub-horizontais na porção basal dessa unidade com espessuras de 5 a 30 cm, que desenvolvem uma alteração esferoidal característica desse derrame.

#### Lâmina PTC - 016 A e 022 A

A rocha tem uma textura equigranular com granulação fina a média e uma estrutura predominantemente maciça e localmente é perceptível uma intercalação de porções de textura granofírica com porções faneríticas, com as fases minerais bem diferenciadas. Ocorrem de forma dispersa na rocha, alguns agregados constituídos principalmente por fenocristais de plagioclásio e piroxênio, que caracterizam a textura do tipo glomeroporfirítica (Figura 4).

A textura dominante é microporfirítica e de forma localizada ocorre textura glomeroporfirítica. Apresenta intensa alteração das fases máficas. A matriz é composta principalmente por

micrólitos de plagioclásio. Estes cristais possuem hábito prismático, variam de subédricos a euédricos e possuem macla polissindética. Nos espaços intersticiais existentes entre os cristais de plagioclásio que constituem a matriz, ocorrem minerais opacos residuais de hábito dendróide originados da desvitrificação. Ocorrem também alguns minerais opacos, piroxênios e plagioclásios de forma disseminada na matriz e poucos fenocristais de plagioclásio e piroxênio. Os fenocristais de plagioclásio possuem aproximadamente 1 - 1,5 mm em média, variam de subédricos a euédricos, e possuem hábito prismático (Figura 4). Em muitos casos possuem uma grande alteração para mica branca. Ocorrem ainda como fenocristais alguns piroxênios, que variam entre 1 - 2 mm são euédricos e de hábito prismático.



**Figura 4** - Lâmina PTC 022 A; A e B - textura glomeroporfirítica formada por fenocristais de plagioclásio e piroxênio; C - fenocristais de plagioclásio em uma matriz de desvitrificação.

### 7.2.3 *Dacito Canyon*

O *Dacito Canyon* ocorre em cotas baixas (normalmente inferiores a 640 m), sendo assim chamado por Bressani, Flores & Nunes (2005) devido ao fato de uma das principais e mais características ocorrências dessa litologia ser encontrada no vale que define o bairro Canyon. Esse derrame caracteriza-se pela presença de estruturas de fluxo sub-vertical, que definem bandas com coloração que variam de cinza escura a marrom-avermelhada. A diferença de coloração é relacionada ao estado de oxidação da rocha, sendo que na maior parte

das vezes ela aparece alterada, e quando são tem cor cinza escura.

**Lâmina PTC - 011 A**

A rocha apresenta uma forte oxidação dos minerais opacos e máficos que a compõem, adquirindo uma coloração geral avermelhada. A textura da rocha é porfirítica, podendo ser chamada de felsolítica por se tratar de uma matriz formada pelo intercrescimento de plagioclásio e quartzo. A matriz tem textura fina e é possível observar a presença de micrólitos ripidiformes de plagioclásio, algum quartzo intersticial e minerais opacos residuais, que estão totalmente oxidados. Ocorrem poucos fenocristais, constituídos principalmente por plagioclásio, e mais raramente piroxênio e opacos (Figura 5).

A matriz é composta principalmente por micrólitos de plagioclásio. Nos espaços intersticiais existentes entre os micrólitos ocorre algum quartzo residual, e principalmente minerais opacos, que apresentam hábito dendrítico a acicular, que estão totalmente oxidados, e são responsáveis pela coloração avermelhada característica da rocha. Os fenocristais de plagioclásio ocorrem de maneira disseminada na matriz e possuem em média 0,1 mm, variando de subédricos a euédricos.

Os fenocristais de piroxênio ocorrem pervasivamente alterados, possuem tamanhos médios de 0,5 mm, são euédricos, de hábito prismático. Os opacos ocorrem euédricos, medindo até 0,3 mm, totalmente oxidados.

Com a análise e interpretação de todos esses dados foi possível a construção do mapa geológico da área urbana do município de Caxias do Sul, que está apresentado na figura 6.

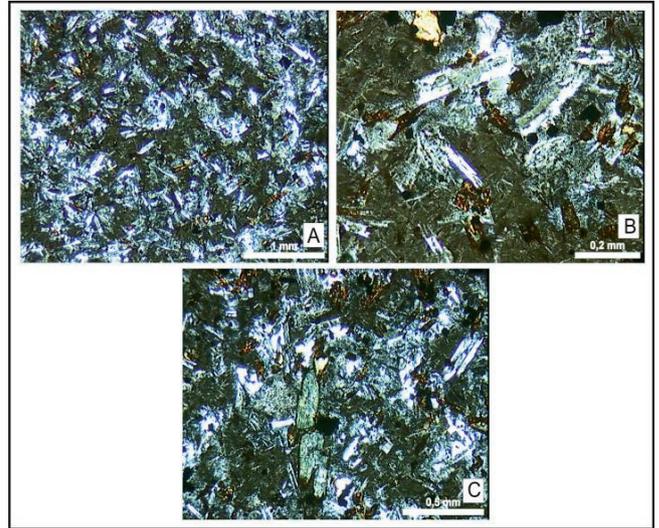


Figura 5 - Lâmina PTC 011 A; A e B - matriz tem textura fina e é possível observar a presença de micrólitos ripidiformes de plagioclásio; C - raros fenocristais.

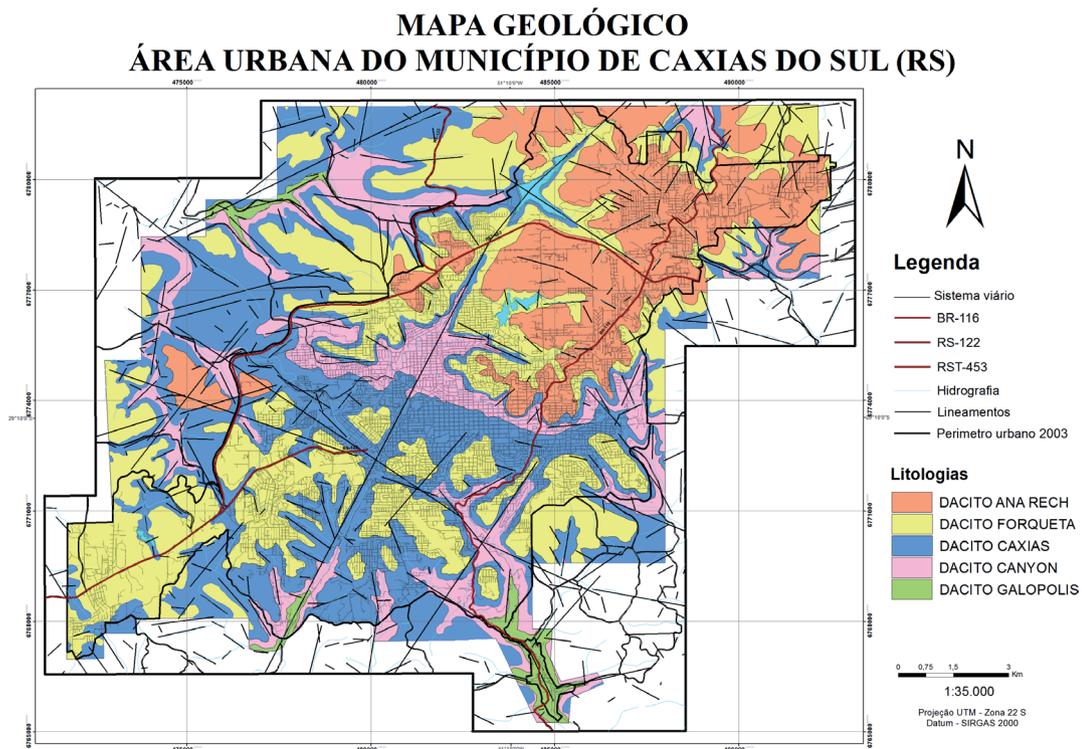


Figura 6 - Mapa geológico da área urbana no município de Caxias do Sul -RS.

## 8 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi mapeada uma unidade geológica, quimicamente classificada como Dacito, mas que apresenta características macro e microscópicas particulares que permitiram a sua divisão em cinco subtipos: Dacito Forqueta, Dacito Caxias, Dacito Canyon, Dacito Ana Rech e Dacito Galópolis (os dois últimos identificados em mapeamento anterior - ver mapa). O método de mapeamento de unidades geológicas, baseado no cruzamento dos dados adquiridos com a análise qualitativa da geologia e geomorfologia, mostrou-se adequado para a área urbana de Caxias do Sul.

Os contatos entre os materiais foram estabelecidos a partir da análise de fotografias aéreas. Em campo pode-se observar alguns contatos bastante nítidos entre os materiais, no entanto, observou-se alguns contatos transicionais por variação no intemperismo, o que impediu uma definição clara do mesmo.

As rochas vulcânicas dacíticas mapeadas apresentam algumas importantes diferenças estruturais:

1. Dacito Forqueta apresenta uma estrutura de fluxo bem marcada, evidenciada por bandas de diferente coloração;
2. Dacito Caxias apresenta estratos tabulares sub-horizontais na sua porção basal;
3. Dacito Canyon é comumente encontrado com uma coloração avermelhada devido à oxidação dos minerais opacos e quando não alterado pode-se observar uma estrutura de fluxo subvertical, que definem bandas com coloração distinta.
4. Dacito Ana Rech: caracteriza-se pela sua marcada estratificação horizontalizada em toda a sua área de ocorrência.
5. Dacito Galópolis: dois derrames que ocorrem de forma bem característica sendo um intervalo basal vulcânico e um vidro vulcânico superior, que foram unificados em uma só unidade devido à declividade do local, o que proporciona uma proximidade em planta baixa.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Geól. Felipe Faccioni pela ajuda nos trabalhos de campo, ao apoio

institucional da PM Caxias do Sul, ao PPGEC/UFRGS e Instituto de Geociências, CAPES e CNPq por apoios diversos à pesquisa.

## REFERÊNCIAS

Bellieni G., Comin-Chiaramonti P., Marques L.S., Melfi A.J., Nardy A.J.R., Papatrechas C.; Piccirillo E.M., Roisemberg A., Stolfa D. 1986. Petrogenetic Aspects of Acid and Basaltic Lavas from the Paraná Plateau (Brazil): Geological, Mineralogical and Petrochemical Relationships. *Journ. of Petrol.*, 27(4):915-944.

Bressani L. A., Flores J. A. A., Nunes L. F. 2005. Desenvolvimento de Estudos de Engenharia Geotécnica/Geologia com Vistas à Geração de Relatório e Mapa Geotécnico dos Solos e Rochas Superficiais da Área Urbana da Cidade de Caxias do Sul. Relatório final, Prefeitura Municipal de Caxias do Sul.

