NATÁLIA DA COSTA SOUZA

GEOTECNOLOGIAS NA ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE E RISCO DE PROCESSOS EROSIVOS EM ÁREAS DE ENTORNO DE LINHAS FÉRREAS ESTUDO DE CASO: MALHA PAULISTA – SP (BACIA DO TIETÊ – SOROCABA)

São Paulo

2015

NATÁLIA DA COSTA SOUZA

GEOTECNOLOGIAS NA ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE E RISCO DE PROCESSOS EROSIVOS EM ÁREAS DE ENTORNO DE LINHAS FÉRREAS ESTUDO DE CASO: MALHA PAULISTA – SP (BACIA DO TIETÊ – SOROCABA)

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Transportes – Informações Espaciais

Orientadora: Prof.ª Dr.ª Ana Paula Camargo Larocca

São Paulo

2015

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: Natália da Costa Souza

Assinatura do orientador: Ana Paula C. Loureiro

Catalogação-na-publicação

Souza, Natália da Costa
GEOTECNOLOGIAS NA ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE E RISCO DE PROCESSOS EROSIVOS EM ÁREAS DE ENTORNO DE LINHAS FÉRREAS ESTUDO DE CASO: MALHA PAULISTA – SP (BACIA DO TIETÊ – SOROCABA) / N. C. Souza -- versão corr. -- São Paulo, 2015.
155 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Erosão 2.Sistemas de Informações Geográficas (SIG) 3.Linhas Férreas 4.Geotecnologias I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

À minha querida madrinha Maria Rita Toniolli Domench, que nos deixou nesse ano. Pelo carinho, pela saudade e por sempre acreditar tanto em mim.

AGRADECIMENTOS

Muito obrigada à minha orientadora Profa. Dra. Ana Paula Camargo Larocca, pela orientação, apoio, colaboração e incentivo dados para realização desta pesquisa. Agradeço também a forma como me recebeu no Departamento e a confiança depositada em mim para condução das aulas na graduação, pós-graduação e acompanhamentos dos seus alunos.

Aos professores Dr. José Alberto Quintanilha e Dra. Mariana Gianotti, pela ajuda durante a pesquisa e na elaboração de artigos científicos. Mari, suas orientações foram fundamentais durante todo o processo. Obrigada pela paciência e pelo conhecimento transferido.

Aos professores Dr. Alfredo Pereira de Queiroz Filho (FFLCH), Dr. Marcelo Rocha (IGC), Dra. Cira Pitombo (EESC) e Dr. André Cunha (EESC), pelas disciplinas ministradas.

Aos amigos do PTR: Daniele Lima e Juliana Kolling. Aos amigos do STT: Luciana Spigolon, Aurenice Figueira, Tiago Torquato e Fábio Vieira.

Muito obrigada aos técnicos do IPT: Msc. Gérson Almeida, Msc. Aranha, Aline Heleno e Samuel Costa, pelo ajuda com os dados fornecidos, questionários, apoio metodológico e fornecimento de material.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPQ e ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (FIPT), pelo apoio financeiro.

Aos amigos de todas as horas e pra toda a vida.

À minha família, especialmente aos meus pais. Eternos e incondicionais incentivadores dos meus sonhos.

RESUMO

A ocorrência de eventos erosivos acelerados associados à implantação de sistemas de transportes é um dos principais problemas socioambientais enfrentados pelas concessionárias brasileiras. Feições erosivas do tipo linear e laminares são observadas tanto ao longo da plataforma, nos cortes e aterros, como fora dela, em caixas de empréstimo, áreas de jazidas exploradas, junto aos pés de aterros e jusante das obras de transposição. Em geral, na literatura, os estudos relativos às analises de dinâmica de desenvolvimento e ocorrência de processos erosivos, bem como o risco oferecido ao meio, estão inseridos nas abordagens ambientais teorizadas como Análise Integrada da Natureza e nas análises de riscos e suscetibilidades *(hazards)* subsidiadas pela Cartografia Geotécnica e Geoambiental, ambas amparadas pela utilização da ciência e sistemas de informação geográfica (SIG) em plataformas computacionais. Especificamente no campo de engenharia de transportes, tais abordagens estão relacionadas aos estudos das áreas de influência pertencentes aos traçados e domínios de empreendimentos lineares (rodovias e ferrovias) em operação ou em implantação, atuando como ferramenta de gestão e monitoramento frente a requisitos ambientais exigidos pela legislação vigente e almejados pelas concessionárias responsáveis pelas vias. Inserido no viés da problemática ambiental envolvendo o setor ferroviário, e no sentido de subsidiar processos de licenciamento ambiental e regularização de linhas férreas em operação, além de fornecer bases metodológicas para a implantação de empreendimentos futuros preocupados com a prevenção de problemas relacionados à erosão, o presente trabalho tem como objetivo principal a elaboração de um estudo que realize a análise do risco oferecido à linha férrea pelos processos erosivos identificados ao longo do traçado da malha.

