

ADRIANO MARTINS JUNQUEIRA

Avaliação de susceptibilidade de movimento de massa em linhas de transmissão:
Estudo de caso na região da Serra da Mantiqueira.

ADRIANO MARTINS JUNQUEIRA

Avaliação de susceptibilidade de movimento de massa em linhas de transmissão: Estudo de caso na região da Serra da Mantiqueira.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia – Gestão Ambiental e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões.

Co-orientadora: Profa. Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes.

Guaratinguetá
2017

J95a

Junqueira, Adriano Martins

Avaliação de susceptibilidade de movimento de massa em linhas de transmissão : estudo de caso na região da Serra da Mantiqueira – Guaratinguetá, 2016.

132 f. : il.

Bibliografia: f. 124-130

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões.

Coorientadora: Profa. Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes

1. Energia elétrica - Transmissão 2. Linhas elétricas – Postes e torres 3. Sistemas de informação geográfica I. Título

CDU 621.315(043)

ADRIANO MARTINS JUNQUEIRA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. SILVIO JORGE COELHO SIMÕES
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCIO ROBERTO MAGALHÃES DE ANDRADE
CEMADEN

DADOS CURRICULARES

Adriano Martins Junqueira

NASCIMENTO	23.01.1973 - SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP
FILIAÇÃO	Osmar Bustamante Junqueira Célia Martins Junqueira
1992/1996	Curso de Graduação Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.
1997/1998	Curso de Pós-Graduação lato sensu em Administração Contábil e Financeira, na Fundação Armando Álvares Penteado.
2000/2001	Curso de Pós-Graduação lato sensu em Gerenciamento de Projetos, no Instituto de Educação Tecnológica.
2015/Atual	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

de modo especial, dedico este trabalho àqueles muito próximos que cederam horas de nosso convívio para que fosse possível a realização deste trabalho, em especial à meus filhos Leonardo e Lucas, minha esposa Juliana, meus pais Osmar e Célia e minha irmã Cynthia. Que Deus os abençoe sempre.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus, por tantos momentos felizes. Agradeço pela minha vida, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Adj. Silvio Jorge Coelho Simões* que além de entusiasta, sempre acreditou nas minhas aspirações e me proporcionou esta oportunidade de estudo,

à minha co-orientadora, *Profa. Dra. Tatiana Sussel Gonçalves Mendes* que durante todo trajeto me ajudou com dedicação, compreensão e orientação,

à minha esposa *Juliana* a quem dedico este mestrado, que sempre me apoiou e incentivou para a realização deste passo,

aos meus filhos, *Leonardo e Lucas* a quem espero estar deixando o exemplo de que sempre é dia para realizar,

aos meus pais *Osmar e Célia*, que contribuíram de maneira fundamental para a minha formação como pessoa e sempre incentivaram meus estudos,

à minha irmã *Cynthia* pelo carinho e inspiração à viajar pelo mundo,

à *Lúcia* que sempre me acolheu em casa com alegria,

aos professores desta faculdade que de maneira dedicada dispensaram a sua atenção,

à todos os funcionários da Unesp com quem me relacionei, pelo respeito, acolhimento e atendimento eficiente em especial para a *Renata* pela paciência e alegria,

aos colegas da Pós Graduação da FEG, IPBEN e LOSE que dividiram momentos especiais durante nossos estudos,

ao professor Dr. Eymar S. S. Lopes do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelas explicações e colaboração no desenvolvimento da plataforma de monitoramento,

às muitas sugestões, tempo e discussões dedicados de Danilus Rebelo, Jack Zorzan, Ubirajara Freitas, Victor Blasechi,

ao professor Dr. John R. Logan pela oportunidade de intercâmbio na Universidade de Brown e conhecimento transmitido junto a iniciativa S4 (*Spatial Structures in the Social Sciences*),

à Geo Pixel Geotecnologias Consultoria e Serviço Ltda., em particular na pessoa dos meus amigos Fernando Leonardi, Alex Moraes, Bruno Prado, Ubirajara Freitas e Manoel Ortiz pelo apoio e incentivo constantes,

à todos aqueles, que de maneira direta ou indireta, colaboraram para a realização desta dissertação.

Muito Obrigado!

“A verdade não é, de modo algum,
aquilo que se demonstra, mas aquilo que se simplifica.”

Antoine de Saint-Exupéry

JUNQUEIRA, A. M. **Avaliação de susceptibilidade de movimento de massa em linhas de transmissão:** Estudo de caso na região da Serra da Mantiqueira. 2017. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

RESUMO

A maioria dos empreendimentos do setor elétrico brasileiro não apresentam uma avaliação sistemática espaço-temporal de suas estruturas para identificar vulnerabilidades ambientais nos empreendimentos. Assim, este estudo teve como objetivo analisar a susceptibilidade de movimento de massa em linhas de transmissão, na região da Serra da Mantiqueira, sujeitas aos efeitos de chuvas tropicais e operacionalizar uma plataforma dinâmica de análise e alerta nas áreas de maior criticidade. Para este trabalho, foram levantados dados estáticos e dinâmicos na região a partir de fontes de acesso público e privado. A seguir, foram definidos os múltiplos critérios através do processo de análise hierárquica (AHP). Utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e álgebra de mapas, foi possível determinar o mapa de susceptibilidade em cinco classes e operacionalizar a plataforma de monitoramento, análise e alerta a riscos ambientais baseando-se nas áreas identificadas e nos dados dinâmicos meteorológicos e hidrológicos. Como resultado, foi gerado um banco de dados geográfico com abrangência regional (14.000 km²), que envolveu 7 critérios: declividade, distância das linhas de transmissão, densidade de drenagem, uso do solo, tipo do solo, densidade de fraturas e falhas, e precipitação. A distribuição das classes de susceptibilidade encontradas na região de estudo foram: muito baixa (1,5%), baixa (12%), média (34,9%), alta (45,3%) e muito alta (6,2%). Foi possível ainda, identificar diferentes movimentos de massa em áreas próximas às linhas de transmissão, quanto próximas aos outros elementos de risco, como moradias, estradas, bordas de reservatórios e torres de telecomunicações. A plataforma de monitoramento operacionalizada possibilitou o estabelecimento de análises dinâmicas sobre a ocorrência de eventos naturais extremos, através do envio de notificações e acesso WEB com o mapa das áreas afetadas. Assim, este estudo pode se tornar um instrumento de avaliação, acompanhamento e gerenciamento para a gestão pública e agências reguladoras do setor elétrico.

PALAVRAS-CHAVE: Susceptibilidade. Vulnerabilidade. Processo Hierárquico Analítico (AHP). Sistema de Informação Geográfico (SIG). Transmissão de Energia Elétrica.

JUNQUEIRA, A. M. Evaluation of mass movement susceptibility over transmission lines: Case study at Serra da Mantiqueira region. 2017. 132 f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

ABSTRACT

Most of the Brazilian electric sector enterprises do not present a systematic space-time evaluation of their structures to identify environmental vulnerabilities in the projects. Thus, this study aimed to analyze the susceptibility of mass movement in transmission lines, in the Serra da Mantiqueira region, subject to the effects of tropical rains and to operationalize a dynamic platform of analysis and alertness in the most critical areas. For this work, static and dynamic data were collected in the region from public and private sources. Next, the multiple criteria were defined through the hierarchical analysis process (AHP). Using Geographic Information Systems (GIS) and map algebra, it was possible to determine the susceptibility map in five classes and to operationalize the monitoring platform for monitoring, analysis and alert to environmental risks based on identified areas and dynamic meteorological and hydrological data. As a result, a geographic database with a regional coverage (14.000 km²) was generated, involving 7 criteria: slope, distance of transmission lines, drainage density, soil use, soil type, fracture and failure density, and precipitation. The distribution of susceptibility classes found in the study region were very low (1.5%), low (12%), average (34.9%), high (45.3%) and very high (6, 2%). It was also possible to identify different mass movements in areas close to the transmission lines, as well as to other risk elements such as dwellings, roads, reservoir borders and telecommunications towers. The operationalized monitoring platform allowed the establishment of dynamic analyzes on the occurrence of extreme natural events, by sending notifications and WEB access with the map of the affected areas. Thus, this study can become an instrument of evaluation, monitoring and management for the public management and regulatory agencies of the electric sector.

KEYWORDS: Susceptibility. Vulnerability. Analytical Hierarchy Process (AHP). Geographic Information System (GIS). Electric Power Transmission. Space-Time Data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Abordagem de vulnerabilidade	20
Figura 2 - Relação conceitual entre perigo, risco, vulnerabilidade e elementos de risco.....	21
Figura 3 - Itens relacionados à vulnerabilidade de encosta publicados em revistas especializadas listadas na coleção principal do site <i>Web of Science</i>	22
Figura 4 - Itens relacionados à vulnerabilidade de encosta publicados em revistas especializadas listadas na coleção principal do site <i>Web of Science</i> analisados com auxílio do software de análise bibliométrica <i>CitNetExplorer</i>	23
Figura 5 - Exemplo de projeção dos fatores de vulnerabilidade para cada representação espacial (pixel) onde cada semi-eixo representa variação entre 0 e 100% do fator	24
Figura 6 - Representação de um modelo vetorial e um modelo <i>raster</i>	28
Figura 7 - a) Mapa com elementos representados por ponto, linha e polígono (vetorial); b) Imagem <i>raster</i> com elementos vetoriais superpostos.....	29
Figura 8 - Campo de propósito dos mapas	30
Figura 9 - Cenários de mudanças espaço-temporais da representação de um objeto geográfico também conhecido como triângulo W (“Where-What-When”).....	31
Figura 10 - Concepção geral da plataforma para monitoramento de Linhas de Transmissão a partir do mapa de susceptibilidade de movimento de massa e dados meteorológicos e hidrológicos dinâmicos.....	34
Figura 11 - Arquitetura interna da plataforma para monitoramento de Linhas de Transmissão a partir do mapa de susceptibilidade de movimento de massa e dados meteorológicos e hidrológicos dinâmicos.....	36
Figura 12 - Fluxograma do processo hierárquico analítico	40
Figura 13 - Representação simplificada do sistema elétrico entre a geração e o uso da energia elétrica	41
Figura 14 - Mapa geoelétrico brasileiro da rede de operação de transmissão de energia elétrica do Sistema Integrado Nacional.....	43
Figura 15 - a) Imagem da região de estudo com destaque para diversidade de altitude e ocupação do solo; b) Modelo em relevo demonstrando a variação de declividade do relevo na região; c) Representação da Bacia do Rio Paraíba do Sul, suas sub-bacias e principais rios .	46
Figura 16 - Detalhe da paisagem com morros e colinas na área de estudo destacando a presença de fragmentos de floresta e Linhas de Transmissão	47
Figura 17 - Fluxograma das etapas deste estudo	50

Figura 18 - Informações exploratórias da região Sudeste	51
Figura 19 - Área de Estudo.....	52
Figura 20 - Representação do banco de dados do estudo (SGDB): cores mais suaves destacam informações de uso específico no modelo AHP e cores mais fortes representam camadas de dados adicionais ou complementares	55
Figura 21 - Macro representação das etapas do AHP no estudo até geração de resultados estáticos para a plataforma de monitoramento	56
Figura 22 - Estrutura para ponderação pareada de critérios utilizando escala fundamental de Saaty	56
Figura 23 - Exemplo do transporte de resultados para formação da matriz de ponderação por critério.....	57
Figura 24 - Figura ilustrativa da multiplicação de matrizes para geração das Medidas de Consistência (MC) para cada critério e geração do auto vetor.....	58
Figura 25 - Sugestão de formulário para ponderação pareada das alternativas frente a cada um dos critérios utilizado na estrutura hierárquica proposta	59
Figura 26 - Modelo digital de elevação global - ASTER GDEM	65
Figura 27 - Mosaico com dados de declividade do terreno gerado a partir do modelo digital de elevação ASTER GDEM.....	65
Figura 28 - Gráfico de distribuição de declividade na região de estudo	66
Figura 29 - Mapa temático com dados de Limites Políticos, Áreas Indígenas, Unidades de Conservação e municípios pertencentes ao Mosaico da Mantiqueira	67
Figura 30 - Mapa destacando os 4884 setores censitário de 2010 (IBGE) na área de estudo.	67
Figura 31 - Grade estatística de número de domicílios representado por quadrículas de 1km ² gerado por dados dos setores censitário de 2010 e publicados pelo IBGE em 2016 para a área de estudo	68
Figura 32 - Imagem do satélite Landsat 8 na área de estudo, Órbita 217 - Ponto 075.....	70
Figura 33 - Imagem do satélite RapidEye com 5 metros de resolução mostrando característica da paisagem na área de estudo (paralelo 22°2'S e meridiano 43°2'O)	70
Figura 34 - Mosaico de imagens aéreas reamostradas com 1 metro de resolução mostrando detalhe do traçado da Linha de Transmissão.....	71
Figura 35 - Mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo (esquerda), detalhe sobre o município de Guaratinguetá (centro) e aproximação em escala 1:50.000 sobreposto de informações viárias sobre traçado da rodovia Presidente Dutra (BR-116) (direita)	72

Figura 36 - Processo AHP usado para definição de importância relativa entre as classes de uso do solo	74
Figura 37 - Mapa de uso do solo reclassificado em 5 classes	75
Figura 38 - Mapa de solos (primeira ordem) na área de estudo	76
Figura 39 - Processo AHP usado para definição de importância relativa entre as ordens de tipo de solo.....	77
Figura 40 - Hidrografia e massas d'água na área de estudo	79
Figura 41 - Mapa de densidade de drenagem na área de estudo baseado em trechos de rios monofilares e detalhes dos parâmetros de tamanho da célula e raio de influência	80
Figura 42 - Mapa de fraturas e falhas na área de estudo e sua interação com sistema viário na região de estudo.....	82
Figura 43 - Mapa de densidade de fraturas e falhas na área de estudo.....	82
Figura 44 - Mapa destacando precipitação média anual e isoietas para a região de estudo	83
Figura 45 - Mapa de distância entre zona de influência máxima e borda da área de estudo...	85
Figura 46 - Relação entre quantidade de quadrículas e distância da zona de influência para a área de estudo	86
Figura 47 - Imagem da previsão numérica calculada com o modelo BRAMS em resolução de 5x5 km para a variação de precipitação acumulada em 24 horas.....	88
Figura 48 - Imagem do Satélite GOES 13 – Canal 4 com representação da precipitação em cores.....	89
Figura 49 - Representação dos dados utilizados na operacionalização da plataforma de monitoramento de análise e alerta em relação ao horário de aquisição.....	90
Figura 50 - Estrutura hierárquica da avaliação da susceptibilidade de movimento de massa em Linhas de Transmissão (LT).....	92
Figura 51 - Resultados do cálculo da Razão de Consistência (RC)	94
Figura 52 - Julgamentos utilizados para análise das alternativas (A1=Implantação, A2=Operação e A3=Desativação de Linhas de Transmissão) por critério, em função de sua importância junto à susceptibilidade de movimento de massa em Linhas de Transmissão	94
Figura 53 - Mapas com dados normalizados empregados para as camadas de distância dos ativos (a), precipitação (b), densidade de drenagem (c), densidade de fraturas e falhas (d) e declividade (e)	98
Figura 54 - Esquemático da operação de <i>Model Buidier</i> para realização de álgebra de mapas usando critérios do AHP	100

Figura 55 - Mapa de susceptibilidade e resultados das parciais 1 e 2 após execução do <i>Model Builder</i>	101
Figura 56 - Quantis de distribuição das categorias do mapa de susceptibilidade e respectiva escala linguística adotada (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto)	102
Figura 57 - Comparação visual entre os mapas de susceptibilidade (original <i>versus</i> generalizado)	103
Figura 58 - <i>Model Builder</i> utilizado para classificação, vetorização e generalização do mapa de susceptibilidade para a área de estudo	104
Figura 59 - Detalhe de escorregamento translacional ocorrido na Serra da Mantiqueira	105
Figura 60 - Detalhe do mapa de susceptibilidade na região de Bananal (SP) com destaque (elipse branca) do traçado de linha de transmissão e linhas de representação das fraturas e falhas (cinza).....	105
Figura 61 - Detalhes de linhas de transmissão a) reforço de talude, b) solo exposto ao redor de algumas torres, c) processo erosivo próximo ao traçado e d) detalhe de movimentação de postes em área com linhas de transmissão evidenciando movimentações no terreno.....	106
Figura 62 - Detalhe da erosão e movimentações de terreno dentro da área de estudo, Aparecida (SP). Elipses menores detalham processos erosivos e círculo maior detalha presença de linha de transmissão próxima à região com forte presença de movimentação..	107
Figura 63 - Detalhes dos escorregamentos de encostas, erosões e movimentações de terreno dentro da área de estudo, Paracambi (RJ).....	108
Figura 64 - Telas para acompanhamento e administração da plataforma de monitoramento	109
Figura 65 - Detalhes das interfaces de configuração da plataforma de monitoramento.....	110
Figura 66 - Detalhes do e-mail enviado com resultado da análise para usuário cadastrado no sistema	111
Figura 67 - Detalhes do sistema de alerta WEB, resultado da operacionalização da plataforma de monitoramento, análise e alerta para usuários cadastrados	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Representação esquemática dos principais tipos de dados envolvidos em modelos de vulnerabilidade e que apresentam diferentes frequências de atualização (C= Crítico, A=Alta importância, M= Média importância, B=Baixa importância, - = Não relevante)	25
Tabela 2 - Perguntas centrais em análises usando SIG	30
Tabela 3 - Escala básica de comparação pareada de objetos do método AHP.....	40
Tabela 4 - Tensões de transmissão utilizadas no Brasil para transmissão de energia elétrica.	42
Tabela 5 - Valores de Índice Aleatório (IA) baseado na ordem da matriz de critérios	59
Tabela 6 - Participação das classes de uso do solo no mapa reclassificado para 5 classes na área de estudo	75
Tabela 7 - Participação de cada tipo de solo na área de estudo e sua importância relativa definida através de processo AHP	78
Tabela 8 - Matriz de comparação pareada entre os critérios selecionados para avaliar a susceptibilidade de movimento de massa em Linhas de Transmissão (C1=Declividade, C2= Distância dos ativos de LTs, C3= Densidade de drenagem, C4= Uso do solo, C5= Tipo de solo, C6= Densidade de fraturas e falhas, C7= Precipitação)	93
Tabela 9 - Matriz de critérios normalizada, medida de consistência de cada critério e importância relativa dos critérios	93
Tabela 10 - Nível de preferência das alternativas propostas no AHP	96
Tabela 11 - Correlação entre os critérios da classificação de risco adotada pelo Ministério das Cidades e as classes de susceptibilidade determinadas com o processo AHP neste estudo..	118

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRATE	Associação Brasileira das Empresas de Transmissão de Energia Elétrica
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i> - Processo Hierárquico Analítico
ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> - Medidor avançado de emissão térmica e reflexão transportado ao espaço
BEN	Balanço Energético Nacional
BRAMS	<i>Brazilian Regional Atmospheric Modeling System</i> - Sistema Brasileiro Regional de Modelagem Atmosférica
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CTEEP	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
DEM	<i>Digital Elevation Model</i> - Modelo Digital de Elevação
DSA	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GDEM	<i>Global Digital Elevation Map</i> - Mapa Digital Global de Elevação
GIS	<i>Geographic Information System</i> - Sistema de Informações Geográficas
GMT	<i>Greenwich Mean Time</i> - Hora Média de Greenwich
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> - Sistema Global de Navegação por Satélite
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i> – Satélite Geoestacionário Operacionais de Meio-Ambiente
GSI-PR	Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
JTC-1	<i>Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes</i> - Comissão Técnica Conjunta sobre Deslizamentos de Terra e Engenharia de Encosta
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDE	Modelo Digital de Elevação
METI	<i>Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan</i> - Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério das Minas e Energia
MPOG	Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão
NASA	<i>National Aeronautic and Space Administration</i> – Administração Espacial e Aeronáutica Espacial
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
OGC	<i>Open Geospatial Consortium</i> – Consórcio Geoespacial Aberto
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PPDC	Plano Preventivo de Defesa Civil
SAD	<i>South American Datum</i> – Sistema de Referência da América do Sul
SCN	Sistema Cartográfico Nacional
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro

SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIGEL	Sistema de Informações Geográficas de Energia Elétrica
SIN	Sistema Integrado Nacional
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SGDB	Data Base Management System - Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados
SOA	<i>Service Oriented Architecture</i> - Arquitetura Baseada em Serviço
UTC	<i>Universal Coordinated Time</i> - Tempo Coordenado Universal
WEO	<i>World Energy Outlook</i> – Perspectiva da Energia Mundial
WGS	<i>World Geodetic System</i> - Sistema Geodésico Mundial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	SUSCEPTIBILIDADE E VULNERABILIDADE	19
2.2	SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICA (SIG).....	26
2.2.1	Fundamentos do SIG.....	26
2.2.2	Álgebra de mapas	31
2.2.3	Plataforma de monitoramento, análise e alerta a riscos ambientais	33
2.3	PROCESSO HIERÁRQUICO ANALÍTICO (AHP) DE DADOS ESPACIAIS.....	37
2.4	SISTEMA INTEGRADO NACIONAL E CONTEXTO DA REGIÃO DE ESTUDO.....	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1	ÁREA DE ESTUDO	51
3.2	FONTES DE DADOS	52
3.3	ANÁLISE HIERÁRQUICA DOS DADOS DA ÁREA DE ESTUDO	55
3.4	ÁLGEBRA DE MAPAS PARA IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE SUSCEPTIBILIDADE DE MOVIMENTO DE MASSA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO	60
3.5	MONITORAMENTO DAS SUSCEPTIBILIDADES	60
4	RESULTADOS	63
4.1	ESTABELECIMENTO DOS DADOS PRIMÁRIOS PARA A ÁREA DE ESTUDO.....	63
4.2	MONTAGEM DO BANCO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS.....	63
4.2.1	Relevo.....	64
4.2.2	Limites políticos e sociodemográficos	66
4.2.3	Imagens georreferenciadas	69
4.2.4	Uso e ocupação do solo	71
4.2.5	Tipo do solo	76
4.2.6	Hidrografia.....	78
4.2.7	Geologia estrutural.....	80
4.2.8	Precipitação.....	83

4.2.9	Distância dos ativos	84
4.2.10	Dados meteorológicos e hidrológicos em tempo real	86
4.3	ANÁLISE HIERÁRQUICA PARA SUSCEPTIBILIDADE DE MOVIMENTO DE MASSA	91
4.4	PROCESSOS FINAIS PARA GERAÇÃO DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE	96
4.4.1	Normalização dos dados.....	97
4.4.2	Álgebra de mapas	99
4.4.3	Generalização e vetorização do mapa de susceptibilidade	102
4.5	CONFIRMAÇÃO DOS RESULTADOS DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE	104
4.6	PLATAFORMA DE MONITORAMENTO, ANÁLISE E ALERTA EM TEMPO REAL ADAPTADO AO MONITORAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	109
5	DISCUSSÃO	111
5.1.	BANCO DE DADOS DA REGIÃO DE ESTUDO	111
5.2	ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSO (AHP)	113
5.3.	MAPA DE VULNERABILIDADE	115
5.4.	TECNOLOGIAS E MONITORAMENTO	117
6	CONCLUSÕES.....	120
	REFERÊNCIAS	124
	APÊNDICE A	131
	APÊNDICE B.....	132

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN), a matriz energética brasileira é sobretudo de origem hídrica (80% da geração elétrica) (BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética (EPE) Ministério de Minas e Energia (MME), 2014), sendo que a maior parte da geração ocorre através de grandes usinas distantes dos centros metropolitanos, os quais se conectam por sistemas de transmissão. De acordo com as diretrizes da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a rede de transmissão no Brasil é constituída por um Sistema Interligado Nacional (SIN) que aumenta a qualidade dos serviços prestados e tem papel importante na regulação entre fontes produtoras e fontes consumidoras (BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) Ministério de Minas e Energia (MME), 2004).

Esta rede de transmissão está espalhada por todo o território nacional e, portanto, existem vários fatores que podem colocar em risco suas estruturas ao longo do tempo, como: dinâmica hidrológica e geomorfológica (relevo), alterações causadas pelo uso da terra, tempestades intensas, incêndios florestais, fatores antrópicos, entre outros. Assim, tornam-se necessários estudos que analisem as regiões com a presença de redes de transmissão, utilizando ferramentas digitais de análises (Sistemas de Informações Geográficas), dados de sensoriamento remoto e dados de campo obtidos por GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema Global de Navegação por Satélite) para determinar a susceptibilidade de movimento de massa nestes empreendimentos em base espaço-temporal (VAN WESTEN et al., 2008). Segundo Van Westen et al. (2008), para avaliar riscos em encostas, os principais dados a serem analisados envolvem fatores ambientais, fatores catalisadores, caracterização das encostas e por fim elementos de risco (rodovias, prédios e populações) que são usados como apoio para dimensionamento dos cenários e magnitude do risco.

Tendo em vista que a maioria dos empreendimentos do setor elétrico não apresenta uma avaliação sistemática espaço-temporal de suas estruturas para identificar a susceptibilidade à movimento de massa, torna-se de relevância nacional o desenvolvimento de estudos que identifiquem os principais fatores de impacto ambiental nesses empreendimentos.

Este estudo teve como foco analisar as encostas dos empreendimentos do setor elétrico sujeitas aos efeitos de chuvas tropicais caracterizadas por grandes volumes pluviométricos em curto espaço de tempo. Desta forma, a abordagem aqui desenvolvida visou estudar as dimensões de tempo e espaço (LIAO et al., 2011) para estabelecer múltiplos critérios para uma análise hierárquica na região de estudo, gerando um sistema de identificação de

susceptibilidade de movimento de massa que possa ser atualizado à medida que novos dados sejam disponibilizados.

Além de criar um mapa de susceptibilidade regional apoiado por um processo hierárquico analítico, este estudo buscou a integração desses resultados a uma plataforma de monitoramento, análise e alerta a riscos ambientais em tempo real para operacionalizar um sistema dinâmico de apoio à gestão de sistemas de transmissão de energia elétrica.

1.1 OBJETIVO GERAL

A pesquisa apresentada objetivou a construção de um processo hierárquico analítico para a elaboração de um mapa de susceptibilidade de movimento de massa otimizado para empreendimentos do setor elétrico na região da Serra da Mantiqueira, trazendo informação complementar para a segurança do sistema energético do país.

Esta pesquisa também teve como objetivo a incorporação do mapa de susceptibilidade criado em uma plataforma de monitoramento, análise e alerta a riscos ambientais alimentados por informações meteorológicas em tempo real que pode se tornar um instrumento de avaliação para a gestão pública.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Criação de banco de dados espacial para área de estudo unindo dados de diferentes fontes.
- Operacionalização de um sistema de análise e alerta dinâmico para as áreas de susceptibilidade muito alta a partir de dados de previsão meteorológica e hidrológica do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentre diversos temas investigados para elaboração completa deste estudo, a delimitação da revisão bibliográfica foi focada nos seguintes pontos: Susceptibilidade e Vulnerabilidade, Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Processo de Análise Hierárquica (AHP) de Dados Espaciais, Sistema Integrado Nacional e Contexto da Região de Estudo.

2.1 SUSCEPTIBILIDADE E VULNERABILIDADE

Considera-se que a suscetibilidade está vinculada somente às condições físicas do meio, ou seja, trata da intensidade ou probabilidade de um determinado ambiente sofrer impacto devido a um perigo natural, enquanto a vulnerabilidade surge como consequência da interação do homem com o meio. Assim, numa avaliação de vulnerabilidade busca-se localizar pessoas e lugares sob risco e também identificar quem nesse espaço é mais vulnerável (MULER; BONETTI, 2011).

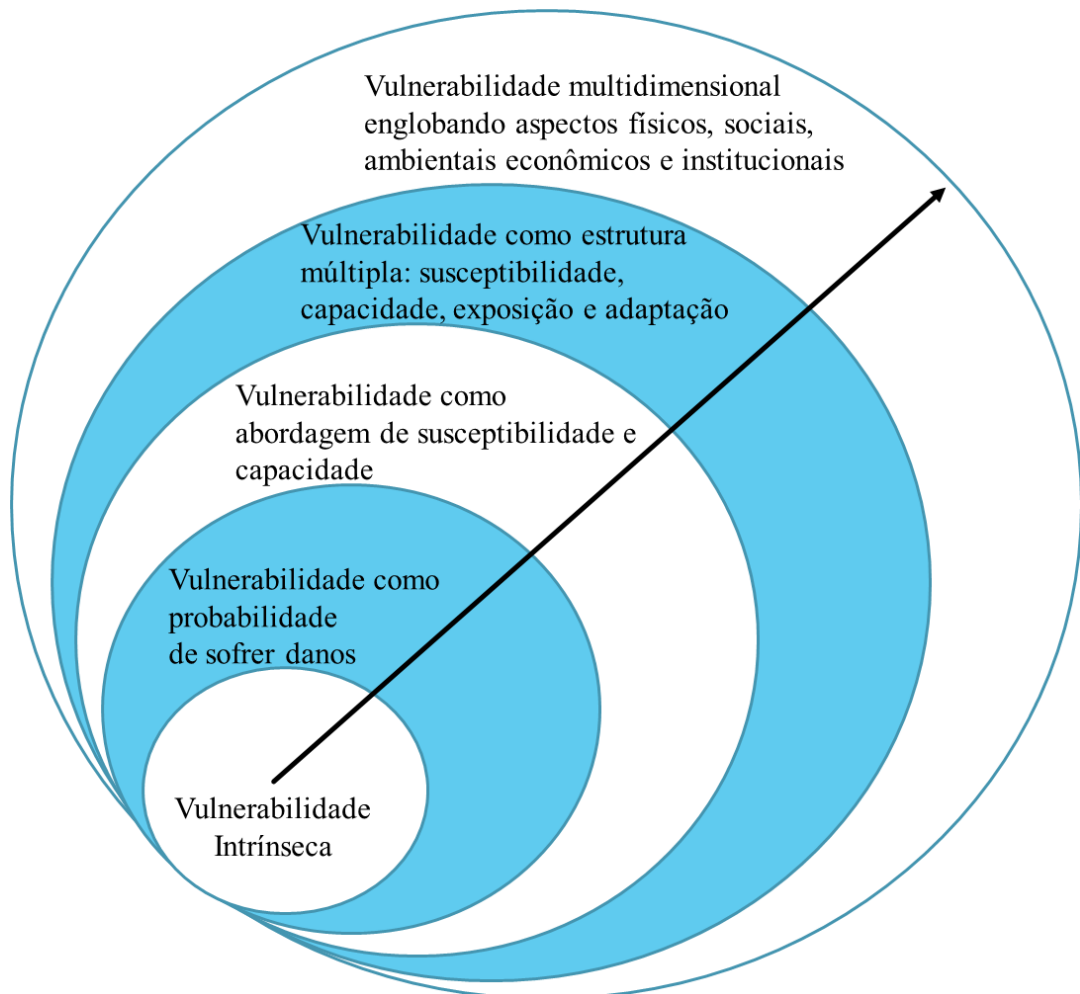
Captar a idéia de vulnerabilidade é especialmente difícil nos contextos sociais e humanos porque as vulnerabilidades são dificilmente discerníveis se não houver métodos para sua capacidade de enfrentamento (BOGARDI, 2006). Uma forma de resolver essa questão é o uso de indicadores de susceptibilidade e vulnerabilidade que busquem combinar conhecimentos de diferentes disciplinas para identificar o grau de ameaça.

A identificação de vulnerabilidades pode variar desde uma abordagem intrínseca, como por exemplo, vulnerabilidade pessoais de um indivíduo, passando por caracterizações de probabilidades de ocorrência de um risco e indo até uma abordagem multidimensional que envolvem diferentes aspectos do ambiente em análise, englobando os aspectos físicos, ambientais, sociais, econômicos, institucionais dentre outros. Algumas definições e estruturas conceituais para sistematizar vulnerabilidade foram desenvolvidas e são utilizadas por diferentes escolas de pensamento: risco de desastres, pesquisa e desenvolvimento, mudanças globais, dentre outras (Figura 1).

A relação conceitual entre vulnerabilidade e periculosidade em um ambiente representa seu nível de risco para um espaço susceptível em um determinado tempo. Sua curva de risco é uma equação que conjuga probabilidade de ocorrência e intensidade das perdas. Para se medir a vulnerabilidade, comumente, são associados os elementos de riscos, enquanto que para valorar a periculosidade são associados suas consequências (CROZIER et al., 2005). Ou seja,

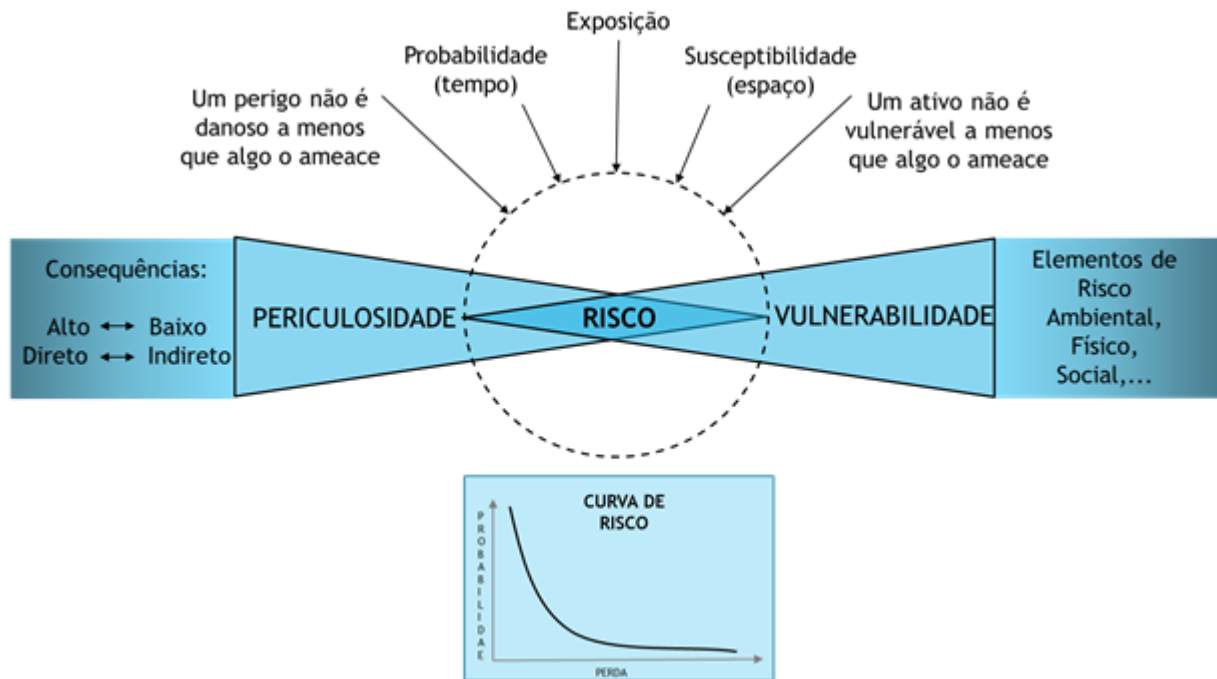
uma das formas de minimizarmos o risco é diminuirmos a área de intersecção entre vulnerabilidade e periculosidade. Para minimizar a vulnerabilidade é necessário compreender seu espaço, tempo, suas susceptibilidades e agir sobre os elementos de risco que o ameaçam (Figura 2).

Figura 1- Abordagem de vulnerabilidade



Fonte: Traduzido de Birkmann (2007).

Figura 2 - Relação conceitual entre perigo, risco, vulnerabilidade e elementos de risco



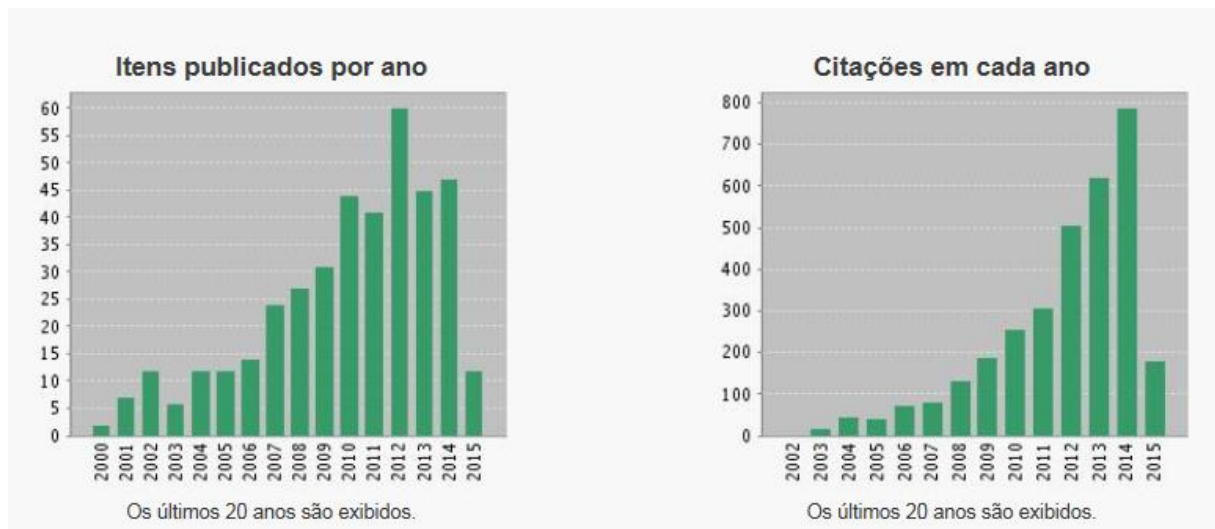
Fonte: Adaptado de Crozier et al. (2005).

Para estudos de susceptibilidade e vulnerabilidade em encostas, o método de entendimento do perigo e avaliação de risco proposto por Varnes (1974) e com contribuições de Fell (1994) é seguido pela maioria dos processos usando Sistemas de Informação Geográficas (SIG) para diferentes áreas com terminologia similar (CHACÓN et al., 2006).

Dentro deste cenário de avaliação de encostas, muitos métodos têm sido desenvolvidos para melhorar os resultados qualitativos e quantitativos, como regressões logísticas, redes neurais, lógicas fuzzy, análises de incertezas, dentre outros apoiados por tratamentos estatísticos e análise multivariada. Todos esses métodos combinados com SIG passaram a representar os resultados alcançados de forma visual e espacial, tornando-se uma ferramenta dominante neste tipo de aplicação. Muitos estudos também trazem a comparação destes resultados com exemplos de deslizamentos de encostas ao redor do mundo, como apresentado por Van Westen et al. (2008), Fell et al. (2008a), Fell et al. (2008b), dentre outros.

Este tema vem sendo cada vez mais investigado tendo cerca de 400 diferentes artigos entre os anos de 2000 e 2015, com busca realizada no dia 22/04/2015 no site da *THOMSON REUTERS, Web of Science* (www.webofscience.com) conforme pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 - Itens relacionados à vulnerabilidade de encostas publicados em revistas especializadas listadas na coleção principal do site *Web of Science*



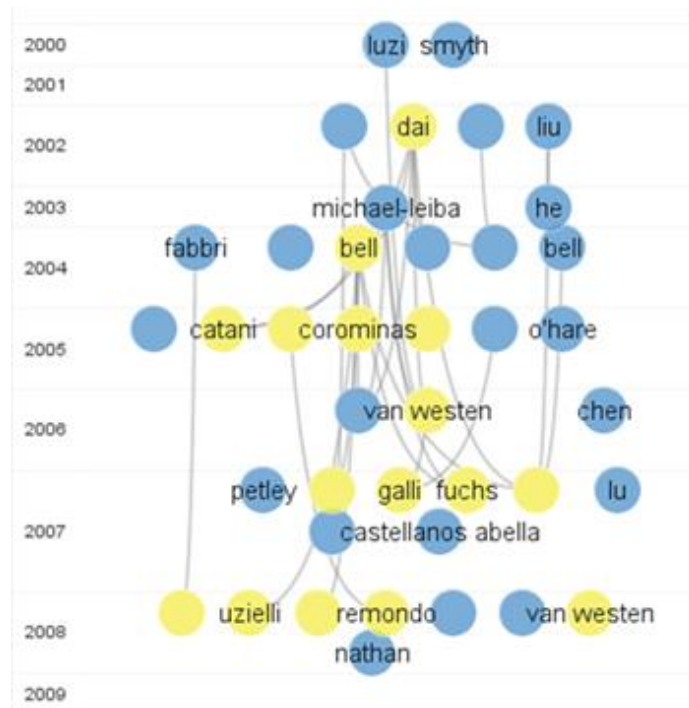
Fonte: Autor, a partir de artigos selecionados no site *Web of Science*.

Em uma análise mais detalhada deste material com relação ao padrão de citações, pode-se observar que dentre mais de 3200 citações no período, alguns autores se destacam na análise de vulnerabilidade de encostas como Corominas et al. (2005, 2014), Dai et al. (2002), Dai; Lee (2002) e Van Westen et al. (2006, 2008) dentre outros destacados em amarelo na Figura 4, a qual representa artigos com mais de 5 citações em cada.