Garland F., Hawkesworth C.J., Mantovani M.S.M. 1995. Description and Petrogenesis of the Paraná Rhyolites, Southern Brazil. *J.Petrol.*, 36(5):1193-1227.

Nardy A. J. R., Machado F. B., Oliveira M. A. F. 2008. As rochas vulcânicas mesozóicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas. *Revista Brasileira de Geociências*. 38(1): 178-195.

Noronha F. L. 2007. Estudo geológico-geotécnico da área urbana de Santa Cruz do Sul - RS. Trabalho de conclusão do curso de geologia do instituto de geociências - UFRGS. 104 p.

Nunes L. F. 2004. Mapeamento geotécnico preliminar da área urbana de Caxias do Sul - RS. Trabalho de conclusão do curso de geologia do instituto de geociências - UFRGS. 100 p.

Peate D.W., Hawkesworth C., Mantovani M.M.S. 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (S. America): classification of magma types and their spatial distribution. *Bull. Volc.*, 55:119-139.

Pejon O. J. & Rodrigues J. E. 1987. Análise geológico-geotécnica da região de Araraquara,

- SP. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5. São Paulo, Anais, ABGE, v. 2, p. 279-290.
- RADAMBRASIL 1986. Folha SH. 22 Porto Alegre e Parte das Folhas SH. 21 Uruguaiana e SI. 22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Levantamento de Recursos Naturais, Vol. 33.
- Roisenberg A. & Viero P.; 2000. O vulcanismo mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: Holz M. & De Ros L. F. (eds.) Geologia do Rio Grande do Sul, UFRGS-Cigo, Porto Alegre. p. 355-374.
- Reginato, P. A. R.. 2003. Integração de dados geológicos para prospecção de aquíferos fraturados em trecho da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas – RS. 2003. 254 f. Tese de doutorado, PPGEM. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Renne, P.R.; Deckart, K.; Ernesto, M.; Férraud, G.; Piccirillo, E.M.; 1996. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil) and implications to Paraná flood volcanism. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 144:199-212.
- Renne P., Ernesto M., Pacca I.G., Nardy A.J.R., Coe R.S., Glen J.M., Prevót M., Perrin M. 1992. Age and Duration of Paraná Flood Volcanism in Brazil. *EOS-AGU*, 27:531-532.
- Turner S., Regelous M., Kelley S., Hawksworth C., Mantovani M.M.S. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 121:333-348.

# PLANO MUNICIPAL DE REDUÇÃO DE RISCO DE SANTA MARIA DE JETIBÁ – ES - BRASIL

MUNICIPAL PLAN FOR RISK REDUCTION OF SANTA MARIA DE JETIBÁ - ES - BRAZIL

LEONARDO ANDRADE DE SOUZA

*Zemlya Consultoria e Serviços LTDA. Belo Horizonte - Brasil.*

*E-mail: leonardo@zemlya.com.br*

MARCO AURÉLIO COSTA CAIADO

*Instituto Federal do Espírito Santo – IFES – Espírito Santo – Brasil.*

*E-mail: macaiado@gmail.com*

FILLIPE TESCH

*Avantec Engenharia. Vitória – Brasil.*

*E-mail: fillipetes@gmail.com*

GILVIMAR VIEIRA PERDIGÃO

*Zemlya Consultoria e Serviços LTDA. Belo Horizonte - Brasil.*

*E-mail: gilvimar@zemlya.com.br*

LARISSA TOSTES LEITE BELO

*Zemlya Consultoria e Serviços LTDA. Belo Horizonte - Brasil.*

*E-mail: laristbello@gmail.com*

## RESUMO ABSTRACT

O Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR) de Santa Maria de Jetibá - ES é parte integrante de um trabalho executado pelo Governo do Espírito Santo em 17 municípios prioritários do Estado, tendo como objetivos principais a ampliação do conhecimento sobre os processos geodinâmicos ocorrentes, riscos e ações de gerenciamento efetivas para enfrentamento dos eventos adversos. Neste caso específico, dentre as temáticas tratadas neste PMRR serão abordados os estudos relacionados ao mapeamento do risco geológico e hidrológico do município de Santa Maria de Jetibá com os resultados das etapas de identificação do mapeamento do risco geológico-geotécnico, bem como as propostas de intervenções estruturais e não estruturais para a eliminação e/ou redução destes. O município tem sua sede a 87,0 quilômetros da capital do estado, possui uma população de 34.176 habitantes e uma área de 735.579 km<sup>2</sup>. O PMRR é uma importante ferramenta para orientar a implementação de uma política pública de gestão para a redução de riscos e desastres em Santa Maria de Jetibá.

**Palavras-chave:** Redução de Risco, Política Pública, Santa Maria de Jetibá.

The Municipal Plan Risk Reduction (PMRR) of Santa Maria Jetibá - ES is part of a work developed by the government of the Espírito Santo state (Brazil) in 17 priority cities, having, as main objectives, the expansion of Knowledge about the geodynamic processes, risks and effective actions of management in order to face adverse events. In this particular case, among the issues addressed in this PMRR, were considered the studies related to mapping of geological risk, the maps of geological and geotechnical risks, as well as the proposals for structural and non structural interventions for risk elimination and / or reduction. The municipality is located 87.0 km from the state capital, has a population of 34.176 inhabitants and an area of 735.579 km<sup>2</sup>. The PMRR is an important tool to guide the implementation of a public policy of management for the reduction of risks and disasters in Santa Maria Jetiba.

**Keywords:** Risk Reduction, Public Politic, Santa Maria Jetiba.

## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A urbanização é um processo característico da civilização humana e os problemas a ela inerentes são largamente estudados atualmente. Enquanto em 1800 apenas 1% da população mundial vivia em cidades, a partir da revolução industrial, a urbanização se acelerou em ritmo ascendente, de forma que, durante a primeira metade do século XX, a população total do mundo aumentou 49%, enquanto a população urbana aumentou 240%. Durante a segunda metade do século, a população urbana passou de 1.520 milhões em 1974 para 1.970 milhões em 1982 (Tucci, 2003). No século XXI este número já ultrapassou 2.100 milhões em 2014.

No Brasil, o processo de urbanização nos últimos 50 anos tem se caracterizado pelo incremento da população em grandes cidades, tendo o número de localidades urbanas com população igual ou maior que 20.000 habitantes passado de 89, em 1950, para 870, em 2010, com a população total nessas localidades alterada de 24 para 131 milhões (George & Schensul, 2013).

Em relação aos desastres naturais, estes afetam indistintamente toda a humanidade gerando inevitavelmente um sem número de vítimas e prejuízos econômicos. A conjunção entre especificidades do substrato geológico, características geomorfológicas, eventos climáticos e aumento expressivo da urbanização tem levado a situações críticas por todo o planeta. Uma simples leitura de um jornal diário de alguma forma sempre abrange o fato de que algum evento ocorreu ou está para ocorrer, relacionados em sua maioria a deslizamentos, inundações, enxurradas, entre outros. No Brasil não é diferente, sendo que o histórico brasileiro de crescimento desordenado nas últimas décadas, e atuais taxas de urbanização acima de 84%, só corroboram para o incremento da vulnerabilidade de pessoas, infraestrutura e instalações tornando a questão da prevenção de desastres e acidentes de natureza geológica e hidrológica um dos maiores problemas nacionais, tanto pelas perdas de vida frequentes, como pelos danos e prejuízos econômicos causados à sociedade.

Os eventos recentes relacionados a grandes desastres ocorridos no Brasil, como as inundações em novembro de 2008 e setembro de 2011, no Vale

do Itajaí, em Santa Catarina, as enxurradas e deslizamentos em janeiro de 2011 na região serrana do Rio de Janeiro e as cheias da Região Norte e Noroeste do estado do Espírito Santo em 2013, entre outros, aumentaram a percepção da sociedade brasileira sobre a ocorrência de desastres e evidenciam a urgente necessidade de desenvolvimento de instrumentos eficazes de prevenção e mitigação de riscos, além da qualificação da resposta aos desastres (Sobreira & Souza, 2012).

Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2012), apenas no Estado do Espírito Santo foram contabilizados entre os anos de 1991 e 2010, 491 registros oficiais de inundações bruscas e graduais que resultaram em 400 mil habitantes atingidos, sendo que desses 339.329 foram afetados, 17.109 ficaram desalojados, 4.401 desabrigados e 3 mortos; e 114 registros de movimentos gravitacionais de massa que resultaram em 184.781 habitantes afetados, com 6.602 desalojados, 734 desabrigados e 9 mortos.

Diante dessa problemática foram elaborados para 17 municípios capixabas definidos como prioritários pela Defesa Civil Estadual, Planos Municipais de Redução de Risco (PMRR) com o propósito de atender às expectativas da sociedade capixaba para a formulação de estratégias, diretrizes e procedimentos que efetivamente consigam ampliar o conhecimento sobre os processos geodinâmicos, riscos e desastres, com proposição de ações estruturais e não estruturais para reduzir os riscos e minimizar o impacto relacionado aos desastres no Estado. O Plano Municipal de Redução de Risco de Santa Maria de Jetibá aqui apresentado é parte integrante deste trabalho.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO

O município de Santa Maria de Jetibá possui uma população de 34.176 habitantes e uma área de 735,579 km<sup>2</sup>. Sua sede está a 87,0 quilômetros da capital do estado, Vitória. O município de Santa Maria de Jetibá limita-se com os seguintes municípios: ao norte com Santa Teresa e Itarana, a oeste com Afonso Cláudio, ao sul com Domingos Martins e a leste com Santa Leopoldina, conforme ilustrado na Figura 1.