Através da utilização de informações espaciais em plataformas SIG, a pesquisa apresenta a aplicação de um conjunto de metodologias que compõem todo o procedimento, desde o registro dos pontos mapeados, espacialização, o fornecimento de mapas temáticos ambientais intermediários, a identificação de graus de suscetibilidade da área de estudo até a definição de parâmetros para a análise de risco dos processos erosivos em relação à linha férrea em análise. Os resultados fornecem a leitura das características analisadas para composição do indicador de suscetibilidade e a análise de risco (baixo, médio ou alto) de cada processo erosivo mapeado em relação à linha férrea.

Palavras chave: Erosão, Linhas Férreas, Geotecnologias, Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Licenciamento Ambiental e Operacional

ABSTRACT

The occurrence of accelerated erosion events associated with the implementation of transport systems is one of the main environmental problems facing brazilian concessionaires. Erosive features of linear and laminar type are observed both along the platform, in the sections and embankments, and outside in boxes loan areas explored deposits, at the foot of embankments and downstream of the works transposing. In general, studies on the analysis of dynamics of development and occurrence of erosion (and risks induced to the environment) are inserted in environmental approaches theorized such as Integrated Analysis of the Nature and analysis of risks and susceptibility (hazards) subsidized by the Geotechnical and Geoenvironmental Cartography, both supported by the use of science and geographic information systems (GIS) in computing platforms. Specifically in the area of transportation engineering, such approaches are related to studies of areas of influence belonging to the plan and domain of linear transport developments (roads and railways) in operation or in implementation, acting as a management tool and monitoring against environmental requirements by current legislation and sought by the concessionaires responsible for roads. Inserted into the bias of environmental issues involving the railway sector, and in order to support the processes of environmental licensing and regulation of railways in operation, besides provide methodological foundations for the implementation of future projects concerned with the prevention of problems related to erosion, the present work aims to prepare a study that performs the analysis of the risk concerned to the railway line by erosion processes identified along the plan line.

Through the use of spatial information in GIS platforms, a set of methodologies that make up the whole process will be presented, from registration and spatial distribution of mapped points, provision of environmental thematic maps intermediaries, identification of susceptibility levels of the study area until parameters settings for risks assessment of erosion in relation to railway line analysis.The results provide the reading of the characteristics analyzed for composition of susceptibility indicator and risk analysis (low, medium or high) of each erosion mapped in relation to the railway line .

Palavras chave: Erosion, Railway, Geotechnologies, Geographical Information Systems (GIS), Environmental Licensing and Operational