Com a análise bibliométrica foi possível uma rápida seleção de abordagens utilizadas por importantes autores em relação ao tema de deslizamento de encostas adotado em diferentes países e ajudou a identificar insumos essenciais para algumas destas abordagens, reduzindo, desta forma, o tempo de preparação deste projeto frente à realidade de dados disponíveis para a área de estudo.

Dentro das referências estão as diretrizes propostas pelo *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes* (JTC-1), propondo diretrizes internacionais para susceptibilidade de deslizamento de terra, perigo iminente e zonas de risco voltadas ao planejamento do uso da terra. Além disso, o JTC-1 apresenta definições e terminologias em padrões internacionais de métodos, níveis, escalas e tipos de zoneamento (FELL et al., 2008a, 2008b).

Figura 4 - Itens relacionados à vulnerabilidade de encosta publicados em revistas especializadas listadas na coleção principal do site *Web of Science* analisados com auxílio do software de análise bibliométrica *CitNetExplorer*



Fonte: Autor.

Van Westen et al. (2008) e Cascini (2008) complementam detalhes importantes no estudo de encostas trazendo análises de variações de escalas indicativas para os dados usando SIG.

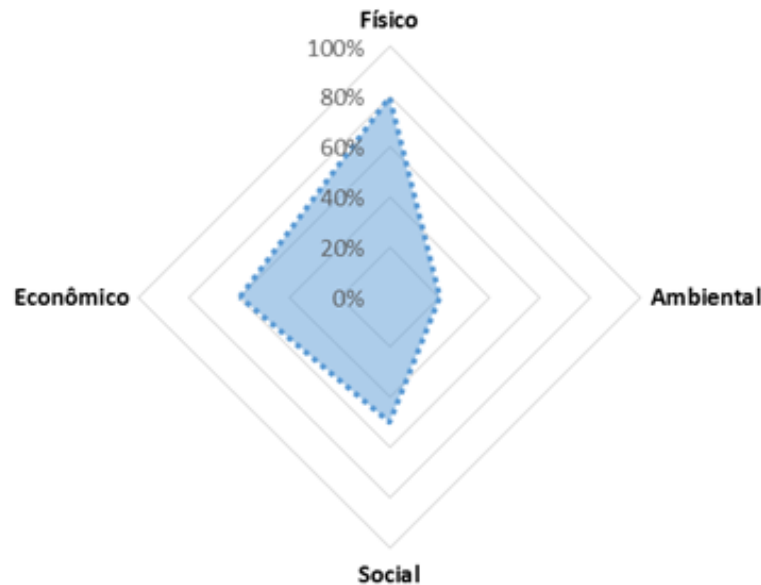
Fatores do ambiente como geologia, solo, morfologia, geomorfologia, uso e cobertura do solo e hidrologia, aliados à inventário de escorregamentos, permitem uma modelagem espacial inicial de avaliação da susceptibilidade e vulnerabilidade do ambiente estudado (DAI; LEE, 2001; VAN WESTEN et al., 2008) e que podem ser influenciadas por fatores catalisadores como terremotos, tempestades tropicais, vendavais dentre outros.

Para fins de mensuração de impacto da vulnerabilidade, podem ser usados elementos como quantidade de vidas humanas, bens materiais (edificações) e consequências ao meio-ambiente (CROZIER et al., 2005).

Um instrumento de auxílio na visualização da composição dos fatores de vulnerabilidade multidimensionais (social, físico, ambiental, econômico) são os mapas. Nele cada dimensão pode ser caracterizada por uma camada de informação e o cruzamento destas camadas pode representar a vulnerabilidade multidimensional resultante. Uma vez que os

mapas podem ter unidades mínimas de visualização (pixel) o mapa de vulnerabilidade resultante é entendido como a projeção dos fatores de vulnerabilidade em semi-eixos com variação entre 0 e 100%, como visualizada na Figura 5 (CHACÓN et al., 2006).

Figura 5 - Exemplo de projeção dos fatores de vulnerabilidade para cada representação espacial (pixel) onde cada semi-eixo representa variação entre 0 e 100% do fator



Fonte: Autor.

Chacón (1999) adotou uma abordagem geográfica para a susceptibilidade global na área urbana de Manizales, Colômbia, obtendo como resultado tipos e níveis de susceptibilidade, o qual demonstrou sobre os mapas um forte relacionamento entre declividade, morfologia e vulnerabilidade geral (CHACÓN et al., 2006).

Os fatores catalisadores são melhor explorados quando trabalhados de forma dinâmica, propondo uma revisão espaço-temporal aos mapas de susceptibilidade.

Uma importante contribuição apresentada por Van Westen et al. (2008) é a representação esquemática dos principais tipos de dados envolvidos nos mapas de vulnerabilidade e que apresentam diferentes frequências de atualização. O modelo digital de elevação (MDE) é considerado crítico para a maioria das escalas, o mesmo acontecendo com a precipitação para escalas grandes e detalhadas, porém, enquanto a frequência de atualização da precipitação é normalmente considerada em horas, a frequência de atualização da informação de relevo é em décadas (Tabela 1).

Tabela 1 - Representação esquemática dos principais tipos de dados envolvidos em modelos de vulnerabilidade e que apresentam diferentes frequências de atualização (C= Crítico, A=Alta importância, M= Média importância, B= Baixa importância, - = Não relevante)

Dados		Frequência de Updates			SR	Escala				Modelos Perigo				Métodos de Risco	
Tipo Principal	Camada de Dados	(anos)			Uso Sensoriamento Remoto	Pequena	Média	Grande	Detalhada	Heurístico	Estatístico	Determinístico	Probabilístico	(Semi) Quantitativo	Qualitativo
		10 ...	1 ...	0,002											
Inventário de Desmoronamento	Inventário de desmoronamento	↔	↔	↔	A	C	A	A	A	C	A	A	A		
	Atividade de desmoronamento	↔	↔		A	M	C	C	C	A	C	C	C		
	Monitoramento de desmoronamento		↔	↔	M	M	M	M	C	-	-	A	A		
Fatores Ambientais	MDE	↔			A	A	C	C	C	A	C	C	C		
	Ângulo de inclinação / aspectos	↔			A	B	A	A	A	A	A	A	A		
	Relevo Interno	→			A	A	M	B	B	A	B	-	-		
	Acúmulo de fluxo	→			A	B	M	A	A	B	M	A	A		
	Litologia	→			M	A	A	A	A	A	A	A	A		
	Estrutura	→			M	A	A	A	A	A	A	A	A		
	Falhas	→			M	A	A	A	A	A	A	-	-		
	Tipos de solos	→			M	M	A	C	C	A	A	C	A		
	Profundidade de solos	→			-	-	B	C	C	-	-	C	A		
	Inclinação hidrológica		↔	↔	-	-	-	C	C	-	-	C	A		
	Principais unidades geomorfológicas	→			A	C	A	M	B	C	M	B	B		
	Detalhes geomorfológicos	→			A	A	A	A	B	A	A	M	B		
	Tipos de uso do solo	↔	↔		A	A	A	A	A	A	A	A	A		
	Mudanças de uso do solo	↔	↔		A	M	A	A	C	A	A	A	C		
Fatores de Gatilho	Precipitação			←	B	M	M	C	C	A	A	C	C		
	Temperatura/evaporação			←	M	-	-	M	A	-	-	A	B		
	Terremotos catalogados			↔	-	M	M	A	C	-	-	-	C		
	Aceleração terrestre	↔	↔		B	B	M	A	A	A	A	A	B		
Elementos de Risco	Prédios	↔			A	B	M	C	C	-	-	-	-	C	C
	Redes de transporte	↔			A	M	M	M	A	M	M	M	M	A	A
	Expectativa de vida	↔			-	-	B	B	M	-	-	-	-	B	B
	Infra-estruturas essenciais	↔			B	B	M	A	A	-	-	-	-	A	A
	Dados populacionais	↔			B	A	A	C	C	-	-	-	-	C	C
	Dados agrícolas	↔			A	B	M	A	M	-	-	-	-	B	M
	Dados econômicos	↔			-	B	M	A	A	-	-	-	-	B	M
	Dados ecológicos	↔			A	B	B	B	B	-	-	-	-	B	M

Requer resultados probabilísticos de análises

Requer resultados heurísticos, estatísticos ou determinísticos de análises

No Brasil existe uma carência de informações geoespaciais principalmente no que diz respeito a inventário de deslizamento para as diferentes escalas; isso se dá em parte devido à grande dimensão do país, mas é agravado pela ausência de infraestrutura, mão de obra especializada e procedimentos detalhados para adquirir e gerenciar esse tipo de informação.

Como elemento de risco, os dados populacionais são de grande importância, uma vez que permitem quantificações de vidas humanas ameaçadas (Tabela 1), juntamente com as próprias estruturas físicas que possuem valor intrínseco ameaçado, no caso deste estudo as linhas de transmissão de energia elétrica.

Ainda em relação aos dados necessários para criação dos mapas de susceptibilidade de movimento de massa, existe uma grande lacuna internacional relacionada à disponibilidade de informações espaciais em escalas mais detalhadas (CHACÓN et al., 2006), especialmente em países em desenvolvimentos e subdesenvolvidos sem tradição na coleta sistemática de infraestrutura de dados espaciais.

2.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

2.2.1 Fundamentos do SIG

Os primeiros SIGs foram desenvolvidos há 50 anos, por agências governamentais, para lidar com quantidades substanciais de dados espaciais no Canadá e nas agências estaduais dos EUA (CHACÓN et al., 2006). Nas análises geoespaciais sobre a superfície da Terra, estes sistemas se estendem da topografia à atmosfera, e abaixo da superfície da Terra tem-se análises do subsolo à geologia, operando em uma ampla faixa de escala espacial e temporal.

Com uma variação de escala entre o local, em centímetros, e o global, no caso de análises de aquecimento global da superfície ou expansão de epidemias, os SIGs são ferramentas computacionais que permitem análises geoespaciais para responder “o que” e “onde” acontecem os fenômenos ou eventos, através de relações entre seus atributos e suas localizações (SMITH et al., 2008).

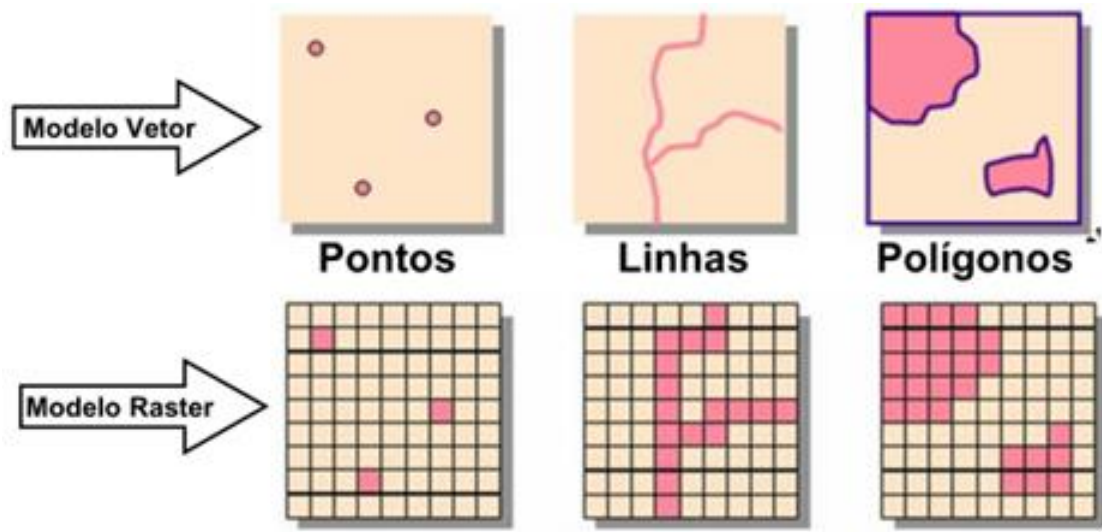
Alguns conceitos básicos relacionados ao SIG são encontrados em muitos livros voltados ao tema, dentre eles destacam-se (ELANGOVAN, 2006; SMITH et al., 2008):

- Lugar: um conjunto de medidas que permite especificar um lugar de forma inequívoca e significativa a todos, num sistema de coordenadas. No Brasil

o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) é o sistema de referência geodésico adotado para atividades da cartografia brasileira conforme resolução do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) N° 1/2005 (BRASIL, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPEG), 2005).

- Atributos: o termo usado para se referenciar a característica ou propriedade de um lugar. Os mais usuais atributos são:
 - Nominais: valores sem relação com importância ou potencial aritmético, como por exemplo um número de telefone;
 - Ordinais: valores com implicação de ordem de importância;
 - Intervalos: valores quantitativos que podem representar vários tipos de medidas;
 - Relações: valores onde a relação faz sentido na divisão de um atributo por outro, existindo relação com o zero absoluto;
 - Ciclos ou Direções: valores que representam direções ou ciclos como por exemplo datas de calendário e ângulos;
- Objetos: formas de representação espacial (Figura 6). Considerando avaliações em duas dimensões para representação de um lugar, as formas padrões são:
 - Ponto: par de coordenadas (latitude/longitude);
 - Linha: sequência ordenada de pontos conectada por uma linha;
 - Polígono: o Open Geospatial Consortium (OGC) define polígono como uma superfície planar formada por um contorno exterior e nenhum contorno interior. Cada contorno interior define um orifício em um polígono.
 - *Raster*: forma de representação usando células discretas arranjadas em uma grade regular com um atributo ou mais associados a cada posição da célula ou pixel (menor elemento em uma imagem).

Figura 6 - Representação de um modelo vetorial e um modelo *raster*



Fonte: Santos et al. (2014).

- Topologia: propriedade do dado que sobrevive a deformações e distorções produzidas no espaço. Por exemplo, no caso de adjacência de duas áreas, qualquer distorção ou deformação aplicada na superfície manterá a relação de adjacência entre os objetos (SMITH et al., 2008). Muitos são os artigos e livros que descrevem as propriedades topológicas, devido à sua importância para operações de geoprocessamento. As propriedades topológicas permitem:
 - Distinção entre ponto, linha, área e volume através de análise da dimensão topológica (0 vértices para ponto, 1 vértice para linha, 2 vértices para área e 3 vértices para volume);
 - Testes de adjacência (toque de regiões, estados e municípios);
 - Testes de conectividade (junção entre rios, estradas e linhas de transmissão);
 - Pertinência (avaliação entre elementos do mapa);
- Redes: constituem estruturas de uma dimensão incorporadas em duas ou três dimensões. Uma rede constitui um grafo e, muitas técnicas desenvolvidas para os grafos podem ter aplicações para redes, como medida de conectividade, menor caminho, área de serviço dentre outros. Alguns

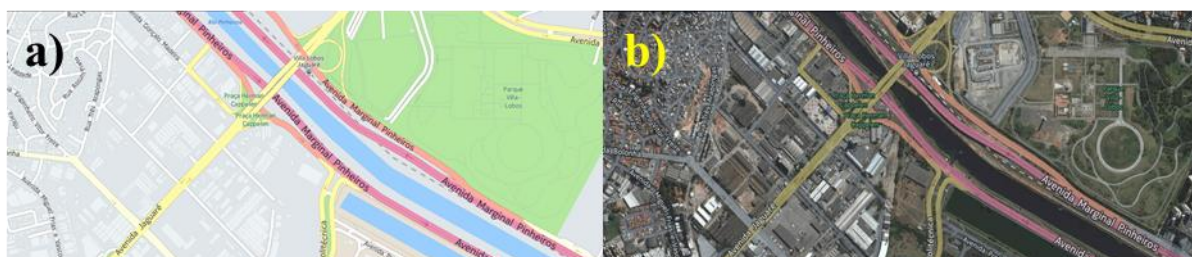
exemplos de representação de redes são os sistemas viários (SMITH et al., 2008) e hierarquização de topologias de rios (BRASIL, Agência Nacional de Águas (ANA) Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2012).

- Mapas: historicamente os mapas são confeccionados para comunicar e armazenar informações espaciais que são representações de objetos e atributos relacionados a um lugar.

Os mapas ganharam maiores aplicações e capacidades de armazenamento e comunicação de informações com os avanços tecnológicos gerados a partir do advento dos computadores. Atualmente, os SIGs são capazes de representar eventos dinâmicos, realizar operações e análises avançadas, armazenar um volume amplamente escalável de objetos e compartilhar os resultados em formatos que vão do papel tradicional à compartilhamentos através da Web. Um dos pioneiros no uso de SIG para deslizamentos de encosta foram Brabb et al. (1972) na Califórnia.

Como exemplo de um mapa, um ponto pode representar um endereço, uma linha pode representar uma ferrovia ou outras feições lineares e um polígono pode representar áreas, tais como parques, edificações dentre outros (Figura 7).

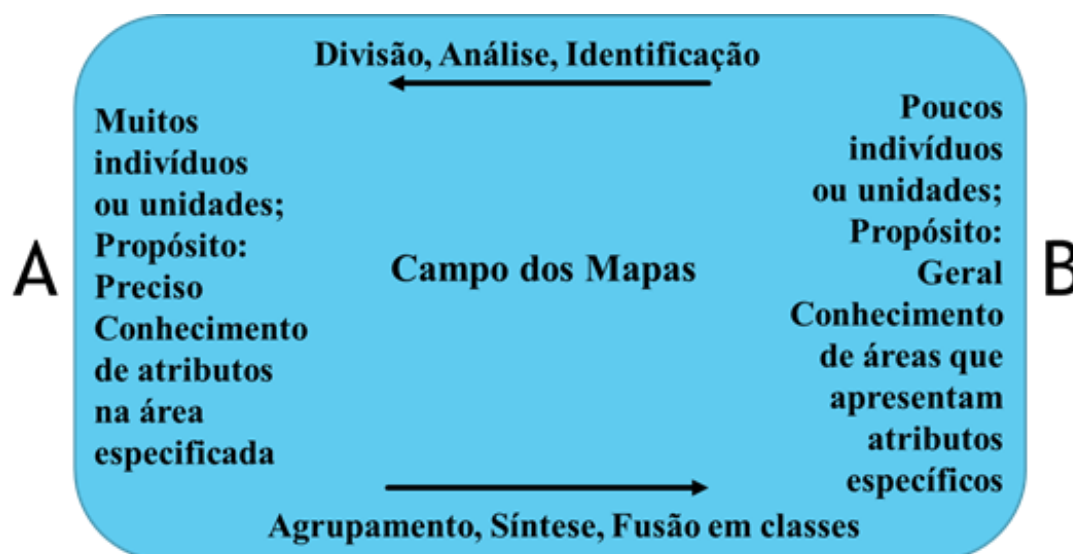
Figura 7 - a) Mapa com elementos representados por ponto, linha e polígono (vetorial);
b) Imagem *raster* com elementos vetoriais superpostos



Fonte: Autor com dados de <https://maps.here.com/?map=-23.54738,-46.73251,16,satellite>.

Uma das descrições pioneiras do campo de atuação dos mapas para os SIGs é tratada no trabalho de Varnes (1974) e ilustrada na Figura 8, destacando como as operações espaciais com mapas podem ajudar na identificação, análise e divisão da informação (A) ou, em sentido oposto no agrupamento, síntese e fusão dos conteúdos (B).

Figura 8: Campo de propósito dos mapas



Fonte: Traduzido de Varnes (1974).

Dentre o campo de atuação dos mapas proporcionados por um SIG, as análises realizadas ajudam a responder à algumas perguntas centrais, apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Perguntas centrais em análises usando SIG

Análise	Pergunta Principal
Condição	O que está
Localização	Onde está...?
Tendência	O que mudou...?
Roteamento	Por onde passar...?
Padrões	Qual o padrão
Modelos	O que acontece se...?
Temporal	Qual a dinâmica de...?

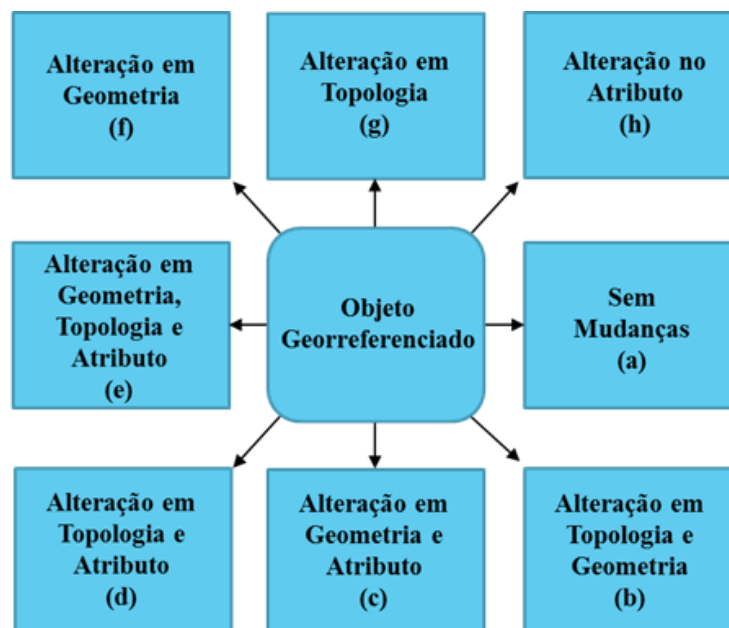
Fonte: Adaptado de Santos et al. (2014).

Ao responder estas perguntas pode-se entender fenômenos do mundo real os quais podem ser observados de três modos distintos (SANTOS et al., 2014):

- Espacial: estudos que tratam da variação de um lugar para outro;
- Temporal: estudos que tratam da variação de uma época para outra;
- Temático: estudos que tratam da variação de uma camada para outra com características diferentes.

Os componentes de mudança dos objetos espaciais nestes estudos ao longo do tempo (ABRAHAM; RODDICK, 1999) são: a geometria, a topologia e/ou os atributos, permitindo oito diferentes cenários, como representados de (a) a (h) na Figura 9.

Figura 9 - Cenários de mudanças espaço-temporais da representação de um objeto geográfico também conhecido como triângulo W (“Where-What-When”)



Fonte: Traduzido de Abraham; Roddick (1999).

2.2.2 Álgebra de Mapas

Através do uso do SIG, é possível realizar álgebra de mapas, que foi um conceito introduzido por Tomlin na década de 1980 para a manipulação de dados geográficos baseado em álgebra, no qual dois ou mais mapas *raster* podem ser combinados através de operações algébricas (CÂMARA; LUCENA, 2001; SMITH et al., 2008).

Na álgebra de mapas diferentes operações podem ser realizadas, como operações sobre objetos, operações sobre campos, operadores de transformação entre campos e objetos, e operadores mistos entre objetos e campos (CORDEIRO et al., 2001).

O SIG habilita todas as funcionalidades de álgebra de mapas seja com operadores locais (resultados são funções de valores associados ao mesmo local), de vizinhança (resultados são baseados na dimensão e forma da vizinhança em torno de cada local de análise) ou zonais

(resultados são definidos sobre regiões específicas de um campo de entrada normalmente envolvendo restrições definidas através de operadores booleanos de outros campos) (CORDEIRO et al., 2001; SMITH et al., 2008).

Em álgebra de mapas, diferentes tipos de operadores podem ser utilizados, tais como: aritméticos, relacionais, trigonométricos e estatísticos, permitindo a consolidação dos resultados. Algumas operações locais são extensões naturais de operações matemáticas ou booleanas.

Para geração do mapa de susceptibilidade usando SIG, a álgebra de mapas é muito presente, sendo normalmente realizadas operações de transformação, como ponderações, reclassificações e fatiamento de classes.

Normalmente, na preparação de dados SIG, outras operações de álgebra de mapas são também de grande importância, como os operadores de vizinhança ou interpolação usados para cálculo de declividades, densidades e estatísticas de vizinhança ao entorno a um ponto.

Uma das formas de determinar os ponderadores para a geração de mapas de susceptibilidade pode ser com o uso da técnica do Processo Hierárquico Analítico (AHP) que será mais detalhado na subseção 3.3.

As operações zonais existentes em álgebra de mapas são importantes para determinar estatísticas simples (média, moda, máximo,...) envolvendo valores associados a locais de regiões especificadas dada por uma restrição (CORDEIRO et al., 2001), são de grande relevância nas análises em plataformas de monitoramento dinâmicas e que conjugadas com atribuições condicionais permitem a geração de alertas e notificações em tempo real em grandes regiões monitoradas.

Por vezes, um mapa de susceptibilidade gerado usando técnicas de álgebra de mapa pode se tornar um objeto monitorado em plataformas de análise à riscos extremos que, por sua vez, faz uso de álgebra de mapas para identificar alertas baseados em médias ou máximos acumuladas de eventos naturais em determinada região.

O mapa de susceptibilidade usado em plataformas de monitoramento pode estar em formato *raster* mas, em muitos casos, depois de ser fatiado em classes, é transformado do modo *raster* para o vetorial, por ser um formato mais leve de ser manipulado.

2.2.3 Plataforma de Monitoramento, Análise e Alerta à Riscos Ambientais

Uma nova dimensão aplicada aos estudos espaciais tem sido registrada com a inclusão de informações temporais e que geram cenários de mudanças apresentadas pelo triângulo W (“Where-What-When”) (ABRAHAM; RODDICK, 1999), principalmente advinda da ampliação do poder computacional e disponibilidade de informações.

Os trabalhos de Câmara; Freitas (1995), Abraham; Roddick (1999), Peuquet (2001) e Goodchild (2010) resgatam desde o panorama histórico do uso de informações espaço-temporais até a importância da multidisciplinariedade para atingir o conhecimento ou redescobrimto de uma variedade de paradigmas científicos.

Não foram tratadas as particularidades dos ambientes que permitem análises espaço-temporais, mas a habilidade de geração de análises e alertas a partir do conceito de evento dado pela existência da informação de posição e tempo a um determinado evento.

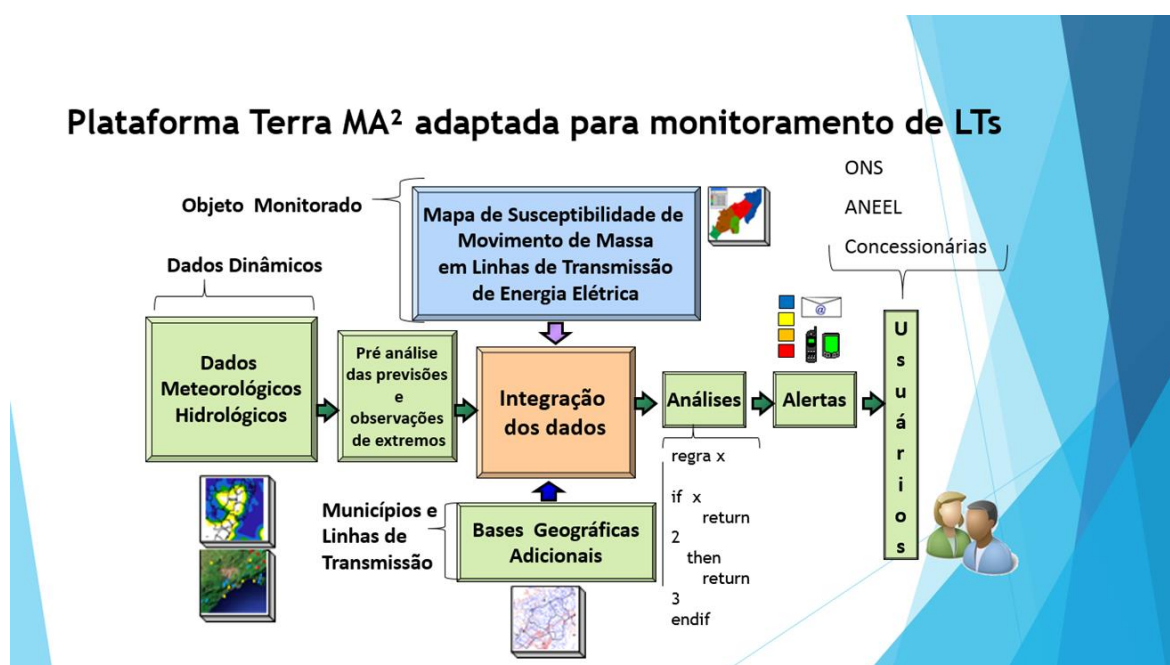
Os eventos catalisadores que influenciam as linhas de transmissão, como chuvas, ventos, raios e queimadas, podem ser caracterizados por eventos com informações de posição e tempo associados. No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (BRASIL, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Ministério da Ciência, Tecnologia, 2012) desenvolveu uma plataforma que permite trabalhar com informações espaço temporais para monitoramento, análise e alerta à riscos ambientais. A plataforma é composta por módulos e serviços que usam uma base de dados geográficos tanto para entrada de dados como para saída das análises usadas nos alertas (BRASIL, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Ministério da Ciência Tecnologia Inovações e Comunicações (MCTIC), 2013).

A plataforma de monitoramento amplia a capacidade de preparação para desastres naturais, sendo um fator chave na redução do seu impacto na sociedade (ARRUDA JUNIOR et al., 2015) uma vez que no estudo de fenômenos de deslizamento de encostas a dinâmica hidrológica está relacionada ao aumento da instabilidade nas encostas e a redução da resistência dos solos, normalmente provocada por chuvas tropicas, dentre outros fenômenos. Por vezes, estes fenômenos estão associados à influência das mudanças climáticas geradas pelo homem.

A plataforma de monitoramento, análise e alerta está baseada no conceito de serviços (SOA – *Service Oriented Architecture*), na qual um serviço é uma funcionalidade independente que aceita uma ou mais requisições e retorna um ou mais resultados.

A arquitetura da plataforma utiliza um banco de dados PostgreSQL como sistema de banco de dados espacial para armazenamento dos resultados, entrada dos dados vetoriais do mapa de susceptibilidade (informação estática) e armazenamento de dados dinâmicos (hidro meteorológicos) monitorados. Este banco de dados pode ainda ter bases geográficas auxiliares armazenadas, como limites de municípios, grids populacionais estatísticos, linhas de transmissão, dentre outros temas. A plataforma também armazena as regras de execução das análises e definição dos parâmetros de alertas. A concepção geral da plataforma é apresentada na Figura 10.

Figura 10 - Concepção geral da plataforma para monitoramento de Linhas de Transmissão a partir do mapa de susceptibilidade de movimento de massa e dados meteorológicos e hidrológicos dinâmicos.



Fonte: Adaptado pelo autor de <http://www.dpi.inpe.br/terrama2/doku.php>

Na Figura 10 pode ser observado que dados dinâmicos estabelecem as condições das variáveis obtidas a intervalos de tempo pré-determinados. O objeto monitorado é um dado estático, neste caso, o mapa de susceptibilidade de movimento de massa em linhas de transmissão (formato vetorial), e que contém informações sobre as pré-condições necessárias para a ocorrência de algum alerta. O objeto monitorado pode ser atualizado sempre que seja feito um refinamento no mapa de susceptibilidade devido à modificação das camadas de

dados usadas na álgebra de mapas, à melhoria da precisão e escala dos dados utilizados ou mesmo à modificação nos parâmetros do modelo de análise multicritério utilizado.

No caso de bases de dados geográficas adicionais, elas podem ter quaisquer informações espaciais que auxiliem a localização ou explicação das análises e alertas.

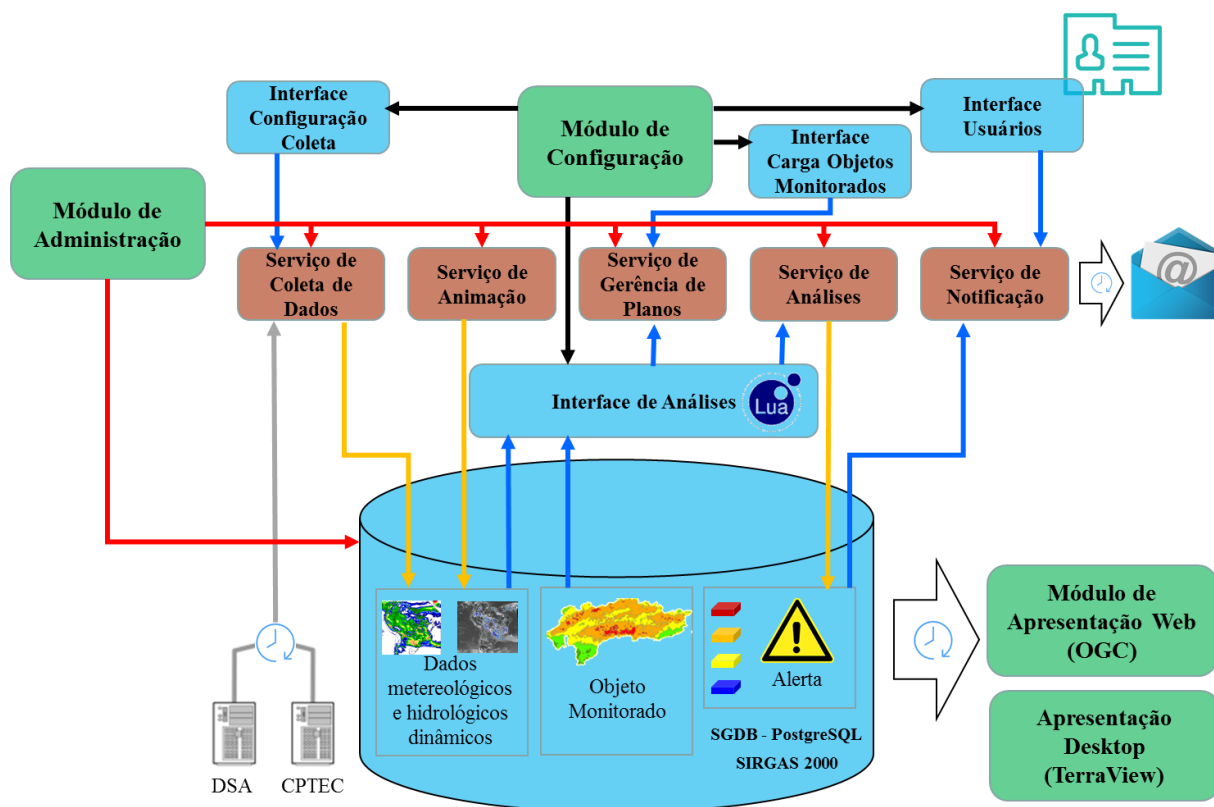
As regras de análises devem ser desenvolvidas com a linguagem de programação Lua¹ e este módulo da plataforma ficará encarregado pelo cruzamento entre os dados de entrada (dados dinâmicos e objeto monitorado). Sempre que um novo dado for disponibilizado ao sistema, frente as regras implementadas, as análises são novamente realizadas.

O módulo de alerta é o responsável por gerar as mensagens e relatórios com as informações dos níveis de risco detectados no sistema de análise. Vale destacar que o módulo de análise e alerta podem ser caracterizados como um Sistema Baseado no Conhecimento (SBC) e que podem ter novas condições e relatórios implementados à medida que se ganha mais conhecimento sobre a região de estudo. A interface com os usuários pode ser por e-mail, SMS ou mesmo através de consulta a um serviço WEB.

A arquitetura da plataforma de monitoramento, análise e alerta pode ser melhor apresentada com a Figura 11, na qual observam-se os módulos de configuração e de administração como os responsáveis, respectivamente, por configurar o sistema (servidores externos para entrada de dados, análises, carga de objetos monitorados e interface de usuários) e os serviços internos da plataforma (coleta de dados, gerência dos dados, análises, notificações, animações e interfaces com o Sistema Gerenciamento de Banco de Dados - SGDB).

¹ É uma linguagem de *script* que combina sintaxe processual simples com construções de descrição de dados baseadas em matrizes associativas e semântica extensível. É executado pela interpretação de *bytecode* com uma máquina virtual baseada em registradores e tem gerenciamento de memória automático. Foi projetado, implementado e é mantido pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RJ).

Figura 11 - Arquitetura interna da plataforma para monitoramento de Linhas de Transmissão a partir do mapa de susceptibilidade de movimento de massa e dados meteorológicos e hidrológicos dinâmicos.



Fonte: Adaptado pelo autor para uso no monitoramento de linhas de transmissão de energia elétrica de <http://www.dpi.inpe.br/terrama2/doku.php>

Os serviços, que atuam de forma independente, são os responsáveis pelo:

- Serviço de Coleta de Dados: Controla a entrada de dados dinâmicos providos por servidores remotos através de download e inclusão no SGDB.
- Serviço de Análise: Responsável pelo cruzamento entre as informações dinâmicas, objeto monitorado e dados adicionais para determinação de alertas.
- Serviço de Gerência de Planos: Executa o serviço controle das informações na base de dados geográficos como a inclusão de resultados das análises.
- Serviço de Notificação: envio de mensagens e relatórios contendo informações a respeito das alterações nos níveis de risco detectados pelo serviço de análise. A notificação é enviada através de correio eletrônico para os usuários cadastrados.

- Serviço de Animação: gera conjunto de imagens para animação do módulo de apresentação WEB. Controla a camada de referência e o período da animação facilitando assim a disseminação do resultado

Outro módulo importante da plataforma é o módulo de apresentação WEB, que disponibiliza os dados presentes no SGDB em formatos WFS, WMS e WCS do Open GIS Consortium (OGC), ampliando sua disseminação e garantindo a associação com seus metadados.

A plataforma de monitoramento, análise e alerta à riscos ambientais possibilita a execução das análises de duas formas distintas, através de estudo de situações passadas armazenadas no banco de estudo, executando o modelo para uma área e período específicos ou como operação em tempo real, nesse caso com dados dinâmicos recebidos pela plataforma através da internet.

Neste ponto do estudo, a atenção foi direcionada para mostrar a associação entre o mapa estático gerado de susceptibilidade de movimento de massa em linhas de transmissão com informações dinâmicas de eventos catalizadores a partir do uso de uma plataforma de monitoramento. Com isso, a implementação de configurações iniciais e operacionalização da plataforma de monitoramento, análise e alerta à desastres naturais, buscou demonstrar a exequibilidade da proposta como um instrumento de gestão pública para diferentes níveis de alertas, e especialmente, quando as condições meteorológicas monitoradas destacam a possibilidade ou a ocorrência de um evento extremo.

2.3 PROCESSO HIERÁRQUICO ANALÍTICO (AHP) DE DADOS ESPACIAIS

O Processo Hierárquico Analítico, em inglês *Analytical Hierarchy Process* (AHP), é uma abordagem estruturada proposta por Saaty (1977, 1990) para análise de decisões complexas tendo em consideração um grande número de fatores ou critérios. É uma abordagem de tomada de decisão multicritério em que os fatores são organizados em uma estrutura hierárquica. Fundamentalmente, o processo de tomada de decisão é baseado na decomposição do problema em uma hierarquia de sub-problemas mais simples com avaliação sistemática e independente (GORSEVSKI et al.; 2012; TAHERI et al.; 2015; KUMAR; VAIDYA, 2006).

Devido à sua facilidade de uso e entendimento (HO, 2008; BRATS, 2010), o AHP tem sido extensivamente aplicado nos últimos 40 anos em centenas de estudos, combinando este processo com aplicações de diversas áreas, tais como: finança, educação, engenharia, governo, indústria, gestão, manufatura, pessoal, meio ambiente, política, social e desportivo (VAIDYA; KUMAR, 2006). Esse processo muitas vezes também está integrado com outras técnicas (matemáticas, estatísticas, lógica *fuzzy*, programação) a fim de considerar não apenas os fatores qualitativos e quantitativos, mas também algumas limitações de recursos do mundo real.

Ao se construírem hierarquias, devem-se incluir detalhes suficientes e relevantes para representar o problema da forma mais completa possível, evitando exageros que possam levar à perda de sensibilidade de mudança na comparação dos elementos. O ambiente no qual o problema está situado ajuda na identificação das questões ou atributos que contribuem para a solução (SAATY, 1990).

No AHP, com base no julgamento dos tomadores de decisão ou avaliadores experientes, os dados quantitativos e qualitativos disponíveis são analisados quanto ao seu peso relativo em relação aos critérios de decisão da hierarquia, buscando-se avaliar as alternativas existentes. Os diferentes critérios são ponderados através de um método comparável aos pares, sendo no passo subsequente calculadas as prioridades para cada uma das alternativas de decisão (TAHERI et al., 2015). Os resultados da AHP são em grande parte dependentes do conhecimento e da experiência dos especialistas que selecionam os pesos dos critérios considerados no processo de decisão (HO, 2008; KUMAR; VAIDYA, 2006).

A importância relativa dos parâmetros é traduzida para uma contínua escala de classificação de 9 pontos formada por uma matriz de comparação aos pares (SAATY, 1990). As classificações são dadas pelos valores 1, 3, 5, 7 e 9, no qual 1 apresenta a mesma importância entre os elementos avaliados e o 9 representa a importância extrema para cada comparação. Os valores de 2, 4, 6 e 8 são usados como intermediários na escala. Comparando um parâmetro com o próprio, gera-se uma classificação igual a 1. Recíprocos representam a comparação de um par de parâmetros no sentido inverso. Por exemplo, se o parâmetro A está no extremo relativo mais importante em comparação ao parâmetro B, é dada uma classificação de valor 9. A comparação em sentido inverso, do parâmetro B em relação ao parâmetro A, é dada uma classificação de valor $1/9$. Uma vez que a cada possível par de parâmetros tenha sido atribuída uma classificação, os pesos são calculados por álgebra

matricial utilizando o método autovetor (*eigenvector*) para encontrar o vetor máximo ou principal da matriz (DRAGIĆEVIĆ et al., 2015).