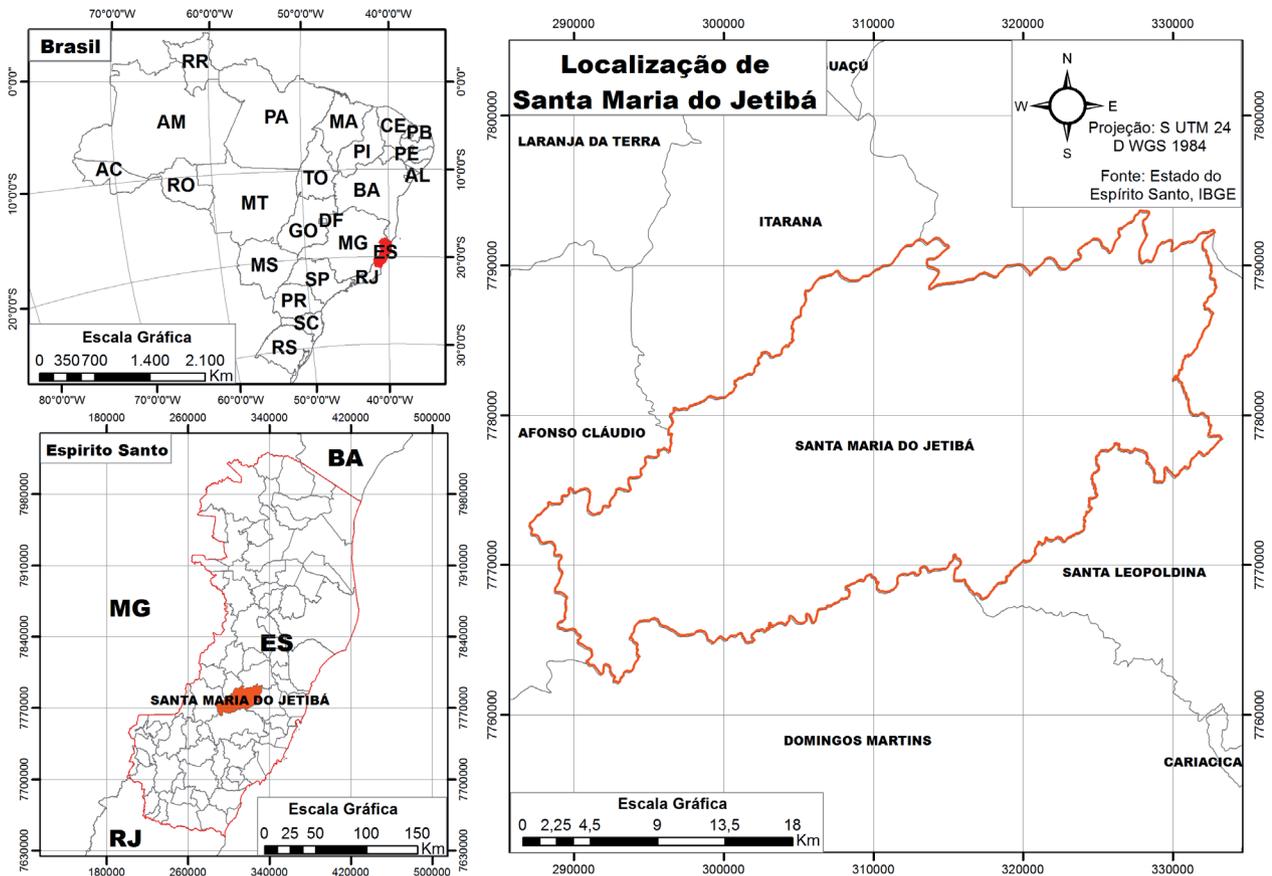


Figura 1 - Localização do município de Santa Maria de Jetibá no contexto do Espírito Santo e do Brasil.

## 2.1 Aspectos gerais do meio físico do município de Santa Maria de Jetibá

O Estado do Espírito Santo situa-se na Província Estrutural Mantiqueira, a sudeste do Cráton São Francisco (Almeida 1976, 1977). A província Mantiqueira representa um sistema orogênico Neoproterozóico com direção preferencial NE-SW. Em decorrência do fato de a partir da divisa do Rio de Janeiro com o Espírito Santo ocorrer uma mudança de direção de NE-SW para N-S, alguns autores têm incluído este trecho na faixa Araçuaí (Alkmim & Mashark 1998), sendo esta uma das feições estruturais mais importantes da Faixa Ribeira. Os granitoides tipo I, granitoides foliados, paragneisses, kinzigitos, xistos e quartzitos são as rochas com maior ocorrência compondo o mapa geológico do município (Figura 2):

A geomorfologia é um conhecimento específico, sistematizado, que tem por objetivo analisar as formas do relevo, buscando compreender os

processos pretéritos e atuais (Caseti, 1991). Para Christofolletti (1980), as formas do relevo constituem o objeto da geomorfologia, afirmando ainda que “Se as formas existem, é porque elas foram esculpidas pela ação de determinado processo ou grupo de processo. Dessa maneira, há um relacionamento muito grande entre as formas e os processos, onde o estudo de ambos pode ser considerado como o objetivo central desse ramo do conhecimento, de forma a embasar as características fundamentais do sistema geomorfológico”.

Em relação a compartimentação geomorfológica do município de Santa Maria de Jetibá, os procedimentos adotados para a identificação dos domínios ao longo do território foram propostos considerando classes de relevo que retratam as especificidades locais na escala 1:50.000.

A análise realizada se enquadra no 4º táxon da metodologia proposta por Ross (1992), onde às formas de relevo são individualizadas em unidades com padrão de formas semelhantes.

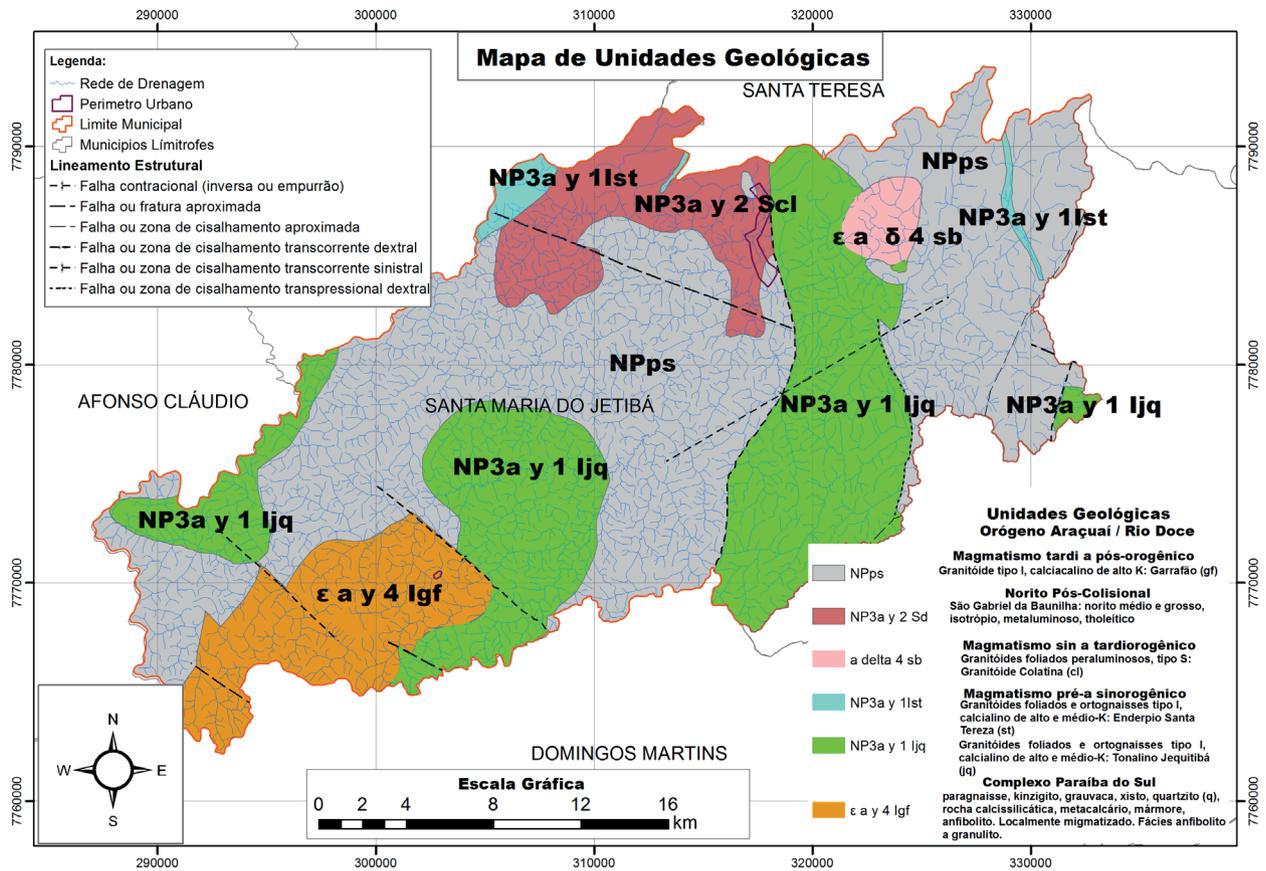


Figura 2 - Mapa de Unidades Geológicas do Município de Santa Maria de Jetibá - ES.

A sequência geral de trabalho para as análises do relevo iniciou-se, resumidamente, com a pesquisa bibliográfica e inventário de dados da área do município; passando para a preparação das bases cartográficas disponíveis; a elaboração do Modelo Digital de Elevação Hidrologicamente Consistente - MDEHC; a elaboração de perfis topográficos representativos e trabalho de campo para reconhecimento do meio físico, reconhecimento de feições e padrões morfológicos, e limites do município; a compartimentação morfológica e elaboração da carta geomorfológica preliminar baseada em conhecimento especialista (Método Heurístico), e trabalhos de campo para validação dos resultados; a compartimentação topográfica a partir de composição colorida RGB e realce dos padrões de relevo; a proposta de metodologia de compartimentação do relevo adequada ao município (Tabela 1), a partir dos resultados obtidos nas etapas 5 e 6; e a elaboração da carta geomorfológica final do município com edição gráfica.

Tabela 1 - Classes de Sistemas de Relevo Usadas como Referência.

Unidades geomorfológicas	Amplitude (m)	Declividade (%)
Suave a Plano	< 100 m	< 5%
Rampa	<100m	5 a 10%
Colina	<100m	10 a 20%
Morrote	<100m	> 20%
Morros com Vertentes Suaves	100 a 300 m	5 a 20%
Morro	100 a 300 m	> 20%
Suave a Plano de Alta Altitude	100 a 300 m	< 5%
Suave a Plano de Alta Altitude	>300m	<20%
Montanhoso	>300m	>20%

A Figura 3 sintetiza o mapeamento geomorfológico proposto para o município de Santa Maria de Jetibá.