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de processos erosivos 12
Figura 2. Solo exposto na execução de terraplenagem gerando potencial para ocorrer erosão laminar, município de Barueri (SP) 14
Figura 3. Solo exposto em área agrícola (preparação do solo para cultivo) favorecendo a erosão laminar em períodos chuvosos, no município de Ouro Verde (SP) 14
Figura 4. Formação de processo de sulcos em área rural no município de Cunha (SP). 16
Figura 5. Formação de sulcos em área de entorno de sistema viário devido à falta de pavimentação no município de Porto Feliz (SP) 17
Figura 6. Processo de ravinamento em área rural, município de Itaquaquecetuba (SP). 18
Figura 7. Ravina desencadeada pelo lançamento das águas pluviais de área urbana no município de Presidente Venceslau (SP). 19
Figura 8. Boçoroca de evolução acelerada, comum no planalto ocidental, município de Pardinho (SP). 20
Figura 9. Detalhe da formação de orifício na base do talude, devido à concentração de água do lençol freático (fenômeno de piping), no município de Paraguaçu - Paulista (SP). 21
Figura 10. Escorregamentos generalizados dos taludes da boçoroca devido a ação do piping, município de Bauru (SP) 22
Figura 11. Esquematização de conceitos associados ao campo da Ciência da Informação Geográfica (IG). 28
Figura 12. Representação das classes no espaço de atributos. 35
Figura 13. Bases e origens teóricas dos estudos de análise de risco (erosão). 48
Figura 14. Fluxograma metodológico das atividades envolvidas 55
Figura 15. Fluxograma do método para cadastramento dos processos erosivos urbanos 56
Figura 16. Fluxograma do método para cadastramento dos processos erosivos urbanos 60
Figura 17. Fluxograma do método para cadastramento dos processos erosivos urbanos 61
Figura 18. Categorias morfodinâmicas referente aos níveis de suscetibilidade do terreno ao desenvolvimento de processos erosivos (alta, média e baixa suscetibilidade) 63
Figura 19. Procedimento para geração de mapeamento de solos baseado na análise estatística de frequência de características topográficas 70
Figura 20. Fluxograma de procedimentos para construção do modelo de suscetibilidade à erosão no SIG 86
Figura 21. Mapeamento geológico 93
Figura 22. Modelo digital de terreno (MDT) gerado – Mapeamento hipsométrico 97
Figura 23. Perfil topográfico – Traçado da linha férrea Malha Paulista 98
Figura 24. Mapeamento de declividade 99
Figura 25. Mapeamento de compartimentos geomorfológicos e da rede de drenagem utilizados na obtenção do índice de dissecação do relevo pela drenagem 102

Figura 26. Mapeamento do índice de dissecação pela drenagem 103
Figura 27. Mapeamento de tipos de solo (pedologia) – Mapeamento ESALQ – Escala 1:500.000..... 106
Figura 28. Hipsometria - Histograma de Frequência – Argissolos..... 107
Figura 29. Hipsometria - Histograma de Frequência – Latossolos 107
Figura 30. Hipsometria - Histograma de Frequência – Nitossolos..... 108
Figura 31. Declividade - Histograma de Frequência – Argissolos 108
Figura 32. Declividade - Histograma de Frequência – Latossolo 109
Figura 33. Declividade - Histograma de Frequência – Nitossolo 109
Figura 34. Mapeamento de tipos de solos segundo metodologia adotada..... 111
Figura 35. Mapa base. Fonte: Geovisual – IGC – Instituto de Geociência – USP 112
Figura 36. Histograma. Fonte: Geovisual – IGC – Instituto de Geociência – Universidade de São Paulo..... 114
Figura 37. Variograma experimental e parâmetros utilizados. Fonte: Geovisual – IGC – Instituto de Geociência – Universidade de São Paulo..... 115
Figura 38. Variograma teórico (linha de ajuste) e parâmetros utilizados. Fonte: Geovisual – IGC – Instituto de Geociência – Universidade de São Paulo..... 116
Figura 39. Validação cruzada. Fonte: Geovisual – IGC – Instituto de Geociência – Universidade de São Paulo..... 117
Figura 40. Mapeamento dos dados de pluviometria através da técnica de krigagem 119
Figura 41. Mapeamento de uso e cobertura do solo 122
Figura 42. Questionário aplicado a especialistas para geração da ponderação AHP das variáveis analisadas no mapeamento de suscetibilidade à erosão 123
Figura 43. Matriz final de julgamento oriunda das avaliações dos especialistas 124
Figura 44. Parâmetros de peso das variáveis analisadas na análise multicritério 124
Figura 45. Gráfico de dispersão: correlação entre níveis de suscetibilidade e quantidade de processos erosivos..... 126
Figura 46. Fluxograma “Model Builder”: Modelo para geração de mapeamento de suscetibilidade da área de estudo..... 127
Figura 47. Mapeamento de suscetibilidade à erosão 128
Figura 48. Mapeamento da análise de risco do processo erosivo à linha férrea 133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação da erosão pelos fatores ativos 11
Tabela 2. Diferentes definições de SIG e os grupos para os quais cada uma é mais apropriada. 31
Tabela 3. Geologia - principais tipos de rocha e sua classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos 65
Tabela 4. Características topográficas – Declividade: classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. 67
Tabela 5. Características topográficas – Intensidade da dissecação do relevo pela drenagem: classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. 68
Tabela 6. Tipos de solos - principais tipos de solos e classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. 71
Tabela 7. Clima – Intensidade pluviométrica / Erosividade da chuva: classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. 76
Tabela 8. Uso e cobertura do solo – Tipologias mapeadas na área de estudo: classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. ... 83
Tabela 9. Escala fundamental de Saaty (1977) para julgamentos de variáveis par a par 85
Tabela 10. Grau de vulnerabilidade da linha férrea em função da distância da cabeceira da erosão e suas laterais – solos predominantemente arenosos. 89
Tabela 11. Grau de vulnerabilidade da linha férrea em função da distância da cabeceira da erosão e suas laterais – solos predominantemente argilosos. 89
Tabela 12. Graus de risco. 90
Tabela 13. Graus de risco da linha férrea em relação aos processos erosivos identificados na área de estudo. 90
Tabela 14. Declividade – Unidades Geológicas: principais tipos de rochas e classificação de suscetibilidade à erosão 92
Tabela 15. Declividade – Área (km² e %) por intervalo de classe mapeado e classificação de suscetibilidade à erosão 96
Tabela 16. Índice de Dissecação do Relevo pela Drenagem: Total de drenagem (m) / área (m²) e classificação de suscetibilidade à erosão 101
Tabela 17. Parâmetros estatísticos – Classes de solos mapeadas na área de estudo 109
Tabela 18. Tipos de solos mapeados (mapeamento ESALQ e mapeamento gerado) – Área equivalente e classificação de suscetibilidade à erosão 110
Tabela 19. Valores das médias mensais e anuais dos postos pluviométricos utilizados para krigagem ordinária dos dados de chuva 113
Tabela 20. Pluviometria (em mm) e classificação de suscetibilidade à erosão 118
Tabela 21. Classes de uso e cobertura do solo e classificação de suscetibilidade à erosão 120
Tabela 22. Matriz de erros: análise da classificação 121
Tabela 23. Classificação final de suscetibilidade à erosão da área de estudo 129
Tabela 24. Análise de risco: base de dados resultante: exemplo 130
Tabela 25. Análise de risco: resumo dos processos analisados 131