Segundo a teoria de Perron-Frobenius, a existência de um maior autovetor real positivo, para matrizes com entradas positivas, está associada ao vetor de pesos. Este vetor é normalizado por ter suas entradas somadas com valor igual a 1 (SAATY, 1977).

Na produção do mapa final, os valores de peso calculados são a média de todas as formas possíveis de comparação dos parâmetros, representando a importância de um parâmetro para com o outro (DRAGIĆEVIĆ et al., 2015).

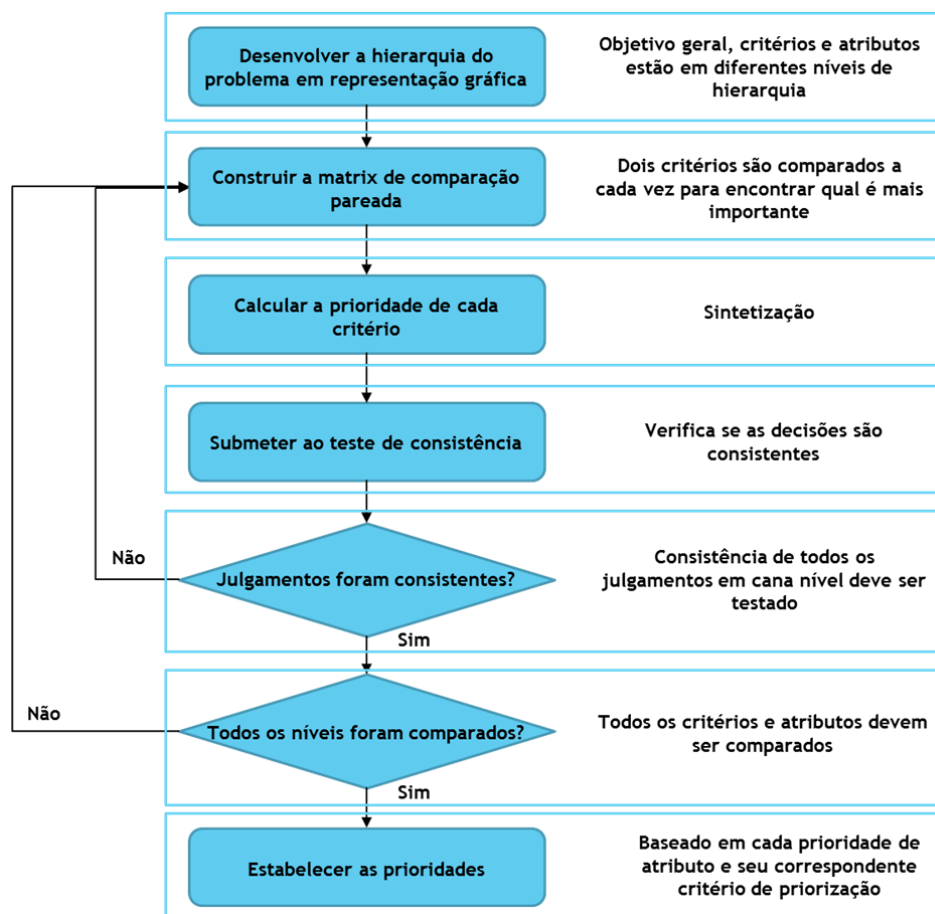
Um passo importante do método AHP é avaliar a consistência de seus resultados, uma vez que o cálculo dos pesos usando uma comparação de pares pode resultar em muitas variações. Uma razão de consistência (RC) foi proposta por Saaty (1977) e consiste em uma medida da probabilidade de que as classificações da matriz foram geradas aleatoriamente. Valores de RC menores que 10% são considerados aceitáveis (DRAGIĆEVIĆ et al., 2015; KUMAR; VAIDYA, 2006).

Uma forma de visualizar todo o fluxo do AHP é apresentado na Figura 12 proposta por Ho (2008) e também relatada em sete passos por Kumar; Vaidya (2006). Nesta figura destaca-se que, após a representação gráfica do problema com bom entendimento de seus objetivos, critérios e atributos, deve-se construir a matriz pareada com julgamento de consistência para todos os critérios analisados, sendo que somente quando todos os julgamentos forem satisfatórios é que se pode dizer que as prioridades foram estabelecidas.

O método AHP geralmente é implementado em quatro fases:

- (1) decomposição de um problema de decisão e construção de um modelo hierárquico de critérios de decisão e variantes que afetam a solução do problema;
- (2) comparação pareada dos critérios e geração do vetor de pesos para os critérios individuais conforme Tabela 3;
- (3) decisão pareada em relação aos critérios individuais e geração dos vetores de pesos locais para essas variantes em relação a esses critérios;
- (4) determinação do vetor de preferências globais de variantes de decisão, organizados em relação à contribuição das variantes para alcançar o objetivo do problema que é a decisão final.

Figura 12 - Fluxograma do processo hierárquico analítico



Fonte: Traduzido de Ho (2008).

Tabela 3 - Escala básica de comparação pareada de objetos do método AHP

Escala	Comparação	Importância
1/9	Extremo	Menos Importante
1/8	Entre Muito Forte e Extremo	
1/7	Muito Forte	
1/6	Entre Forte e Muito Forte	
1/5	Forte	
1/4	Entre Moderado e Forte	Igual Importância
1/3	Moderado	
1/2	Entre Igual e Moderado	
1	Igual	
2	Entre Igual e Moderado	
3	Moderado	Mais Importante
4	Entre Moderado e Forte	
5	Forte	
6	Entre Forte e Muito Forte	
7	Muito Forte	
8	Entre Muito Forte e Extremo	Mais Importante
9	Extremo	

Fonte: Saaty (1990); Dragičević et al. (2015); Podgórski (2015).

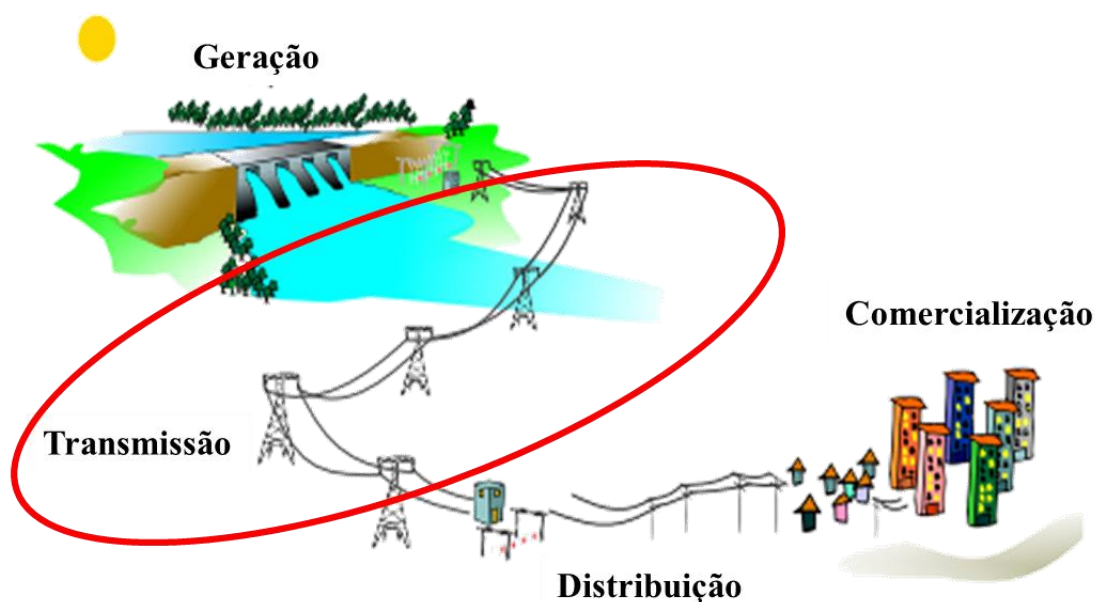
O estudo realizado por Van Westen et al. (2008) destaca algumas principais camadas de dados usados em análises de escorregamentos e frequências de atualizações habituais bem como a importância em relação as escalas de análises (Tabela 1).

Aspectos como modelo digital de elevação, declividade e aspecto do relevo, uso do solo, litologia, geomorfologia são presentes em praticamente todos os trabalhos relacionados a escorregamento de encostas (CHACÓN et al., 2006; FELL et al., 2008b; LIAO et al., 2011; MEINHARDT et al., 2015; VAN WESTEN et al., 2008) e em trabalhos relacionados à processos multicritérios como o AHP (DRAGIĆEVIĆ et al., 2015; TAHERI et al., 2015; YU et al., 2011; PUISSANT et al., 2013; LI et al., 2015; YOUSSEF, 2015).

2.4 SISTEMA INTEGRADO NACIONAL E CONTEXTO DA REGIÃO DE ESTUDO

As linhas de transmissão representam um papel importante na regulação entre geração e consumo de energia elétrica, uma vez que a energia gerada quase nunca é utilizada ou consumida no lugar de sua geração. Na representação da Figura 13 é destacada, em vermelho, a parcela do sistema de transmissão de energia, foco do estudo.

Figura 13 – Representação simplificada do sistema elétrico entre a geração e o uso da energia elétrica



Fonte: Adaptado pelo autor de BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) Ministério de Minas e Energia (MME), (2007)

No caso do Brasil, o serviço de transporte de grandes quantidades de energia elétrica por longas distâncias é feito utilizando-se uma rede de linhas de transmissão e subestações em tensão igual ou superior a 230 kV, denominada Rede Básica (BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) Ministério de Minas e Energia (MME), 2004).

A operação e a administração da Rede Básica são atribuições do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) com a responsabilidade de gerenciar o despacho de energia elétrica das usinas em condições otimizadas.

As empresas de transmissão de energia, ao disponibilizarem o sistema de transmissão à ONS e prestarem serviço público de transmissão, recebem pagamentos baseados na configuração de suas redes e carga conectada (BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) Ministério das Minas e Energia (MME), 2014).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) conecta as usinas hidrelétricas e termelétricas do Brasil em uma grande rede de transmissão. Com isso, é possível que a energia produzida no Sul do país seja conduzida e utilizada no Nordeste. De acordo com a ONS, o sistema interligado brasileiro é dividido em dois subsistemas: o Sul/Sudeste/Centro-Oeste e o Norte/Nordeste. O sistema de transmissão de energia conta com mais de 800 linhas de transmissão, que totalizam 125.640 km de extensão (BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética (EPE) Ministério das Minas e Energia (MME), 2015) e são explorados, atualmente, por oito grandes empresas: Furnas, Chesf, Eletronorte, Eletrosul, CEEE, Copel, CTEEP e Cemig. (PORTELLA, 2009). As principais tensões de transmissão utilizadas no Brasil são apresentadas na Tabela 4 com prevalência para circuitos em 230 kV de corrente alternada devido a capilaridade hoje implementada com muitas linhas de pequena extensão, com distâncias inferiores a 80 km.

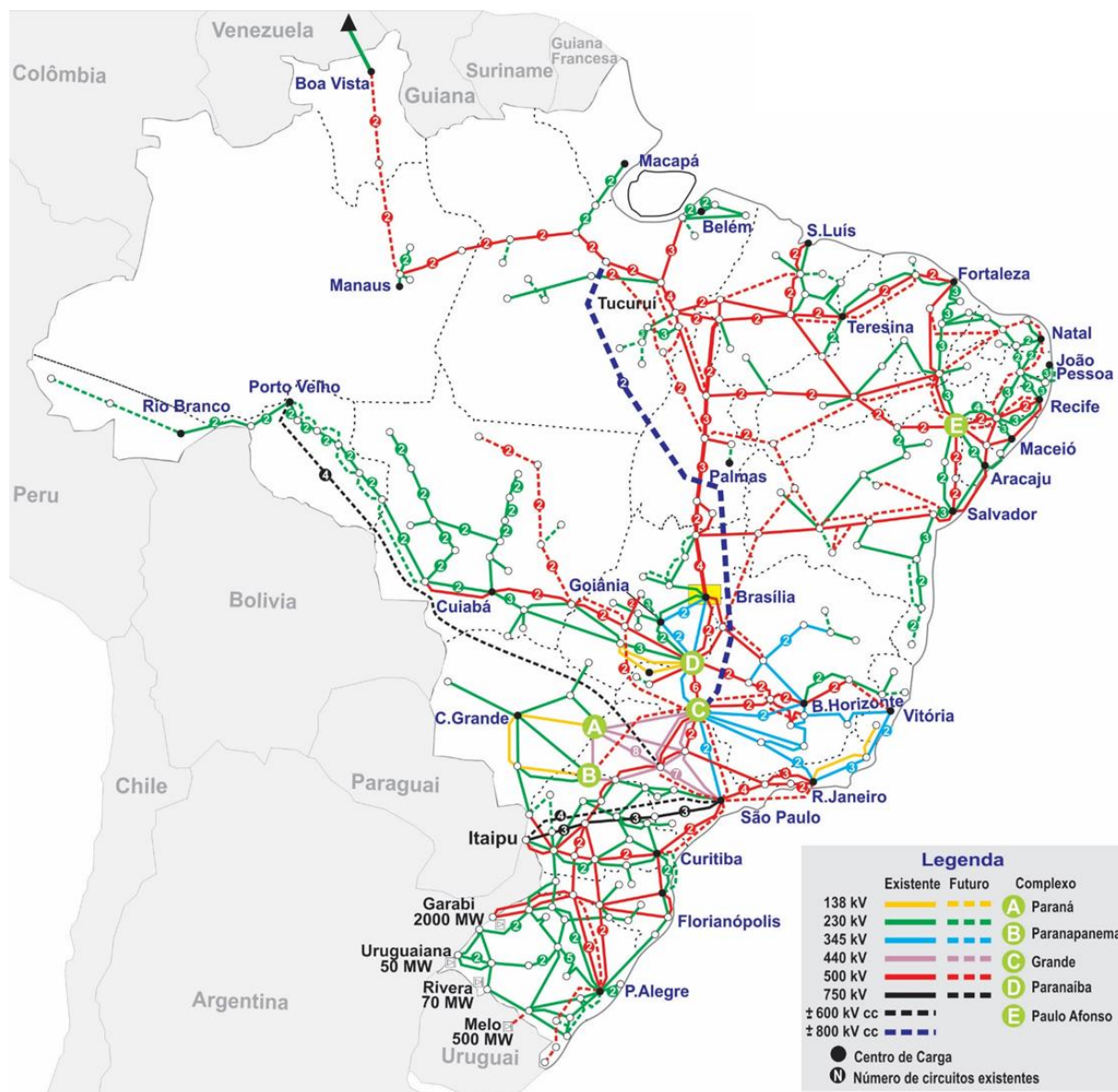
Tabela 4 – Tensões de transmissão utilizadas no Brasil para transmissão de energia elétrica

Tensão da Rede	Extensão das Linhas de Transmissão	Participação em 2014 (%) (2014)
230 kV	52.450	41,7
345 kV	10.303	8,2
440 kV	6.728	5,4
500 kV	40.659	32,4
600 kV CC	12.816	10,2
750 kV	2.683	2,1
Total	125.640	100,0

Fonte: BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética (EPE) Ministério das Minas e Energia (MME), (2015).

A Figura 14 ilustra o mapa geoeletrico da rede de operação de transmissão de energia elétrica para o horizonte de 2016 no Brasil atualizado em 31 de maio de 2015 pela ONS. Este estudo irá se concentrar nos circuitos que interligam os estados do RJ e SP.

Figura 14 – Mapa geoeletrico brasileiro da rede de operação de transmissão de energia elétrica do Sistema Integrado Nacional



Fonte: BRASIL, Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) Ministério das Minas e Energia (MME), (2015).

O sistema de transmissão é construído dentro do critério N-1, o que representa que a perda isolada de um elemento do sistema não deve ocasionar interrupção no fornecimento, pois uma outra linha que opera em paralelo deve suprir à demanda, porém os circuitos em regiões montanhosas são em número reduzidos e de maior dificuldade de reestabelecimento.

Como a transmissão de energia elétrica se faz necessária para conectar os centros urbanos onde concentram-se grandes cargas, os maiores desafios a serem transpostos são as cadeias montanhosas e a malha hidrográfica.

No contexto de estudos desta natureza, a interdisciplinaridade de Engenharia Elétrica, Engenharia Mecânica, Geologia da Engenharia e Ciência da Terra e Ciência da Computação se unem para modelar fatores estáticos e dinâmicos do ambiente.

A Geologia de Engenharia como área do conhecimento é uma ciência dedicada à investigação, estudo e solução dos problemas de engenharia e meio ambiente decorrentes da interação entre as obras e atividades do homem e o meio físico geológico, assim como ao prognóstico e desenvolvimento de medidas preventivas ou reparadoras de riscos geológicos (SANTOS, 2008). Dentre dela, a Cartografia Geotécnica embasa a elaboração de mapas que expõem a previsão do comportamento do meio físico (água, materiais inconsolidados², relevo e rochas), na forma de processos diversos que interferem em obras de engenharia e atividades humanas. Assim, a elaboração de mapa de susceptibilidade permite a delimitação de criticidade de regiões com base nas propriedades ou comportamentos geotécnicos (ZUQUETTE; GANDOLFI, 2004).

A Ciência da Computação e a Ciências da Terra apoiam no que diz respeito a implementação de sistemas de informações geográficas e operacionalização de metodologias computacionais para operacionalização de um sistema de análise e alerta.

Existe uma grande variedade de mapas geotécnicos (mapas de suscetibilidade ou perigo de movimentos de massa, risco de deslizamentos e inundações, aptidão física para urbanização, etc), sendo os mapas de suscetibilidade e risco à movimentos de massa voltados na delimitação espacial classificadas quanto à probabilidade de ocorrência destes processos. Diversas metodologias de mapeamento de perigo (*hazard*) são encontradas na literatura, sendo apontado por Pardeshi et al (2013) a Heurística, semi-quantitativa, quantitativa, probabilística e multicritério decisório³.

Movimentos de massa formam um grupo amplo de processos naturais da dinâmica superficial terrestre (geomorfológico e hidrológico) que possuem como característica básica a

² diferentes tipos de solos, sedimentos e rochas alteradas moles que frequentemente compõem as coberturas superficiais dos terrenos terrestres.

³ A avaliação de risco de deslizamento envolve a consideração de várias variáveis de deslizamento de terra. É uma tarefa crítica determinar a contribuição relativa de um parâmetro individual na ocorrência de deslizamentos. Por conseguinte, a aplicação da abordagem de tomada de decisão com critérios múltiplos é de extrema importância no mapeamento de perigo. O Processo Hierárquico Analítico (AHP) é um processo de tomada de decisão multicritério de medição através de comparações de pares e se baseia nos julgamentos dos especialistas para derivar escalas de prioridade (Saaty 2008).

desagregação, o transporte e a deposição de massas das encostas pela energia gravitacional. Podem ter geometria, volume e velocidades variadas resultando impactos diversos. Por serem processos gravitacionais, estão diretamente ligados ao equilíbrio limite de massas localizadas nas encostas e assim, a fatores topográficos além daqueles relacionados às mecânicas de rochas e solos, tais como a inclinação, comprimento e forma das encostas que se demonstram como agentes predisponentes para sua ocorrência. No Brasil, dadas às características climáticas das paisagens no território, os movimentos de massa mais comuns estão relacionados à dinâmica hidrológica, sendo a chuva o agente imediato deflagrador destes processos, pela redução da resistência dos materiais ou pela indução do comportamento plástico ou fluído nos solos.

Desta forma, este estudo busca entender o comportamento de encostas na Serra da Mantiqueira para o setor elétrico, dando especial atenção à Serra da Mantiqueira e porção da bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul através da geração de um mapa de susceptibilidade de movimento de massa.

A Serra da Mantiqueira é uma cadeia montanhosa que se estende por três estados do Brasil: São Paulo (30%), Minas Gerais (60%) e Rio de Janeiro (10%). O maciço rochoso possui aproximadamente 500 km de extensão, tendo início próximo à cidade de Bragança Paulista e segue para o leste, delineando as divisas dos três estados brasileiros até a região do Parque Nacional do Itatiaia, onde adentra Minas Gerais até a cidade de Barbacena. Seu ponto culminante é a Pedra da Mina, com 2.798 metros de altitude, na coordenada 22°25'41"S e 44°50'34"O, na tríplice divisa dos municípios de Queluz e Lavrinhas, no estado de São Paulo, com o de Passa Quatro em Minas Gerais.

O ponto de transposição mais baixo da Serra da Mantiqueira é a Garganta do Embaú, que apresenta uma altitude de 1133 metros e está localizada no ponto de coordenadas 22°28'05"S e 45°00'12"O, entre as cidades de Cruzeiro no estado de São Paulo e a cidade de Passa-Quatro em Minas Gerais (MOSSRI, 1998).

A Serra da Mantiqueira conta com diversas unidades de conservação que fazem parte de um dos 14 mosaicos ecológicos definidos pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (Lei 9985 - Constituição Brasileira, 2000), destacando-se o Parque Nacional do Itatiaia e os Parques Estaduais dos Mananciais de Campos do Jordão, da Serra do Brigadeiro e Serra do Papagaio, dentre outros nas esferas federal, estaduais e municipais.

Na região de estudo, por sua grande extensão, é possível observar grande variações de declividade, diferentes ocupações e a presença de tipos de solo susceptíveis a escorregamentos translacionais e rotacionais (Figura 15a; b).

Na Figura 15c ainda é possível visualizar os principais rios e sub-bacias presentes na Bacia do Rio Paraíba do Sul e que cobre parte da área de estudo.

Figura 15 – a) Imagem da região de estudo com destaque para diversidade de altitude e ocupação do solo; b) Modelo em relevo demonstrando a variação de declividade do relevo na região; c) Representação da bacia do Rio Paraíba do Sul, suas sub-bacias e principais rios



Fonte: a) Google (2015), b) Google (2015) e c) Braga et al. (2008)

Na região é possível ainda identificar fragmentos de floresta por toda a área com elevada diversidade de relevos como serras, morros e colinas conforme pode ser visto na Figura 16.

A bacia do Rio Paraíba do Sul está inserida nos territórios dos estados de São Paulo (13.900 km²), Rio de Janeiro (20.900 km²) e Minas Gerais (20.700 km²), onde vivem cerca de 14,3 milhões de pessoas em uma das mais importantes regiões industriais do país e onde se localizam várias cidades de médio e grande porte (SOARES, 2008).

Figura 16 – Detalhe da paisagem com morros e colinas na área de estudo, destacando a presença de fragmentos de floresta e Linhas de Transmissão



Fonte: Autor (2016)

A região da bacia do Rio Paraíba do Sul possui alta diversidade do meio físico e evolução geológica complexa (ROSS; MOROZ, 1996). Na região é possível identificar três

unidades geológicas-geomorfológicas bem distintas: a) rochas pré-cambrianas associadas com relevos de morros e serras; b) sedimentos terciários associados a relevos suaves; c) sedimentos quaternários associados à extensas planícies aluviais. Esta grande diversidade geológica-geomorfológica tem contribuído para o desenvolvimento de diversas unidades pedológicas, tais como latossolos, argissolos, cambissolos e gleissolos. A grande variação de altimetria observada também favorece os processos orográficos, sendo em parte, responsável pela significativa variabilidade temporal (entre 1.300 e 2.400 mm/ano) e espacial das precipitações regionais (SOARES, 2008; SIMÕES; BARROS, 2007).

Tendo em vista que na região Sudeste, as áreas da Serra da Mantiqueira e Bacia do Rio Paraíba do Sul possuem linhas de transmissão que interligam importantes centros de carga do SIN e encontram-se em uma região com relevo bastante acidentado, torna-se relevante o conhecimento da susceptibilidade de movimento de massa presentes próximos a esses empreendimentos para maior segurança e estabilidade de todo o sistema elétrico nacional.

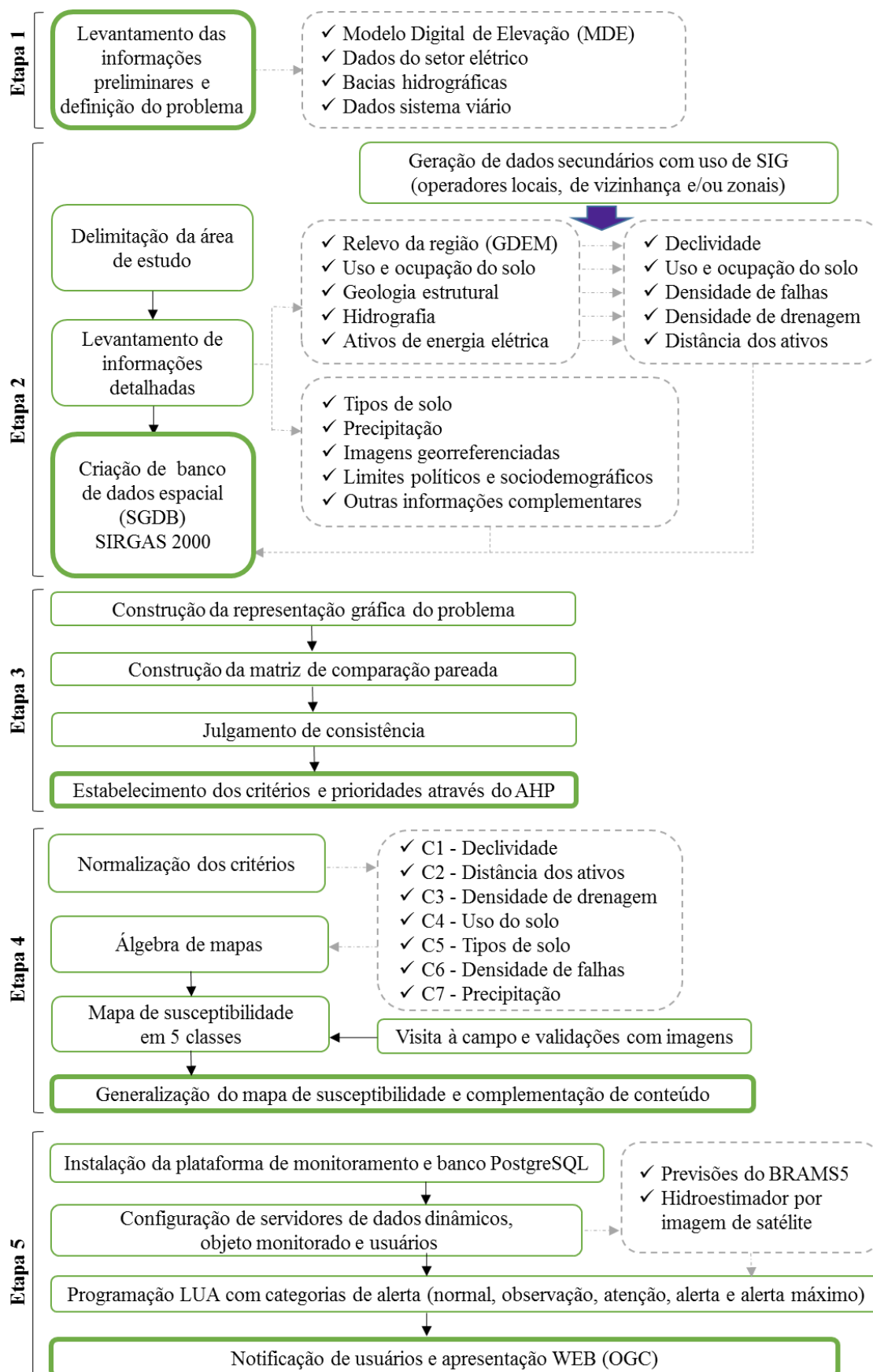
O estudo da susceptibilidade de movimento de massa em determinadas áreas da região Sudeste é importante, uma vez que essa região apresenta paisagens cada vez mais povoadas e as cidades encontram-se em constante ampliação, com substituição das paisagens naturais por aumento de infraestrutura e habitações, influenciando as relações e dinâmicas da paisagem pré-existente. No caso deste estudo, o uso de SIG permite a ponderação de diferentes critérios que influenciam na estabilidade das encostas em áreas extensas relacionadas aos empreendimentos de linhas de transmissão de energia, gerando uma melhor compreensão regional.

Com a melhoria das técnicas de sensoriamento remoto e aumento da qualidade e quantidade de sensores para captura de informações geoespaciais, aliado a maior capacidade das ferramentas de geoprocessamento (FELL et al., 2008b), este estudo busca a definição de áreas mais suscetíveis a movimento de massa na região dos empreendimentos do setor elétrico principalmente relacionados à escorregamentos translacionais rasos, que podem ser especialmente afetadas por eventos catalisadores como chuvas tropicais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi realizado em 5 etapas: 1) Levantamento de informações preliminares e definição do problema; 2) Caracterização da área e estudo e criação do banco de dados espacial (SGBD); 3) Estabelecimento de um modelo hierárquico analítico para análise de susceptibilidade de movimento de massa; 4) Geração de mapa de susceptibilidade de movimento de massa em linhas de transmissão; 5) Operacionalização de um sistema de monitoramento, análise e alerta dinâmico para as áreas de alta criticidade (Figura 17).

Figura 17 – Fluxograma das etapas deste estudo

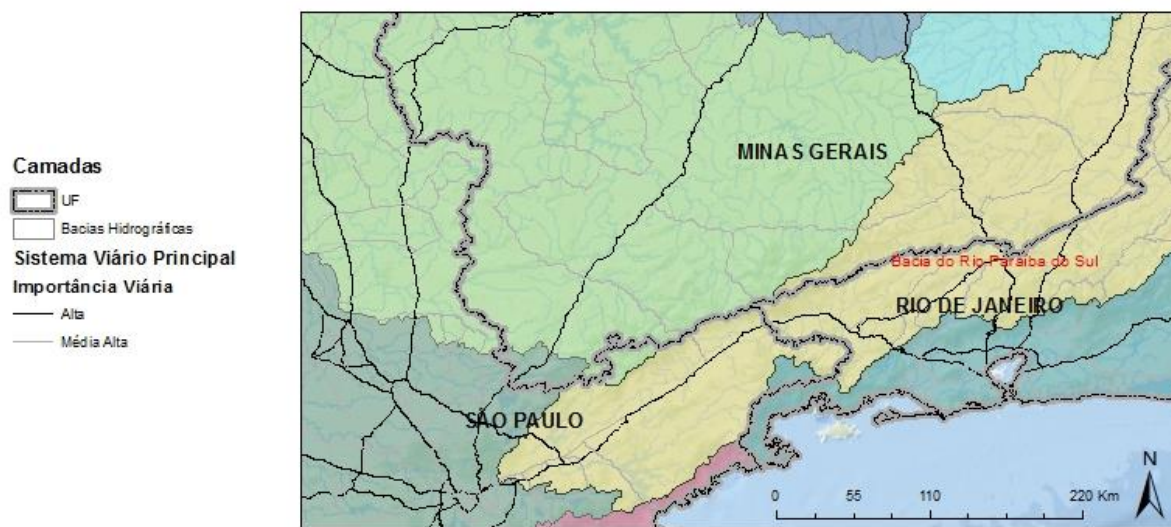


Fonte: Autor.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Inicialmente foram localizados dados para uma área (Figura 18) compreendida entre os paralelos 20°S a 24°S e os meridianos 42°O a 48°O, utilizando principalmente os dados de Modelo Digital de Elevação (MDE), dados do setor elétrico, bacias hidrográficas e dados do sistema viário.

Figura 18 - Informações exploratórias da região Sudeste



Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS.

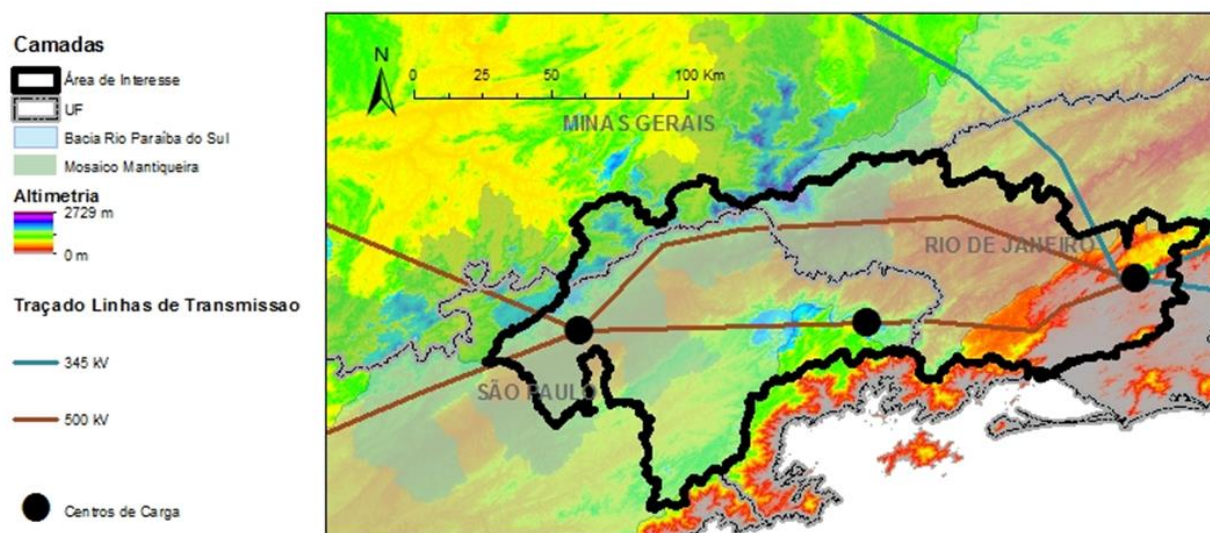
A partir destes dados, foi definida a área de estudo como a região compreendida entre os paralelos 22°2'S a 23°4'S e os meridianos 43°2'O a 45°7'O, especialmente sobre as regiões da Serra da Mantiqueira por apresentar relevo mais montanhoso e bacia do Rio Paraíba do Sul, sendo o rio mais extenso da Região Hidrográfica Atlântico Sudeste com 1150 quilômetros de extensão e uma das maiores demandas hídricas do Brasil (BRASIL, Agência Nacional de Águas (ANA) Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2006). Em relação ao sistema de transmissão de energia elétrica, a área de estudo está concentrada sobre as linhas de transmissão gerenciadas pela Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP) e Furnas, que interconectam as maiores cargas nesta região. A área escolhida corrobora com o estudo de Santos et al. (2007), no qual é descrito que as condições mais propícias para a ocorrência de deslizamentos são terrenos com relevos íngremes e/ou encostas modificadas pela ação humana, assim como as localidades situadas em regiões serranas, as áreas de intensa urbanização, e locais onde foram instaladas obras de engenharia de grande

porte, tais como rodovias, ferrovias, dutos, linhas de transmissão e outros equipamentos de infraestrutura urbana.

Assim, a área de estudo selecionada corresponde à uma área de influência indireta⁴, definida pelos limites de municípios que tem intersecção com uma distância de até 5 km do traçado das linhas de transmissão, localizadas entre os centros de carga de Guaratinguetá - SP, Bananal - SP e Nova Iguaçu – RJ (Figura 19). As linhas de transmissão nesta região são de 500 kV.

A Figura 19, além de representar o traçado entre os centros de carga, apresenta a diferença acentuada de altimetria do relevo entre o estado de Minas Gerais e o litoral brasileiro, as cidades que compõem o Mosaico Mantiqueira e parte da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

Figura 19 - Área de Estudo



Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS.

3.2 FONTES DE DADOS

Para realização deste estudo foram levantados dados estáticos e dinâmicos na região da Serra da Mantiqueira e Bacia do Rio Paraíba do Sul a partir de fontes de acesso público como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Centro de Previsão de Tempo e Estudos

⁴ A área de influência direta em empreendimentos ou atividades socioeconômicas corresponde exatamente ao terreno sobre o qual se instala a atividade. A área de influência indireta, por outro lado, trata-se de terrenos imediatamente vizinhos ao empreendimento que podem ser afetados pela atividade ou podem afetar a atividade em si. Muitas vezes este é determinado como uma distância mínima na forma de uma faixa contínua, mas podendo corresponder aos limites de uma ou mais limites administrativos.

Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Agência Nacional de Águas (ANA), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Companhia de Pesquisa Recursos Minerais (CPRM), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) além de dados disponibilizados para fins de pesquisa por empresas privadas.

Entre os dados captados para construção do banco de dados do estudo estão:

- Localização dos empreendimentos do setor elétrico como a localização de usinas, centros de cargas e linhas de transmissão (ANEEL e CTEEP);
- Dados do Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL) concebido pela ANEEL que inclui informações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no território nacional;
- Informações sobre o relevo através do Modelo Digital de Elevação (MDE) provenientes do ASTER GDEM, que correspondem a um produto do Ministério da Economia, Indústria e Comércio do Japão (Ministry of Economy, Trade, and Industry of Japan - METI) e da Agência Espacial Americana (National Aeronautic and Space Administration - NASA). Este produto é o resultado de modelos digitais de elevação (DEM) construídos a partir de pares estéreo de cenas (60 km por 60 km) capturadas com o sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer);
- Condições Climatológicas e dados de precipitações provenientes do INPE. Os dados do INPE foram usados para definir limites de pluviometria na região (isoietas) e também como informações para o sistema de monitoramento e alerta em tempo real.

No sistema de análise foram usados os dados de precipitação estimada a partir de dados do satélite GOES 13 gerados pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DAS) do INPE. O GOES 13 é um satélite geoestacionário operacional de meio-ambiente para fins de operações de monitoração e previsão do tempo;

Ainda para o sistema de monitoramento e alerta, foram utilizados os dados de pluviometria gerados pelo Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA);

- Uso de imagens de satélite de baixa, média e alta resolução de sensores como Landsat e RapidEye e imagens aéreas disponíveis no IBGE. As imagens foram usadas para apoiar o entendimento da região, para uso na reclassificação de uso

e ocupação do solo e para identificação de pontos de movimento de massa existentes, os quais são importantes para confirmação dos resultados do mapa de susceptibilidade;

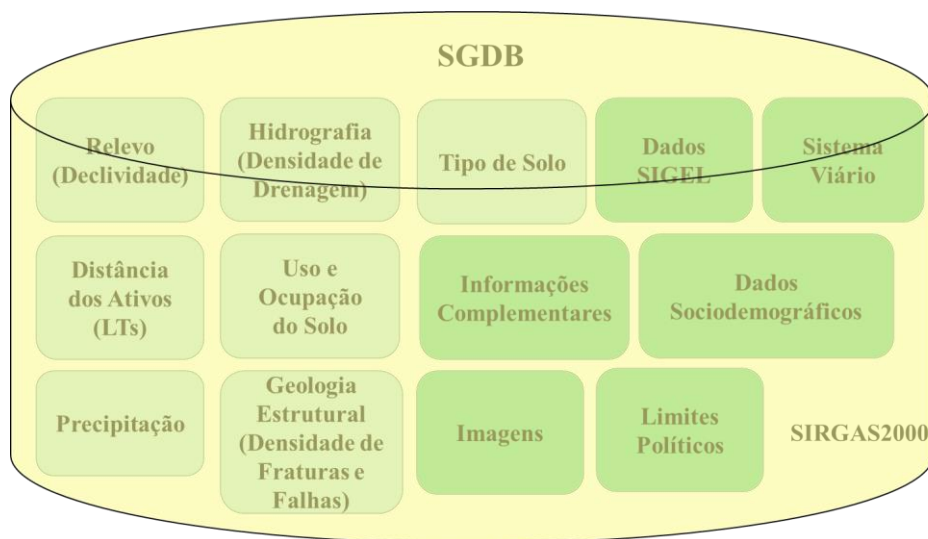
- Dados da malha hidrográfica da Agência Nacional de Águas (ANA) em escala 1:1.000.000. A partir da base hidrográfica foi gerado um mapa com a densidade de drenagem usando a ferramenta de *Line Density* disponível no módulo *Spatial Analyst* do ArcGIS;
- Dados de solos provenientes de cartas pedológicas do CPRM, em escala 1:1.000.000 que permitiu o entendimento das características do solo e localização de incidência de fraturas e falhas geológicas. Outras informações de apoio também acrescidas ao banco de dados deste estudo foram as redes de transporte terrestre como ferrovias, rodovias e logradouros. O processo para geração do mapa com a densidade de fraturas e falhas foi análogo ao usado em densidade de drenagem;
- Dados sociodemográficos do IBGE para contextualização da antropização. Neste caso foram utilizados os dados de grid estatístico da população publicado pelo IBGE em 2016 a partir dos dados do Censo de 2010 e que traz a informação de domicílios e população (homens e mulheres) consolidadas através de quadrículas de 1 km²;

Ainda do IBGE foram utilizados limites políticos e administrativos de regiões, estados e municípios como subsídio complementar às informações de alerta do sistema de monitoramento.