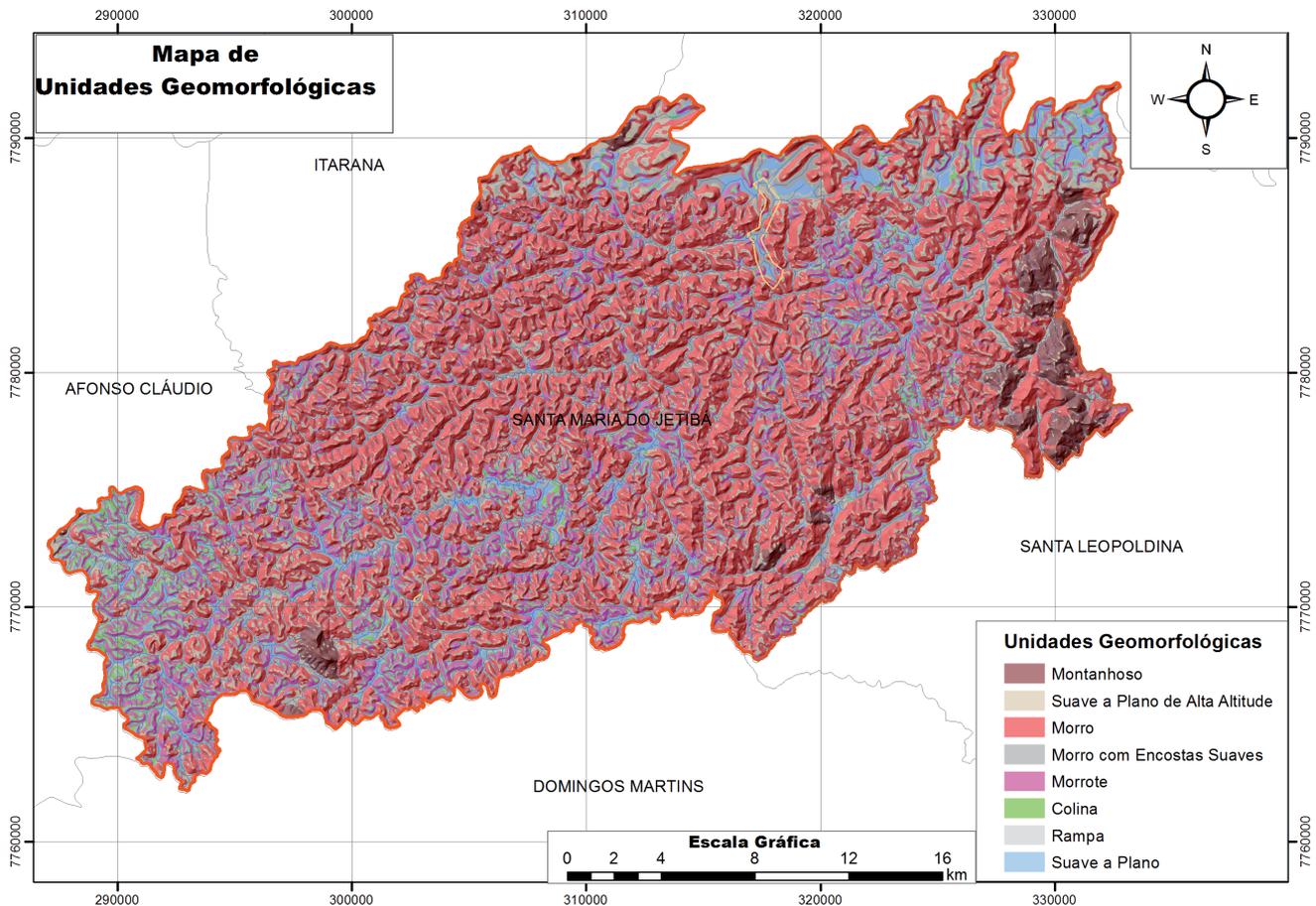


Figura 3 – Mapa de Unidades Geomorfológicas gerado para o município de Santa Maria de Jetibá.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A contínua ocupação desordenada de nosso território, as margens do planejamento urbano e do ordenamento territorial é um dos fatores que contribuem para o aumento da exposição da sociedade aos desastres naturais, bem como a magnitude dos danos relacionados a estes, principalmente os relacionados a inundações e movimentos gravitacionais de massa. Nesse contexto, fica cada vez mais evidente a necessidade da inserção dos mapeamentos hidrológicos e geológico-geotécnicos como instrumentos de ordenamento territorial, conforme definido pela Lei 12.608 (Brasil, 2012).

Os impactos advindos do processo de crescimento desordenado das cidades deterioram a qualidade de vida da população devido ao aumento da frequência e do nível de deflagração de processos geodinâmicos merecendo destaque entre os mais recorrentes, a deflagração de processos de inundação urbana e deslizamentos. Via

de regra, tais problemas e os impactos associados à expansão urbana possuem uma relação direta com a ampliação de áreas impermeabilizadas e construção de sistemas de drenagem, como condutos e canais; à ocupação de planícies de inundação quando a legislação de uso do solo e o planejamento urbano são inadequados e após uma sequência de anos em que rios urbanos apresentam baixas vazões e a população passa a ocupar planícies de inundação devido à topografia plana, proximidade com áreas importantes do centro urbano e baixo custo, mas que quando altas vazões ocorrem, os prejuízos podem atingir somas intangíveis e a municipalidade é chamada a investir na proteção da população contra cheias; à ocupação de terrenos com declividades acentuadas, naturalmente suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa, ressaltando-se aqui que a exclusão social somada a incapacidade do poder público de promover uma expansão urbana adequada, bem como de fiscalizar o processo de ocupação desordenado de seu território, associado a cultura de

ocupação dos terrenos por meio da geração de cortes e aterros, em áreas sem infraestrutura adequada, tem contribuído para o aumento significativo dos registros de ocorrência de movimentos de massa, com geração de danos materiais e vítimas fatais.

Entre os instrumentos técnicos que podem contribuir para uma gestão mais efetiva dos territórios já ocupados, o mapeamento hidrológico-hidráulico é utilizado para definir o grau de / perigo e risco à inundação de uma determinada bacia. Para Oliveira & Guasselli (2011), a suscetibilidade à inundação de uma área está diretamente relacionada à probabilidade dessa área ser atingida por enchentes, cheias, ou alagamentos e o mapeamento dessas áreas é um recurso que auxilia na tomada de decisões para mitigação desses problemas. Quanto ao risco, ele pode ser definido como a combinação da probabilidade de um evento e suas consequências negativas.

Além da suscetibilidade natural, duas condutas do poder público tendem a agravar ainda mais a situação das áreas suscetíveis a processos de inundação. A primeira tem relação com o fato de que os projetos de drenagem urbana têm como filosofia escoar a água precipitada o mais rapidamente possível para jusante. Este critério, via de regra, aumenta a vazão máxima, a frequência e o nível de inundação de jusante. Soma-se a esta uma segunda conduta comum, onde a falta de estudos técnicos nas escalas adequadas à determinação da aptidão a urbanização e legislação normatizadora da ocupação do solo, ou a falta de meios para aplicar as normas existentes possibilitam a ocupação de áreas ribeirinhas, restringindo a passagem de cheias e ocasionando inundações a montante.

Mesmo sendo os princípios básicos de drenagem urbana largamente estudados e apresentados em manuais, estes não são normalmente empregados em cidades brasileiras, e as principais causas são citadas em Tucci et al. (2002) destacando-se entre elas o rápido e imprevisível desenvolvimento urbano, com tendência à ocupação de jusante para montante, ampliando os riscos de danos; a ausência de programas de prevenção para a ocupação de áreas de perigo e risco e, quando as cheias ocorrem, recursos a fundo perdido são colocados à disposição para a municipalidade sem a exigência de programas de

prevenção; a ausência de conhecimento por parte da população e técnicos locais de como lidar com inundações; e a falta de organização institucional em drenagem urbana em nível local.

A estas questões pode-se acrescentar, entre outros, o subdimensionamento das estruturas de drenagem como pontes e galerias, a falta de manutenção das mesmas, que resulta na redução de suas capacidades de transporte, além da não exigência de estudo dos impactos dos novos empreendimentos na drenagem urbana.

O PMRR aqui descrito, em relação as águas pluviais/fluviais do município de Santa Maria de Jetibá teve por objetivo fornecer subsídios técnicos para a execução de ações que possam contribuir efetivamente para uma expansão urbana adequada no território municipal, bem como a redução dos impactos das inundações na cidade criando as condições para uma gestão sustentável da drenagem urbana. Para tanto, os seguintes objetivos específicos foram perseguidos:

- (1) a cartografia da suscetibilidade e perigo relacionados a processos de inundação no território municipal em escala adequada (1:10.000 ou maior) para a determinação da aptidão a urbanização.
- (2) apresentar diretrizes para o controle dos principais problemas relacionados a cheias no município, tendo como foco a bacia principal;
- (3) mudar o modo com que os problemas relacionados a cheias são encarados no município, por meio da implementação de práticas estruturais e não estruturais que ajudam a reduzir os prejuízos, diminuem os custos de controle e evitam o aumento dos problemas no futuro, podendo ser replicados em outros municípios do país;

Já em relação a cartografia geotécnica, seja ela de suscetibilidade, aptidão ou risco, estes são produtos cartográficos que retratam a distribuição dos diferentes tipos de rochas e solos (residuais e transportados) considerando suas características mecânicas e hidráulicas no contexto do meio físico (formas de relevo, geodinâmica externa – processos atuantes, uso e ocupação do solo), com o intuito de se definir as limitações, potencialidade e necessidades de intervenções para a consolidação do uso urbano e rural (Sobreira & Souza,

2012). Para a elaboração do PMRR e considerando a proposta do método de detalhamento progressivo a menor escala de mapeamento admissível é de 1:2.000, pois neste caso as avaliações e o mapeamento conseguem identificar pequenas áreas/setores (escala de lote), bem como permitem a proposição de soluções para as situações de risco em um nível conceitual ou, se possível, de suporte a projetos (básico e executivo).

Sobreira & Souza (2012) propõem que o modelo do detalhamento progressivo seja seguido também em práticas de planejamento e ordenamento urbano, com os níveis hierárquicos representados pela suscetibilidade (geral), aptidão à urbanização (semi-detalle ou intermediário) e risco (detalle), sendo que no caso em questão as cartas de perigo/risco geológico e hidrológico foram geradas para dar suporte ao planejamento urbano, às ações de prevenção e emergência.

### 3.1 Etapas do Plano Municipal de Redução de Risco

Para a elaboração do PMRR de Santa Maria de Jetibá - ES a seguinte metodologia de trabalho e respectivas etapas de trabalho foram desenvolvidas:

#### 3.1.1 *Consolidação do plano de trabalho*

A Etapa de consolidação do plano de trabalho iniciou-se com a definição e homogeneização das bases conceituais principais. Em seguida procedeu-se à avaliação preliminar das informações, mapas, imagens de satélite, fotos do município, documentos gerados pela Defesa Civil estadual e municipal, e informações do mapeamento emergencial elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM. Com os dados disponíveis levantados tornou-se possível a realização de visitas técnicas ao município com o propósito de reconhecimento inicial do meio físico, processos geodinâmicos ocorrentes, histórico de eventos e impacto dos mesmos, bem como informações mínimas para a realização de estudos preliminares. A partir dos dados obtidos em campo durante o reconhecimento inicial ocorreu à adaptação da metodologia do trabalho, a partir da metodologia proposta

pelo Ministério das Cidades, para o mapeamento do risco geológico, e proposta metodológica para o mapeamento do perigo/risco hidrológico, com definição as especificidades sobre a condução do PMRR e acompanhamento deste pelos técnicos municipais.