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. HIPÓTESES 4
1.2. OBJETIVOS 4
1.2.1. OBJETIVO GERAL 4
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5
1.3. JUSTIFICATIVA 5
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8
2.1. PROCESSOS EROSIVOS 8
2.1.1. CONCEITOS GERAIS 8
2.1.2. CLASSIFICAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS 11
2.1.2.1. EROSÃO LAMINAR 12
2.1.2.2. EROSÃO LINEAR 15
SULCOS E RAVINAS 15
BOÇOROCAS OU VOÇOROCAS 20
2.1.3. FATORES CONTROLADORES DOS PROCESSOS EROSIVOS 23
2.2. CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA 25
2.2.1. GEOTECNOLOGIAS: DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS ASSOCIADOS 25
2.2.1.1. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA 29
2.2.1.2. SENSORIAMENTO REMOTO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS 33
2.2.2.2 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DO USO DE GEOTECNOLOGIAS NO ESTUDO DE EROSÃO E EVENTOS DE RISCO ASSOCIADOS 35
2.3. ESTUDOS DE EROSÃO: ORIGENS TEÓRICAS – METODOLÓGICAS E TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RISCO E SUSCETIBILIDADE 44
2.3.1. A CIÊNCIA DA VULNERABILIDADE – BASE CONCEITUAL E METODOLÓGICA PARA ESTUDOS DE RISCOS AMBIENTAIS 44
2.3.2. TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RISCO E SUSCETIBILIDADE À EROSÃO 46
2.3.2.1. ANÁLISE INTEGRADA DA PAISAGEM 48
2.3.2.2. CARTOGRAFIA GEOAMBIENTAL E GEOTÉCNICA 51
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 54
3.1. ETAPA 1: DEFINIÇÕES PRELIMINARES 54
3.1.1. DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 54
3.2. ETAPA 2: DADOS DE PROCESSOS EROSIVOS: MAPEAMENTO DE REGISTROS E ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS 59