Esses dados foram trabalhados para composição de um SGDB, sendo que algumas camadas de informação foram aplicadas no mapa de susceptibilidade e outras foram utilizadas como informação complementar (Figura 20).

Portanto, para o desenvolvimento deste estudo, foram inicialmente analisadas a localização dos empreendimentos do setor elétrico relacionadas com linhas de transmissão de energia elétrica e as variações de relevo presentes para a definição e a caracterização detalhada da região de estudo. A partir do processamento dos dados primários coletados, foram gerados dados secundários para padronização, homogeneização e enriquecimento das análises. Como exemplo de dados secundários gerados estão a declividade do terreno, densidade de fraturas e falhas geológicas e a densidade hidrográfica.

Figura 20 – Representação do banco de dados do estudo (SGDB): cores mais suaves destacam informações de uso específico no modelo AHP e cores mais fortes representam camadas de dados adicionais ou complementares



Fonte: Autor.

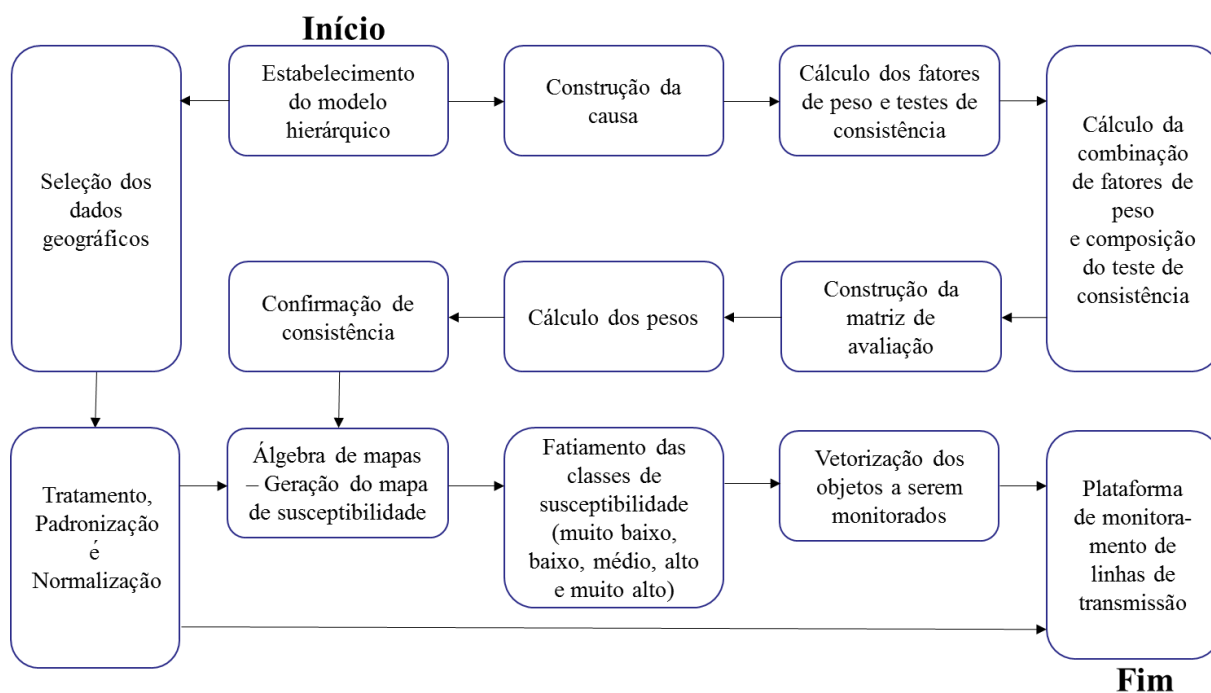
3.3 ANÁLISE HIERÁRQUICA DOS DADOS DA ÁREA DE ESTUDO

Foi definida a estrutura dos múltiplos critérios para Análise Hierárquica (AHP) conforme as etapas sugeridas por Ho (2008), e Kumar; Vaidya (2006) e também utilizada por Liao et al. (2011): 1)Estabelecimento do modelo hierárquico; 2)Construção da causa; 3)Cálculo dos fatores de peso e teste de consistência; 4)Cálculo da combinação de fatores de peso e composição do teste de consistência; 5)Construção da matriz de avaliação; 6)Cálculo dos pesos; 7)Confirmação de consistência.

Para o estabelecimento do modelo hierárquico com seus critérios de hierarquia e alternativas foi utilizado o pacote Office da Microsoft, onde as operações matriciais foram automatizadas com o apoio do software Microsoft Excel para a montagem da matriz pareada de avaliação, normalização dos resultados, cálculo e validação da razão de consistência e priorização das alternativas realizadas (Figura 21).

A ponderação pareada dos critérios foi realizada pela estrutura indicada na Figura 22, na qual foram definidos os valores relativos entre os pares de critérios que permitiram a montagem da matriz. Os critérios da Figura 22 que se encontram à esquerda representam as linhas da matriz e os critérios à direita representam as colunas da matriz a ser construída. Toda vez que um critério da coluna é mais importante que um critério da linha os valores são menores que 1.

Figura 21 – Macro representação das etapas do AHP no estudo até geração de resultados estáticos para a plataforma de monitoramento



Fonte: Autor.

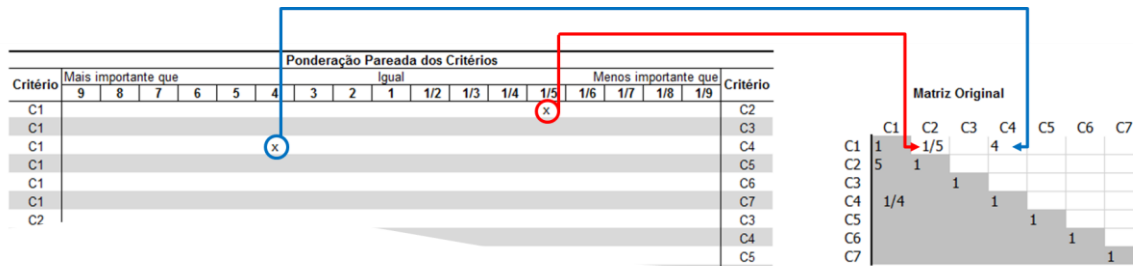
Figura 22 - Estrutura para ponderação pareada de critérios utilizando escala fundamental de Saaty

Ponderação Pareada dos Critérios																		
Critério	Mais importante que									Igual								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	Critério
C1																		C2
C1																		C3
C1																		C4
C1																		C5
C1																		C6
C1																		C7
C2																		C3
C2																		C4
C2																		C5
C2																		C6
C2																		C7
C3																		C4
C3																		C5
C3																		C6
C3																		C7
C4																		C5
C4																		C6
C4																		C7
C5																		C6
C5																		C7
C6																		C7

Fonte: Autor.

A Figura 23 ilustra a configuração inicial da matriz com transporte dos resultados da ponderação entre cada critério e a Equação 1 descreve a matriz.

Figura 23 - Exemplo do transporte de resultados para formação da matriz de ponderação por critério



Fonte: Autor.

Matriz Original

$$C_{ij} = \frac{1}{n} C_{ij} \quad (i \neq j)$$

$$C_{ij} = 1 \quad (i = j)$$

C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇
C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅	C ₂₆	C ₂₇
C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	C ₃₅	C ₃₆	C ₃₇
C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅	C ₄₆	C ₄₇
C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄	C ₅₅	C ₅₆	C ₅₇
C ₆₁	C ₆₂	C ₆₃	C ₆₄	C ₆₅	C ₆₆	C ₆₇
C ₇₁	C ₇₂	C ₇₃	C ₇₄	C ₇₅	C ₇₆	C ₇₇

(1)

Com a matriz original montada foi então realizada a sua normalização dividindo cada elemento da coluna pela soma dos números da coluna (Equação 2). Na matriz normalizada a soma de cada coluna deverá ser igual a 1.

$$X_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^n C_{ij}} =$$

X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇
X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇
X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₃₄	X ₃₅	X ₃₆	X ₃₇
X ₄₁	X ₄₂	X ₄₃	X ₄₄	X ₄₅	X ₄₆	X ₄₇
X ₅₁	X ₅₂	X ₅₃	X ₅₄	X ₅₅	X ₅₆	X ₅₇
X ₆₁	X ₆₂	X ₆₃	X ₆₄	X ₆₅	X ₆₆	X ₆₇
X ₇₁	X ₇₂	X ₇₃	X ₇₄	X ₇₅	X ₇₆	X ₇₇

(2)

Foi calculado a partir da matriz normalizada a contribuição de cada fator pela média de cada linha, conforme Equação 3.

$$P_{1j} = \frac{\sum_{i=1}^n X_{i1}}{n} = \begin{vmatrix} P_{11} \\ P_{21} \\ P_{31} \\ P_{41} \\ P_{51} \\ P_{61} \\ P_{71} \end{vmatrix} \quad (3)$$

Para validar a consistência das medidas foram calculadas as Medida de Consistência (MC) de cada critério, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Figura ilustrativa da multiplicação de matrizes para geração das Medidas de Consistência (MC) para cada critério e geração do auto vetor

Multiplicação de Matrizes										Autovetor			
C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	*	P ₁₁	=	MC ₁₁	MC ₁₁ /P ₁₁	=	MC ₁₁
C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅	C ₂₆	C ₂₇		P ₂₁		MC ₂₁	MC ₂₁ /P ₂₁		MC ₂₁
C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	C ₃₅	C ₃₆	C ₃₇		P ₃₁		MC ₃₁	MC ₃₁ /P ₃₁		MC ₃₁
C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C ₄₄	C ₄₅	C ₄₆	C ₄₇		P ₄₁		MC ₄₁	MC ₄₁ /P ₄₁		MC ₄₁
C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄	C ₅₅	C ₅₆	C ₅₇		P ₅₁		MC ₅₁	MC ₅₁ /P ₅₁		MC ₅₁
C ₆₁	C ₆₂	C ₆₃	C ₆₄	C ₆₅	C ₆₆	C ₆₇		P ₆₁		MC ₆₁	MC ₆₁ /P ₆₁		MC ₆₁
C ₇₁	C ₇₂	C ₇₃	C ₇₄	C ₇₅	C ₇₆	C ₇₇		P ₇₁		MC ₇₁	MC ₇₁ /P ₇₁		MC ₇₁

Fonte: Autor.

Com a Medida de Consistência para cada critério (MC_{ij}) foi possível calcular a somatória das Medidas de Consistência (λ) e o Índice de Consistência (IC), que reflete a consistência do julgamento de cada critério através da Equação 4.

$$\lambda = \sum_{i=1}^n MC_{ij}$$

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (4)$$

Para o teste de consistência geral do método AHP, a partir dos pesos atribuídos aos critérios, foi calculada a Razão de Consistência (RC) que é dada pela divisão do IC pelo Índice Aleatório (IA). O IA pode ser consultado na Tabela 5 e representa o IC para uma matriz de comparação pareada gerada aleatoriamente, conforme proposto por Saaty.

Tabela 5 - Valores de Índice Aleatório (IA) baseado na ordem da matriz de critérios

Ordem da Matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatório (IA)	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49

Fonte: Saaty (1990).

Portanto a RC pode ser testada através da Equação 5, sendo considerada aceitável para uma razão inferior a 10% ou 0,1, conforme proposto por Saaty (1990).

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (5)$$

Para cada um dos critérios foram avaliados até 5 subcritérios (fatiamento do critério) em mapas. A soma dos fatiamentos de cada critério totalizou o peso do referido critério.

Para finalizar o processo do AHP, foram analisadas as alternativas de uso deste modelo e importância de seus critérios, na avaliação de susceptibilidade de movimento de massa, para as alternativas de implantação, operação ou desativação das linhas de transmissão. Para isso, cada uma das alternativas foi ponderada frente a importância do critério utilizado (Figura 25). A escala de valores manteve definição de Saaty apresentada na Tabela 3.

Figura 25 – Sugestão de formulário para ponderação pareada das alternativas frente a cada um dos critérios utilizado na estrutura hierárquica proposta

Ponderação Pareada das Alternativas por Critérios																					
Critério	Alternativa	Mais importante que								Igual				Menos importante que						Alternativa	Critério
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9			
C1	A1																		A2	C1	
	A1																		A3		
	A2																		A3		
C2	A1																		A2	C2	
	A1																		A3		
	A2																		A3		
C3	A1																		A2	C3	
	A1																		A3		
	A2																		A3		
																			A2	C4	
																			A3		

Fonte: Autor.

A média ponderada entre as alternativas pelos critérios representa a importância da susceptibilidade para cada uma das alternativas apontadas.

As ponderações definidas em cada critério pelo processo hierárquico foram aplicadas nas diferentes camadas de informação para, a partir de álgebra de mapas, produzir a avaliação

da susceptibilidade de movimento de massa sobre as linhas de transmissão na região de estudo.

3.4 ÁLGEBRA DE MAPAS PARA IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE SUSCEPTIBILIDADE DE MOVIMENTO DE MASSA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Utilizando álgebra de mapas foi gerada a multiplicação ponderada dos critérios para a geração do mapa de susceptibilidade de movimento de massa sobre as linhas de transmissão. Os critérios e pesos utilizados foram identificados no AHP.

Sempre que um critério apresentava escala quantitativa, foi gerado um mapa intermediário com sua normalização antes da realização da álgebra de mapa. Para os critérios que apresentaram variáveis categóricas foram aplicados novamente o processo de AHP para definição de importância entre estas variáveis, permitindo assim que representassem uma escala de importância quantitativa expressada pelos seus percentuais de importância relativos.

Alguns critérios tiveram mapas intermediários gerados como pré-processamento das informações coletadas, como o caso dos mapas de declividade, densidade de fraturas e falhas, densidade hidrográfica e distância dos ativos (Linhas de Transmissão) antes do processo de normalização.

Portanto, a análise da região de estudo foi função da combinação do modelo hierárquico e álgebra de mapas, permitindo determinar índices de susceptibilidade em escala linguística (DONG et al., 2008) com 5 classes (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto) para a área de análise do empreendimento do setor elétrico.

3.5 MONITORAMENTO DAS SUSCEPTIBILIDADES

Para que as susceptibilidades possam também ser monitoradas sempre que ocorra um fenômeno catalisador, como chuvas tropicais de grande escala, o resultado foi integrado com os dados dinâmicos, meteorológicos e hidrológicos do CPTEC, resultando em um processo de acompanhamento e gerenciamento dos empreendimentos de transmissão de energia elétrica na região.

Para o acompanhamento dinâmico das informações, foi empregada plataforma de monitoramento, análise e alerta à riscos ambientais (também conhecida como TerraMA²) que

é baseada em tecnologia livre desenvolvida pelo INPE (<http://www.dpi.inpe.br/terrama2/doku.php?id=documentos>).

Para que as susceptibilidades fossem acompanhadas em diferentes intensidades de importância, o mapa de susceptibilidade teve um fatiamento por quintis e cada quintil associado a uma escala linguística dado por muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, respectivamente ordenada por sua criticidade.

Neste processo de fatiamento também foi realizada uma homogeneização em relação a predominância de classes de seus vizinhos mais próximos para área muito pequenas, gerando assim uma redução do número de polígonos a serem analisados durante a etapa de monitoramento em tempo real.

Os polígonos de susceptibilidades categorizados em 5 classes foram exportados em formato vetorial e usados como objeto de monitoramento no sistema de análise e alerta. Com isso foi possível o estabelecimento de regras em linguagem Lua (linguagem de script executado do interior de programas sem se restringir ao ambiente destes programas) dentro da plataforma de monitoramento, análise e alerta com diferentes critérios aplicados nos dados em tempo real coletados em relação aos objetos monitorados.

De forma mais específica, foram criadas regras em programação Lua para cruzar os polígonos de susceptibilidade muito alta, com os dados de precipitação estimada gerados a partir das imagens do satélite GOES 13. Neste estudo foram aplicados critérios mais restritivos para os polígonos de susceptibilidade muito alta e menos restritivos para os demais polígonos demonstrando a facilidade de parametrização da plataforma. A partir dos níveis parametrizados, o sistema de análise gera condições de alerta frente a previsões de grandes volumes pluviométricos para as áreas monitoradas.

A mesma linha de raciocínio foi aplicada para cruzar os polígonos de susceptibilidade muito alta com os dados de precipitação observados com o hidroestimador, neste caso, permitindo confirmar situações de alerta potencialmente vivenciados na região devido grandes volumes pluviométricos detectados pelo Sistema Integrado de Dados Ambientais (SINDA).

A utilização completa do sistema permitiu ainda o cadastramento de usuários ao sistema para envio de e-mails com as notificações de alerta e controle de acesso ao ambiente WEB para consulta das últimas análises geradas.

A inclusão de novas regras em programação Lua ou novos critérios para outras classes de susceptibilidade ou ainda, refinamento dos parâmetros para os níveis de alerta para as

classes atuais não foram objeto de estudo, mas se mostram de grande valia para aperfeiçoamento do sistema.

De forma geral, o que se buscou foi demonstrar a aplicabilidade do uso de mapas de susceptibilidade e informações em tempo real para criar sistemas efetivos de auxílio à gestão tanto para o planejamento de diminuição de cargas em circuitos sobre áreas de alerta quanto para apoio na verificação posterior à ocorrência de fortes chuvas tropicais da estabilidade das estruturas das linhas de transmissão afetadas.

4 RESULTADOS

4.1 ESTABELECIMENTO DOS DADOS PRIMÁRIOS PARA A ÁREA DE ESTUDO

Dentro da área estabelecida e das fontes de dados analisadas, foram identificadas as seguintes informações para montagem do banco de dados do estudo:

- Relevo da região;
- Limites políticos e sociodemográficos;
- Imagens georreferenciadas;
- Uso e ocupação do solo;
- Tipos de solo;
- Geologia estrutural;
- Hidrografia;
- Precipitação;
- Distância dos ativos de transmissão de energia elétrica;
- Dados meteorológicos e hidrológicos em tempo real;
- Outras informações complementares.

Estes dados apresentaram diferentes fontes e escalas de referência e foram trabalhados para formação de um banco de dados unificado, com uniformidade de *Datum* e projeção, de forma a permitir o cruzamento de dados espaciais e a geração de novos dados.

4.2 MONTAGEM DO BANCO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS

Para auxiliar na compreensão dos critérios do processo hierárquico analítico foi realizada a montagem do banco de dados de informações espaciais, sendo utilizadas prioritariamente fontes de dados públicas. Em alguns casos foi necessário o uso de geoprocessamento para diferenciação de classes, agrupamentos, transformação, normalização, formatação e adequação, gerando um banco de dados espaciais unificado.

O sistema geodésico de referência para todo o trabalho foi o SIRGAS2000 seguindo a adoção do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e Sistema Cartográfico Nacional (SCN) adotado para o Brasil a partir de 25 de janeiro de 2015. Desta forma, todas as informações que originalmente foram adquiridas em coordenadas geodésicas e provenientes de produtos cartográficos, referenciados aos sistemas de referência Córrego Alegre, SAD 69, WGS 84,

foram convertidas para o SIRGAS2000 seguindo notas técnicas publicadas pelo IBGE (IBGE - Nota Técnica SIRGAS 2000, 2005).

O banco de informações espaciais criado permite, a qualquer momento, incorporar novas informações para melhoria de contexto da área de estudo, atualização de uma camada de dados existente, detalhamento adicional de alguma camada de dados ou mesmo inclusão de novas disciplinas para modificação do modelo. No caso de inclusão de camadas que venham a ser consideradas como novos critérios, é importante revalidar todo o modelo uma vez que os pesos relativos que foram propostos poderão sofrer a necessidade de revisão para garantir uma Razão de Consistência menor que 10%.

O estudo fez uso de um *File Geodatabase* para armazenamento das informações espaciais construídas a partir do uso do software ArcGIS 10.2.2, o qual foi um dos principais instrumentos para análise exploratória dos dados, conversão de formatos e criação de dados secundários a partir das fontes originais coletadas e um banco de dados PostgreSQL para uso na plataforma de monitoramento, análise e alerta à riscos ambientais. Este banco de dados PostgreSQL replicou alguns dados do *File Geodatabase* como objeto monitorado e informações de apoio além de armazenar os dados dinâmicos utilizados.

Em muitos casos foram aplicados os princípios de álgebra de mapas para operadores locais (classificação, ponderação), de vizinhança (mapa de declividade) ou zonais (critérios de pertinência) a fim de viabilizar a geração do mapa de susceptibilidade para a região de estudo.

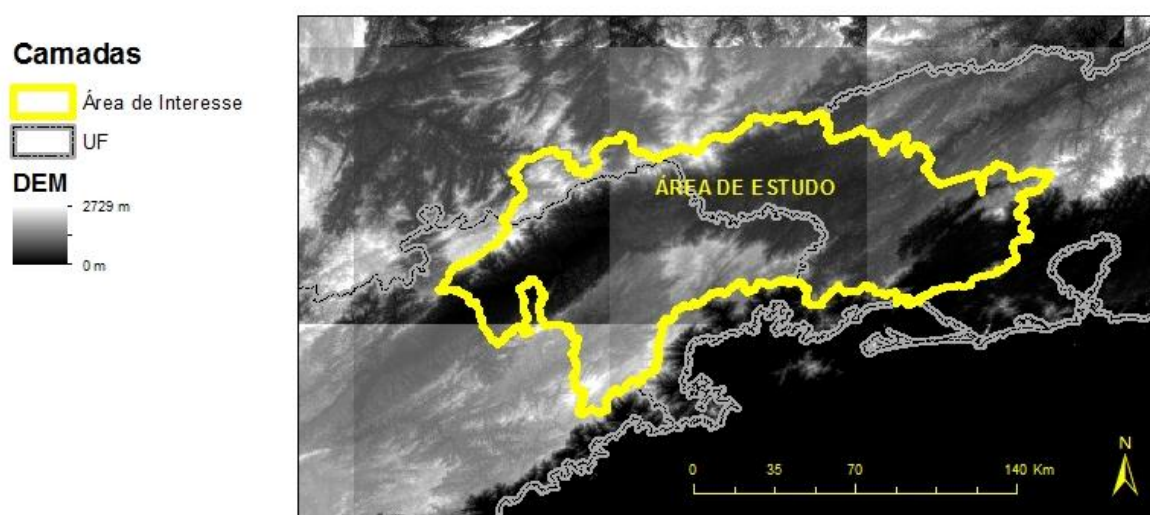
Os dados armazenados são detalhados nos subitens apresentados a seguir:

4.2.1 Relevô

Para o relevo foram utilizados dados ASTER GDEM 2, que corresponde a imagens *raster* em formato GeoTIFF com 16-bit sinalizado, representando a unidade vertical em metros e *Datum* WGS84. A resolução do pixel é de 1 arco-segundo o que é equivalente a cerca de 30 metros na região do Equador.

A Figura 26 ilustra os dados do relevo por blocos, área de estudo e divisas estaduais.

Figura 26 - Modelo digital de elevação global - ASTER GDEM

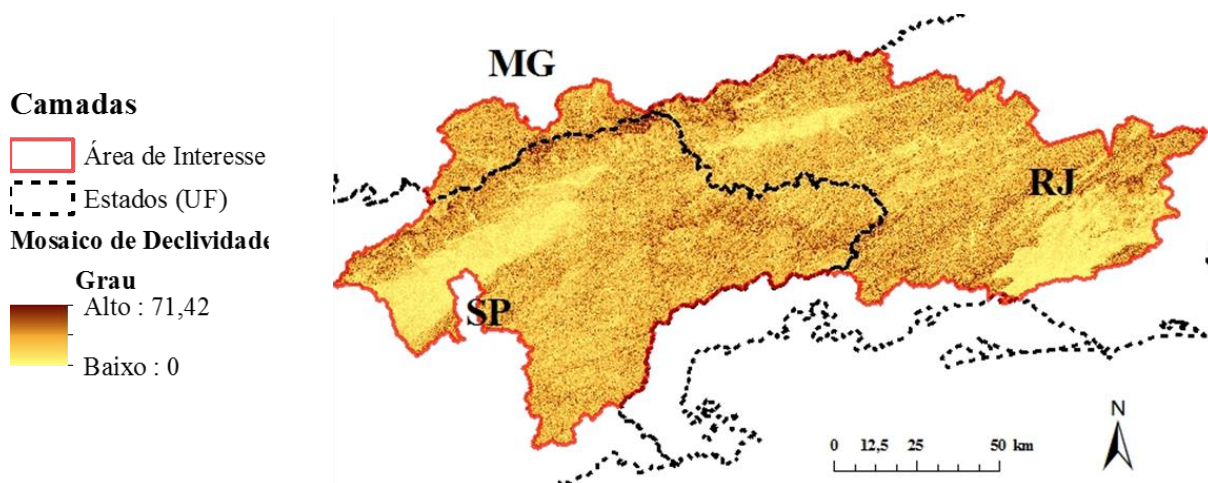


Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS.

Para os dados adquiridos, além da reprojeção para SIRGAS2000, foram realizados o processo de mosaico que permite a visualização uniforme dos dados e o processamento para geração de mapa de declividade, o qual é expresso em graus.

O mapa de declividade na região de estudo apresentou declividades variando de 0° a $71,42^{\circ}$, conforme mostrado pela Figura 27.

Figura 27 – Mosaico com dados de declividade do terreno gerado a partir do modelo digital de elevação ASTER GDEM



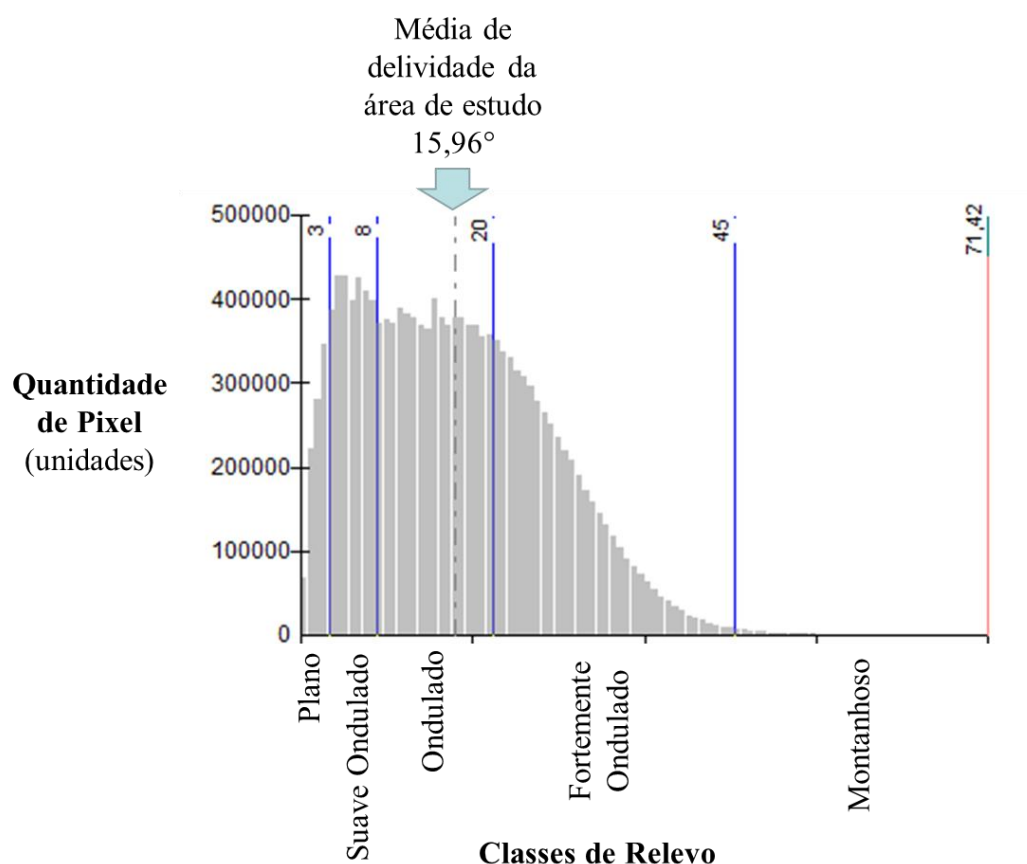
Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS.

Segundo as classes de relevo definidas pelo IBGE (BRASIL, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPEG),

2009) e CPRM (BRASIL, Serviço Geológico do Brasil (CPRM) Ministério de Minas e Energia (MME), 2011), regiões com até 3% de declividade são consideradas planas, entre 3 e 8% são consideradas suave ondulado, entre 8 a 20% ondulado, de 20 à 45% fortemente ondulado, entre 45 a 75% montanhoso e superior a 75% escarpado.

O gráfico da Figura 28 ilustra a distribuição de declividade na região de estudo, bem como destaca que a caracterização média da região se apresenta como ondulada, com uma declividade média de 15,96°.

Figura 28 – Gráfico de distribuição de declividade na região de estudo



Fonte: Gráfico gerado pelo autor com dados do mapa de declividade na região de estudo.

4.2.2 Limites Políticos e Sociodemográficos

Os dados de limites políticos e sociodemográficos, referenciado aos setores censitários de 2010, foram obtidos através do geoportal do IBGE. A área do estudo é composta de 40 municípios, uma população de 2.708.390 pessoas pelo Censo de 2010 e engloba uma faixa de Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) que varia entre 0,650 a 0,798. As Figuras 29 e 30

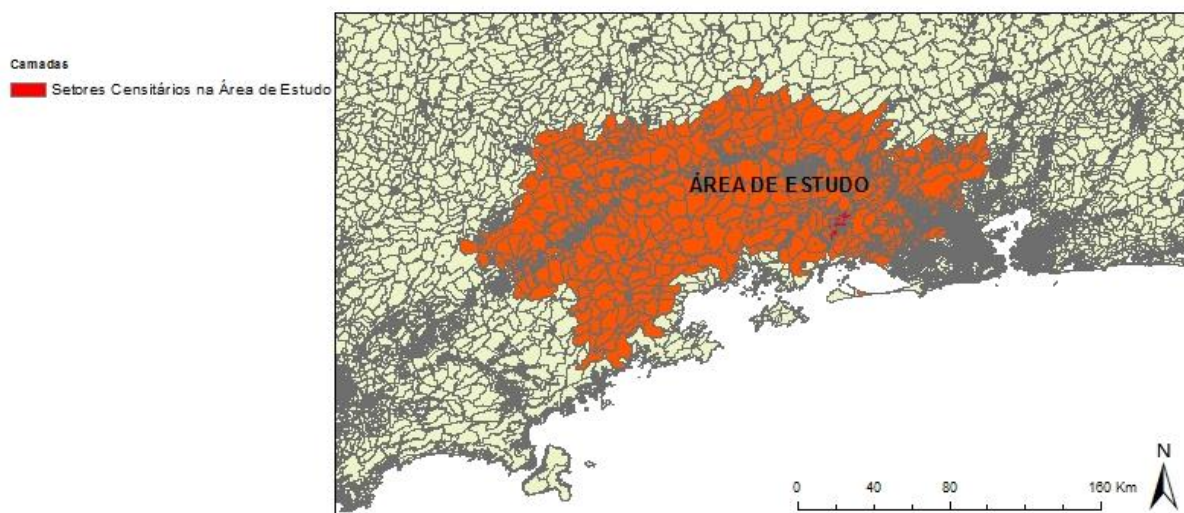
ilustram, respectivamente, exemplos de informações espaciais de limites de municípios e limites de setores censitários contidos no banco de dados para esta região.

Figura 29 - Mapa temático com dados de limites políticos, áreas indígenas, unidades de conservação e municípios pertencentes ao Mosaico da Mantiqueira



Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS.

Figura 30 - Mapa destacando os 4884 setores censitários de IBGE (2010) na área de estudo



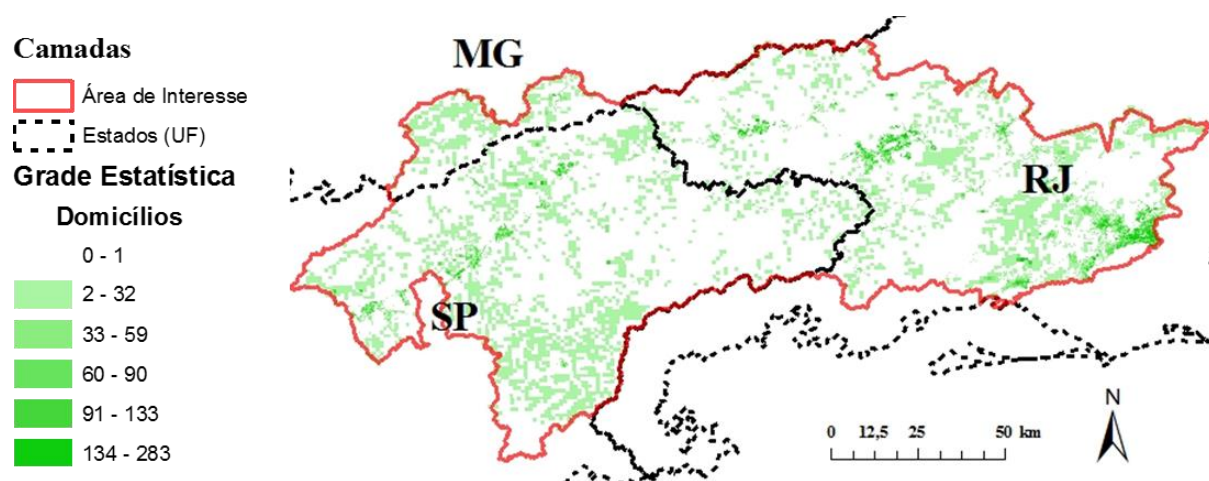
Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS.

Estes 4884 setores censitários estão divididos em 40 cidades e abrange uma área oficial de 14.053,207km² conforme estrutura político-administrativa vigente em 01/07/2015 publicada pelo IBGE.

Um estudo detalhado das características demográficas da região foi desenvolvido durante estágio na Universidade de Brown – Providence – EUA em 2016 junto ao grupo a iniciativa S4 – *Spatial Structures in the Social Sciences* com a análise das informações tabulares de áreas de ponderação, identificação de compatibilidades geográficas entre os censos de 2000 e 2010. Dentre as buscas de informações e cruzamentos de dados foi identificado uma nova publicação oferecida pelo IBGE que consiste de uma grade estatística que apresenta a distribuição de dados populacionais de domicílios e população de homens e mulheres em quadrículas uniforme de 1 km² para todo o território brasileiro.

A Figura 31 destaca as regiões onde existem presença de domicílios indicados pela grade estatística do IBGE na região de estudo, permitindo, portanto, a identificação de elementos de riscos humanos adicionais e que devem ser considerados pelos gestores no enfrentamento das vulnerabilidades.

Figura 31 – Grade estatística de número de domicílios representado por quadrículas de 1 km² gerado por dados dos setores censitários de 2010 e publicados pelo IBGE em 2016 para a área de estudo



Fonte: Mapa gerado pelo autor com dados do Censo 2010 do IBGE usando software ArcGIS.

Na área de estudo existem 89111 quadrículas de 1 km² sendo que 69,66% (62077 quadrículas) segundo o Censo do IBGE não apresentam ocupações de domicílios, 6,25% (5573 quadrículas) apresentam apenas 1 domicílio e estão representadas em branco no mapa da Figura 32. Existem 13487 quadrículas (15,14% da área) com baixa concentração de domicílios (entre 2 a 32 domicílios por km²). As regiões predominantemente concentradas nas periferias dos centros urbanizados encontram-se nas faixas de 33 a 59 domicílios por quadrícula (3,22% equivalente a 2873 quadrículas de 1km²). As áreas prioritariamente

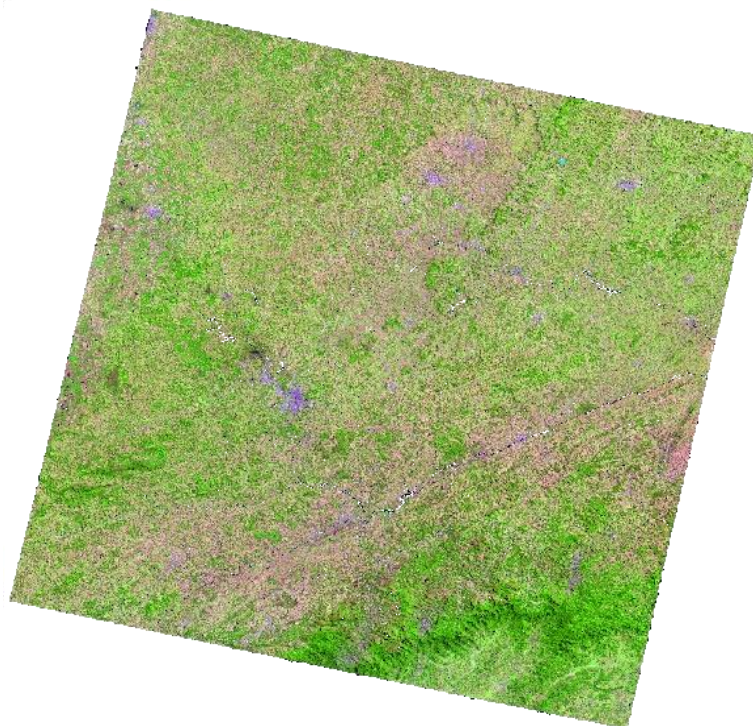
urbanas têm de 60 a 90 domicílios por km² (2,53% equivalente a 2255 quadrículas de 1 km²), 91 a 133 domicílios por km² (2,02% equivalente a 1803 quadrículas de 1 km²) seguida por área fortemente urbanizadas com mais de 134 domicílios por km² (1,14% equivalente a 1020 quadrículas de 1 km²), esta última faixa prioritariamente concentrada no estado do Rio de Janeiro.

4.2.3 Imagens Georreferenciadas

Os dados das imagens georreferenciadas foram utilizados para permitir a compreensão da área e o detalhamento paisagístico em pontos específicos, principalmente para no que tange ao uso e ocupação do solo. Dentre as imagens adquiridas como base de dados do projeto estão as imagens aéreas reamostradas com 1 metro de resolução para estado do Rio de Janeiro provenientes do IBGE, imagens de satélite Landsat 8 provenientes do INPE com resolução de 15 metros e imagens RapidEye com 5 metros de resolução provenientes do geocatálogo do Ministério do Meio Ambiente (MMA).

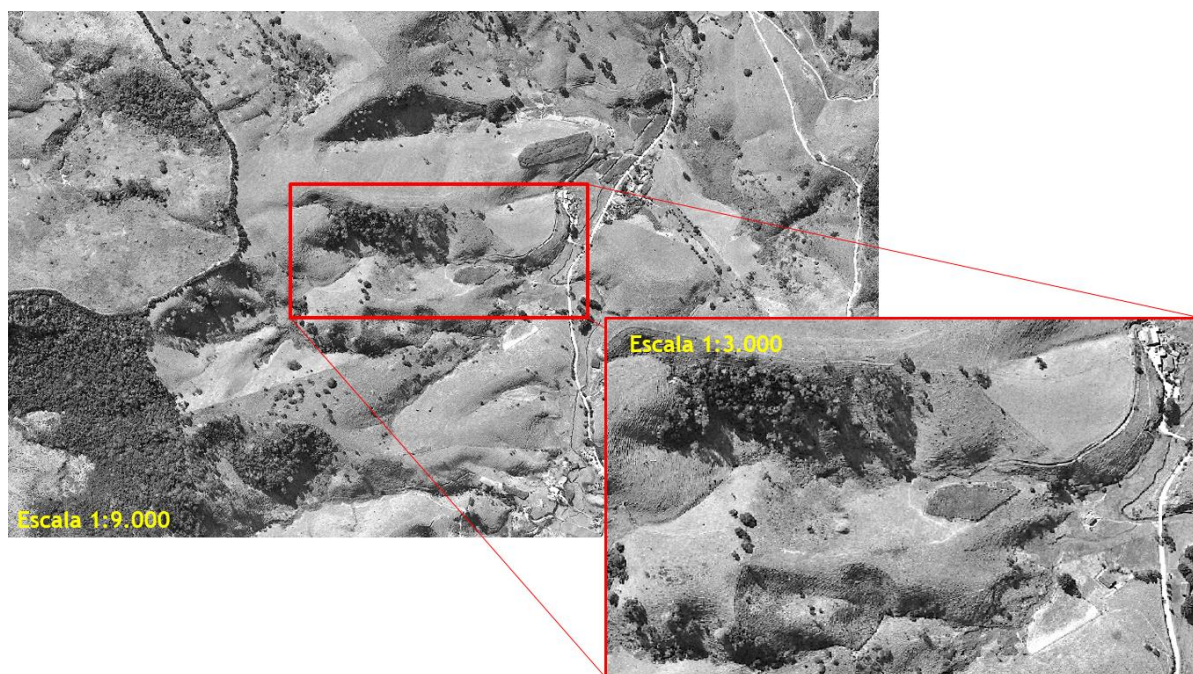
As imagens nas diferentes resoluções não foram utilizadas diretamente para o processo hierárquico analítico, mas permitiram o enriquecimento visual dos resultados apresentados e complementação de informações pontuais como confirmação de existência de elementos de risco nos pontos analisados. Exemplos das imagens utilizadas são mostrados nas Figuras 32, 33 e 34.