#### 3.1.2 *Preparação e montagem da base cartográfica*

Durante a elaboração do Plano de Trabalho Consolidado foram iniciados os trabalhos referentes à preparação e montagem da base cartográfica. O material cartográfico disponível obtido para o município de Santa Maria de Jetibá estava em consonância com a escala de trabalho adotada destacando-se entre as informações mais relevantes o levantamento aerofotogramétrico, com ortomosaico na escala 1:15.000, disponível no formato raster extensão.ecw; elementos planialtimétricos do mapeamento sistemático do IBGE tais como setores censitários 2010, disponibilizado em formato vetorial na extensão.shp, estrutura conforme padrão do IBGE e a mancha urbana, entre outros atributos, além de base de dados alfanumérica (geodatabase), abrangendo todos os municípios, disponível em formato vetorial na extensão.shp; OTTOBACIAS, que são bacias hidrográficas de abrangência estadual, ottocodificadas até nível 7, georreferenciada com atributos, em geodatabase, disponível em formato vetorial na extensão.shp; e imagens de Satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite), ano 2009 e 2010, com resolução espacial de 10 m, e classificação de diversas categorias do uso e ocupação do solo, cobrindo todo o município.

#### 3.1.3 *Mapeamento hidrológico-hidráulico*

O mapeamento hidrológico-hidráulico teve como foco a bacia hidrográfica do Rio São Luiz que engloba o principal aglomerado populacional do município, o seu distrito Sede, e que, segundo a defesa civil municipal, tem histórico de problemas de inundação mais frequentes. A bacia do Rio São Luiz possui área de drenagem de 23,18 Km<sup>2</sup>, com nascente localizada na comunidade que dá nome ao rio. Observa-se que, nesta bacia, existe

um intenso uso do solo, principalmente para atividades hortifrutigranjeiras, além de outras atividades agropastoris.

O Rio São Luiz, no centro de Santa Maria de Jetibá, apresenta declividade reduzida. Após o Centro de Santa Maria de Jetibá, a declividade aumenta abruptamente em trecho encachoeirado. O presente estudo analisou a situação da macrodrenagem até o trecho final do bairro Centro, sendo que a bacia do Rio São Luiz foi dividida em 15 bacias urbanas e 20 bacias rurais e periurbanas. As vazões provenientes de cada uma das sub bacias do Rio São Luiz foram apropriadas utilizando o modelo HEC-HMS.

A proposta de elaboração do mapeamento hidrológico-hidráulico foi baseada em sete princípios fundamentais. O primeiro deles define as Bacias hidrográficas como unidades de planejamento, o que permite que o excesso de escoamento superficial seja controlado na fonte, evitando a transferência para jusante do aumento do escoamento e da poluição urbana. O segundo princípio destaca que o diagnóstico deve ser executado na escala de detalhe (1:5.000 ou maior) em compatibilidade com a definição efetiva da aptidão a urbanização através de uma abordagem interdisciplinar, bem como a futura solução dos problemas de inundação integradas à paisagem e aos mecanismos de conservação do meio ambiente. No terceiro princípio proposto ressalta-se a importância da identificação da distribuição da água pluvial no tempo e no espaço, englobando as áreas já ocupadas e com histórico de cheias, bem como as áreas definidas para a expansão urbana do município, de forma a permitir análises correlacionando a tendência de ocupação urbana para um horizonte mínimo de planejamento de 20 anos, compatibilizando esse desenvolvimento e a infraestrutura para evitar prejuízos sociais, econômicos e ambientais. O quarto princípio destaca a importância da incorporação dos estudos na cultura da administração municipal, principalmente nos setores diretamente responsáveis pelo planejamento urbano e serviços de águas pluviais. O quinto princípio está relacionado à necessidade de institucionalização e incorporação dos resultados na legislação municipal, em especial no Plano Diretor do Município. Já o sexto princípio, este tem relação com a necessidade de se controlar

a ocupação de áreas suscetíveis e de perigo/risco de inundação através de regulamentação. Por último sugere-se a promoção de ações visando a convivência segura com as enchentes nas áreas de médio e baixo perigos/riscos identificados.

Para o mapeamento hidrológico-hidráulico foram utilizadas informações levantadas junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE, Agência Nacional de Águas-ANA, Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo-GEOBASES, Companhia Espírito Santense de Saneamento-CESAN, Prefeitura municipal e em visitas a campo. Além dos dados obtidos de fontes secundárias foram necessários para o desenvolvimento deste trabalho estudos topográficos com a geração de seções transversais ao longo dos canais; cadastro das redes pluviais; macrodrenagem natural e construída; fotos aéreas e imagens de satélite antigas e atuais da região; informações climatológicas; levantamento de dados dos setores censitários; pedologia e uso do solo na escala de detalhe; delimitação de bacias, vias de acesso, comunidades, entre outros; informações sobre as inundações municipais (áreas com recorrência de atingimentos, contornos e cotas das linhas de inundação, trechos críticos, singularidades dos sistemas, eventos pluviométricos críticos relacionando os níveis de inundação e a frequência; verificação de projetos existentes, restrições técnicas, restrições legais, político-administrativas, ambientais e hidrológicas à expansão urbana; e entrevista com as pessoas de referência no assunto de planejamento urbano e de águas urbanas na prefeitura, com levantamento de documentos e trabalhos existentes ou em execução, incluindo o Plano Diretor Municipal.

Foram descartados dados fora da área de estudo, e cuja qualidade não foi considerada adequada bem como a escala incompatível com o nível de detalhamento proposto para o trabalho, problemas no georreferenciamento, dados desatualizados, dados hidrológicos com períodos inadequados, entre outros.

Os dados fornecidos no formato shapefile foram recortados, de modo a abranger toda a área de estudo e projetados para Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum SIRGAS 2000, zona 24 S, equalizando o sistema de

projeção utilizado. Para o material digital e georreferenciado, a escala dos mapas se ajustaram entre si no sistema de informação geográfica construído.

Posteriormente foram elaborados os mapas de suscetibilidade e de perigo/risco atual e futuro, construídos a partir da determinação dos valores dos CN (coeficiente de escoamento) de acordo com o tipo de solo, uso do solo e manejo agrícola, sendo que CN é um valor tabelado e relacionado ao uso do solo e ao tipo hidrológico do solo; da elaboração dos mapas pedológicos, dos mapas de uso e ocupação do solo atual e futuro; da geração das equações de chuva intensa, onde a estação pluviométrica Santa Maria de Jetibá (código 204000) foi a escolhida para a apropriação da equação intensidade-duração-frequência de chuvas do município por possuir o maior número de anos com dados, por estar funcionando até os dias atuais e por estar dentro da bacia em estudo (os valores diários de chuva foram obtidos no sítio oficial da Agência Nacional de Água - [www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)); da determinação do tempo de concentração das sub-bacias; da apropriação dos valores das vazões de projeto; da realização da modelagem hidráulica; e da elaboração e apresentação propriamente dita do mapeamento de suscetibilidade e perigo/risco utilizando as ferramentas do ArcGis 10.1.

Para o desenvolvimento do modelo hidráulico foram utilizadas curvas de nível com equidistância vertical de 2 metros, sendo complementadas por levantamento topográfico realizado especificamente para o presente trabalho, a fim de detalhar dispositivos hidráulicos localizados na área de estudo. A partir dos dados de topografia, foi construído um TIN - Triangulated Irregular Network da área modelada, que foi a base de entrada de dados do modelo HEC-RAS.

Utilizando o modelo HEC-HMS, as vazões dos cursos d'água foram simuladas a partir da precipitação. Estas vazões foram utilizadas como variáveis de entrada do modelo HEC-RAS e as cotas do nível d'água simuladas pelo modelo foram comparadas com as cotas verificadas em campo. A partir desta comparação, o modelo foi calibrado por meio da variação de valores de parâmetros hidráulicos do mesmo, buscando aproximar os resultados das simulações com aqueles medidos em campo.

### 3.1.3 Mapeamento geológico-geotécnico

Para o mapeamento geotécnico foram avaliadas todas as áreas urbanizadas do município, incluindo além do próprio núcleo urbano os distritos. O risco geológico em áreas urbanas não depende apenas das características intrínsecas dos materiais envolvidos nos processos geodinâmicos, da morfologia das encostas ou do regime pluviométrico da estação chuvosa. Está diretamente relacionado à forma de ocupação, tanto em encostas como em baixadas, e à conscientização da população envolvida no que tange a alteração da geometria das encostas sem critérios técnicos ou ocupação de áreas geologicamente instáveis.

Os trabalhos de campo foram constituídos, basicamente, por investigações geológico-geotécnicas de superfície, buscando identificar condicionantes dos processos de instabilização, existência de agentes potencializadores e evidências de instabilidade ou indícios do desenvolvimento de processos destrutivos.

Inicialmente ocorreu a definição dos critérios para elaboração do mapeamento de perigos/riscos de acordo com a publicação “mapeamento de riscos em encostas e margens de rios” do Ministério das Cidades (Brasil, 2007). Definidos os critérios o passo seguinte foi à identificação e análise do perigo/risco geológico dentro do município de Santa Maria de Jetibá. Os objetivos específicos desta atividade foram: (1) identificar evidências, (2) analisar os condicionantes geológico-geotécnicos e ocupacionais que as determinam e (3) avaliar a probabilidade de ocorrência de processos associados a deslizamentos em encostas e solapamentos de margens de córregos, (4) delimitar os setores das encostas que pudessem ser afetados por cada um dos processos destrutivos potenciais identificados na base cartográfica, (5) estimar o número de moradias de cada setor de risco.

A atribuição do grau de probabilidade de ocorrência de processo de instabilização, teve com base nos critérios descritos em Brasil, (2007) considerando a seguinte classificação: risco muito alto (R4), risco alto (R3), risco médio (R2) e risco baixo a inexistente (R1).

Definida a hierarquização do perigo/risco o passo seguinte foi a elaboração do Plano de Intervenções Estruturais para Redução de Perigos/

Riscos. As proposições de intervenção foram indicadas visando a melhor relação custo x benefício. Estabelecidas as obras necessárias para a eliminação do perigo/risco identificado em cada setor, foram estimados os custos necessários para cada obra/serviço, somando-se aqui os custos com a remoção de famílias. Em relação ao estabelecimento de referências para a composição de custos das obras, a planilha de composições de preços para orçamentos adotada foi a disponível no sistema da Caixa Econômica Federal - SINAPI.