Figura 32 - Imagem do satélite Landsat 8 na área de estudo, Órbita 217 - Ponto 075



Fonte: Figura gerada pelo autor usando software ArcGIS e dados do satélite Landsat 8.

Figura 33 - Imagem do satélite RapidEye com 5 metros de resolução mostrando característica da paisagem na área de estudo (paralelo 22°2'S e meridiano 43°2'O)



Fonte: Figura gerada pelo autor usando software ArcGIS e dados do satélite RapidEye.

Figura 34 - Mosaico de imagens aéreas reamostradas com 1 metro de resolução mostrando detalhe do traçado da Linha de Transmissão

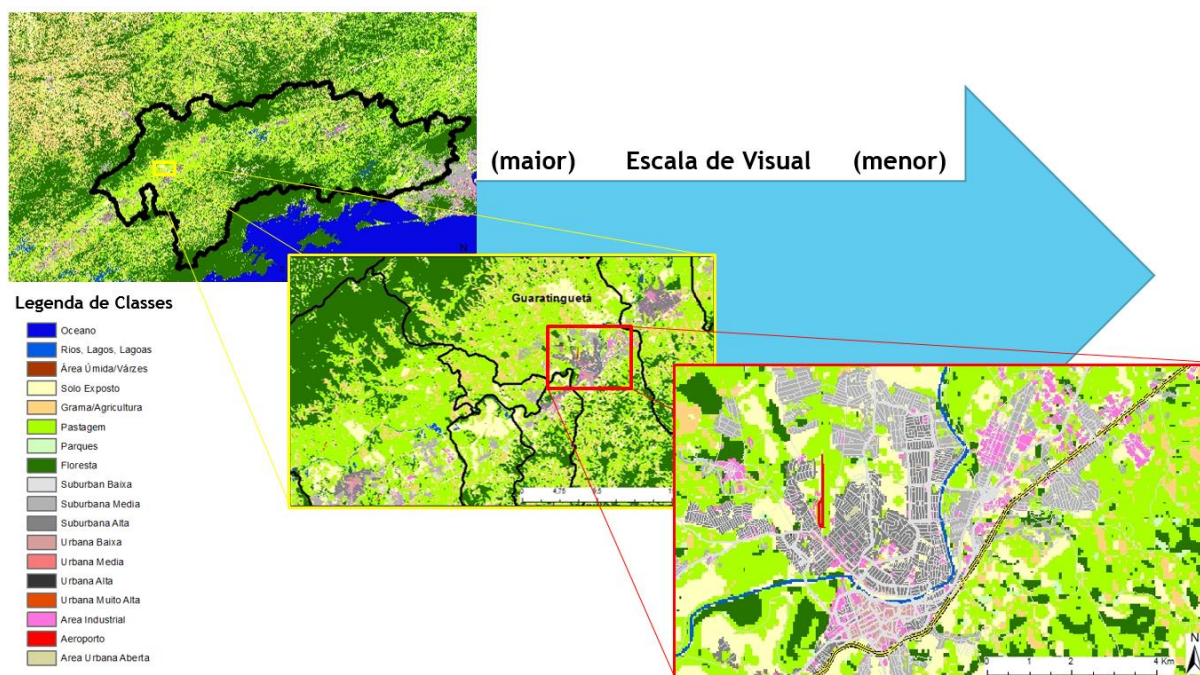


Fonte: Figura gerada pelo autor usando software ArcGIS e dados de imagens aéreas reamostradas fornecidas pelo IBGE.

4.2.4 Uso e Ocupação do Solo

O dado de uso e ocupação do solo empregado neste estudo foi elaborado pela Geo Pixel (empresa privada) a partir de interpretação semiautomática das imagens de satélite Landsat 8 datadas de 2014. Este mapeamento foi ajustado por meio de interpretação visual das imagens para os polígonos, proporcionando uma visão geral da área de estudo com as classes temáticas do uso do solo e detalhe ampliado do traçado da Rodovia Presidente Dutra no município de Guaratinguetá – SP (Figura 35).

Figura 35 - Mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo (esquerda), detalhe sobre o município de Guaratinguetá (centro) e aproximação em escala 1:50.000 sobrepostos de informações viárias sobre traçado da rodovia Presidente Dutra (BR-116) (direita)



Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS e dados de uso e ocupação do solo com 18 classes.

Para este estudo as classes de uso foram agrupadas em 5 grandes categorias a saber: água, urbano, pastagem/agricultura, solo exposto e floresta. De forma mais detalhada, as classes oceano, rios, lagos e lagoas foram reclassificadas para água, as classes grama/agricultura, pastagem foram reclassificadas para pastagem/agricultura, a classe solo exposto foi mantida, as classes parques e floresta foram reclassificadas para floresta, e as demais classes foram reclassificadas para urbano pois estão fortemente relacionadas áreas antropizadas na região.

Com isso observou-se a presença da classe água para 0,59% da área, 3,95% para a classe de uso urbano, 40,47% para a classe de pastagem/agricultura, 7,57% para a classe de solo exposto e predominância da classe floresta com 47,42%.

A reclassificação permitiu definir cluster de uso do solo mais homogêneos entre si e com características mais dissociadas entre as classes a fim de permitir a comparação pareada destas novas classes frente ao processo de movimento de massa.

Como o uso do solo é uma variável categórica e no modelo de álgebra de mapas usamos uma equação ponderada aplicada sobre dados normalizados, também foi utilizado a

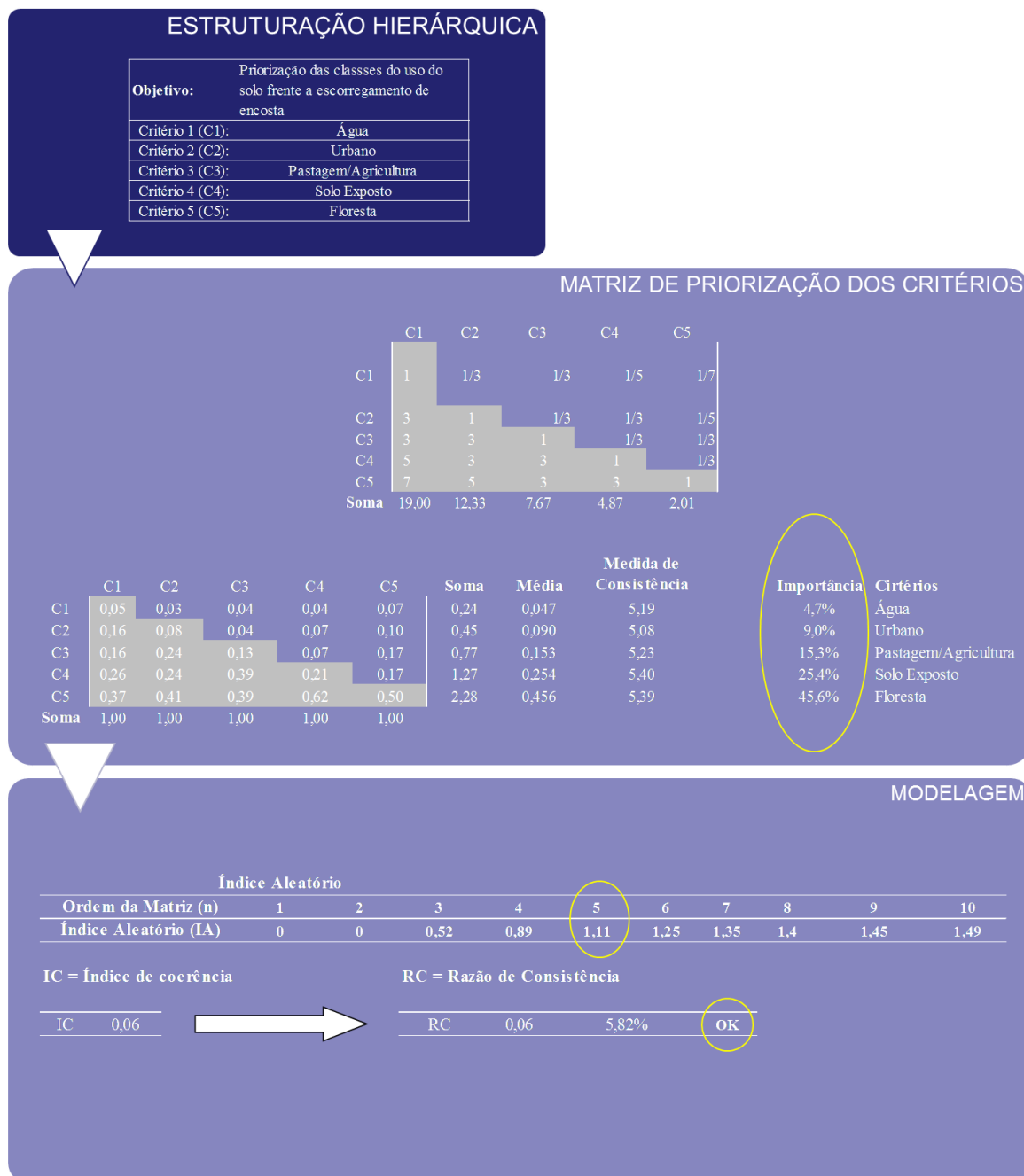
comparação ponderada das categorias do uso do solo (processo de AHP) para gerar a importância relativa entre as classes e, portanto, ter valores entre 0 e 1.

A comparação pareada entre as classes de uso de solo (água, urbano, pastagem/agricultura, solo exposto e floresta) utilizou a escala básica de Saaty (1990) e priorizou a avaliação das classes em relação à infiltração de água no solo como forma de potencializar escorregamentos translacionais. Todo o processo de AHP para identificação da importância relativa entre as classes pode ser visualizado na Figura 36.

Ainda da Figura 36 pode-se observar que a razão de consistência, dada pela divisão entre o índice de coerência apontado de 0,06 pelo índice aleatório para matrizes com 5 elementos, de 1,11, reflete um resultado final de RC de 5,82%, portanto inferior a 10% e adequado para uso.

Como critérios utilizados no modelo foram, portanto, definidos os seguintes valores: 4,7% para a classe água, 9,0% para a classe urbano, 15,3% para a classe pastagem/agricultura, 24,4% para a classe solo exposto e 45,6 para a classe floresta, pois esta auxilia na infiltração de água em camadas mais profundas de solo.

Figura 36 – Processo AHP usado para definição de importância relativa entre as classes de uso do solo



Fonte: Autor.

Na Figura 37 pode-se observar o tema de uso do solo em 5 classes após processo de reclassificação para toda a região e detalhe do município de Guaratinguetá (SP) em escala 1:50.000. Na legenda das classes do mapa também são apresentados os valores de importância relativa utilizada.

Figura 37 – Mapa de uso do solo reclassificado em 5 classes

Camadas

 Área de Interesse

 Estados (UF)

Uso do Solo 5 Classes

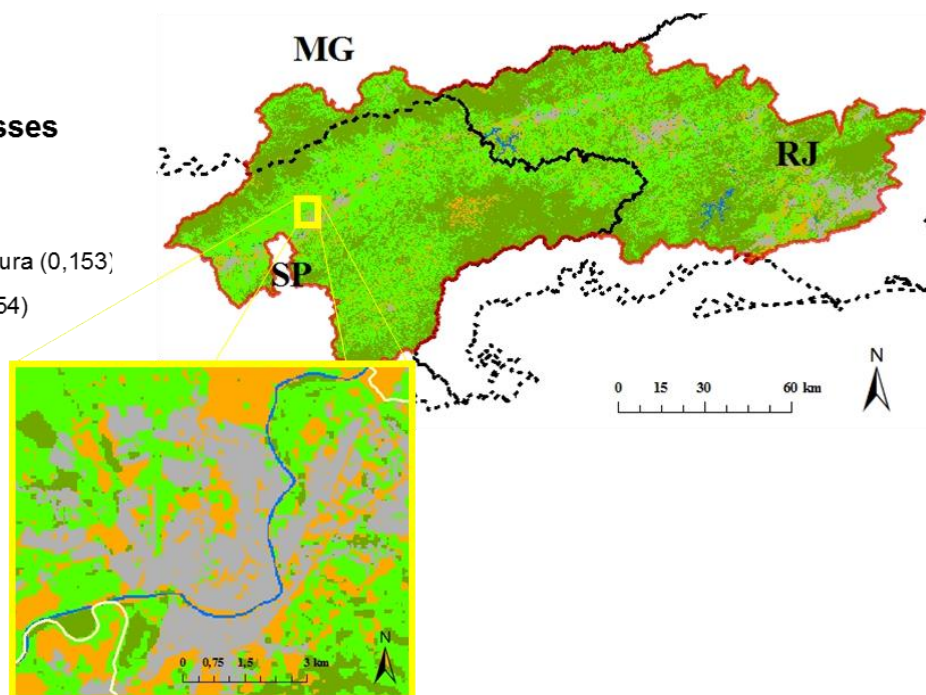
 Floresta (0,456)

 Pastagem/Agricultura (0,153)

 Solo Exposto (0,254)

 Urbano (0,090)

 Água (0,047)



Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS.

A Tabela 6 resume a participação das áreas encontradas para classe de uso de solo reclassificada bem como os pesos adotados de importância relativa das classes usando AHP.

Tabela 6 – Participação das classes de uso do solo no mapa reclassificado para 5 classes na área de estudo

Descrição das classes	Importância Relativa definida com uso de AHP	Participação na área de estudo de cada classe
Água	4,7%	0,59%
Urbano	9,0%	3,95%
Pastagem/Agricultura	15,3%	40,47%
Solo Exposto	25,4%	7,57%
Floresta	45,6%	47,42%

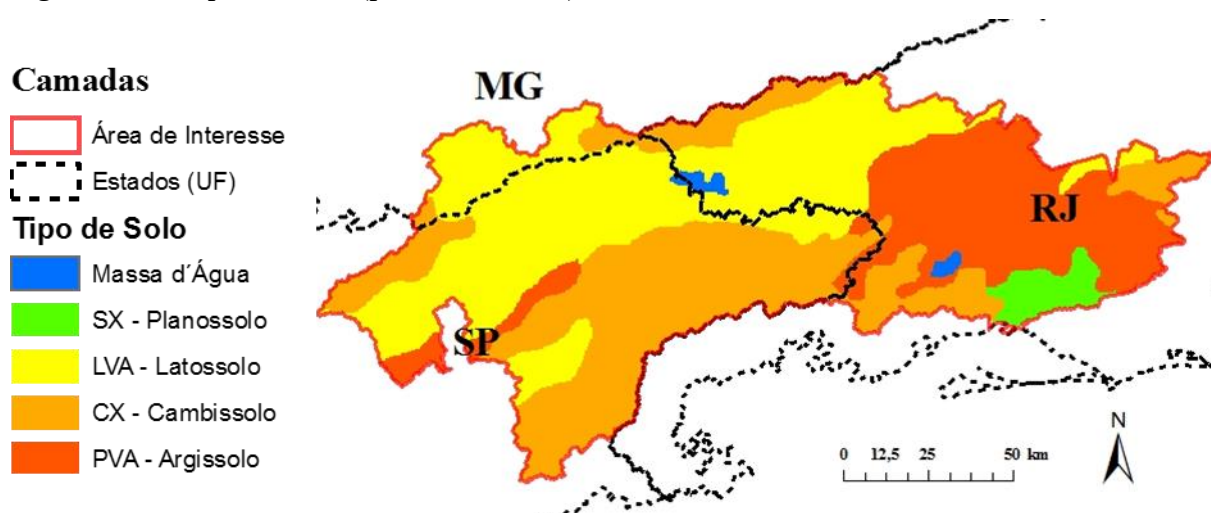
Fonte: Dados sumarizados do mapa de uso do solo reclassificado e do processo de comparação pareada das classes.

4.2.5 Tipo do Solo

O dado de tipo de solo empregado neste estudo foi elaborado pela EMBRAPA (BRASIL, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), 2011), tendo como base o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Neste estudo utilizou-se a classe de solo de primeiro nível (ordem), uma vez que apresentava uma quantidade de categorias adequada para este estudo e minimizava problemas relacionados com a escala de informações no qual o mapa foi disponibilizado de 1:5.000.000.

Para a área de estudo as classes de solo de primeira ordem encontradas foram: argissolo, cambissolo, latossolo e planossolo, sendo as grandes áreas inundadas consideradas como massa d'água. Na Figura 38 pode ser visualizado as classes de solo de primeira ordem na área de estudo bem como as siglas utilizadas em pedologia para cada uma destas categorias.

Figura 38 – Mapa de solos (primeira ordem) na área de estudo



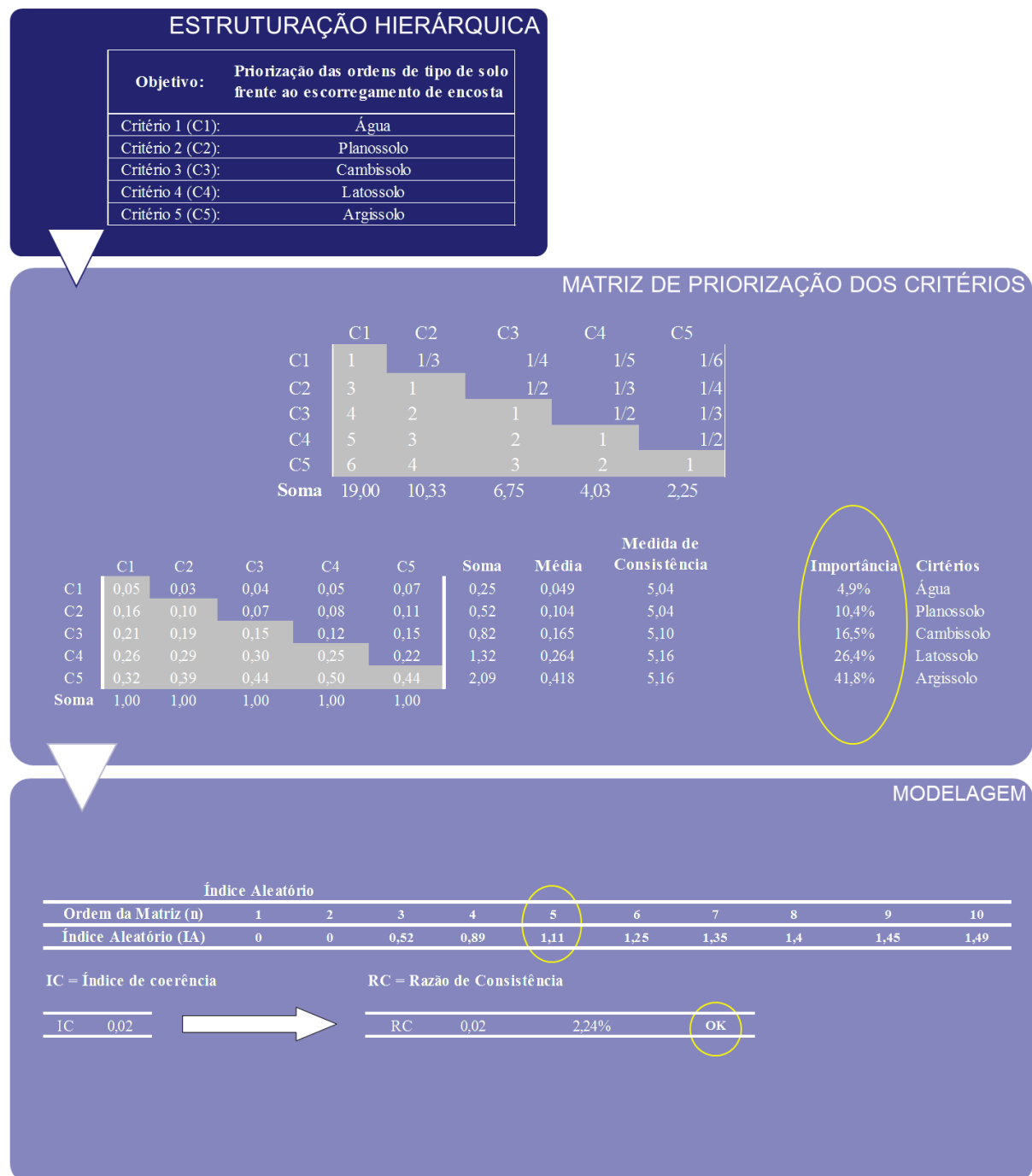
Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS.

Uma vez que o tipo de solo também é uma variável categórica, aplicou-se processo similar ao usado na variável de uso do solo para determinar a importância relativa entre as classes de solo e para assim gerar escala de valores relativos e normalizada.

A comparação pareada entre as classes de tipo de solo (argissolo, cambissolo, latossolo, planossolo e massa d'água) utilizaram a escala básica de Saaty (1990) e priorizaram a avaliação das ordens em relação à menor permeabilidade do solo como forma de potencializar

escorregamentos translacionais. Todo o processo de AHP, inclusive as ponderações adotadas entre as classes podem ser visualizadas através da Figura 39.

Figura 39 – Processo AHP usado para definição de importância relativa entre as ordens de tipo de solo



Fonte: Autor.

Vale destacar, conforme mostrado na Figura 39, que a razão de consistência (RC) foi de 2,24%, portanto inferior a 10% e adequado para uso sendo, portanto, definido os seguintes valores para cada tipo de solo: 4,9% para a classe massa d'água, 10,4% para a classe planossolo, 16,5% para a classe cambissolo, 26,4% para a classe latossolo e 41,8% para a classe argissolo, pois esta por apresentar maior impermeabilização à passagem da água fator importante encontrado em escorregamentos translacionais.

A Tabela 7 resume a participação das áreas encontradas neste tema bem como os pesos adotados de importância relativa usando AHP entre os 5 tipos de solo predominantes na área de estudo.

Tabela 7 – Participação de cada tipo de solo na área de estudo e sua importância relativa definida através de processo AHP

Descrição dos tipos de solo	Importância Relativa definida com uso de AHP	Participação na área de estudo de cada tipo de solo
Argissolo	41,75%	23,06%
Latossolo	26,40%	40,01%
Cambissolo	16,49%	33,44%
Planossolo	10,45%	2,71%
Massa d'água	4,91%	0,77%

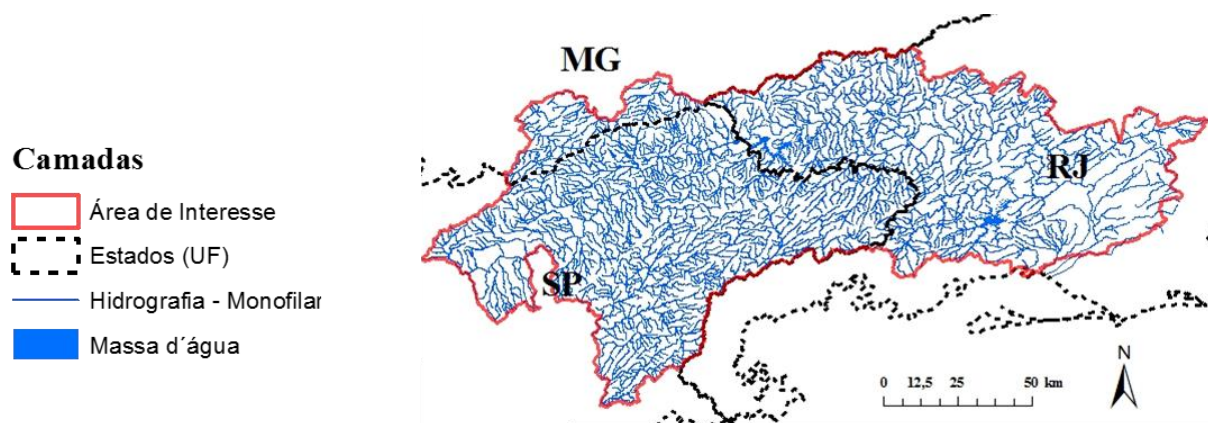
Fonte: Dados sumarizados do mapa de tipo de solo e resultado do processo de comparação pareada.

4.2.6 Hidrografia

O dado de hidrografia utilizado apresenta-se disponibilizado pela Agencia Nacional de Águas através do portal Hidroweb (<http://hidroweb.ana.gov.br>) e foi atualizado em 2010. Das camadas temáticas disponibilizadas destaca-se as utilizadas na composição do banco de dados que são o limite de bacia e sub-bacias hidrográficas e a malha hidrográfica em escala 1:1.000.000 as quais podem ser visualizadas para a área de estudo através do mapa da Figura 40.

A base hidrográfica ao milionésimo na área de estudo considera os rios permanentes os quais totalizam cerca de 9200 km lineares.

Figura 40 – Hidrografia e massas d'água na área de estudo



Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS e dados de hidrografia em escala 1:1.000.000.

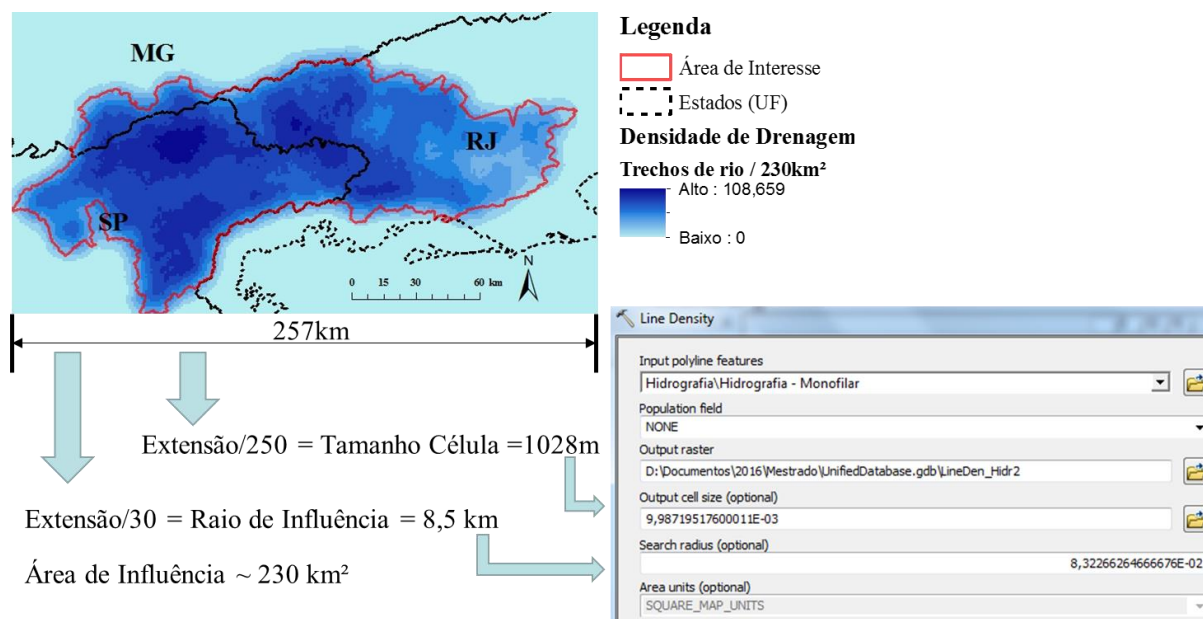
A partir da base hidrográfica foi gerado um mapa com a densidade de drenagem usando a ferramenta de *Line Density* disponível no módulo *Spatial Analyst* do ArcGIS. Desta forma, foi possível calcular para cada quadrícula de aproximadamente 1 km² a quantidade de trechos de rio que existem sob influência de em uma área circular de cerca de 230 km². Estes valores são consequência da utilização da função *Line Density* com parâmetros padrões. O cálculo do tamanho da célula de saída corresponde a 1/250 de extensão tema de hidrografia monofilar e o raio de influência 1/30 desta mesma extensão.

A Figura 41 ilustra detalhadamente os valores calculados em função do dado de entrada de hidrografia monofilar utilizada.

Na área de estudo foram considerados 2863 trechos de rio o que representa uma relação de cerca de 0,2 trechos de rios por km². Nas regiões com maior drenagem chegamos a cerca de 0,47 trecho por km² representada pelas áreas mais escuras do mapa (Figura 41). Vale destacar que o comprimento médio de cada trecho de rio na área de estudo é de cerca de 3200 metros.

Desta forma optou-se por trabalhar os parâmetros padrões do ArcGIS, no presente estudo representou um raio de 8,5 km de extensão, cerca de 3 vezes o valor médio dos trechos de rio e produziu um dado *raster* com quadrículas de aproximadamente 1 km². Como isso, minimizou-se o fato dos dados de entrada estarem em escala grande e portanto, com menor precisão posicional em relação aos dados de relevo e uso de solo utilizados. A opção de raios de influência maiores para o cálculo, produz um mapa de densidade *raster* mais generalizado, evitando assim que a escala da informação do dado de entrada produzisse distorções no critério de densidade de hidrografia.

Figura 41 – Mapa de densidade de drenagem da área de estudo baseado em trechos de rios monofilares e detalhes dos parâmetros de tamanho da célula e raio de influência



Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS e dados de hidrografia em escala 1:1.000.000.

Vale destacar que abordagem semelhante foi adotada para a camada de geologia estrutural.

4.2.7 Geologia Estrutural

A geologia estrutural permite uma interpretação da evolução estrutural das áreas voltado para aplicações de prospecção de petróleo, minerais preciosos e água subterrânea, estudos geotécnicos para cálculos de pesos ou sobrecargas em construções, mas também na prevenção de deslizamentos.

Dentro da geologia estrutural a geometria dos corpos rochosos e as deformações nas estruturas geológicas aplicados à processos de escorregamento de encostas remetem à necessidade de entendimento da presença de fraturas e falhas.

Uma fratura é qualquer ruptura mecânica significativa na rocha. Alguns autores definem uma fratura de modo que a ruptura não deve ser paralela a um arranjo geométrico visível de estruturas ou de características componentes na rocha (GUDMUNDSSON, 2011). Falha são descontinuidades entre blocos de rocha adjacentes ao longo da superfície planar que apresentam movimentos relativos entre si. Os tipos de movimentos ao longo das falhas mais importantes são os movimentos rotacionais, quando os blocos não se deslocam paralelamente

e um bloco tende a girar sobre o outro perdendo a condição de paralelismo e os movimentos translacionais, onde o movimento mantém o paralelismo após o evento, ocorrendo, portanto, ao longo de linhas retas que podem configurar a medida de separação (WOLLE; CARVALHO, 1994).

Os reconhecimentos de fraturas e falhas com critérios geológicos muitas vezes não são observados diretamente, mas são inferidas a partir de elementos estruturais observados em afloramentos ou descontinuidades geológicas representando a expressão da falha na superfície da área de estudo.

Para as estruturas de linha de transmissão, os movimentos translacionais podem afetar mais de uma estrutura e normalmente tem maior relação com grandes volumes de infiltração de água em pequeno espaço de tempo.

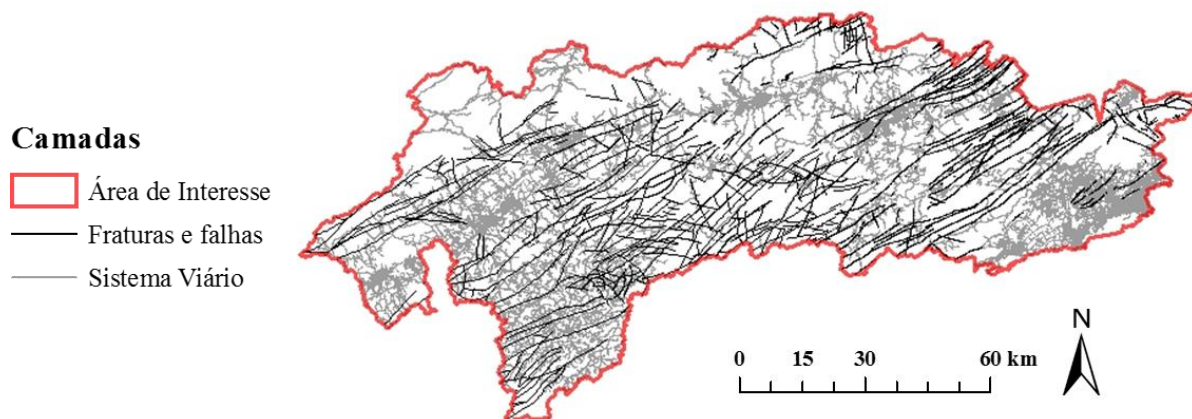
Para representação das fraturas e falhas no modelo de estudo foi trabalhado com o mapa de estruturas geológicas proveniente da CPRM, que tem a atribuição do Serviço Geológico do Brasil e responde ao Ministério das Minas e Energia. Os dados são divulgados através do Geobank (<http://geobank.cprm.gov.br/>).

Com a Figura 42 pode-se observar que existe uma grande concentração de fraturas e falhas na área de estudo e se analisar estas informações em conjunto com o dado de declividade e tipo de solo observa-se que sua localização é predominante em relevos mais ondulado e nos solos do tipo argissolo e cambissolo, portanto mais propensas a escorregamento de encostas. Na Figura 42 é possível ainda observar a relação entre as fraturas e falhas com o sistema viário como áreas de risco adicionais que também podem ser monitoradas ao longo do tempo.

Isso reforça a necessidade de sistemas de monitoramento e definição de níveis de alerta que correlacionam chuvas e movimentos de massas.

Para o modelo hierárquico analítico, optamos por criar um mapa de densidade de fraturas e falhas utilizando procedimento análogo ao aplicado para geração do mapa de densidade de drenagem a partir do uso da função *Line Density* do módulo *Spatial Analyst* presente no software ArcGis.

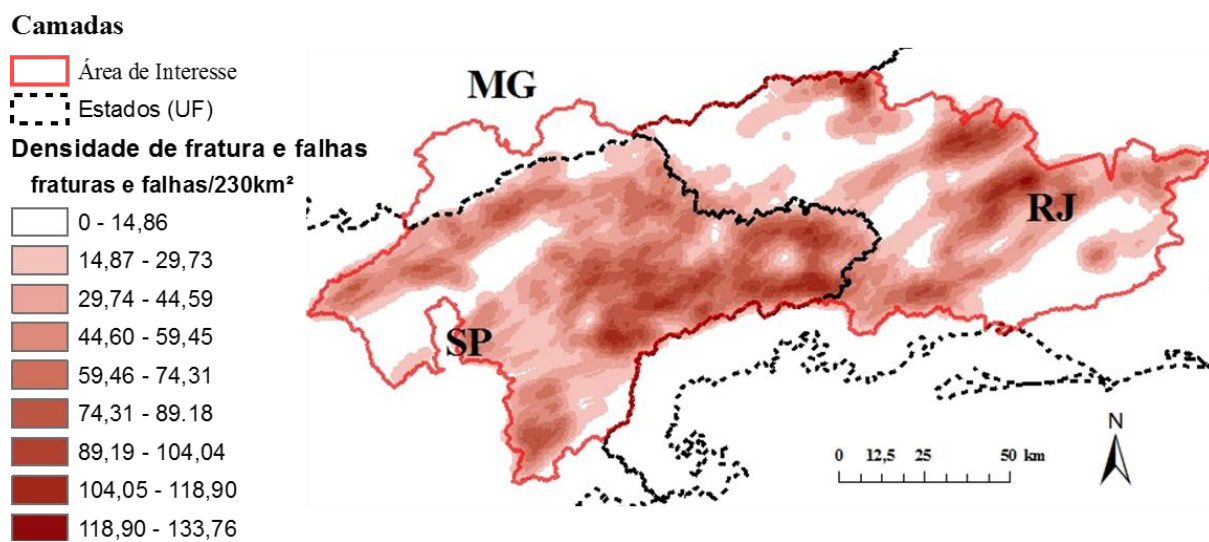
Figura 42 – Mapa de fraturas e falhas geológicas e a presença do sistema viário na região de estudo



Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS a partir de dados de fraturas e falhas geológicas e malha de arruamento do sistema viário.

A Figura 43 ilustra o mapa de densidade de fraturas e falhas que foi criado.

Figura 43 – Mapa de densidade de fraturas e falhas na área de estudo



Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS a partir de dados de estruturas geológicas.

4.2.8 Precipitação

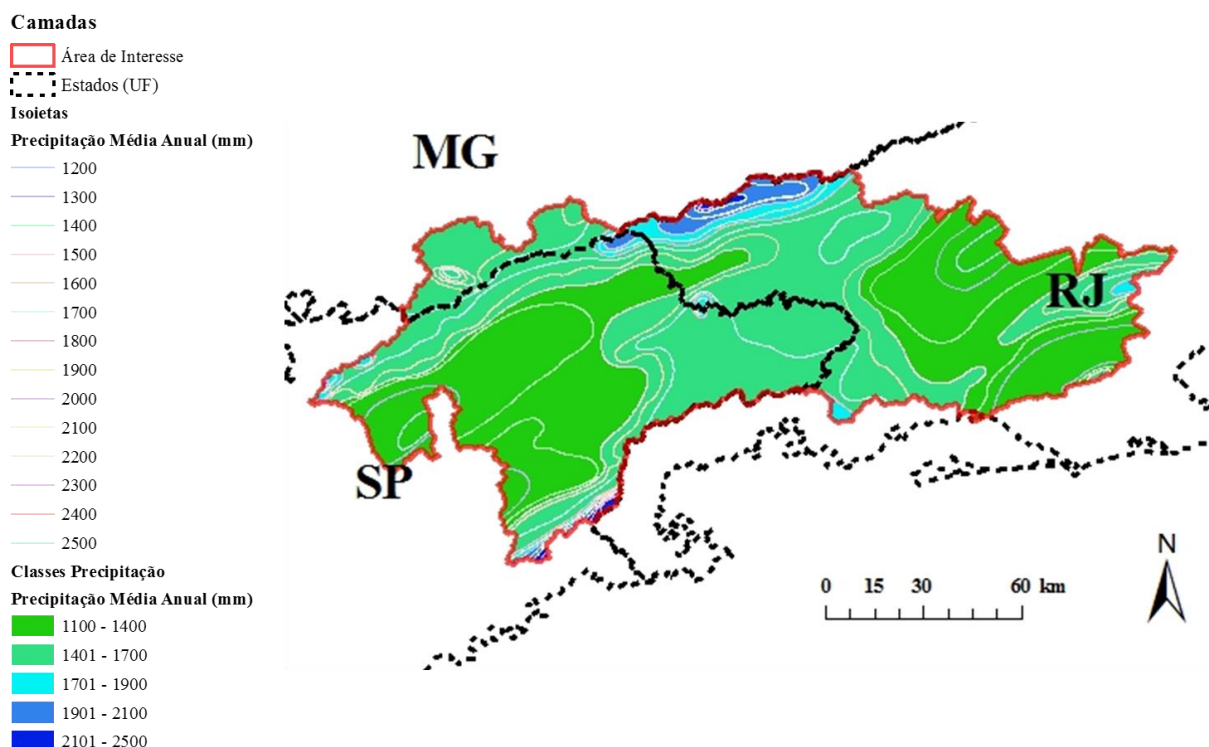
Para a informação de precipitação, que é a quantidade de chuva expressa pela altura de água acumulada sobre uma superfície plana e impermeável, utilizou-se os dados acumulados no atlas pluviométrico do Brasil, (BRASIL, Serviço Geológico do Brasil (CPRM) Ministério de Minas e Energia (MME), 2011), referente às isoietas anuais médias do período de 1977 a 2006.

O mapa utilizado bem como as precipitações anuais médias podem ser visualizados na Figura 44.

Neste mapa são destacadas, além de classes de precipitação, suas isoietas, que são linhas indicativas de mesma altura pluviométrica e que para o presente estudo é apresentado com um espaçamento de 100 mm/ano.

A informação de precipitação foi utilizada para caracterizar as regiões com maiores volumes pluviométricos e como um importante gatilho para o processo de deslizamento de encostas.

Figura 44 – Mapa destacando precipitação média anual e isoietas para a região de estudo



Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS e dados do Atlas Pluviométrico publicado pela CPRM (BRASIL, Serviço Geológico do Brasil (CPRM) Ministério de Minas e Energia (MME), 2011).

A intensidade de precipitação, que é a relação entre a altura pluviométrica e a duração da precipitação, é importante no monitoramento em tempo real onde serão gerados alertas nas áreas de maior susceptibilidade de movimento de massa para grandes intensidades de precipitação em curto espaço de tempo e também em função de volumes acumulados nos últimos 3 dias que possam provocar saturação do solo.

Com base na configuração das isoietas da região de estudo observou-se, a partir da Figura 44, que as precipitações mais elevadas, bem como, as maiores diferenças nas precipitações, estão associadas às Serras da Mantiqueira e regiões da Serra do Mar (2100 a 2500 mm). Em contraste com a região plana do Vale do Paraíba que possui os menores índices de precipitação anual da bacia oscilando, entre 1100 e 1400 mm. Desta forma, a Figura 44 permite melhor visualização do efeito orográfico refletido pela distribuição espacial das precipitações.