A quantificação do risco teve como unidade de análise a edificação e não a família. O levantamento do número de famílias em risco demandaria o cadastramento social da população para viabilizar a análise do número de domicílios por edificação. O trabalho social dentro do Plano Municipal de Redução de Riscos teve como foco permitir que o conhecimento resultante da investigação sobre a situação de risco no município de Santa Maria de Jetibá seja apropriado pela população local, sejam estes técnicos vinculados à administração municipal, lideranças comunitárias e/ou a própria poluição envolvida.

#### 4 RESULTADOS DO MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE INUNDAÇÃO

Os principais problemas de macrodrenagem diagnosticados do município de Santa Maria de Jetibá podem ser assim resumidos:

- a) redução da eficiência hidráulica de pontes por estruturas de fundação de pontes antigas que ainda estão no local, que acabam por acumular lixo embaixo das atuais pontes;
- b) assoreamento e crescimento de vegetação rasteira em diversos trechos de canal;
- c) presença de resíduos sólidos e entulhos no interior dos canais que ficam presos a obstáculos como rochas e tubulações e;
- d) tubulações de esgoto que atravessam os canais dentro da área da seção hidráulica do escoamento.

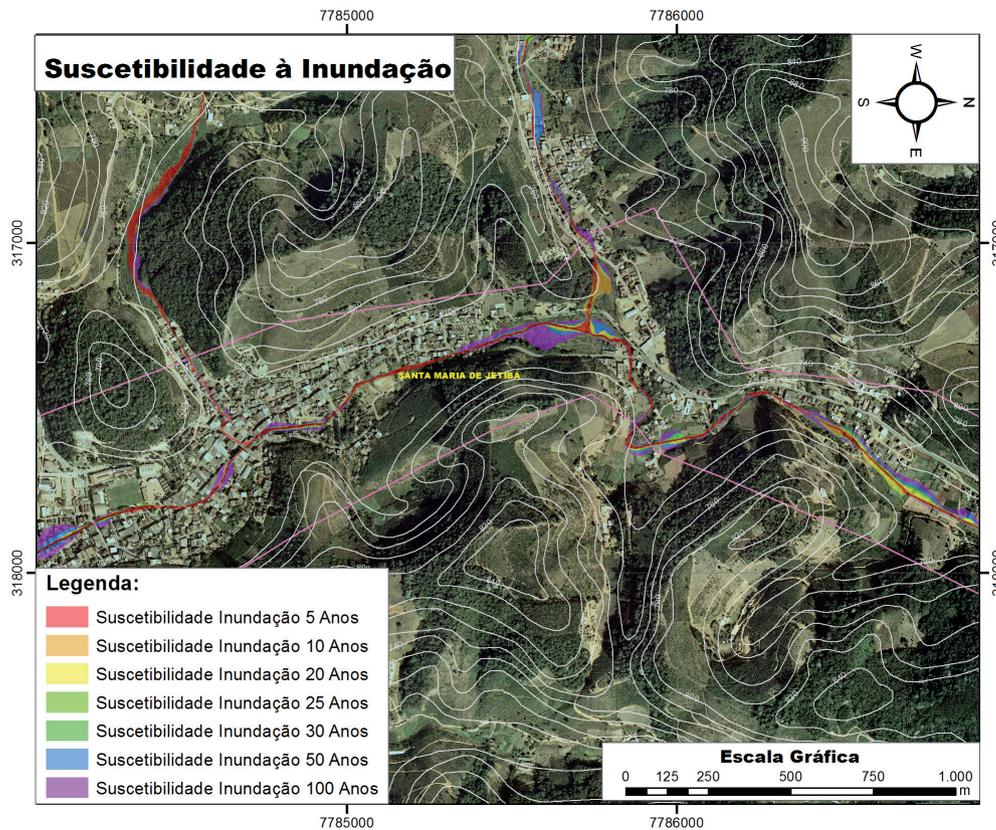
Como o modelo hidrológico gerou uma geometria com um número significativo de elementos hidrológicos, decidiu-se pela execução da modelagem de um elemento hidrológico único da bacia hidrográfica do Rio São Luiz. Neste caso, adotou-se uma bacia com área de 23,18 Km<sup>2</sup>, CN médio

de 46,21 e Lag Time de 88,1 minutos. A simulação da vazão para a chuva com tempo de retorno de 25 anos resultou em 15,2 m<sup>3</sup>/s, enquanto que o modelo com os diversos elementos hidrológicos das sub-bacias do Rio São Luiz resultou em uma vazão igual a 18 m<sup>3</sup>/s. Considerou-se, portanto, que as vazões simuladas pela geometria mais complexa está simulando as vazões com uma faixa de erro aceitável, uma vez que a vazão simulada está aproximadamente 15% maior que a vazão simulada pelo elemento hidrológico que representa toda a bacia hidrográfica do Rio São Luiz.

Foi definido como domínio do modelo o trecho urbano Rio São Luiz, assim como seus principais córregos afluentes, o córrego Vila Jetibá e o córrego São Sebastião do Meio, contemplando os bairros São Luiz, Vila Jetibá, Vila Nova, São Sebastião do Meio e Centro, totalizando uma extensão total de 13,4 Km.

Durante as visitas de campo, foram identificadas cotas da última enchente significativa, cujas alturas máximas puderam ser identificadas pelas marcas d'água ainda presentes em muros, residências e outros elementos construídos, as quais foram registradas durante as visitas em campo. Os níveis d'água verificados em campo são relativos à cheia que ocorreu em dezembro de 2010, quando ocorreu um evento de chuva de 188 mm, cuja recorrência foi estimada em 60 anos.

A Figura 4 retrata o Mapa de Suscetibilidade à Inundação para o município de Santa Maria de Jetibá - ES, como resultado da modelagem hidráulica. O mapa apresenta as áreas previstas de serem inundadas por cheias com períodos de retorno de 5, 10, 20, 25, 30, 50 e 100 anos. Observa-se uma quantidade razoável de domicílios que se encontram nas áreas classificadas como suscetíveis, principalmente aqueles mais próximos ao Rio São Luiz. No córrego Vila Jetibá, onde houve a ocupação mais intensa das margens deste, foi possível identificar áreas de suscetibilidade muito alta, com casas edificadas muito abaixo do nível da rua. Verificou-se que no total 65 domicílios encontram-se nas áreas com recorrência de inundação de 5 anos. Quando se trata da inundação com recorrência de 25 anos, o número de domicílios atingidos cresce para 100, com um aumento significativo de pessoas expostas.



**Figura 4** – Carta de suscetibilidade a inundação de parte do Município de Santa Maria de Jetibá – ES.

As medidas estruturais, que são as obras destinadas à redução do risco de inundações, foram apresentadas na forma de estudos preliminares para todas as intervenções e de projetos para as intervenções específicas selecionadas pelo Governo Estadual. O nível de detalhamento das intervenções estruturais foi compatível com o nível de planejamento. Um dos cenários de intervenção propostos se referiu à implantação de um canal de gabião no Rio São Luiz no trecho em que este corta o bairro Centro, além da construção de uma galeria no córrego Vila Jetibá.

Complementarmente as análises foram propostas medidas não estruturais constituídas pelas posturas que deverão ser incorporadas na legislação de uso e ocupação do solo, e medidas de gestão que deverão ser implantadas na administração municipal. Estas foram apresentadas para a área urbana do município e englobaram propostas para o controle do uso e ocupação do solo a serem incorporadas pelo município por projeto de lei ou pela revisão e atualização do Plano Diretor Municipal; a aplicação do princípio jurídico pelo qual o proprietário, ao vender sua propriedade, deve

oferecê-la, em primeiro lugar, ao poder público; a reformulação do sistema de gestão considerando-se as características do sistema de drenagem proposto; a legislação voltada ao gerenciamento de áreas de perigo/risco, APP, águas pluviais e controle de impactos decorrentes do desenvolvimento municipal; a criação de parques lineares ao longo das várzeas de inundação natural ainda não ocupadas; e a criação de parques nas cabeceiras dos rios principais para proteção dos rios contra assoreamento e proteção da qualidade da água, entre outras.

## 5 RESULTADOS DO MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE PERIGO/RISCO GEOLÓGICO

O mapeamento do perigo/risco foi feito a partir de uma abordagem integrada dos aspectos do meio físico inventariados e, principalmente trabalhos de campo na escala 1:2.000 (cadastro). Uma vez montada a plataforma SIG tornou-se possível a delimitação dos setores identificados em campo sobre as informações cartográficas inventariadas, bases topográficas e imagens. Como documento

final do mapeamento tem-se um relatório com a identificação, representação e descrição de setores na paisagem (áreas urbanas) com condicionantes naturais que indicam a possibilidade de ocorrência de um processo, assim como as áreas sob

influência (atingimento) destes. Parte dos resultados obtidos nos trabalhos de mapeamento pode ser visualizado na Figura 5, por setor identificado (Figura 5).

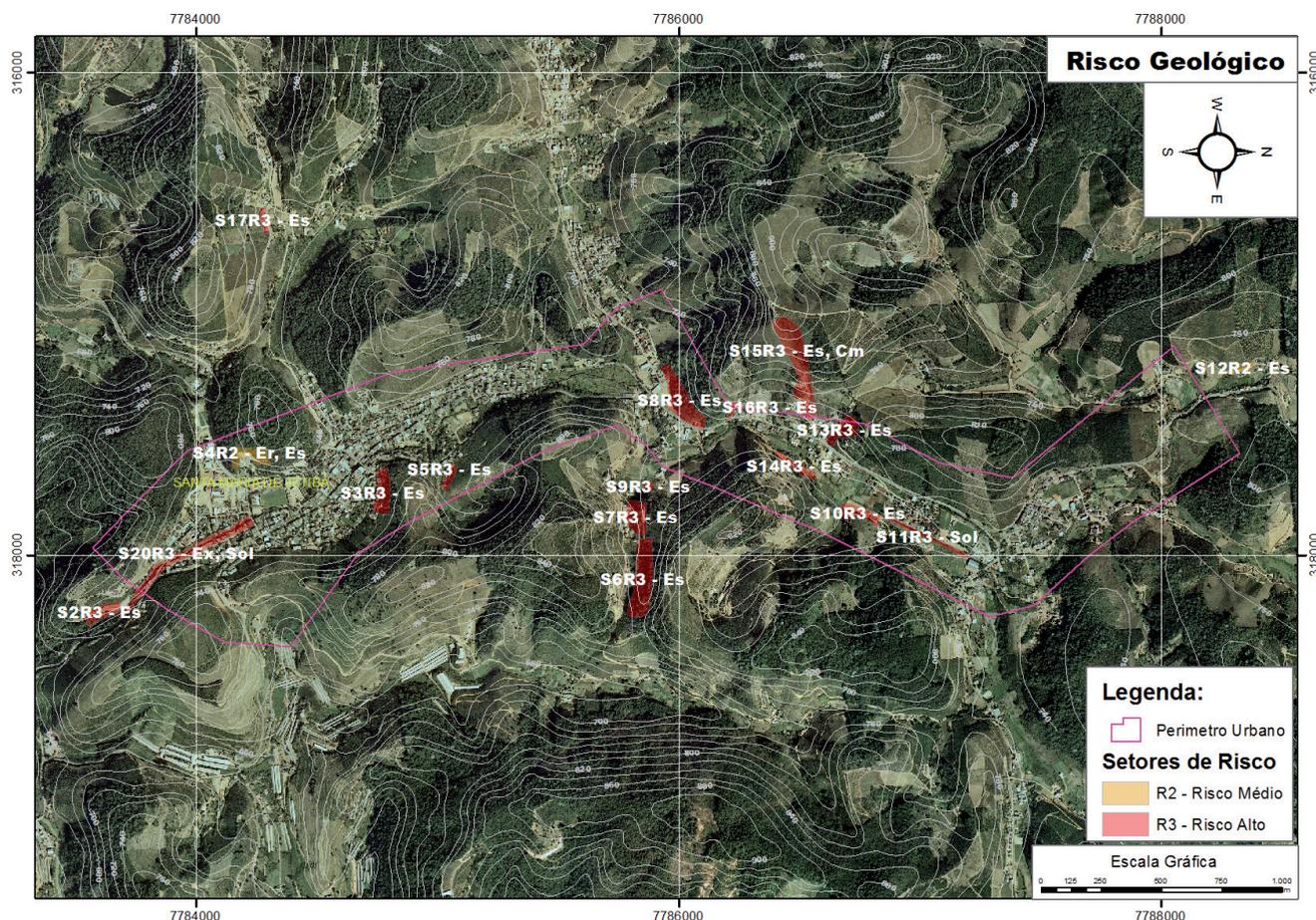


Figura 5 - Setores de risco geológico identificados em parte da sede do município de Santa Maria de Jetibá - ES.

O diagnóstico de risco geológico do município de Santa Maria de Jetibá foi realizado indistintamente na sede e nos distritos, em áreas correspondentes a assentamentos precários, loteamentos e bairros regulares, onde julgou-se haver situações de risco geológico. Foram delimitados e caracterizados 20 setores de perigo/risco, sendo 18 setores classificados como de perigo/risco geológico alto e 2 setores classificados como de perigo/risco médio, distribuídos ao longo das áreas mapeadas. Foram identificados 138 domicílios entre os níveis de perigo/risco geológico apontados no diagnóstico, quais sejam alto ou médio. Entretanto, em situação de perigo/risco alto existem 136 domicílios, o que corresponde às situações prioritárias para intervenção.

A realização das atividades de identificação e mapeamento dos setores de perigo/risco geológico contribuiu para a qualificação do conhecimento sobre os riscos associados a deslizamentos e processos correlatos na sede do município e distritos, por meio da setorização, da estimativa de moradias afetadas, e do estabelecimento de graus e tipologias de suscetibilidades e perigo/risco. Possibilitou ainda, a elaboração do mapa dos setores de perigo/risco geológico do território municipal relacionado aos processos de deslizamento, solapamento e, secundariamente erosão, com a geração de fichas de campo para cada setor identificado, contendo não só as características do setor, mas também as proposições de intervenção estruturais e não estruturais para a eliminação/

redução do perigo/risco, e/ou convivência segura com o quadro diagnosticado.

As situações de perigo/risco alto ocorrem em todo o município, destacando-se os bairros Centro, Rio Posmosser, Vila dos Italianos, Vila Nova, Alto São Sebastião, e Beira Rio e São Luis.

A atividade de elaboração do plano de intervenções estruturais para redução de risco apresentou como produto, além das descrições das intervenções nas fichas de campo, a compilação de custos e priorização das obras formatadas por setor, além da síntese dos resultados para o município. O custo total estimado foi calculado tomando-se como base as planilhas de referência SINAPI.

As ações não estruturais propostas buscaram a formulação de uma política municipal de gerenciamento de riscos e a identificação de fontes de recursos e programas para implementação do PMRR do município de Santa Maria de Jetibá-ES. Entre as diversas análises e proposições ressaltou-se a caracterização do contexto institucional municipal relacionado à gestão do risco, a avaliação da estrutura institucional do município na área urbana e habitacional, a avaliação das ações governamentais do município na área urbana e habitacional, a avaliação das posturas legais mais impactantes e gargalos institucionais, a avaliação da legislação e programas nas esferas Municipal, Estadual e Federal, e o levantamento de possíveis fontes de recursos nas esferas Municipal, Estadual e Federal e, principalmente, ações que devem ser aplicadas visando à reestruturação e o fortalecimento do sistema municipal de defesa civil de Santa Maria de Jetibá.

## 6 CONCLUSÕES

A crescente ocupação desordenada, principalmente dos centros urbanos tem levado a ocupação de áreas suscetíveis a processos geodinâmicos elevando a probabilidade da ocorrência de desastres sócio naturais como inundações e deslizamentos. Por isso, o planejamento urbano torna-se essencial tanto para impedir uma expansão urbana em áreas inadequadas, quanto na mitigação e resposta rápida aos desastres.

Para a elaboração de um planejamento adequado é necessário um bom levantamento de

informações e um mapeamento compatível com essa necessidade. Entretanto, são encontrados obstáculos a essa proposta devido à dificuldade de um levantamento na escala de detalhe, que remonta a necessidade de visitas a campo, conhecimento especialista e utilização de informações cartográficas de fontes e escalas de detalhamento variadas. Mesmo assim, ressalta-se a necessidade de que estudos voltados a identificação dos perigos/riscos geológicos e hidrológicos sejam realizados em escalas de detalhe (1:5.000 ou maiores), o que implica na maioria das vezes na geração de dados primários, considerando o objetivo de que os resultados alcançados deem subsídio para a elaboração de propostas, seja para o planejamento urbano e ordenamento territorial dos municípios, seja para a minimização, redução, eliminação e efetiva gestão do risco.

O PMRR de Santa Maria de Jetibá foi estruturado considerando ações para que se torne público e apropriado pela população envolvida, com o desenvolvendo de um trabalho educativo, informativo e de mobilização junto à população moradora nas áreas de perigo/risco, através das lideranças comunitárias e de entidades da sociedade civil.

Em relação à Gestão do Risco no município cabe destacar que além dos produtos cartográficos gerados, foi entregue ao município um programa de gestão de risco com a proposição de ações de monitoramento, fiscalização e controle de riscos envolvendo vistorias periódicas e sistemáticas em todas as áreas diagnosticadas; proposição de estruturação de equipe técnica, com formação e atribuição diversificada; proposição de formas de registro contínuo de todas as informações coletadas no campo e/ou junto à população e, consequentemente, atualização permanente dos mapas de riscos; foi entregue a prefeitura uma proposta de gestão de proximidade, onde o monitoramento de cada área deve feita sempre que possível pelos mesmos agentes públicos, para que estes adquiram maior conhecimento sobre a área e gozem da confiança dos moradores; outra necessidade levantada foi a existência de um plantão de atendimento público e outros canais permanentes de comunicação com os moradores das áreas de risco para apresentação de demandas, solicitação de vistorias e informação sobre “problemas que

podem causar risco”, somando-se a esse a necessidade de fortalecimento dos núcleos de proteção e defesa civil, e/ou dos grupos de referência constituídos por moradores das áreas de perigo/risco, voluntários e lideranças populares, que devem ser informados e capacitados, de forma a envolver a população nas ações de prevenção, monitoramento e fiscalização das áreas de perigo/risco, por meio de uma gestão compartilhada.

As cheias do Rio São Luiz são frequentes e os problemas oriundos das mesmas vêm se agravando devido ao avanço da população para as proximidades de suas margens, e para a ocupação das áreas mais a montante da bacia hidrográfica.

Observou-se, a partir da modelagem hidráulica, que 65 domicílios estão na área classificada como de perigo/risco muito alto (inundação com 5 anos de recorrência), e que 100 domicílios são inundados com vazões de 25 anos de recorrência (vazão de projeto).

As “obras de arte especiais” da Rua Augusto Martin Germano Vesper, da Rua Francisco Shartz com a Rua Ronald Berger e da Rua do Imigrante não apresentam eficiência hidráulica para a vazão de projeto de 100 anos de recorrência no cenário atual. Para uma chuva intensa com período de retorno de 25 anos, prevê-se que a vazão no trecho final do Rio São Luiz passe de 18 m<sup>3</sup>/s para 24 m<sup>3</sup>/s (aumento de 34,83%) em 20 anos, caso se confirme a tendência de expansão urbana prevista.

O Plano de Intervenções Estruturais para o Município de Santa Maria de Jetibá, que corresponde a uma das etapas do Plano Municipal de Redução de Risco - PMRR, demonstrou a viabilidade de melhorar as condições de convivência com o risco na cidade a curto e médio prazo e apontou as necessidades de intervenções imediatas para eliminação das situações classificadas como de perigo/risco alto e muito alto.

A finalização do trabalho ocorreu com a proposição de planos de ação para redução do perigo/risco visando à implementação de ações, programas, diretrizes e medidas para a redução, mitigação e prevenção de perigos/riscos relacionados às inundações, solapamento de margens, movimento de massas e deslizamentos, conforme diagnóstico executado no município de Santa Maria de Jetibá, que foram divididos em Planos de Controle Ambiental, Planos de Ordenamento

Territorial, Planos de Estruturação Institucional e Planos de Drenagem Urbana.

## REFERÊNCIAS

Alkmin F.F & Marschak S. 1998. Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Prec. Res.*, 90: 29-58.

Almeida F.F.M. 1976. Estruturas do Pré-Cambriano inferior brasileiro. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Ouro Preto. Resumos dos trabalhos...Belo Horizonte: SBG-Núcleo Minas Gerais, p. 201-202.

Almeida F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo: SBG, v. 7, n. 4, p. 349-364.

Brasil, Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. 2007. Mapeamento de Risco em Encostas e Margens de Rios / Celso Santos Carvalho. Eduardo Soares de Macedo e Agostinho Tadashi Ogura, Organizadores - Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. 176 P..