4.2.9 Distância dos Ativos

Para o cálculo da distância de ativos foram utilizadas como valores máximos de importância as representações do traçado das linhas de transmissão localizadas entre os centros de carga de Guaratinguetá - SP, Bananal - SP e Nova Iguaçu - RJ fornecido pelo ambiente do SIGEL (ANEEL).

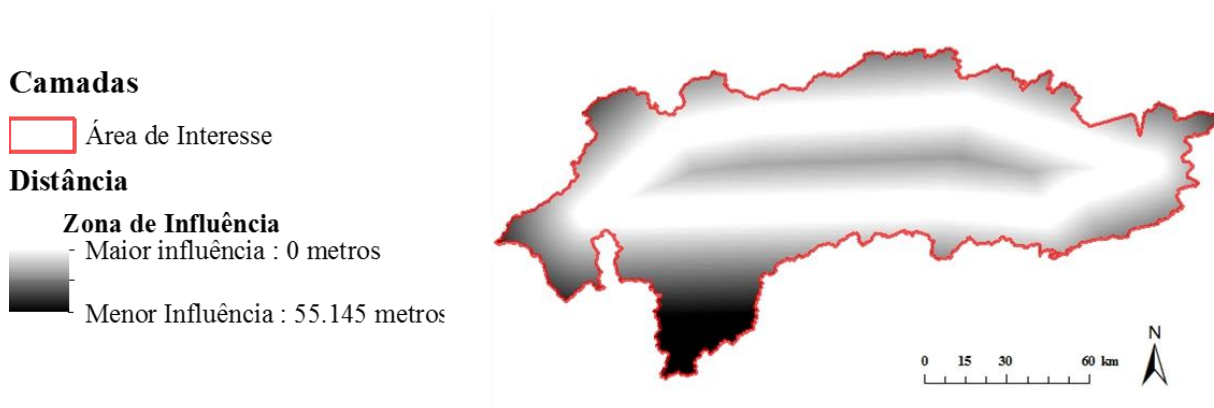
Neste estudo, foi mantida a premissa inicial de estudo que define uma área de alta importância através de uma zona de influência de 5 km ao redor deste traçado. Essa premissa foi mantida devido o traçado real das linhas de transmissão não estarem disponíveis e não serem passíveis de adequada identificação com as imagens orbitais adquiridas ao longo do estudo. Os dados detalhados não são disponibilizados pela Aneel, ONS ou Operadores devido o argumento de que se trata de informação sobre infraestrutura crítica do País e a mesma é classificada pelo Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República (GSI-PR) como de risco à segurança nacional.

Vale destacar, neste momento, que a falta do detalhamento de traçado, bem como a falta de melhor resolução ou detalhamento de outras informações não inviabiliza os resultados e metodologias alcançados, representando uma oportunidade para refinamento da análise em áreas menores e mais concentradas ao redor dos empreendimentos.

A camada de distância de ativos foi inteiramente calculada usando o software ArcGIS para a área de estudo a partir de quadriculas de 900 m² tendo a distância do centroide de cada

quadrícula sido calculada até a borda da zona de influência de 5 km. Optou-se por utilizar uma quadrícula de 900 m² pois quando convertido para dado do tipo *raster* representa pixel com 30 metros de resolução, resolução esta compatível com o dado de relevo utilizado no estudo. Para o valor de distância de cada quadrícula até a zona de influência, utilizou-se o centroide de cada quadrícula. Para representar de forma eficiente todos os valores de distância, foi utilizada uma operação de junção espacial entre os centroides e a borda do polígono de zona de influência pois esta função quando realizada no software ArcGIS já calcula a distância entre os elementos conectados. Isso pode ser melhor visualizado na Figura 45 que tem um gradiente de cores do mais claro (mais influente ao modelo) para o mais escuro (menos influente ao modelo) representando a importância definida por sua distância euclidiana, quanto maior a distância, menor é a necessidade de atenção para o fenômeno estudado.

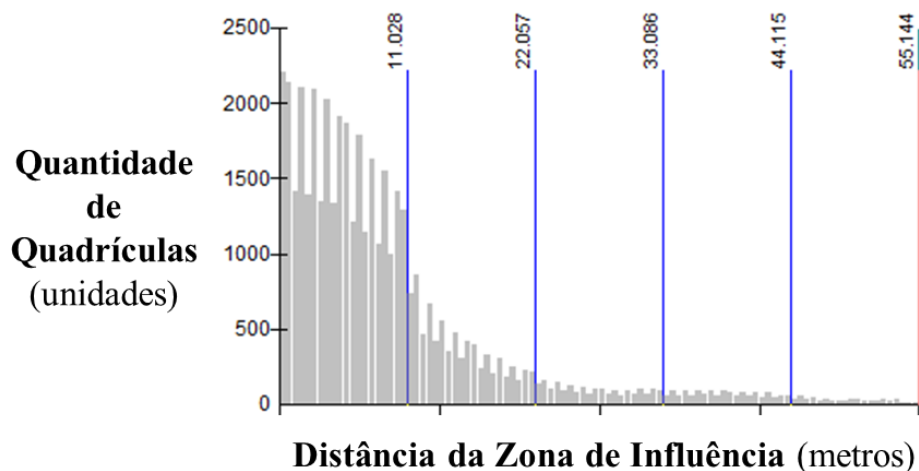
Figura 45 – Mapa de distância entre zona de influência máxima e borda da área de estudo



Fonte: Mapa gerado pelo autor usando software ArcGIS.

A Figura 45 pode ainda ser interpretada com o auxílio da distribuição de valores da distância da zona de influência para suas 43513 quadrículas mostrada no gráfico da Figura 46.

Figura 46 – Relação entre quantidade de quadrículas e distância da zona de influência para a área de estudo



Fonte: Gráfico gerado pelo autor com dados da distância dos ativos.

Neste gráfico podemos observar como o peso dado ao fator distância aos ativos é suavizado com a distância. As distâncias em metros indicadas no gráfico por linhas em azul representam os quintis enquanto a quantidade de quadrículas para cada distância está acumulada na cor cinza.

4.2.10 Dados meteorológicos e hidrológicos dinâmicos

Os dados dinâmicos suportados pela plataforma de monitoramento podem ser classificados em dados de observação, que buscam retratar uma realidade próxima, e dados de previsão numérica, que buscam prever o comportamento da atmosfera a partir de modelos numéricos de previsão do tempo.

Dentre os muitos dados disponíveis, buscou-se utilizar 2 informações para demonstrar a operacionalidade da plataforma voltada ao monitoramento de linhas transmissão de energia elétrica.

A primeira fonte de informação utilizada foi um dado de previsão numérica baseado no Sistema Brasileiro Regional de Modelagem Atmosférica (BRAMS - *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*) adaptado do modelo americano (BRASIL, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Ministério da Ciência Tecnologia Inovações e Comunicações (MCTIC), 2014) e inclui parametrizações especializadas para regiões de trópicos e sub trópicos, incluindo condições e estrutura da precipitação sobre a América do Sul.

Os arquivos que são recebidos continuamente pela plataforma estão no formato Grads. Para configuração do nome dos arquivos e armazenamento é utilizada a seguinte máscara (Prec_BRAMS05km_%A%M%d%h.gra):

Prefixo = Prec_BRAMS05km_

Ano com 2 dígitos = %A

Mês com 2 dígitos = %M

Dia com 2 dígitos = %d

Hora com 2 dígitos = %h

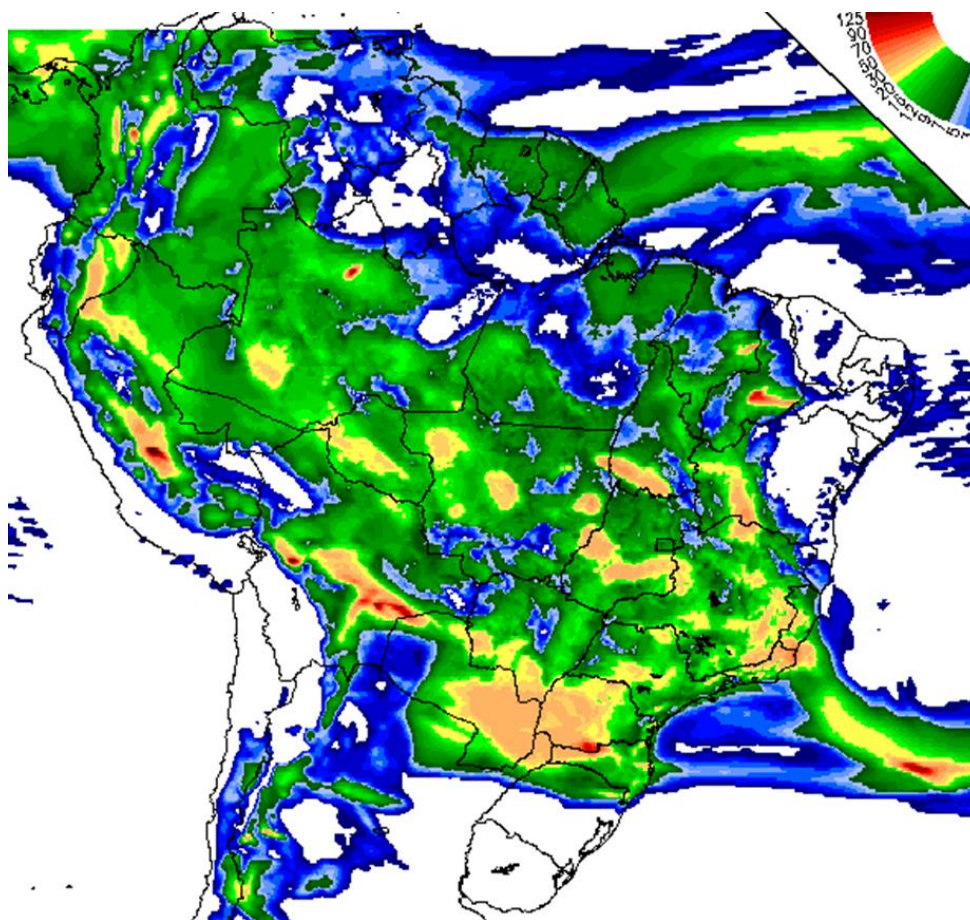
Ponto = .

Sufixo = gra

Adicionalmente um arquivo de controle (Prec_BRAMS05km.ctl) é mantido junto às informações adquiridas, arquivo este, que descreve em formato texto ASCII as informações comuns a todas imagens (número de linhas x colunas, coordenadas do primeiro pixel, resolução da imagem e valor nulo ou *dummy*).

Os dados de previsão estão em formato *raster* com resolução de 5 por 5 km e apresentam previsões de chuva em intervalos de 6 horas. A cada informação disponibilizada são geradas previsões para até 168 horas à frente do horário de referência, a qual está registrada no nome do arquivo (3,5 dias de previsão de 6 em 6 horas). Um exemplo de uma previsão gerada pelo modelo BRAMS pode ser visualizada na Figura 47.

Figura 47 – Imagem da previsão numérica calculada com o modelo BRAMS em resolução de 5x5 km para a variação de precipitação acumulada em 24 horas

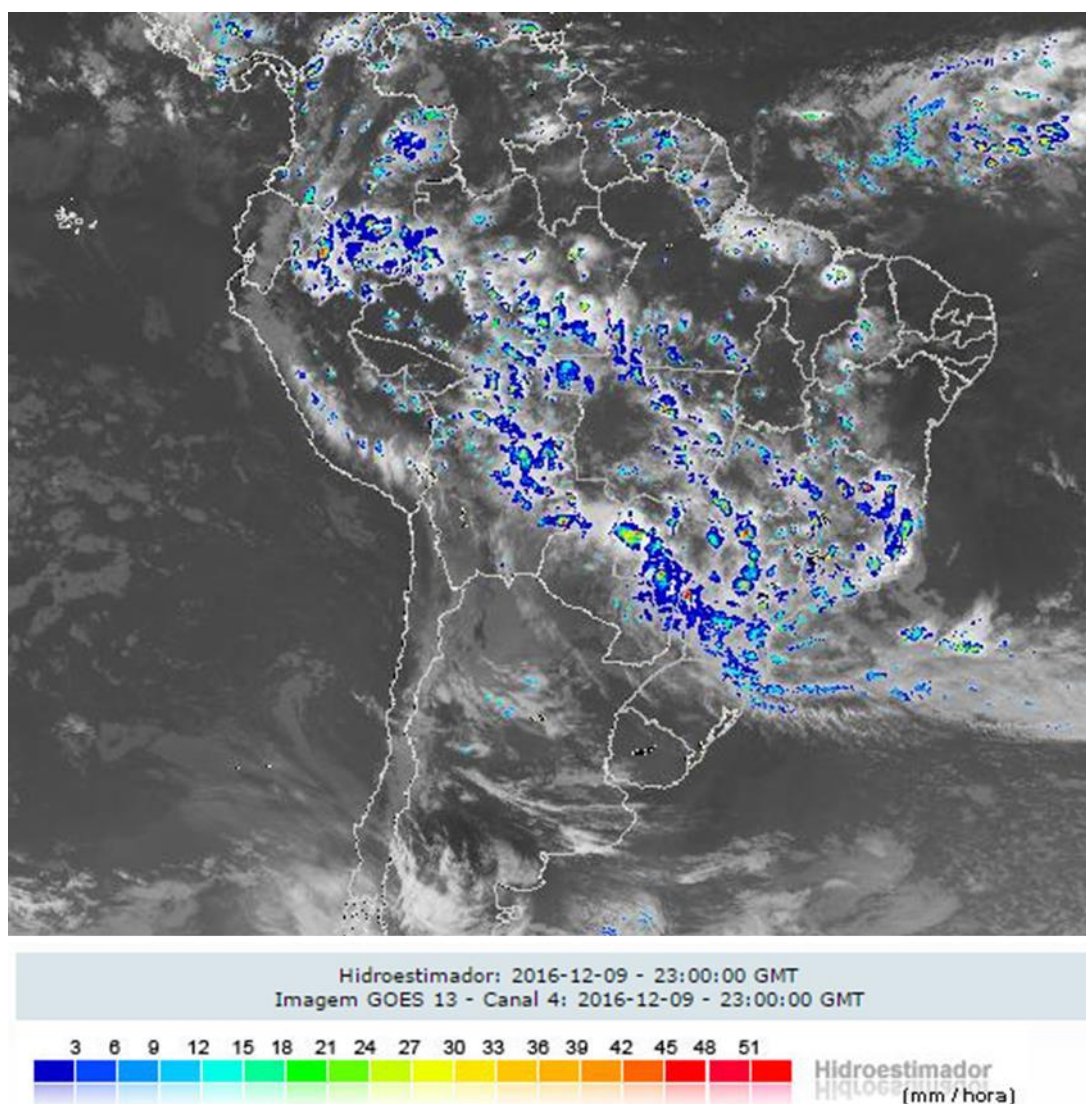


Fonte: Dados de <http://previsaonumerica.cptec.inpe.br/golMapWeb/DadosPages?id=Brams5>

A segunda fonte de informação utilizada, classificada como dados de observação, corresponde a informações meteorológicas do hidroestimador por imagem de satélite. Neste caso, a intensidade de chuva, em mm/h, é medida a partir da quantidade de radiação detectada em comprimentos de onda na região do infravermelho (canal 4) do satélite GOES-13.

Para o hidroestimador por imagens de satélite é calculada uma nova medição a cada 30 minutos. Portanto o acúmulo de chuva em uma determinada região pode ser calculado através dos valores dos dados *raster* gerados pelo hidroestimador. Um exemplo das imagens recebidas do hidroestimador pode ser visualizada na Figura 48.

Figura 48 – Imagem do Satélite GOES 13 – Canal 4 com representação da precipitação em cores



Fonte: Dados de http://sigma.cptec.inpe.br/prec_sat/

Os arquivos que são recebidos continuamente pela plataforma estão no formato Grads. Para configuração do nome dos arquivos e armazenamento é utilizada a seguinte máscara (S10238225_%A%M%d%h%m.bin):

Prefixo = S10238225_

Ano com 2 dígitos = %A

Mês com 2 dígitos = %M

Dia com 2 dígitos = %d

Hora com 2 dígitos = %h

Minuto com 2 dígitos = %m

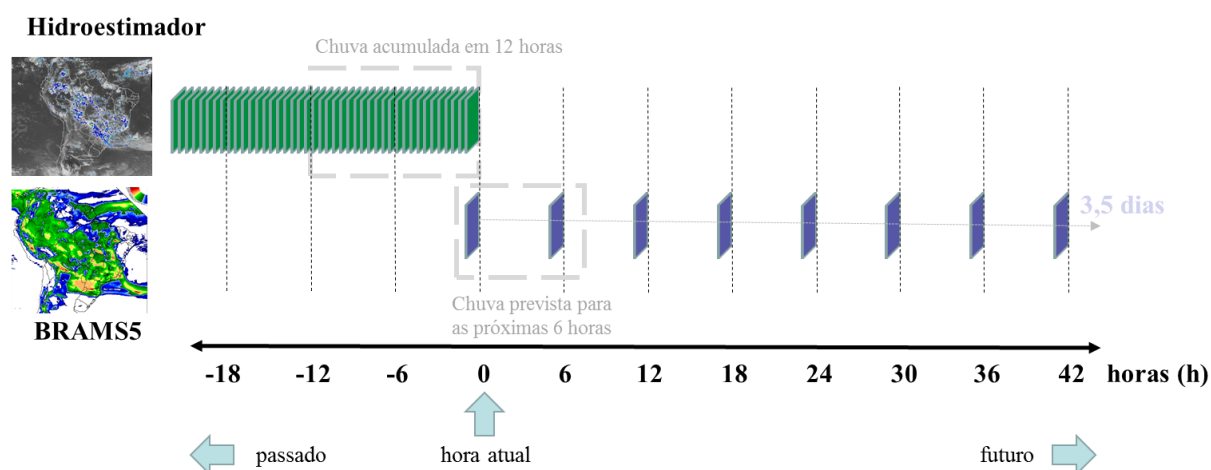
Ponto = .

Sufixo = bin

Um arquivo de controle (racc.ctl) também é mantido junto às informações adquiridas, nos mesmos padrões do arquivo de controle usado para o modelo de previsão numérica utilizado.

Os dados de previsão numérica e observação são armazenados referenciadas a hora mundial (GMT ou UTC). A Figura 49 ilustra os dados dinâmicos utilizados em relação ao horário de aquisição

Figura 49 – Representação dos dados utilizados na operacionalização da plataforma de monitoramento de análise e alerta em relação ao horário de aquisição



Fonte: Autor.

Para demonstrar a viabilidade de operacionalização da plataforma de monitoramento, foram implementadas duas análises em linguagem Lua em cinco categorias: normal, observação, atenção, alerta e alerta máximo sendo que os mapas utilizaram, respectivamente, as cores invisível, azul, amarelo, laranja e vermelho para representação visual da categoria encontrada como resultado da análise.

Na primeira análise implementada, usando dados da previsão numérica, foi avaliada a precipitação nominal máxima nas primeiras 6 horas em relação à hora base do arquivo. Para isso, foram adotados os seguintes valores por categoria: **normal** menor que 5 mm/6 horas; **observação** maior que 5 mm/6 horas e menor que 15 mm/6 horas; **atenção** entre

15mm/6horas até 30 mm/6 horas; **alerta** entre 30 mm/6 horas até 60 mm/6 horas e alerta máximo para valores maiores que 60 mm/6 horas.

Na segunda análise implementada, usando dados de observação, foi avaliado o volume acumulado nas últimas 72 horas em relação a hora base do arquivo. Para isso, foram adotados os seguintes valores por categoria: **normal** menor que 10 mm/72 horas **observação** maior que 10 mm/72 horas e menor que 20 mm/72 horas; **atenção** entre 20 mm/72 horas até 35 mm/72 horas; **alerta** entre 35 mm/72 horas até 80 mm/72 horas e **alerta máximo** para valores maiores que 80 mm/72 horas.

Esses valores adotados estão baseados no Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC) para a região da Vale do Paraíba e Serra da Mantiqueira respectivamente de 100mm e 80mm acumulados para um período de 72 horas apoiando-se na possibilidade de serem tomadas medidas anteriormente a deflagração de um deslizamento (Santoro, J. et al., 2010).

Os valores apresentados acima foram ponderados pelo grau de susceptibilidade previamente encontrado, portanto, para os polígonos de classe de susceptibilidade muito alta foi aplicado um fator de redução dos níveis de alerta em 20% para cada categoria, refletindo a maior criticidade e conforme sugestão de uso de parâmetros operacionais mais conservadores proposto por SANTORO, J. et al., 2010.

Os exemplos supracitados para demonstrar a operacionalização do sistema como um instrumento de acompanhamento das áreas de susceptibilidade de movimento de massa em linhas de transmissão de energia elétrica. Outros valores podem ser adotados para as categorias, bem como, fatores de redução específicos por classe de susceptibilidade, conforme necessidade dos gestores e usuários envolvidos. Os programas implementados em Lua para as 2 análises estão detalhados nos Apêndice.

Para que os dados desnecessários não sejam armazenados, uma vez que a abrangência destas informações cobre todo o Brasil, foi implementado um filtro baseado na área de interesse do estudo e foi importado, dos servidores de dados dinâmicos, informações contidas até meio graus decimais (aproximadamente 1667 metros) das bordas da área de interesse.

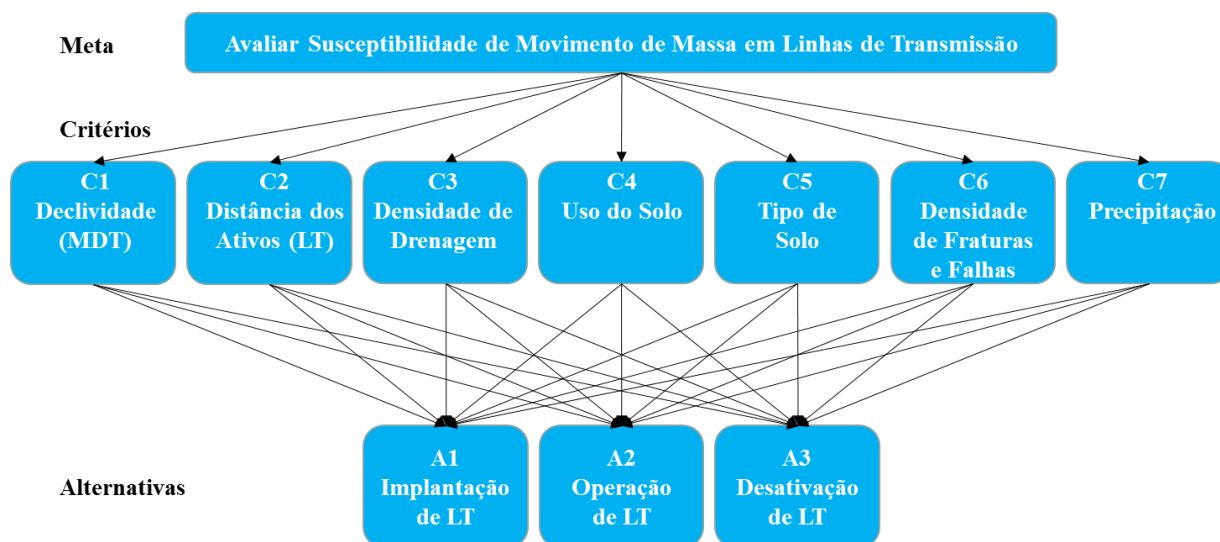
4.3 ANÁLISE HIERÁRQUICA PARA SUSCEPTIBILIDADE DE MOVIMENTO DE MASSA

A avaliação de susceptibilidade movimento de massa em empreendimentos do setor elétrico acompanha todo o ciclo de vida dos empreendimentos relacionados à Linhas de

Transmissão (LT), envolvendo Implantação, Operação e Desativação. Entretanto é muito comum a análise de susceptibilidade na fase de implantação das LTs no Brasil, porém nos processos de operação e desativação muitas vezes, este tipo de análise acaba sendo negligenciada. Segundo a Associação Brasileira das Empresas de Transmissão de Energia Elétrica (ABRATE) deve-se atentar que em 2016, 58% dos ativos de transmissão que tiveram a concessão prorrogada estão com a vida útil regulatória vencida, reforçando a necessidade de avaliação da susceptibilidade em todo o ciclo de vida do empreendimento.

Usando o método de AHP foi possível estruturar o problema através do estabelecimento da meta, dos critérios e das alternativas, conforme apresentados na Figura 50.

Figura 50 - Estrutura hierárquica da avaliação da susceptibilidade de movimento de massa em Linhas de Transmissão (LT)



Fonte: Autor.

Na abordagem proposta para este problema foi preservado o limite cognitivo máximo definido por Keeney; Raiffa (1993), que corresponde a uma quantidade de 7 ± 2 critérios.

Dentre os critérios apontados por muitos autores (MEINHARDT et al., 2015; DRAGIĆEVIĆ et al., 2015; LIAO et al., 2011; YU et al., 2011; TAHERI et al., 2015; CHACÓN et al., 2006; VAN WESTEN et al., 2008, SOARES, 2008; FARIA; AUGUSTO FILHO, 2013; GIMENES; FILHO, 2013), se destacam para o problema de deslizamento de encostas, em estudos regionais, os seguintes fatores: relevo, geologia, tipo e uso do solo, hidrologia e precipitação.

Desta forma, para os critérios definidos na estrutura hierárquica proposta da Figura 50, a determinação de importância relativa dos critérios em comparação pareada, utilizou a escala de julgamento da Tabela 3, resultando na matriz pareada apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Matriz de comparação pareada entre os critérios selecionados para avaliar a susceptibilidade de movimento de massa em Linhas de Transmissão (C1=Declividade, C2= Distância dos ativos de LTs, C3= Densidade de drenagem, C4= Uso do solo, C5= Tipo de solo, C6= Densidade de fraturas e falhas, C7= Precipitação)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1	1/5	5	3	3	2	1/3
C2	5	1	7	4	3	3	1/3
C3	1/5	1/7	1	1/3	1/3	1/3	1/5
C4	1/3	1/4	3	1	1	1/2	1/3
C5	1/3	1/3	3	1	1	1/2	1/3
C6	1/2	1/3	3	2	2	1	1/4
C7	3	3	5	3	3	4	1

Fonte: Autor.

A partir da matriz apresentada na Tabela 8, foram gerados os índices de importância relativa para os critérios (Tabela 9) e o resultado da Razão de Consistência (Figura 51). A Razão de Consistência obtida foi igual à 6,94%, que é considerado um valor aceitável por ser inferior à 10% (DRAGIĆEVIĆ et al., 2015; KUMAR; VAIDYA, 2006).

Tabela 9 - Matriz de critérios normalizada, medida de consistência de cada critério e importância relativa dos critérios

Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7				
	Declividade	Distância dos Ativos	Densidade de Drenagem	Uso do Solo	Tipo de Solo	Densidade de Fraturas e Falhas	Precipitação	Soma	Média	Consistência	Importância
C1 - Declividade	0,10	0,04	0,19	0,21	0,23	0,18	0,12	1,05	0,150	7,36	15,0%
C2 - Distância dos Ativos	0,48	0,19	0,26	0,28	0,23	0,26	0,12	1,82	0,260	8,27	26,0%
C3 - Densidade de Drenagem	0,02	0,03	0,04	0,02	0,03	0,03	0,07	0,23	0,033	7,34	3,3%
C4 - Uso do Solo	0,03	0,05	0,11	0,07	0,08	0,04	0,12	0,50	0,071	7,20	7,1%
C5 - Tipo de Solo	0,03	0,06	0,11	0,07	0,08	0,04	0,12	0,52	0,074	7,27	7,4%
C6 - Densidade de Fraturas e Falhas	0,05	0,06	0,11	0,14	0,15	0,09	0,09	0,69	0,099	7,39	9,9%
C7 - Precipitação	0,29	0,57	0,19	0,21	0,23	0,35	0,36	2,19	0,313	8,11	31,3%

Fonte: Autor.

Figura 51 - Resultados do cálculo da Razão de Consistência (RC)

Índice Aleatório										
Ordem da Matriz (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice Aleatório (IA)	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49

IC = Índice de coerência

IC	0,09
----	------

RC = Razão de Consistência

RC	0,07	6,94%	OK
----	------	-------	----

Fonte: Autor.

Na Tabela 9 pode-se observar, que pelos julgamentos realizados, os critérios encontrados por ordem de importância foram: 1)Precipitação (31,3%), 2)Distância dos ativos de LT (26%), 3)Declividade (15%), 4)Densidade de fraturas e falhas (9,9%), 5)Tipo de solo (7,4%), 6)Uso do solo (7,1%) e 7)Densidade de drenagem (3,3%).

Após o julgamento dos critérios (Figura 52) foi determinado o nível de preferência das alternativas comparando de forma pareada as alternativas implantação, operação e desativação de linhas de transmissão para cada um dos critérios, conforme apresentado na Tabela 10.

Figura 52 - Julgamentos utilizados para análise das alternativas (A1=Implantação, A2=Operação e A3=Desativação de Linhas de Transmissão) por critério, em função de sua importância junto à susceptibilidade de movimento de massa em Linhas de Transmissão

C1 - Declividade				C2 - Distância dos Ativos				C3 - Densidade de Drenagem			
	A1	A2	A3		A1	A2	A3		A1	A2	A3
A1	1	2	2	A1	1	1	1	A1	1	1	1
A2	1/2	1	1	A2	1	1	1	A2	1	1	1
A3	1/2	1	1	A3	1	1	1	A3	1	1	1

VA1	1,59	VN1	50,0%	VA1	1,00	VN1	33,3%	VA1	1,00	VN1	33,3%
VA2	0,79	VN2	25,0%	VA2	1,00	VN2	33,3%	VA2	1,00	VN2	33,3%
VA3	0,79	VN3	25,0%	VA3	1,00	VN3	33,3%	VA3	1,00	VN3	33,3%

C4 - Uso do Solo				C5 - Tipo de Solo				C6 - Densidade de Fraturas e Falhas			
	A1	A2	A3		A1	A2	A3		A1	A2	A3
A1	1	1/3	1	A1	1	2	1	A1	1	2	1
A2	3	1	3	A2	1/2	1	2	A2	1/2	1	2
A3	1	1/3	1	A3	1	1/2	1	A3	1	1/2	1

VA1	0,69	VN1	20,0%	VA1	1,26	VN1	41,3%	VA1	1,26	VN1	41,3%
VA2	2,08	VN2	60,0%	VA2	1,00	VN2	32,7%	VA2	1,00	VN2	32,7%
VA3	0,69	VN3	20,0%	VA3	0,79	VN3	26,0%	VA3	0,79	VN3	26,0%

C7 - Precipitação			
	A1	A2	A3
A1	1	1	2
A2	1	1	5
A3	1/2	1/5	1

VA1	1,26	VN1	36,7%
VA2	1,71	VN2	49,8%
VA3	0,46	VN3	13,5%

Fonte: Autor.

Neste caso observou-se que o modelo proposto e suas comparações pareadas dos critérios se mostram mais ajustado para a Fase de Operação com uma representatividade de 49,8% seguido da alternativa da Fase de Implementação com 36,7% e com menor relevância para a Fase de Desativação (13,5%) uma vez que o critério de precipitação é um dos critérios fundamentais para gatilho da instabilidade de encostas e com participação de 31,3%.

A Tabela 10 resume a importância relativa de cada critério para as diferentes alternativas.

Tabela 10 - Nível de preferência das alternativas propostas no AHP

Participação			Alternativas		
			Implantação	Operação	Desativação
Critérios	Declividade	15,0%	50,0%	25,0%	25,0%
	Distância dos Ativos	26,0%	33,3%	33,3%	33,3%
	Densidade de Drenagem	3,3%	33,3%	33,3%	33,3%
	Uso do Solo	7,1%	20,0%	60,0%	20,0%
	Tipo de Solo	7,4%	41,3%	32,7%	26,0%
	Densidade de Fraturas e Falhas	9,9%	41,3%	32,7%	26,0%
	Precipitação	31,3%	36,7%	49,8%	13,5%
Valor da decisão		100,0%	37,30%	39,04%	23,66%
Ordem de Decisão			2ª escolha	1ª escolha	3ª escolha

Fonte: Autor.

4.4 PROCESSOS FINAIS PARA GERAÇÃO DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE

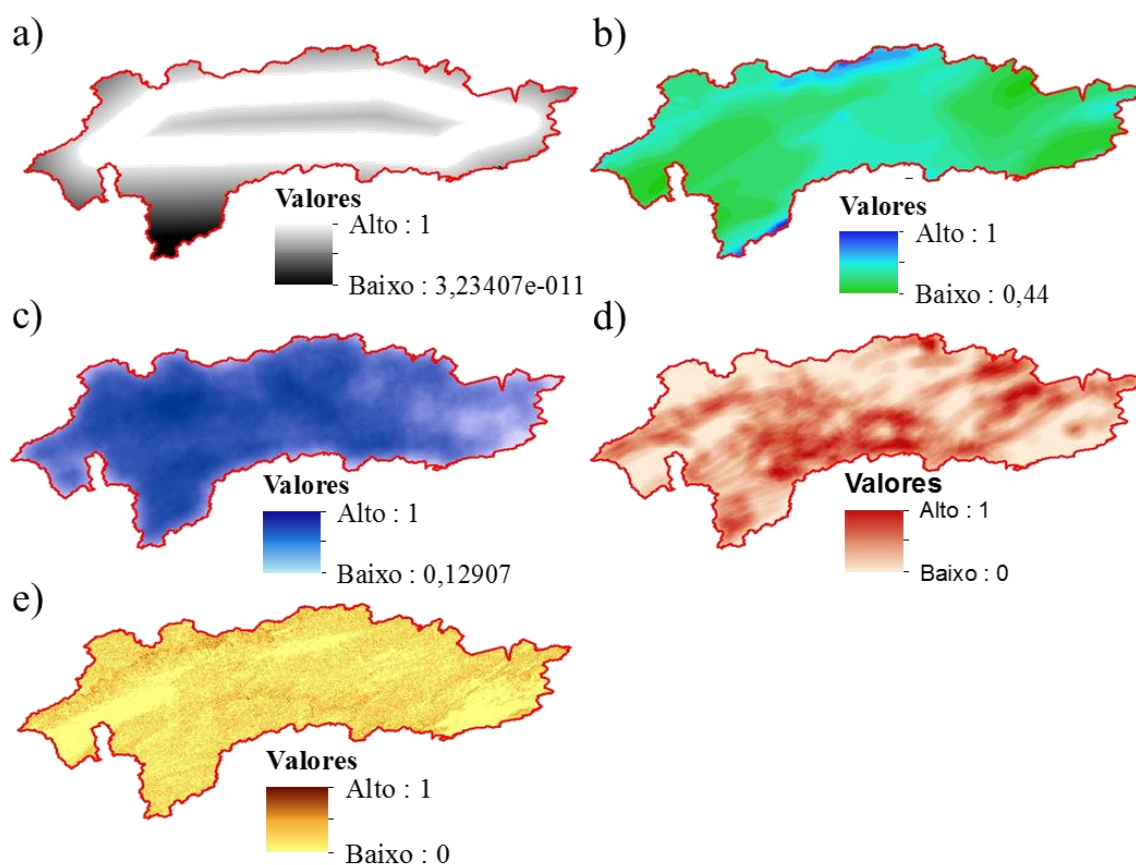
A partir da composição do banco de dados espacial, para área de estudo que envolve 40 municípios, parte da bacia do Rio Paraíba do Sul e regiões da Serra do Mar e principalmente Serra da Mantiqueira, unindo informações de diferentes fontes e escalas (subseção 5.2) e do estabelecimento do modelo hierárquico analítico para análise de susceptibilidade de movimento de massa (subseção 5.3), desenvolvemos a normalização dos dados e o processo

de álgebra de mapas para criação do mapa de susceptibilidade de movimento de massa nas áreas de influência das linhas de transmissão categorizadas em 5 classes (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto).

4.4.1. Normalização dos dados

Para a normalização de dados foi utilizado álgebra de mapas através da função de *raster calculator* do software ArcGIS para os temas de distância dos ativos, precipitação, densidade de drenagem, densidade de fraturas e falhas e declividade. Cada uma destas camadas fora normalizada em relação aos seus valores máximos respectivamente 55.145 metros, 2500 milímetros, 108,66 trechos de rio, 133,76 fraturas e falhas, e 71,42 graus de declividade. Como resultado foram obtidos mapas quantitativos normalizados para uso no processo de álgebra de mapas. O esquemático de transformação de cada mapa pode ser visualizado na Figura 53.

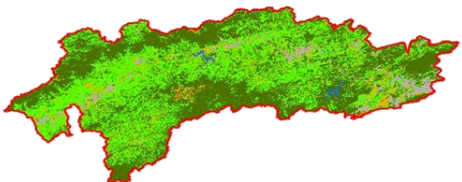
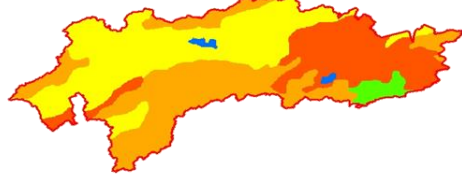
Figura 53 – Mapas com dados normalizados empregados para as camadas de distância dos ativos (a), precipitação (b), densidade de drenagem (c), densidade de fraturas e falhas (d) e declividade (e)



Fonte: Autor usando software ArcGIS.

Para os temas de uso de solo e tipo de solo foram realizadas reclassificações, através da função *reclassify* dentro do módulo *Spatial Analyst* do software ArcGIS onde cada classe passou a assumir o valor correspondente a importância definida pelos processos AHP realizado com cada tema. Os resultados visuais se mantem o mesmo, porém, os valores estão adequados para uso na álgebra de mapas (Quadro 1).

Quadro 1 – Esquemático de normalização empregado para as camadas de uso de solo e tipo de solo

Reclassificação de para Água 0,047 Urbano 0,090 Pastagem/Agricultura 0,153 Solo Exposto 0,254 Floresta 0,456	Reclassificação das classes de uso para valores 	
Reclassificação de para Água 0,049 Planossolo 0,104 Cambissolo 0,165 Latossolo 0,264 Argissolo 0,418	Reclassificação dos tipos de solo para valores 	

Fonte: Autor.

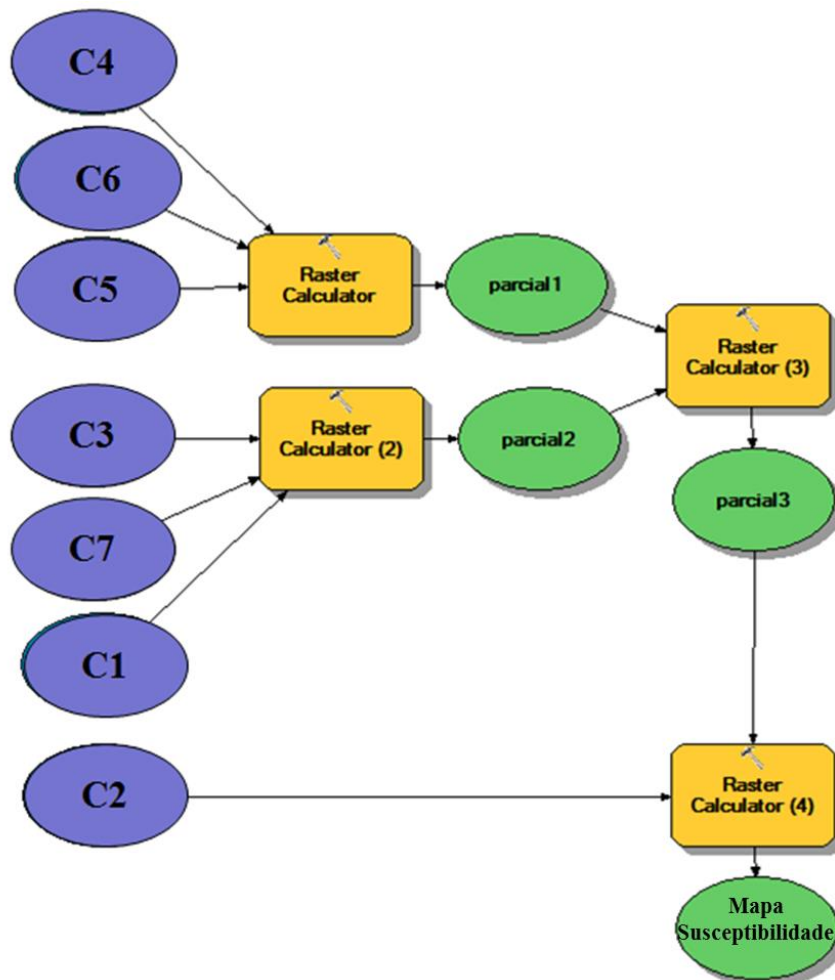
4.4.2. Álgebra de mapas

Para a álgebra de mapa optou-se por construir uma rotina específica com auxílio do ambiente de *Model Builder*, disponível no software ArcGIS, a fim de automatizar o processo do mapa de susceptibilidade, na forma de uma caixa de ferramenta (*toolbox*). Este processo permite que sejam encadeadas funções espaciais, neste caso operações de álgebra de mapas, de forma que toda a operação de geração do mapa final possa ser facilmente replicada quantas vezes forem necessárias simplesmente variando os parâmetros dos pesos ou mesmo fornecendo mapas mais detalhados como critérios ao modelo. Outra vantagem desse método está no fato de que o mesmo pode ser compartilhado em outros projetos e auxilia na documentação.