Brasil. LEI n. 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção de Defesa Civil. Casa Civil. Subchefia para assuntos jurídicos.

Cassetti V. 1991. Ambiente e apropriação do relevo. São Paulo: Contexto.

Christofolletti A. 1980. Geomorfologia. São Paulo: Edgard Blücher, 2<sup>a</sup> ed. 188p.

George M. & Schensul D. (Eds) 2013. The demography of adaptation to climate change. New York, London, and Mexico City: UNFPA, IIED and El Colegio de Mexico.

Oliveira G. G. & Guasselli L. A. 2011. Relação entre a Suscetibilidade a Inundações e a Falta de Capacidade nos Condutos da Sub-bacia do Arroio da Areia, em Porto Alegre/RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, n.1, v. 16, p. 05-15.

Ross J. S. 1992. Registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. Rev. Geografia. São Paulo, IG-USP.

Secretaria Estadual de Desenvolvimento Urbano do Estado do Espírito Santo. 2013. Plano Municipal de Redução de Risco do município de Santa Maria de Jetibá. Espírito Santo.

Sobreira F. G. & Souza L. A. 2012. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo, n. 2, v. 2, p. 79-97.

Tucci C. E. M. 1998. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre: Editora da Universidade / UFRGS / Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 669p.

Tucci C. E. M. 2002. Regionalização de vazões. – Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH.

Tucci C. E. M. 2003. Workshop for decision makers on flood in South America (Nov 2002: Porto Alegre, RS. Porto Alegre.

UFSC. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010. 2012. Volume Espírito Santo. Florianópolis: Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres - CEPED/ UFSC.



# DIRETRIZES PARA AUTORES

## PREPARAÇÃO PARA SUBMISSÃO

**Tipo e Tamanho de Arquivo:** O texto do manuscrito deverá ser enviado em **arquivo Word (.doc)**, **em separado**, com os locais de inserção das figuras assinalados, seguido das respectivas legendas. As **ilustrações** deverão ser enviadas em **arquivo .tif**, também **em separado** (uma ilustração por arquivo). O mesmo procedimento deverá ser adotado para as **tabelas**, em arquivo. doc.

O artigo não poderá ultrapassar a **10.000** palavras ou **20 páginas**, incluindo título, autores, instituições e e-mail, resumo e palavras-chave, abstract e keywords, texto, figuras, tabelas, mapas, referências e legendas.

Nenhum **arquivo** poderá ultrapassar a **10Mb** de tamanho.

**Forma de envio:** O texto deverá ser enviado junto com as **ilustrações** (inclusive tabelas) no Sistema Eletrônico de submissão (ver passos práticos para envio de manuscritos na página da RBGEA, no ítem “Instruções para envio de artigos”).

## ARTIGOS

**Organização de artigos:** deverá constar em sequência, o título, nome completo do(s) autor(es), instituição e e-mail (nome da instituição, cidade, estado, país e e-mail. Para alunos de mestrado ou doutorado, indicar “Programa de Pós-graduação”, instituição, e demais informações acima), resumo e palavras-chave, abstract e keywords, texto completo, referências, ilustrações e tabelas. O texto deve conter, preferencialmente: introdução, materiais e métodos, resultados, discussão, conclusões e agradecimentos.

**Hierarquização dos títulos e subtítulos:** Deve seguir o padrão:

Nível 1 - EM **NEGRITO**, TODAS AS LETRAS MAIÚSCULAS.

Nível 2 - Em **negrito**; a primeira letra da primeira palavra em maiúscula e as demais minúsculas.

Nível 3 - **ITÁLICO**, NÃO **NEGRITO**, TODAS AS LETRAS MAIÚSCULAS.

Nível 4 - **Itálico**, não **negrito**; a primeira letra da primeira palavra em maiúscula e as demais minúsculas.

Agradecimentos - **Negrito e itálico** (apenas o subtítulo). **Referências - Negritas e minúsculas** (apenas o subtítulo).

Manter um espaço simples entre itens e subtítulos do texto. Utilizar fonte Times New Roman, tamanho 11.

A indicação da inserção das ilustrações (figuras, tabelas, etc) no texto deverá ser em posição o mais próximo possível de sua primeira citação.

**Formato do Resumo, Resúmen e o Abstract:** Não poderão exceder 300 palavras cada, em parágrafo único, fonte Times New Roman, corpo 10, espaço simples (1,0) e serem seguidos de palavras-chaves, palabras claves e keywords (no mínimo 3 e máximo 5), respectivamente. Artigos em português, espanhol ou francês deverão ter o título vertido para o idioma inglês, em **MAIÚSCULO E ITÁLICO**, colocado após a palavra Abstract.

**Formato do texto:** Editar o texto em Word, fonte Times New Roman, corpo 11, espaço simples, papel A4, orientação em retrato e editado em apenas uma coluna. As margens deverão ter as seguintes medidas: superior: 2,0; inferior 2,0; esquerda 3,0 e direita 2,0. Digitar as tabelas em documentos word.

**Abreviações:** Devem ser evitadas ou mantidas ao mínimo. Se usadas, devem ser definidas na primeira vez que forem mencionadas e não devem ser utilizadas no título, resumo e abstract.

**Ilustrações:** A versão impressa da RBG publica ilustrações em preto e branco e tons de cinza. A versão “on line” publicações coloridas. As fontes usadas para textos sobre fotografias deve ser uma da família da Helvética.

As ilustrações gráficas, fotográficas e fotomicrográficas serão numeradas seqüencialmente, na ordem de sua citação no texto e consideradas, mesmo pranchas, indiscriminadamente como Figuras. Deverão ser separadas do texto por uma linha. Não serão aceitos encartes. Fotografias de afloramentos deverão apresentar barra de escala e indicação do norte.

**Letreiros e símbolos das ilustrações** devem ter dimensões adequadas para permitir legibilidade. **As ilustrações** deverão ter **larguras** mínimas de **9** ou **18** centímetros (permitir diagramação em uma ou duas colunas). Explicar todos os símbolos. Escalas gráficas, se necessárias, devem ser colocadas dentro da área das ilustrações.

As **Tabelas** devem ser auto-explicativas, com as laterais abertas, concisas e numeradas seqüencialmente. Devem ser elaboradas em Times New Roman, corpo 9. As legendas das ilustrações deverão ser redigidas com a mesma fonte do texto e corpo.

**Formato das Figuras:** Só serão aceitas figuras .tif, devendo ter **resolução mínima de 300dpi**, com tamanhos largura de 8,7 cm ou de 17,7, com comprimento máximo de 21 cm.

**Fórmulas e Equações:** Numerar as fórmulas e equações seqüencialmente à direita, com números arábicos entre parênteses e, no texto, referir como “equação (1)”, etc.

**Citações no corpo do texto:** Deve-se seguir os formatos do seguinte exemplo: ...”Cunha (1985) interpreta a feição como uma estrutura de resfriamento magmático precoce, mas outros (Lima 1986, Fonseca **et al.** 1989, Ferreira & Araújo 1994) como uma feição tardia”.

**Referências: Relatórios internos são serão aceitos** nas referências, com excessão daqueles que são amplamente difundidos na comunidade científica e autorizados pelos consultores **ad hoc**. As referências deverão ser feitas em Times New Roman, corpo 10. Ao final do texto, ordenar as referências em ordem alfabética do sobrenome do primeiro autor, empregando os seguintes formatos:

#### LIVROS:

Arndt N.T. & Nisbet E.G. (Eds.) 1982. **Komatiites**. George Allen & Unwin, London, 526 pp.

#### CAPÍTULOS DE LIVROS:

Pollack H.N. 1997. Thermal characteristics of the Archean. **In:** M. de Wit & L.D. Ashwal (eds.) **Greenstone belts**. Oxford Monographs on Geology and Geophysics, 25, Oxford University Press, p.: 223-232.

#### ARTIGOS DE PERIÓDICOS:

Resende M.G. & Jost H. 1995. Petrogênese de formações ferríferas e metahidrotermalitos da Formação Aimbé, Grupo Guarinos (Arqueano), Goiás. **Rev.Bras. Geoc.**, 25:41-50.

Resende M.G., Jost H., Osborne G.A., Mol A. 1998. The stratigraphy of the Goiás and Faina greenstone belts, Central Brazil: a new proposal. **Rev. Bras. Geoc.**, 28:1-15.

Sabóia L. A. 1979. Os **greenstone belts** de Crixás e Goiás, Go. **In:** SBG, Núcleo Centro-Oeste, **Boletim Informativo**, 9:44-72.

#### ARTIGOS EM PUBLICAÇÕES SERIADAS:

Barbosa O., Braun O.P.G., Dyer R.C., Cunha C.A.B.R. 1970. **Geologia da região do Triângulo Mineiro**. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, Boletim 136, 140 p.

#### TESES E DISSERTAÇÕES:

Resende L. 1995. Estratigrafia, petrografia e geoquímica da seqüência sedimentar do greenstone Belt de Pilar de Goiás, GO. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 124 p.

#### ARTIGOS PUBLICADOS EM EVENTOS:

Tassinari C.C.G., Siga Jr. O, Teixeira W. 1981. Panorama geocronológico do centro-oeste brasileiro: solução, problemática e sugestões. **In:** SBG, Simp. Geol. Centro-Oeste,1, **Atas**, p. 175.

#### ARTIGOS EM JORNAL:

Coutinho W.O. 1985. O Paço da cidade retorna ao seu brilho barroco. *Jornal do Brasil*, Rio de Janeiro, 6 mar. Caderno B, p.6.

#### ARTIGOS AINDA NÃO PUBLICADOS:

Silva R.C. (em preparação). Tectônica na região do Alto Iguaçu-PR. Pereira E.W. (submetido). Evolução geológica da faixa de dobramentos Açungui. *Revista Brasileira de Geociências*. Silva R.C. (no prelo). Tectônica na região do Alto Iguaçu-PR. *Revista Brasileira de Geociências* (Aceito ainda sem data de publicação).

#### FOTOGRAFIAS AÉREAS:

IGC - INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO 1986. (São Paulo). Projeto Lins Tupã. Foto aérea. Escala 1:25.000, São Paulo, Fx28, n. 15.

#### FOLHAS E MAPAS IMPRESSOS:

INPE - INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS 1987. São José dos Campos (SP): atualização do uso da terra. SF-23-Y-D-II-1 MI-2769/1. São José dos Campos, Mapa Topográfico, escala 1:100.000. Silva A.J. 1999. Mapa geológico da Bacia de Campos. Rio de Janeiro, Petrobrás, 1 mapa geológico, escala 1:50.000.

## SÓCIOS PATROCINADORES DA ABGE

---