A Figura 54 detalha a rotina criada no *Model Buidier* no qual tem-se como entrada os critérios de C1 à C7, operações de *raster calculator* onde a entrada são os pesos de forma parametrizada para cada critério até culminar na geração do mapa de susceptibilidade. Como a operação de *raster calculator* pode ser executada com até 5 camadas de dados (neste caso critérios) ao mesmo tempo, optou-se por segmentar a equação em 4 operações, ao invés de duas delas, para conseguir, além de melhor sensibilidade às equações, a separação da distância dos ativos (C2) como um critério final a ser aplicado. Desta forma, tornando o modelo mais flexível não somente à monitoramento de linhas de transmissão como outros

ativos que possam ser afetados pelo mesmo problema de escorregamento tais como, gasodutos, rodovias dentre outros elementos com representação linear.

Figura 54 – Esquemático da operação de *Model Builder* para realização de álgebra de mapas usando critérios do AHP



Fonte: Autor usando função *Model Builder* no ArcGIS.

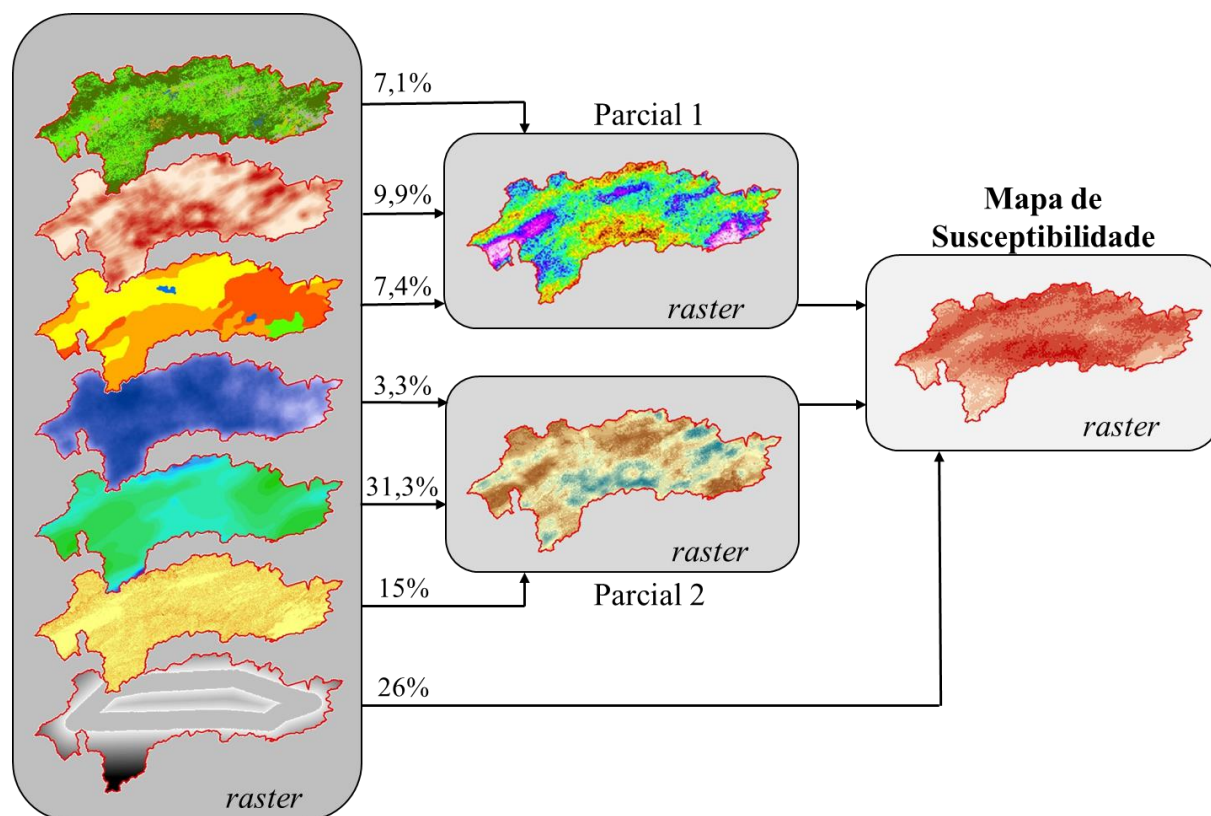
O resultado da álgebra de mapas é um novo mapa em formato *raster* que recombina os fatores baseado na Equação 7 a seguir:

$$\begin{aligned}
 &(C4*0,071+C6*0,099+C5*0,074)+ \\
 &+(C3*0,033+C7*0,313+C1*0,15)+ \\
 &+C2*0,026 = \text{raster (mapa de susceptibilidade)}
 \end{aligned}$$

(7)

Podemos visualizar os resultados parciais e final através da Figura 55.

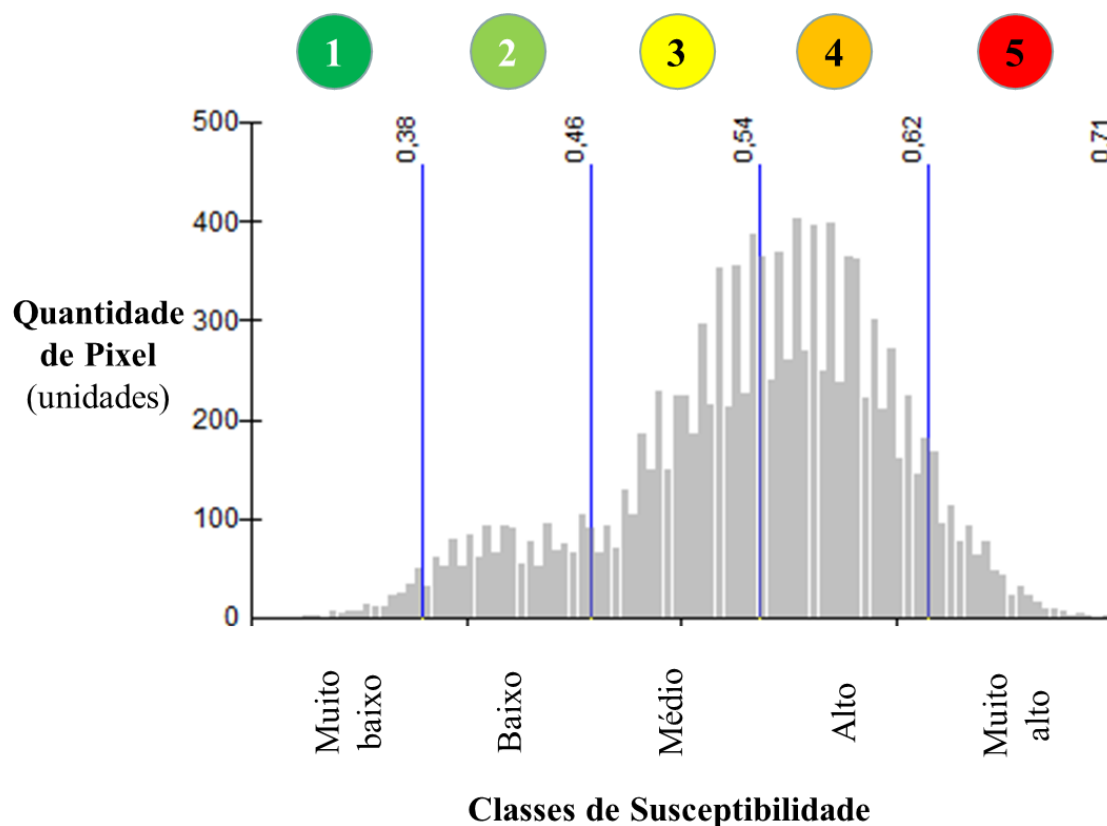
Figura 55 – Mapa de susceptibilidade e resultados das parciais 1 e 2 após execução do *Model Builder*



Fonte: Autor usando software ArcGIS.

Com isso a distribuição dos resultados no mapa de susceptibilidade final variou entre 0,29834 a 0,70698. Para determinação da escala linguística foi adotada a divisão em quintis, o que resultou nos seguintes particionamentos: 1) Muito baixa em 1,5% da área, 2) Baixa em 12,0% da área, 3) Média em 34,9% da área, 4) Alta em 45,3% da área e 5) Muito alta em 6,2% da área. A curva de distribuição é ilustrada na Figura 56.

Figura 56 – Quantis de distribuição das categorias do mapa de susceptibilidade e respectiva escala linguística adotada (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto)



Fonte: Autor usando software ArcGIS.

4.4.3. Generalização e Vetorização do Mapa de Susceptibilidade

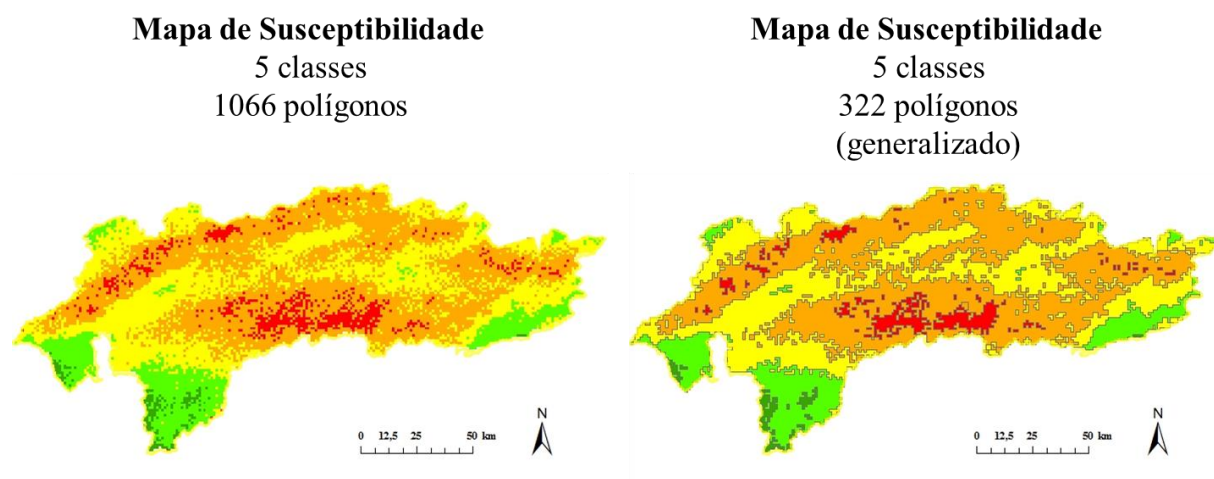
Para facilitar os cruzamentos do mapa de susceptibilidade com outras camadas, foi realizado o processo de categorização em 5 classes, vetorização do mapa categorizado e generalização de polígonos de forma automatizada por uma nova rotina realizada usando o *Model Builder*, de modo a tornar as áreas mais homogêneas e reduzir os polígonos espúrios no mapa final.

O mapa de susceptibilidade inicialmente calculado apresentou 1006 polígonos e, após o processo de simplificação, houve uma redução desse número para 322 polígonos, aumentando assim, a eficiência do processo de análise em tempo real em cerca de 3 vezes além de tornar mais fácil o planejamento de ações de monitoramento. A diferença entre o mapa de inicial e o mapa de susceptibilidade generalizado se mostrou eficiente uma vez que aglutinou os

menores polígonos, *pixels* isolados, ao vizinho de maior adjacência através da função *Eliminate* do ArcGIS.

A comparação visual entre os dois mapas de susceptibilidade de movimento de massa na região de estudo pode ser observada através da Figura 57.

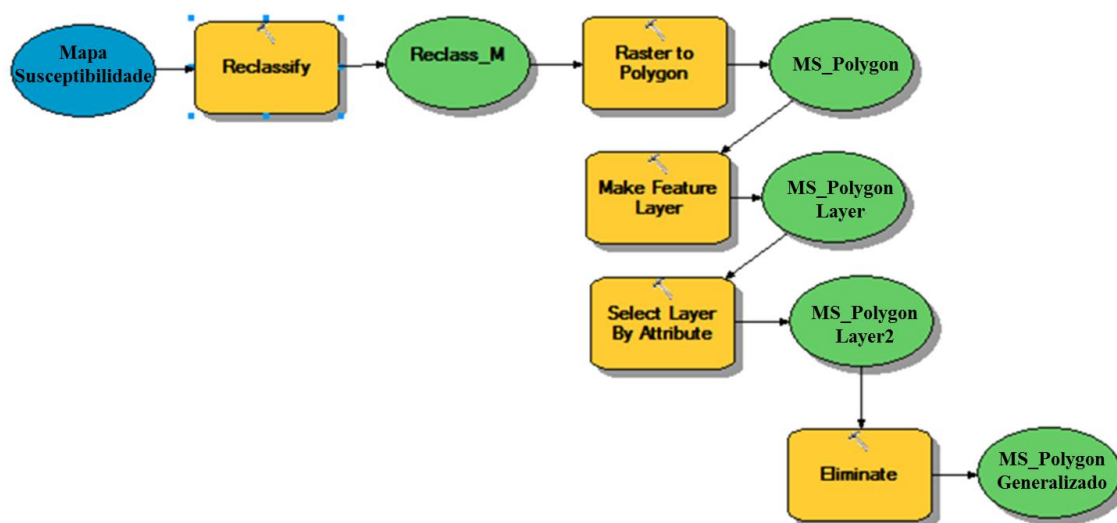
Figura 57 – Comparação visual entre os mapas de susceptibilidade (original *versus* generalizado)



Fonte: Autor usando software ArcGIS.

O processo criado com o *Model Builder* do ArcGIS para realizar este procedimento encontra-se detalhado no fluxograma da Figura 58.

Figura 58 – *Model Builder* utilizado para classificação, vetorização e generalização do mapa de susceptibilidade para a área de estudo



Fonte: Autor usando software ArcGIS.

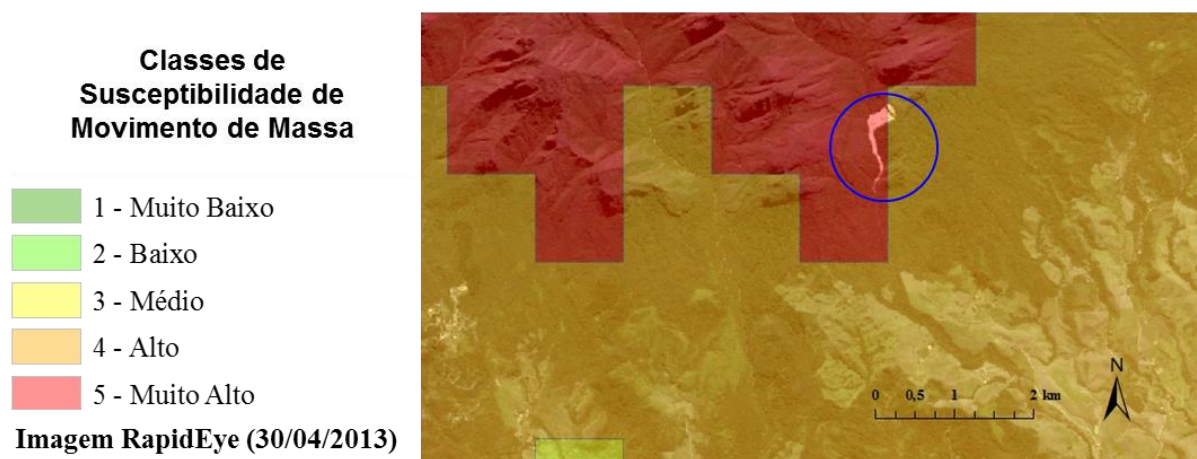
4.5 CONFIRMAÇÃO DOS RESULTADOS DO MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE

Ao se fazer análise detalhada das imagens de satélite é possível identificar diferentes movimentos de massa, tanto em áreas mais próximas a linhas de transmissão quanto próximas a outros elementos de risco como moradias, estradas, bordas de reservatórios, torres de telecomunicações reforçando a predominância da característica apontada pelo mapa de susceptibilidade que ressalta 51,5% com áreas de alta ou muito alta criticidade.

Alguns pontos de destaque que identificamos ao longo do estudo foram documentados por fotos de campo ou evidenciadas através de imagens de satélite para apoiar o desenvolvimento deste trabalho.

Um importante destaque pode ser dado na cidade de Queluz (SP), onde o modelo já apontava regiões de muito alta susceptibilidade e identificamos um grande escorregamento apontado pela imagem de satélite RapidEye (Figura 59).

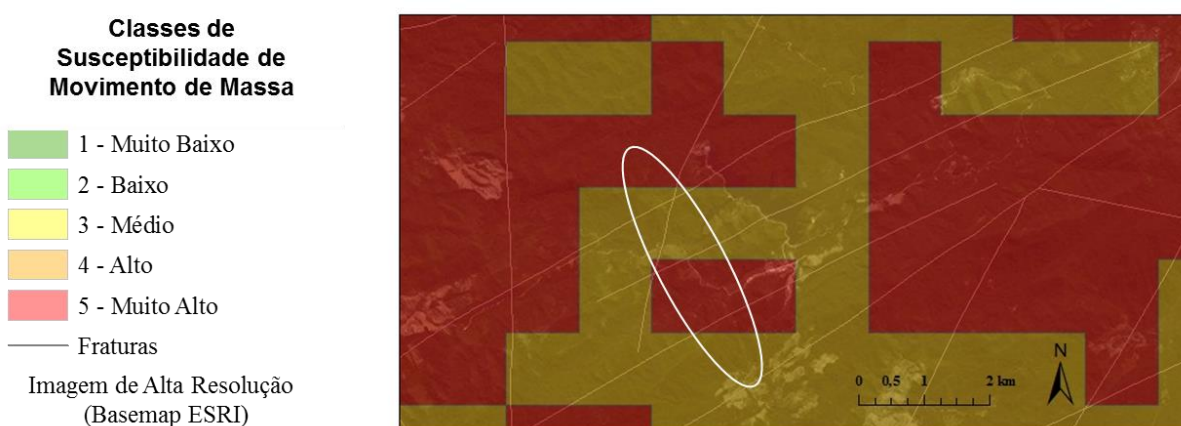
Figura 59 – Detalhe de escorregamento translacional ocorrido na Serra da Mantiqueira



Fonte: Autor com uso do software ArcGIS sobrepondo imagem de satélite RapidEye (5 m) de 30/04/2013 com mapa de susceptibilidade produzido com o método AHP.

Na cidade de Bananal (SP), foi destacado a presença do traçado de uma linha de transmissão (elipse branca) em uma região classificada com alta e muito alta susceptibilidade. Este cenário tem reforçada a característica da presença concentrada de fraturas e falhas (linhas em cinza) e forte presença de floresta dificultando muitas vezes seu monitoramento (Figura 60).

Figura 60 – Detalhe do mapa de susceptibilidade na região de Bananal (SP) com destaque (elipse branca) do traçado de linha de transmissão e linhas de representação das fraturas e falhas (cinza)



Fonte: Autor com uso do software ArcGIS e mapa base da ferramenta (60cm) sobreposto com o mapa de susceptibilidade produzido com o método AHP e dados primários de estruturas geológicas.

Muitos resultados detalhados podem ser extraídos a partir da visualização com transparência entre as diversas camadas na ferramenta GIS inclusive para estudar evidências que foram observadas em campo.

Em campo, outros exemplos foram adquiridos ao longo da rodovia Presidente Dutra (BR-116) onde, podem-se observar áreas com fragilidade na vegetação (levando a condições de solo exposto) e regiões pontuais onde já houve reforço das encostas para evitar maior comprometimento das torres de transmissão (Figura 61).

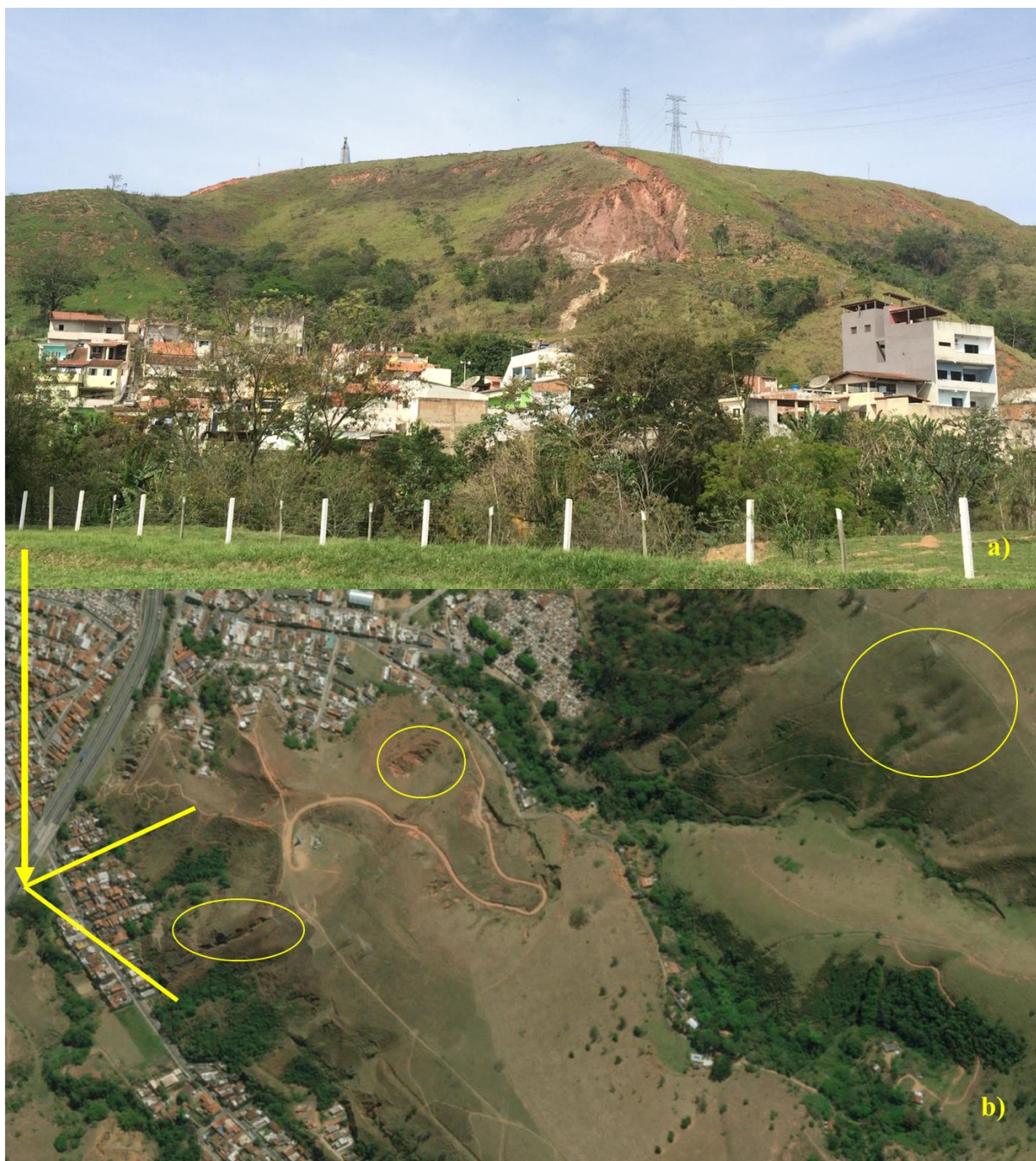
Figura 61 – Detalhes de linhas de transmissão a) reforço de talude; b) solo exposto ao redor de algumas torres; c) processo erosivo próximo ao traçado e d) detalhe de movimentação de postes em área com linhas de transmissão evidenciando movimentações no terreno



Fonte: Autor em coleta em campo realizada no dia 17/10/2016 ao longo da rodovia Presidente Dutra (BR-116).

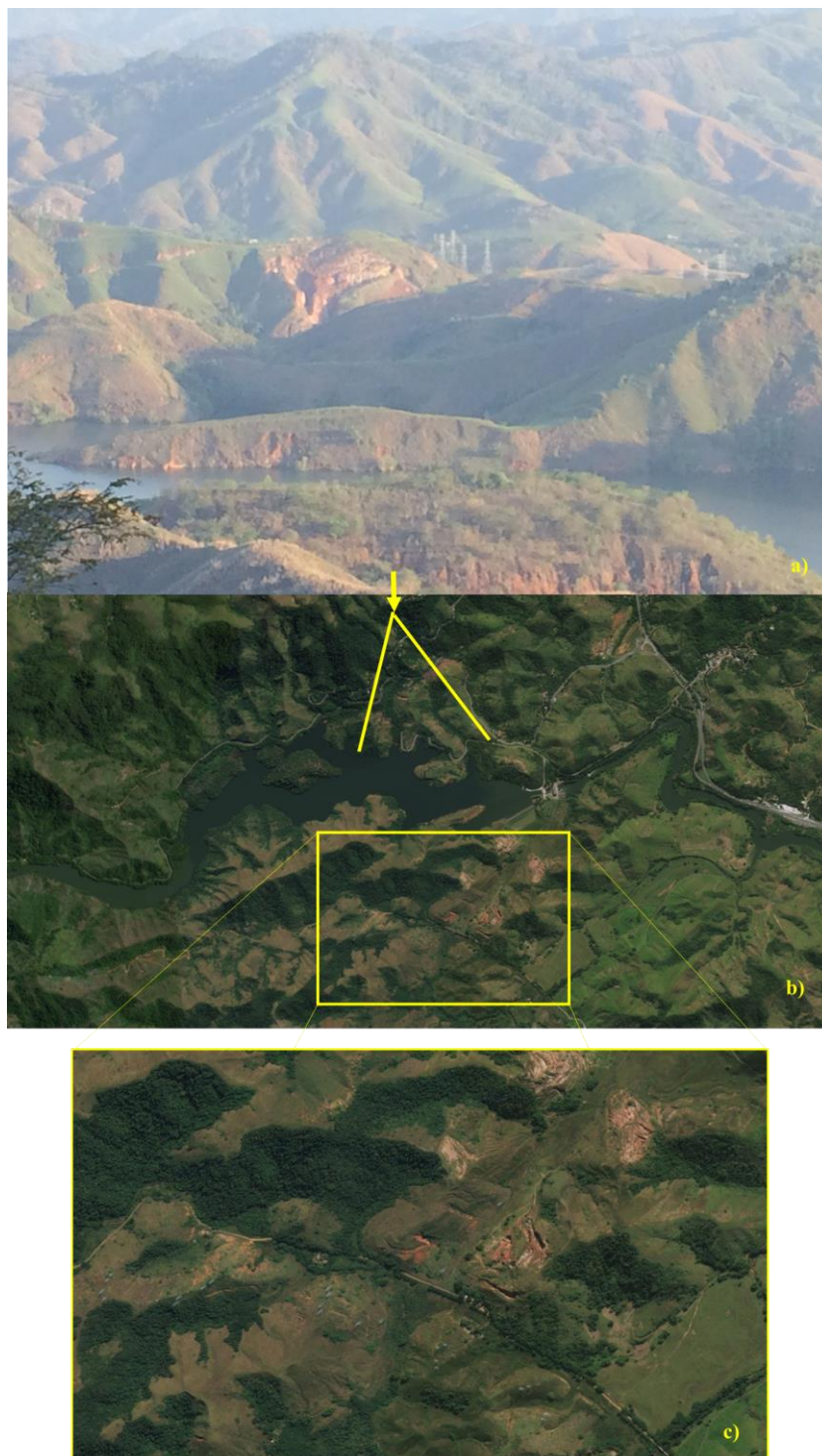
Outros exemplos são destacados nas Figuras 62 e 63, inclusive reforçando a caracterização de relevo ondulada para toda a área de estudo.

Figura 62 – Detalhe da erosão e movimentações de terreno dentro da área de estudo, Aparecida (SP). Elipses menores detalham processos erosivos e círculo maior detalha presença de linha de transmissão próxima à região com forte presença de movimentação



Fonte: a) Foto tirada pelo autor (2016) e b) imagem de satélite de alta resolução (50 cm) do acervo do software ArcGIS (coordenada: -22.8540923,-45.2291837) em zoom 1:6.000.

Figura 63 – Detalhes dos escorregamentos de encostas, erosões e movimentações de terreno dentro da área de estudo, Paracambi (RJ)

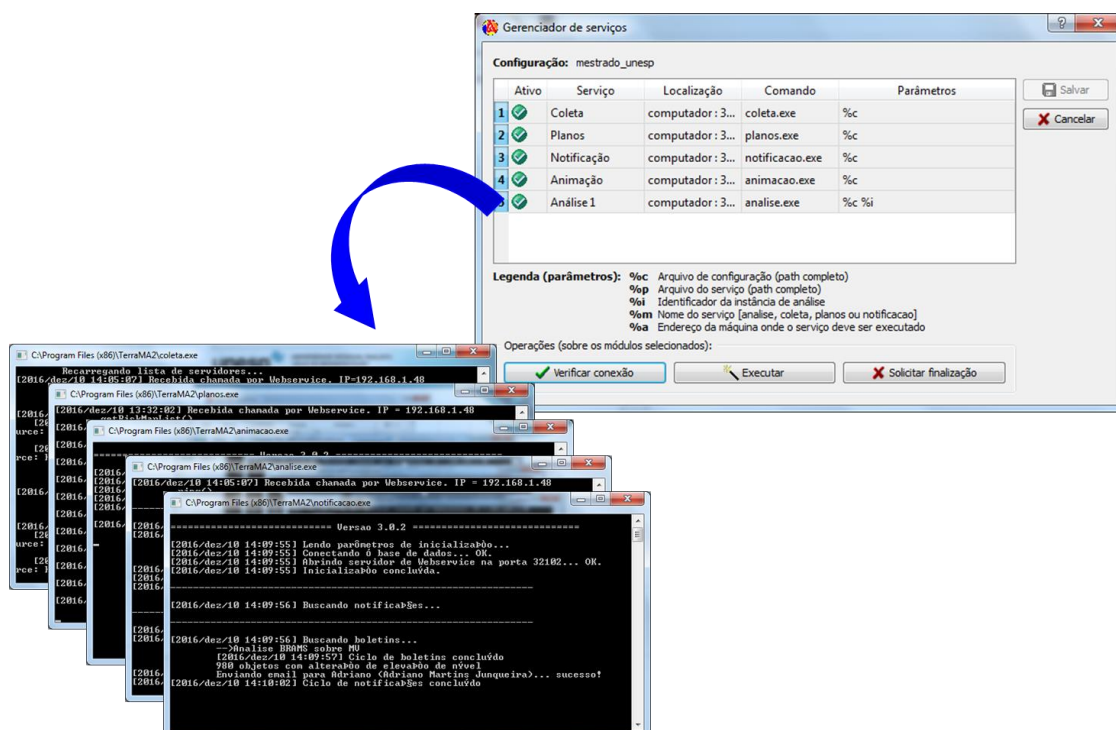


Fonte: a) Foto tirada pelo autor (2016) e b) e c) imagem de satélite de alta resolução (50 cm) do acervo do software ArcGIS (coordenada: -22.673478,-43.8346518) em zoom 1:25.000 e 1:10.000 respectivamente.

4.6 PLATAFORMA DE MONITORAMENTO, ANÁLISE E ALERTA EM TEMPO REAL ADAPTADO AO MONITORAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

O módulo de administração da plataforma permite o acompanhamento de cada um dos serviços (coleta de dados, gerência dos planos de dados, análises, animações e notificações) de forma independente. A Figura 64 ilustra a verificação dos serviços e as 5 janelas independentes com registros de etapas que estão em execução. Estas informações são normalmente utilizadas pelos administradores de TI da plataforma para acompanhamento da rotina dos serviços, parada ou inicialização de serviços.

Figura 64 – Telas para acompanhamento e administração da plataforma de monitoramento.



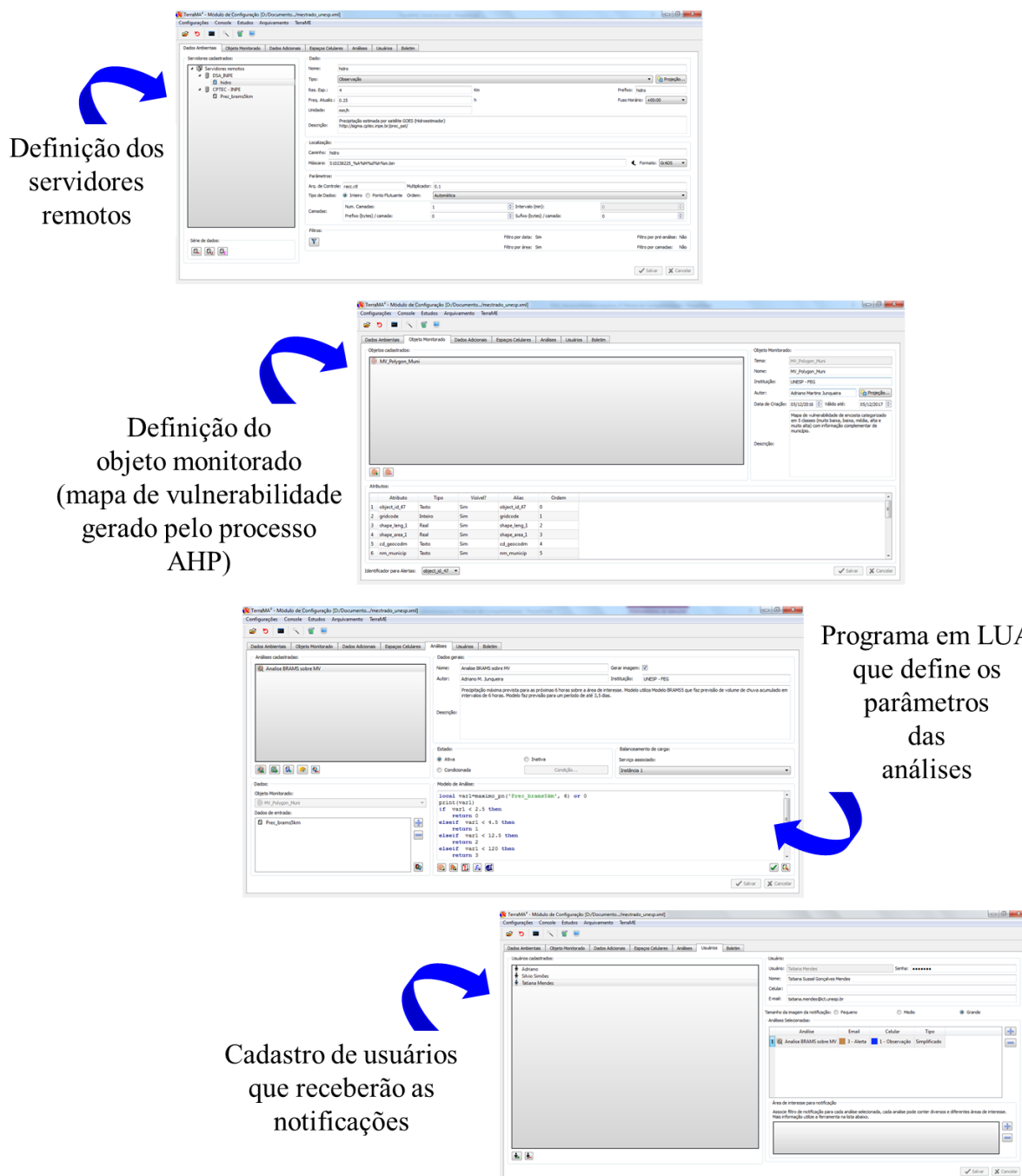
Fonte: Autor com dados do módulo de administração da plataforma de monitoramento.

Outra verificação importante é a definição dos dados dinâmicos coletados, objeto a ser monitorado, dados complementares (se desejado para visualização), análises que irão monitorar a possibilidade de ocorrência de extremos ambientais sobre os objetos monitorados e cadastro de usuários para que recebam a notificação dos alertas no módulo de configuração.

Ao cadastrar cada usuário também é definido a partir de qual categoria de alerta se deseja receber as notificações. As categorias de alerta presentes na plataforma são: 0 - normal, 1 - observação, 2 - atenção, 3 - alerta e 4 - alerta máximo.

Na figura 65 é detalhada a sequência de configuração realizadas para os dois servidores de dados escolhidos para demonstrar a operacionalização do monitoramento em tempo real de linhas de transmissão. Entre os passos necessários estão a definição dos endereços dos servidores remotos para os dados de previsão numérica e observação, configuração de filtros de datas e área geográfica, definição de objetos monitorados, programação das análises em linguagem Lua e cadastro de usuários para receber as notificações.

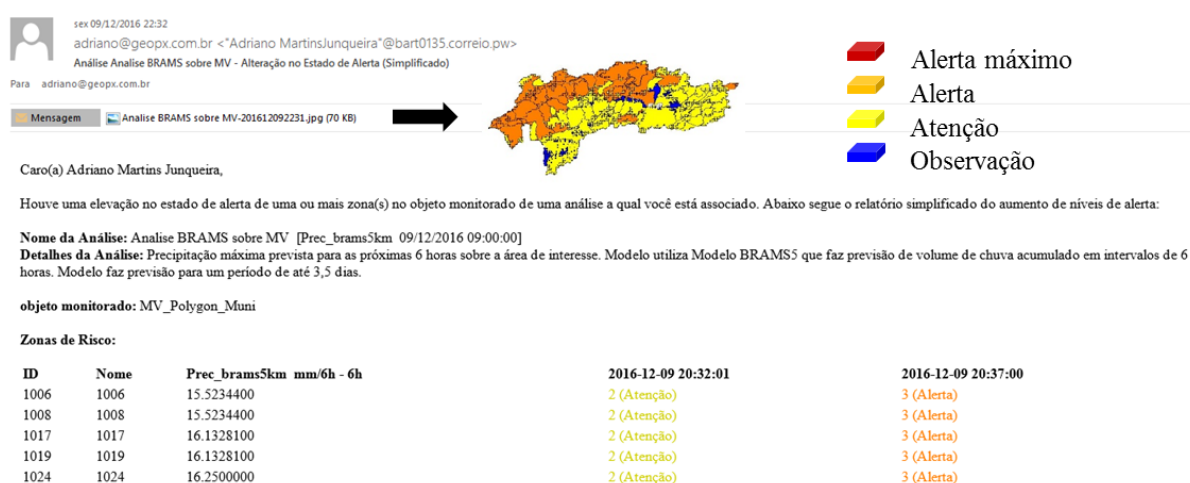
Figura 65 – Detalhes das interfaces de configuração da plataforma de monitoramento



Fonte: Autor com dados do módulo de configuração da plataforma de monitoramento.

Como resultado das análises realizadas pela plataforma de monitoramento, um e-mail é enviado para os usuários cadastrados apenas quando o nível de alerta aumentar em relação ao cadastrado para cada usuário. Um exemplo deste e-mail é apresentado na Figura 66, onde é possível identificar que o texto do e-mail informa detalhes da análise, as áreas com status aumentado, além do volume previsto de chuva. No anexo ao e-mail é possível visualizar uma imagem com a avaliação total da área de interesse.

Figura 66 – Detalhes do e-mail enviado com resultado da análise para usuário cadastrado no sistema

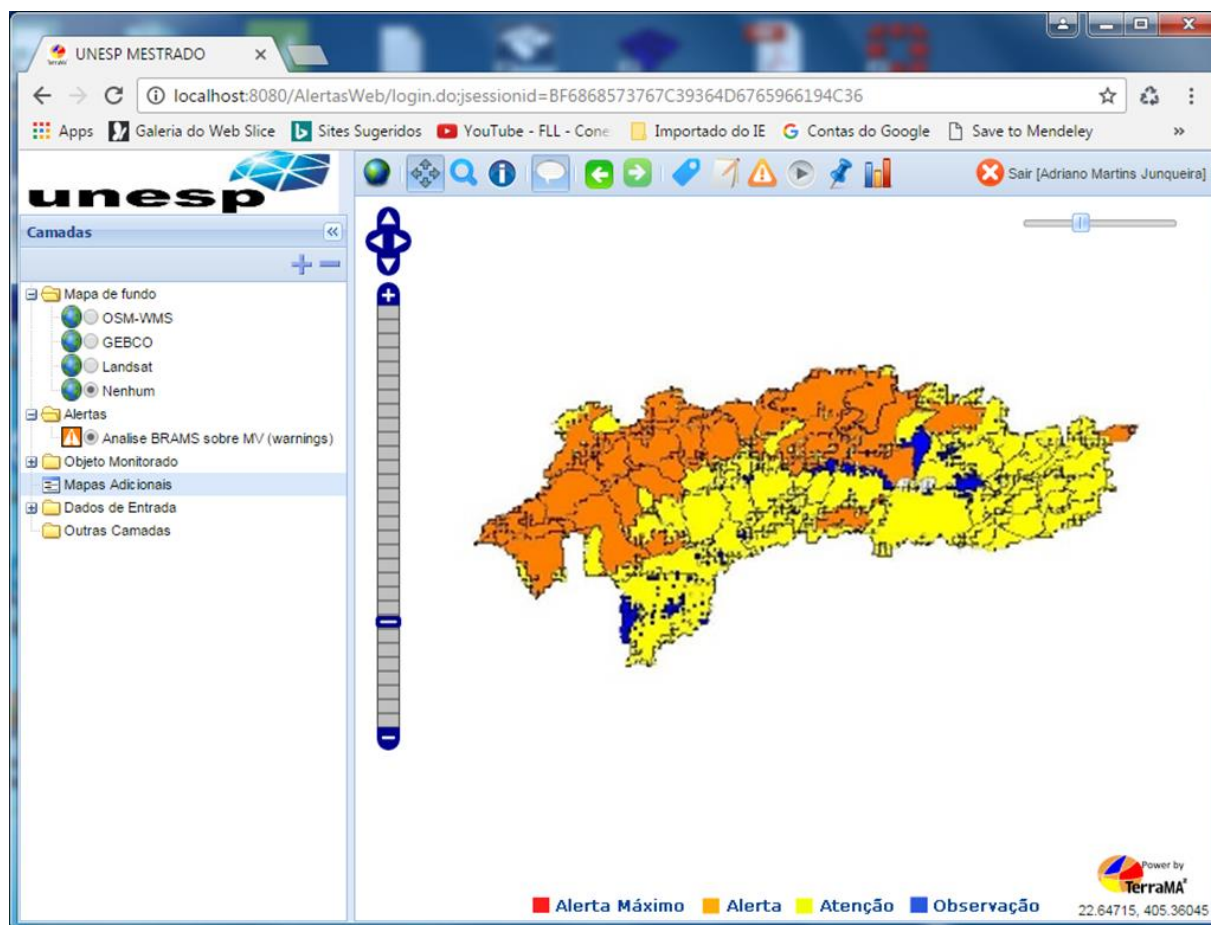


Fonte: Autor com dados do email gerado automaticamente pela plataforma de monitoramento.

Com a análise finalizada, uma nova camada de informação é armazenada no SGDB representando as categorias da análise: normal, observação, atenção, alerta e alerta máximo. Tal informação é subsídio para a geração da imagem que é anexada ao email e também para alimentar um serviço acessível pela WEB, em padrão OGC (*Open Geospatial Consortium*), de forma aberta em qualquer navegador. Os arquivos “wmsconfiguration.xml”, “wcsconfiguration.xml” e “wfsconfiguration.xml” precisam ser atualizados com os dados que estarão disponíveis.

A Figura 67 ilustra o resultado acessível pela WEB.

Figura 67 – Detalhes do sistema de alerta WEB, resultado da operacionalização da plataforma de monitoramento, análise e alerta para usuários cadastrados



Fonte: Autor com dados gerados automaticamente pela plataforma de monitoramento.

5 DISCUSSÃO

5.1 BANCO DE DADOS DA REGIÃO DE ESTUDO

O banco de dados estabelecido para a região de estudo incluiu as variáveis críticas para modelos de movimentos de massa (COROMINAS et al., 2014, VAN WESTEN et al., 2008, CASCINI, 2008, FELL et al., 2008a, FELL et al., 2008b e CHACÓN et al., 2006), tais como declividade, tipo de solo, uso de solo e hidrologia. O banco de dados também armazenou fatores catalisadores aos deslizamentos de encosta, compostos por dados estáticos e dinâmicos de precipitação. O conjunto de dados utilizados mostrou-se coerente para o processo AHP e álgebra de mapas aplicados.

A região estudada apresenta 18,8% da área com uma declividade superior a 25° de declividade e uma altitude média de 757 metros com clima tropical. No verão, as chuvas são volumosas e ocasionalmente intensas. Dai; Lee, (2002) analisaram uma região similar (*Lantau Island* – Hong Kong), a partir do uso de SIG, com o objetivo de avaliar a relação de deslizamento de encostas com a presença de terrenos íngremes e ocorrência de chuvas tropicais. Os autores concluíram que, nesta região (altitude média de 900 metros e 44% da área com declividade superior a 25°), a instabilidade da declividade está relacionada com o relevo e pode ser efetivamente modelada usando a tecnologia de SIG. Esse resultado também foi observado em nosso estudo, uma vez que as regiões da Serra da Mantiqueira com maior susceptibilidade foram aquelas relacionadas com as maiores declividades.

Neste estudo observou-se que as regiões serranas apresentam maiores volumes médios anuais de precipitação (2100 a 2500 mm) em contraste com regiões mais baixas da Bacia do Rio Paraíba do Sul (1100 e 1400 mm), evidenciando a importância do efeito orográfico sobre a distribuição espacial das precipitações. Soares et al. (2008) também destacaram que as precipitações na região sudeste do Brasil apresentam grande diversidade no seu regime de chuvas, em face de ser uma zona de transição e influenciada pelo efeito orográfico das chuvas, dado a presença das serras do Mar e da Mantiqueira.

Para o critério de uso e ocupação do solo, neste trabalho, foi dada especial atenção à infiltração de água no solo como um fator relevante para o processo de saturação e, conseqüentemente, início de escorregamento translacional de encostas. Desta forma, foi considerado que as áreas de formação vegetal, constituídas de matas com estrutura complexa e elevada biodiversidade, possuem as melhores condições de infiltração (maior influência

para este critério). As áreas associadas aos núcleos urbanos e zonas de expansão urbana, caracterizadas pela presença de lotes e impermeabilização da estrutura urbana, foram consideradas com condições menos favoráveis de infiltração (menor influência para este critério). Estas abordagens também foram adotadas por outros autores como Soares et al., (2008), Faria; Augusto Filho (2013) e Quan; Lee (2012).

Os escorregamentos de encostas translacionais, caracterizados pelo destaque de porções da superfície da encosta, são os mais frequentes na Serra do Mar (WOLLE; CARVALHO, 1994) e também foram observados na região estudo através das imagens orbitais e aéreas. Esses deslizamentos estão associados a mais de um mecanismo de instabilidade (WOLLE; CARVALHO, 1994), como fluxo paralelo à encosta (pressões neutras de percolação) e fluxo vertical (redução da resistência pela saturação do solo). Nos relevos ondulados e regiões mais intensamente fraturadas, a infiltração de água acaba sendo drenada por algumas dezenas de metros de profundidade, provocando mais facilmente o efeito de encharcamento do solo e, portanto, redução principalmente do parâmetro de coesão (WOLLE; CARVALHO, 1994).

Quando se encontraram solos mais enriquecidos com argila, como os argissolos, esses foram classificados como de baixa condição de infiltração (mais favoráveis à mecanismos de fluxo paralelo) e, portanto, como de maior contribuição para nosso modelo se comparado aos cambissolos e latossolos. Os cambissolos e latossolos, também presentes na região de estudo, possuem melhores condições de infiltração de água evitando assim seu rápido encharcamento (SOARES et al., 2008). Na referida região, cerca de 23% é representado por argissolo, 33% de cambissolo, 40% de latossolo e pouco mais de 3% representado por planossolo ou regiões de massa d'água.

Os deslizamentos de terra têm sido associados à proximidade de redes de drenagem e observa-se que sua frequência aumenta à medida que aumenta a densidade de drenagem (DAI; LEE, 2002). É geralmente aceito que a frequência de deslizamento de terra diminui à medida que a distância das redes de drenagem aumenta (DRAGIĆEVIĆ et al., 2015). Isso também foi observado no presente estudo na área mais ao extremo leste, sendo que além dessa área apresentar menor densidade de drenagem, também apresentava terrenos mais planos e com baixa densidade de fraturas e falhas.

Para a construção do banco de dados deste estudo, a busca por informações geoespaciais para suportar as análises foi bastante desgastante, visto que por vezes não haviam dados contínuos entre os 3 estados (SP, MG e RJ) desenvolvidos na mesma escala ou resolução. Em alguns casos apresentavam restrição ao acesso (traçado detalhado das linhas de transmissão),

obrigando generalizações ou simplificações para demonstração da viabilidade de operacionalização de um sistema de análise e alerta dinâmico para empreendimentos do setor elétrico.

5.2 ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSO (AHP)

Um dos pontos mais significativos do método AHP é a capacidade de medir o grau de consistência presente nos julgamentos par a par e, desse modo, contribuir para assegurar que somente ordenações justificáveis sejam usadas como base para avaliações (FARIA; AUGUSTO FILHO, 2013). Para a definição de critérios do AHP, neste estudo foram analisados muitos trabalhos de deslizamento de encostas no exterior (MEINHARDT et al., 2015; DRAGIĆEVIĆ et al., 2015; LIAO et al., 2011; YU et al., 2011; TAHERI et al., 2015; CHACÓN et al., 2006; VAN WESTEN et al., 2008) e no Brasil (SOARES, 2008; FARIA; AUGUSTO FILHO, 2013; GIMENES; FILHO, 2013), os quais destacam os seguintes fatores de maior relevância para o problema: geologia e geomorfologia, solo, uso e cobertura do solo, hidrologia e precipitação. Assim, o modelo AHP proposto neste estudo envolveu 7 critérios (declividade, distância dos ativos, densidade de drenagem, uso do solo, tipo do solo, densidade de fraturas e falhas, e precipitação) com abrangência regional cobrindo uma área de aproximadamente 14.000 km².

Segundo Zunquette; Gandolfi (2004), a classificação de terrenos costuma ser baseada em atributos como declividade, componentes do terreno, morfologia, condições de erosão, caracterização de encostas e hidrologia, o que se mostra alinhado com os critérios selecionados nesse estudo e com a sistemática proposta por Froelich et al. (1976). A sistemática de Froelich et al. (1976) tem como finalidade controlar, orientar e dirigir ocupações a partir de mapas do meio físico, trabalhando com dados básicos como topografia, geologia e hidrologia, para criar análises e interpretações que suportam as aptidões de cada região ao desenvolvimento e ocupação.

No contexto das linhas de transmissão, as análises dos principais elementos que influenciam na susceptibilidade de movimento de massa na região da Serra da Mantiqueira sujeitas aos efeitos de chuvas tropicais foram caracterizados pelos aspectos do relevo e do ambiente através de sua declividade, tipo de solos, densidade de fraturas e falhas, uso do solo, características temporais de precipitação, densidade de drenagem e distância dos ativos do setor elétrico. As informações foram integradas em ambiente de SIG. Em virtude das

possibilidades de integração dos dados e atribuição de pesos, utilizou-se a técnica do Processo Analítico Hierárquico (AHP), a qual proporcionou o mapeamento da susceptibilidade dos movimentos de massa, classificada da seguinte maneira: muito baixa (1,5%), baixa (12%), média (34,9%), alta (45,3%) e muito alta susceptibilidade (6,2%). A susceptibilidade muito baixa está elencada principalmente à distância dos ativos, reduzindo a intensidade de sua análise. A baixa susceptibilidade predomina em regiões com relevo plano e baixa densidade de fraturas e falhas, principalmente, na região próxima ao leito do Rio Paraíba do Sul. A susceptibilidade com variação entre 0,46 e 0,54 foi classificada como média e não é destacada a predominância de nenhum fator em específico. A alta susceptibilidade envolve, principalmente, em regiões com precipitações e declividades maiores que a média. A susceptibilidade muito alta apresenta-se nas regiões com combinação de fatores extremos como declividades maiores que 25%, solos mais susceptíveis (tipo e uso) e pluviometria média anual intensa. O modelo AHP utilizado mostrou-se coerente e consistente para a escala e região de estudo. Assim, como Quan; Lee (2012), assumiu-se que a declividade, a intensidade pluviométrica, o solo e a floresta foram os fatores mais importantes para analisar a susceptibilidade de deslizamentos após análise dos resultados.

A incorporação do método AHP nos procedimentos normalmente utilizados nos mapeamentos de escorregamentos em encostas permite diminuir a subjetividade destes mapeamentos e melhorar o grau de confiabilidade do diagnóstico de risco para a implementação das ações de mitigação por parte do poder público (FARIA; AUGUSTO FILHO, 2013).

No estudo de susceptibilidade à deslizamentos em ambiente escasso de dados que também utilizou o processo de AHP (DRAGIĆEVIĆ et al., 2015), a contribuição correspondente à distância de ativos e corpos hídricos foi menor mas similar ao adotado em nosso trabalho com cerca de $\frac{1}{4}$ da contribuição total. O tema de declividade também foi significativo, com 15% da contribuição total, porém, como julgou-se ter um fator catalizador representado pela precipitação, a contribuição deste no modelo foi superior aos demais fatores.

A existência de dados complementares no modelo, tais como a cobertura da terra, tipos de solo, geologia diminuem a forte dependência do uso do MDE como principal critério para deslizamentos de encostas (DRAGIĆEVIĆ et al., 2015).

O uso de dados não categóricos para a maioria dos critérios (declividade, distância dos ativos, densidade de drenagem, densidade de fraturas e falhas, e pluviometria) utilizados no

modelo AHP aumentou o realismo do modelo sendo necessário somente avaliação complementar (subcritérios) para o uso do solo e tipo de solo. Em todos os casos onde foi aplicado o método do AHP, a Razão de Consistência (RC) sempre permaneceu dentro dos padrões descritos na literatura (<10%).

5.3 MAPA DE SUSCEPTIBILIDADE

Apesar da melhoria dos mecanismos de identificação de instabilidades para deslizamento de encostas e da disponibilidade de técnicas de mitigação, os deslizamentos causam inúmeras perdas materiais e humanas, principalmente em países menos desenvolvidos, onde há falta de recursos adequados e conscientização dos riscos (COROMINAS et al., 2014). Apesar desse trabalho ter sido dirigido ao estudo de áreas de susceptibilidade de movimento de massa para empreendimentos do setor elétrico, pode-se identificar a existência de inúmeros domicílios instalados representando uma vulnerabilidade a esta população. Este fato foi observado em várias cidades, como: Queluz, Cruzeiro, Piquete, Guaratinguetá e São José do Barreiro no Estado de São Paulo e Rio Claro, Mendes, Paracambi e Engenheiro Paulo de Frontin no Estado do Rio de Janeiro, reforçando o total despreparo e falta de conscientização dos riscos associados.

Uma das evidências observadas na região de estudo no município de Queluz-SP foi o escorregamento translacional de rocha (Figura 59), em área classificada, no presente trabalho, como de muito alta susceptibilidade. No trabalho de Egas et al. (2011), foi descrito que esta mesma área, com escorregamento translacional, mantém risco remanescente de escorregamento e rolamento de blocos em porções visualmente instáveis. Isso reforça a coerência do modelo de susceptibilidade gerado neste trabalho e a importância de monitoramento para estruturas de linhas de transmissão, uma vez que o movimento de massa próximo aos ativos do setor elétrico pode colocar em risco a operação do sistema.

Os resultados obtidos neste estudo permitem estabelecer uma correlação entre os critérios da classificação de risco adotada pelo Ministério das Cidades (FARIA; AUGUSTO FILHO, 2013) e as classes de susceptibilidade determinadas com o processo AHP neste estudo. Essa comparação pode ser melhor visualizada através da Tabela 11.

Tabela 11 - Correlação entre os critérios da classificação de risco adotada pelo Ministério das Cidades e as classes de susceptibilidade determinadas com o processo AHP neste estudo

Classes de Susceptibilidade	Classificação de risco Ministério das Cidades	Descrição
1 - Muito baixa	-	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (declividade, tipo de terreno, etc) e a distância aos empreendimentos torna de muito baixa potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos. É a condição menos crítica. Mantidas as condições existentes, são áreas de muito baixa vulnerabilidade.
2 - Baixa	Baixo	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (declividade, tipo de terreno, etc) e a distância aos empreendimentos torna de baixa potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos. É uma condição pouco crítica. Mantidas as condições existentes, são áreas de baixa vulnerabilidade.
3 - Média	Médio	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (declividade, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção são de média potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos. É uma condição mediana. Mantidas as condições existentes, são áreas de vulnerabilidade média.
4 - Alta	Alto	Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (declividade, tipo de terreno, etc.) e a distância aos empreendimentos torna de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos. Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
5 - Muito alta	Muito Alto	As evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, postes inclinados, cicatrizes de escorregamento, etc) são expressões presentes. Demonstrando processo de instabilização em avançado estágio de desenvolvimento. É a condição mais crítica, necessitando de intervenção ou monitoramento devido ao seu elevado estágio de desenvolvimento. Mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.

Fonte: Autor comparando resultados com classificação de risco adotada pelo Ministério das Cidades (FARIA; AUGUSTO FILHO, 2013).

Ao executar o processo de álgebra de mapas para a geração do mapa de susceptibilidade de encostas optou-se em gerar resultados parciais como forma de ampliar a compreensão das contribuições individuais dos critérios. Os resultados parciais (Figura 54) podem ser interpretados como de estrutura interna (Parcial 1: que engloba os critérios tipo de solo, uso do solo e densidade de fraturas e falhas) e de características do ambiente (Parcial 2: que

engloba os critérios declividade, densidade de drenagem e precipitação), abordagem similar à adotada por Liao et al. (2011) na estruturação do problema com o método AHP.

Na abordagem deste estudo, como a distância dos ativos é tratada como um critério que só se conjuga na equação para a geração do mapa final de susceptibilidade, isso torna a modelagem bastante flexível e de fácil adaptação a outros ativos com características unifilares, como rodovias e ferrovias, facilitando também a avaliação de áreas de influência mais reduzidas na medida em que se tenha os traçados melhor representados (COROMINAS et al., 2014).

Cabe destacar ainda que a generalização do mapa de susceptibilidade foi adotado para eliminar fragmentos muito pequenos de determinadas classes para a escala utilizada, gerando desta forma áreas mais contínuas e que possa ser mais facilmente utilizada para gestão (GIMENES; FILHO, 2013).

A incorporação do método AHP no processo de determinação do mapa de susceptibilidade permitiu diminuir a subjetividade deste mapeamento e promoveu maior sensibilidade no julgamento dos critérios, aumentando o nível de confiança no processo de monitoramento dinâmico e gestão (FARIA; AUGUSTO FILHO, 2013).

Este estudo utilizou-se de pressupostos adotados na literatura para mapas de susceptibilidade regionais (COROMINAS et al., 2014 e VAN WESTEN et al., 2008) que foram: condições geológicas na área de estudo são homogêneas; todas as declividades têm probabilidades semelhantes de falha; a localização exata do deslizamento de encosta não foi detalhada; todos os deslizamentos de terra foram considerados semelhantes; a distância do escorregamento da encosta não foi calculada, nem sua intensidade e distribuição espacial e; os dados de elementos em risco são estruturados por unidades espaciais homogêneas (grades) tornando, assim, o mapa de susceptibilidade generalizado adequado para ser utilizado como objeto monitorado na plataforma dinâmica de análise em escala regional.

5.4 TECNOLOGIAS E MONITORAMENTO

As tecnologias modernas (nano-satélites, drones, vants, redes de telecomunicações, SIG, dentre outras) têm impulsionado a qualidade e disponibilidade de informações vitais para determinação das susceptibilidade relacionadas aos movimentos de massa (DAI et al., 2002) e, conseqüentemente, tem aumentado as aplicações para gestão de riscos (HAZWANI et al., 2013; OMAR et al., 2013).

Os sistemas para monitoramento e gestão do risco de escorregamento de encosta ainda se encontram em processo de evolução, seja tanto pela multi-temporalidade e multi-escala dos dados ou pela necessidade de conjugar softwares e processos ainda não integrados (DAI et al., 2002).

Neste estudo, observou-se que a plataforma utilizada para monitoramento em tempo real vem sendo melhorada pelo INPE buscando maior versatilidade, seja para o tratamento de dados estáticos e dinâmicos, sem precisar de armazenamento em um único banco, quanto pela independência dos módulos de análise e visualização, o que gera possibilidade de economia de recursos computacionais para alguns processos.

Para a implementação de álgebra de mapas e do processo AHP deste projeto, optou-se por utilizar software de amplo domínio público, como ESRI ArcGIS e Microsoft Excel (FARIA; AUGUSTO FILHO, 2013), possibilitando a replicação desta metodologia por outros pesquisadores (ambiente desktop). Para operacionalização do sistema de monitoramento (ambiente servidor) optou-se pelo uso de software de tecnologia livre TerraMA2 como forma de reduzir o custo de implementação e manutenção do ambiente.

A estruturação com uso de planilhas do programa Microsoft Excel torna o método mais prático, facilmente compreensível e, ainda, permite uma clara visualização da contribuição dos processos associados a escorregamentos (FARIA; AUGUSTO FILHO, 2013). O uso do software ESRI ArcGIS implementa de forma estruturada a espacialização da contribuição adotada para cada critério, permitindo uma investigação detalhada em diferentes pontos da região de estudo. Desta forma, a combinação destas duas ferramentas aumenta o nível de confiança no processo de tomada da decisão e permite que o método possa ser aplicado em diferentes cenários (FARIA; AUGUSTO FILHO, 2013).

A operacionalização de plataformas de monitoramento e uso de diferentes tecnologias e processo metodológicos para apoiar na gestão de empreendimentos em suas diferentes fases de concepção são vitais para aumentar a segurança e facilitar o planejamento de ações mitigatórias. Para empreendimentos do setor elétrico, a introdução deste conceito, apoiados por dados dinâmicos, se mostra viável para melhorar a segurança e gestão de cargas no SIN. Susceptibilidade muito altas já constatadas em diferentes regiões da área de estudo e a possibilidade de ocorrência de eventos extremos promovidos pela natureza reforçam esta afirmação.

São necessárias, ainda, pesquisas cooperativas e maiores esforços de capacitação para apoiar as administrações locais e regionais na maioria dos países (COROMINAS et al., 2014)

na direção do monitoramento de tais eventos. Desta forma, este trabalho representa um pequeno passo na direção da conscientização, almejando se tornar um primeiro instrumento de avaliação para a gestão pública, não só em empreendimentos do setor elétrico, mas, no que diz respeito também à defesa civil para a região.

6 CONCLUSÕES

A metodologia apresentada permitiu, através do uso de comparações e hierarquização dos mapas utilizados, entender como cada critério contribuiu para geração do mapa de susceptibilidade de movimento de massa na região, refletindo nas inter-relações com o ambiente em uma maior ou menor intensidade para empreendimentos do setor elétrico.

Os resultados alcançados para as classes de susceptibilidade muito alta, alta e média se mostraram coerentes com evidências apontadas em campo. Não foram coletadas amostras em campo para áreas com classes de susceptibilidade baixa ou muito baixa.

As ferramentas geoespaciais se mostraram imprescindíveis para alcançar os objetivos propostos, uma vez que a variabilidade espacial e a grande área analisada aumentam as combinações possíveis de resultados de susceptibilidade. Se for adicionado a isso a variabilidade temporal introduzida pelas informações meteorológicas e hidrológicas, a geração de análises e alertas só consegue ser eficientemente realizada e divulgada se apoiada por processos sistêmicos no ambiente SIG.

A criação de um banco de dados espacial unindo dados de diferentes fontes e áreas de conhecimento foi um importante passo e incentiva novas pesquisas na região para os demais eventos catalizadores que agem sobre os empreendimentos de transmissão de energia elétrica.

No que se refere aos dados obtidos, evidencia-se a falta de informações em escalas mais detalhadas (maior que 1:100.000) e uma disparidade na qualidade de informações disponíveis entre os estados de SP, RJ e MG. A metodologia aplicada se mostra adequada para descrever a susceptibilidade de movimento de massa em escala regional sendo um importante ponto de partida para estudos em escala local e detalhada.

Portanto, neste caso, devido as escalas dos dados adquiridos, temos como implicação diferentes graus de precisão das informações geográficas mas adequados a uma abordagem regional.

Um ganho adicional em se trabalhar com escalas mais detalhadas é a possibilidade de implementar regras mais restritivas para a área de influência direta do empreendimento e assim emitir alertas mais específicos.

A operacionalização por parte de agentes públicos de um sistema de monitoramento em tempo real a partir de mapa de susceptibilidade de movimento de massa no setor elétrico pode aumentar a segurança do SIN, uma vez que gera subsídios para planos de ações e informações em tempo real para apoiar decisões de manobras de cargas entre os circuitos existentes.

O sistema de monitoramento em tempo real está preparado para suportar outras informações de relevância para um ambiente de monitoramento de linhas de transmissão, como informações de queimadas, raios e ventos, cobrindo assim os principais agentes catalizadores ambientais que afetam a segurança para o SIN. Neste caso, sugere-se a confecção de uma análise de susceptibilidade específica para cada um destes temas otimizando, portanto, os alertas e procedimentos de acompanhamento.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, T.; RODDICK, J. F. Survey of spatio-temporal databases. **GeoInformatica**, v. 3, n. 1, p. 61–99, 1999.

ARRUDA JUNIOR, E. R.; SILVA, E.; LOPES, S.; CAMPANHA, V. Análise do índice de estabilidade de encostas a partir do modelo SINMAP e de dados pluviométricos obtidos por satélite: estudo de caso para o mega desastre de janeiro de 2011 no município de Nova Friburgo-RJ. **XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 6203–6210, 2015.

BIRKMANN, J. Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications. **Environmental Hazards**, v. 7, n. 1, p. 20–31, 2007.

BOGARDI, J. J. Introduction. **Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Toward Resilient Societies**, p. 1–6, 2006.

BRABB, E. E. ; PAMPEYAN, E. H. ; BONILLA, M. G. . Landslide susceptibility in San Mateo County. **US Geological Survey**, p. Map Scale 1:62,500, 1972.

BRAGA, B. P. F.; FLECHA, R.; PENA, D. S.; KELMAN, J. Pacto federativo e gestão de águas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 17–42, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v22n63/v22n63a03.pdf>>. Acesso em: 16/10/2016.

BRASIL AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Região Hidrográfica Atlântico Sudeste**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/AtlanticoSudeste.aspx>>. Acesso em: 13/7/2016.

BRASIL AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA) MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Codificação de Bacias Hidrográficas pelo Método de Otto Pfafstetter**. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/6503299-Codificacao-de-bacias-hidrograficas-pelo-metodo-de-otto-pfafstetter.html>>. Acesso em: 25/6/2015.

BRASIL AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Manual de fiscalização da transmissão 2004**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/manual de transmissão.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/manual_de_transmissao.pdf)>. Acesso em: 25/6/2015a.

BRASIL AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Resolução Normativa nº 67, de 8 de Junho de 2004**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2004067.pdf>>. Acesso em: 9/12/2015b.

BRASIL AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Representação do Ambiente de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801&idPerfil=4>>. Acesso em: 15/11/2016.

BRASIL AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Tarifas de Transmissão**. Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=97&idPerfil=2>>. Acesso em: 9/12/2015.
BRASIL EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA) MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Mapa de Solos do Brasil**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/busca-de-noticias/-/noticia/1463338/embrapa-lanca-versao-atualizada-do-mapa-de-solos-do-brasil>>. Acesso em: 7/7/2016.

BRASIL EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. Disponível em: <[https://ben.epe.gov.br/downloads/S?ntese do Relat?rio Final_2014_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S?ntese%20do%20Relat%20rio%20Final_2014_Web.pdf)>. Acesso em: 25/6/2015.

BRASIL EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015**. Brasília/DF, 2015.

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO (MPEG). **Nota Técnica SIRGAS 2000**. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/pdf/nota_tecnica_termino_periodo_transicao_sirgas2000.pdf>. Acesso em: 7/7/2016.

BRASIL INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE) MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO (MPEG). **Manual Técnico de Geomorfologia**. Rio de Janeiro/RJ, 2009.

BRASIL INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES (MCTIC). **Monitoramento, Análise e Alerta**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/terrama2/>>. Acesso em: 12/1/2015.

BRASIL INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES (MCTIC). **Manual do Usuário**. São José dos Campos, 2013.

BRASIL INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES (MCTIC). **Dados dinâmicos disponíveis para usuários TerraMA 2**. Disponível em: <[file:///D:/Documentos/2015/Pessoal/Artigos Pesquisados/16 - Decima Sexta/caracteristicas_dados_cpTec.pdf](file:///D:/Documentos/2015/Pessoal/Artigos%20Pesquisados/16%20-%20Decima%20Sexta/caracteristicas_dados_cpTec.pdf)>. Acesso em: 11/8/2016.

BRASIL OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS) / MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **ONS_BRASIL_2016**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx>. Acesso em: 16/10/2016.

BRASIL SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Seleção de municípios críticos a deslizamentos**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/apresentacao_susc.pdf>. Acesso em: 11/11/2016a.

BRASIL SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM) MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Levantamento da Geodiversidade - Projeto Atlas Pluviométrico do**

Brasil - Isoetas Anuais Médias Período 1977 a 2006. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/Isoietas_Totais_Anuais_1977_2006.pdf>. Acesso em: 2/3/2016b.

BRATS, M. Book Reviews 107., n. December, p. 107–109, 2010.

CÂMARA, G.; FREITAS, U. M. Perspectivas em sistemas de informação geográfica. **Simpósio sobre CAD/CAM e Computação Gráfica, SOBRACON, SP. sp**, 1995. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Perspectivas+em+Sistema+s+de+Informa??o+Geogr?fica+1#0>>. .

CÂMARA, G.; LUCENA, I. Álgebra de mapas. , 2001.

CASCINI, L. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3–4, p. 164–177, 2008. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795208001828>>. .

CHACÓN, J.; IRIGARAY, C.; FERNÁNDEZ, T.; EL HAMDOUNI, R. Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 65, n. 4, p. 341–411, 2006. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10064-006-0064-z>>. .

CORDEIRO, J. P.; BARBOSA, C. C. F.; CÂMARA, G. Álgebra De Campos E Objetos. **Introdução à Ciência da Geoinformação**, , n. 1979, p. 26, 2001.

COROMINAS, J.; MOYA, J.; LEDESMA, A.; LLORET, A.; GILI, J. A. Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). **Landslides**, v. 2, n. 2, p. 83–96, 2005.

COROMINAS, J.; VAN WESTEN, C.; FRATTINI, P.; et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 73, n. 2, p. 209–263, 2014.

CROZIER, MICHAEL J.; GLADE, THOMAS; ANDERSON, MALCOLM, G. **Landslide Hazard and Risk**. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

DAI, F. .; LEE, C. .; NGAI, Y. . Landslide risk assessment and management: an overview. **Engineering Geology**, v. 64, n. 1, p. 65–87, 2002.

DAI, F. C.; LEE, C. F. Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 38, n. 5, p. 911–923, 2001. Disponível em: <http://www.nrc.ca/cgi-bin/cisti/journals/rp/rp2_abst_e?cgj_t01-021_38_ns_nf_cgj38-01>. .

DAI, F. C.; LEE, C. F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. **Geomorphology**, v. 42, p. 213–228, 2002.

DONG, Y.; XU, Y.; LI, H.; DAI, M. A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 186, n. 1, p. 229–242, 2008.

DRAGIĆEVIĆ, S.; LAI, T.; BALRAM, S. GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments. **Habitat International**, v. 45, p. 114–125, 2015. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0197397514001076>>. .

EGAS, H. M.; GRAMINHA, C. A.; ANDRADE, M. R. M. DE. **Análise Preliminar da Ocorrência de Avalanche de Rocha na Bacia do Rio do Entupido , Município de Queluz , SP. , n. 12, p. 1–10, 2011.**

ELANGO VAN, K. **GIS fundamentals, Applications and Implementations**. 1st ed. Pitam Pura, New Delhi: New India Publishing Agency, 2006.

FARIA, D. G. M.; AUGUSTO FILHO, O. Aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) no mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas. **Revista do Instituto Geológico**, v. 34, n. 1, p. 23–44, 2013. Disponível em: <<http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/0100-929X.20130002>>. .

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3–4, p. 99–111, 2008a. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795208001774>>. .

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3–4, p. 85–98, 2008b. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>>. .

GIMENES, F. B. Q.; FILHO, O. A. Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (SIG). **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, , n. 1994, p. 6564–6571, 2013.

GOODCHILD, M. F. Twenty years of progress: GIScience in 2010. **Journal of Spatial Information Science**, v. 1, n. 1, p. 3–20, 2010. Disponível em: <<http://josis.org/index.php/josis/article/view/32>>. .

GOOGLE. mantiqueira_google. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Serra+da+Mantiqueira/@-21.9999164,-44.890086,11z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x9e39bb01a62881:0xc2256ad42b16d944!8m2!3d-22!4d-44.75!5m1!1e4>>. Acesso em: 16/10/2016.

GORSEVSKI, P. V.; DONEVSKA, K. R.; MITROVSKI, C. D.; FRIZADO, J. P. Integrating multi-criteria evaluation techniques with geographic information systems for landfill site selection: A case study using ordered weighted average. **Waste Management**, v. 32, n. 2, p. 287–296, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.023>>. .

GUDMUNDSSON, A. **Rock Fractures in Geological Processes**. 1st ed. New York: Cambridge University Press, 2011.

HAZWANI, N. K.; ROHAYU, C. O.; FATHONI, U.; BAHARUDDIN, I. Transmission

tower classification based on landslide risk map generated by Geographical Information System (GIS) at Cameron Highlands. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 16, p. 12093, 2013. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1755-1315/16/i=1/a=012093?key=crossref.22dc955277243102534f981e9fb81192>>. .

HO, W. Integrated analytic hierarchy process and its applications – A literature review. **European Journal of Operational Research**, v. 186, n. 1, p. 211–228, 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221707000872>>. .

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. **Decisions with Multiple Objectives**. Cambridge University Press, 1993.

KUMAR, S.; VAIDYA, O. S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of Operational Research**, v. 169, n. 1, p. 1–29, 2006. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VCT-4CVWRCG-4/2/0aa920a1d837d8e5834b16a46483f8f8%5Cnhttp://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VCT-4CVWRCG-4&_user=686415&_coverDate=02/16/2006&_fmt=full&_orig=search&_cdi=5963&view=c&_acct=C000>. .

LI, X.; ZHOU, Y.; TIAN, B.; KUANG, R.; WANG, L. GIS-based methodology for erosion risk assessment of the muddy coast in the Yangtze Delta. **Ocean & Coastal Management**, v. 108, p. 97–108, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569114003172>>. .

LIAO, T.; HU, D.; LI, X.; CHEN, Y. Landslide vulnerability evaluation: A case study from Sichuan, China. **Proceedings - 2011 19th International Conference on Geoinformatics, Geoinformatics 2011**, , n. 40901227, p. 2008–2011, 2011.

MEINHARDT, M.; FINK, M.; TÜNSCHEL, H. Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: Comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics. **Geomorphology**, v. 234, p. 80–97, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X15000276>>. .

MOSSRI, P. Garganta do Embaú. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Garganta_do_Embaú>. Acesso em: 15/11/2015.

MULER, M.; BONETTI, J. Variação da Suscetibilidade e Vulnerabilidade à ação de perigos costeiros na Praia dos Ingleses (Florianópolis - SC) entre 1957 e 2009. **XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário ABEQUA III Encontro do Quaternário Sulamericano XIII ABEQUA Congress - The South American Quaternary: Challenges and Perspectives**, , n. Figura 1, p. 1–5, 2011.

OMAR, R. C.; ISMAIL, A.; KHALID, N. H. N.; et al. Real time monitoring of slope condition for transmission tower safety in Kenyir, Malaysia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 16, p. 12132, 2013. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1755-1315/16/i=1/a=012132?key=crossref.ed2d9e913936367a2dbccfaaf043a86f>>. .

PEUQUET, D. J. Making space for time: Issues in space-time data representation. **GeoInformatica**, v. 5, p. 11–32, 2001.

PODGÓRSKI, D. Measuring operational performance of OSH management system – A demonstration of AHP-based selection of leading key performance indicators. **Safety Science**, v. 73, p. 146–166, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925753514003063>>. .

PORTELLA, K. Portal IG. Disponível em: <<http://ultimosegundo.ig.com.br/apagao/conheca+o+sistema+de+geracao+e+transmissao+de+energia+no+brasil/n1237786446721.html>>. Acesso em: 12/9/2015.

PUISSANT, A.; VAN DEN EECKHAUT, M.; MALET, J.-P. P.; et al. Landslide consequence analysis: a region-scale indicator-based methodology. **Landslides**, v. 1, n. August 2013, p. 1–16, 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10346-013-0429-x>>. .

QUAN, H.-C.; LEE, B.-G. GIS-Based Landslide Susceptibility Mapping Using Analytic Hierarchy Process and Artificial Neural Network in Jeju (Korea). **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 7, p. 1258–1266, 2012. Disponível em: <www.springer.com/12205>. .

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, 1996.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022249677900335>>. .

SAATY, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, n. 1, p. 9–26, 1990. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221790900571>>. .

SANTORO, J.; MENDES, R. M.; PRESSINOTTI, M. M. N.; MANOEL, G. R. . Correlação entre chuvas e deslizamentos ocorridos durante a operação do Plano Preventivo De Defesa Civil. **7º Simpósio Brasileiro de Cartografia geotécnica e Geoambiental**. Anais... . p.1–15, 2010. Instituto Geológico.

SANTOS, A. R. DOS; EUGENIO, F. C.; RIBEIRO, C. A. A. S.; et al. **ArcGIS 10.2.2 passo a passo: elaborando meu primeiro mapeamento - Volume 1**. 2014.

SMITH, A. M. J. DE; GOODCHILD, M. F.; LONGLEY, P. A. **Geospatial Analysis**. Leicester, UK: Troubador Publishing Ltd, 2008.

SOARES, P. Mapa de infiltração do alto e médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos do meio físico e na precipitação. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 3, n. 1, p. 26–42, 2008.

TAHERI, K.; GUTIÉRREZ, F.; MOHSENI, H.; RAEISI, E.; TAHERI, M. Sinkhole susceptibility mapping using the analytical hierarchy process (AHP) and magnitude–frequency relationships: A case study in Hamadan province, Iran. **Geomorphology**, v. 234, p.

64–79, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169555X15000173>>..

VARNES, D. J. The logic of geologic maps with reference to their interpretation and use for engineering purposes. **US Geological Survey Professional Paper 837, 48 p.**, 1974.

VAN 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**, v. 65, n. 2, p. 167–184, 2006.

VAN WESTEN, C. J.; CASTELLANOS, E.; KURIAKOSE, S. L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3–4, p. 112–131, 2008. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>>..

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. Solos do Litoral de São Paulo. In: N. J. Frederico Fernando, Falconi; Arsenio (Org.); Taludes Naturais. **Anais...** . p.316, 1994. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos - ABMS.

YOUSSEF, A. M. Landslide susceptibility delineation in the Ar-Rayth area , Jizan , Kingdom of Saudi Arabia , using analytical hierarchy process , frequency ratio , and logistic regression models. **Earth Environmental Sciences**, p. 8499–8518, 2015. Springer Berlin Heidelberg. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-014-4008-9>>..

YU, G.; YANG, H.; TIAN, Z.; ZHANG, B. Landslide risk analysis of Miyun reservoir area based on RS and GIS. **Procedia Environmental Sciences**, v. 10, n. PART C, p. 2567–2573, 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1878029611005949>>..

APÊNDICE A

Programação em linguagem Lua para análise dinâmica sobre o mapa de susceptibilidade desenvolvido para a área de interesse em relação a previsão numérica usando o modelo BRAMS5

```
-- Análise BRAMS sobre Mapa de Susceptibilidade (MS)
--
-- Análise baseada em previsão numérica para próximas 6 horas
-- Dado dinâmico: Prec_brams5km

local prec6h=maximo_pn('Prec_brams5km', 6) or 0
print(prec6h)
if prec6h < 5 then
return 0 -- Normal
elseif prec6h < 15 then
return 1 -- Observacao
elseif prec6h < 30 then
return 2 -- Atencao
elseif prec6h < 60 then
return 3 -- Alerta
else
return 4 -- Alerta maximo
end
-----
```

APÊNDICE B

Programação em linguagem Lua para análise dinâmica sobre o mapa de susceptibilidade desenvolvido para a área de interesse em relação aos dados de observação do hidroestimador por imagens de satélite GOES-13 – Canal 4

```
-- Análise HIDRO sobre Mapa de Susceptibilidade (MS)
--
-- Análise baseada em dados de observação (30 em 30 minutos)
-- Dado dinâmico: hidro

local prec72hacum = prec_media_historico_grid('hidro', 72) or 0
local class_vul = gridcode
print (class_vul, prec72hacum)

if class_vul < 5 then
  if prec72hacum < 10 then
    return 0 -- Normal
  elseif prec72hacum < 20 then
    return 1 -- Observacao
  elseif prec72hacum < 35 then
    return 2 -- Atencao
  elseif prec72hacum < 80 then
    return 3 -- Alerta
  else
    return 4 -- Alerta maximo
  end
else
  if prec72hacum < 8 then
    return 0 -- Normal
  elseif prec72hacum < 16 then
    return 1 -- Observacao
  elseif prec72hacum < 28 then
    return 2 -- Atencao
  elseif prec72hacum < 64 then
    return 3 -- Alerta
  else
    return 4 -- Alerta maximo
  end
end
end
```