3.2.1. MÉTODO DE REGISTRO 59
3.2.2. ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS 62
3.3. ETAPA 3: MODELO AMBIENTAL: SUSCETIBILIDADE À EROSÃO 63
3.3.1. AGENTES DESENCADEADORES DE PROCESSOS EROSIVOS: SELEÇÃO DE VARIÁVEIS, DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO A SUSCETIBILIDADE À EROSÃO E PROCESSO DE MAPEAMENTO 63
3.3.1.1. GEOLOGIA 63
3.3.1.1. GEOLOGIA 64
3.3.1.2. CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS 66
3.3.1.3. SOLO 69
3.3.1.4. CLIMA 72
3.3.1.5. USO E COBERTURA DO SOLO 77
3.3.2. ANÁLISE MULTICRITÉRIO - AHP (*Analytic Hierarchy Process*) 84
3.3.3. CONSTRUÇÃO DO MODELO EM PLATAFORMA SIG 86
3.4. ETAPA 4: ANÁLISE DE RISCO DOS PROCESSOS EROSIVOS EM RELAÇÃO À LINHA FÉRREA 87
4. RESULTADOS 91
4.1. MAPEAMENTOS INTERMEDIÁRIOS: VARIÁVEIS AMBIENTAIS 91
4.1.1. GEOLOGIA 91
4.1.2. CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS 94
4.1.2.1. DECLIVIDADE 94
4.1.2.2. DISSECAÇÃO DO RELEVO PELA DRENAGEM 100
4.1.3. SOLO 104
4.1.4. CLIMA 112
4.1.5. USO E COBERTURA DO SOLO 120
4.2. PONDERAÇÕES ESTATÍSTICAS: ANÁLISE AHP 123
4.3. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO 125
4.4. ANÁLISE DE RISCO DO PROCESSO EROSIVO À FERROVIA 130
5. CONDIDERAÇÕES FINAIS 134
5.1. QUANTO À METODOLOGIA PROPOSTA: 134
5.2. QUANTO AOS RESULTADOS ALCANÇADOS: 136
5.3. QUANTO À RELEVÂNCIA E APLICABILIDADE DO TEMA (GEOTECNOLOGIAS): 137
5.4. RECOMENDAÇÕES FUTURAS: 137
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 139
7. ANEXOS 152

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de transportes são atividades necessárias às sociedades e produzem grandes variedades de benefícios, possibilitando principalmente a circulação de pessoas e a realização das atividades sociais e econômicas vinculadas ao seu uso. No entanto, tais sistemas implicam em alguns efeitos negativos, os quais podem ser tratados, de acordo com Vasconcellos (2008), como impactos. A preocupação envolvendo sistemas de transporte e meio ambiente é decorrente de discussões, em nível internacional, ligadas à ascensão das questões ambientais em várias esferas e em escalas abrangentes. A partir de discussões em países desenvolvidos relacionadas inicialmente a aspectos ligados à fauna e flora, o tema foi introduzido e analisado de forma crescente em eventos internacionais, passando a incluir análises das interações ambientais existentes em várias sub-áreas correlatas como mapeamentos de uso do solo, habitação, planejamento urbano, ordenamento territorial, recursos naturais, etc.

Dentre outros não menos importantes, a ocorrência de eventos erosivos acelerados associados à implantação de empreendimentos lineares (rodovias e ferrovias) é um dos principais problemas socioambientais enfrentados pelas concessionárias brasileiras. Feições erosivas do tipo linear e laminar são observadas tanto ao longo da plataforma, nos cortes e aterros, como fora dela, em caixas de empréstimo, áreas de jazidas exploradas, junto aos pés de aterros e jusante das obras de transposição. A imprecisão dos projetos de drenagem, principalmente por não levarem em conta a natureza dos terrenos quanto à suscetibilidade à erosão, o desinteresse pelos investimentos em obras complementares e a falta de manutenção das vias são as principais causas da grande incidência desses processos, que podem não só atingir as linhas como também atuarem como acelerados e induzir a ocorrência de novos processos, oferecendo risco as pessoas e à região localizada no entorno das malhas (Salomão, 1999). Particularmente em linhas férreas, a obstrução das vias causada pela dinâmica de desenvolvimento de processos erosivos e outros eventos de risco associados, envolve os responsáveis pela operação não só do ponto de vista econômico (paralização das vias e impedimento do

transporte de cargas e passageiros), mas principalmente pelo viés socioambiental (acidentes envolvendo passageiros e maquinistas, derramamento de cargas inflamáveis, contaminação do solo e lençóis freáticos, assoreamento de corpos d´água, exposição da fauna local, etc).

Atualmente, a legislação contempla todas as possibilidades de preservação da qualidade do meio ambiente, direcionando instrumentos preventivos, corretivos e compensatórios relativos a consequências decorrentes de intervenções na base de recursos naturais e ambientais do país. No que tange a leis específicas ambientais direcionadas aos sistemas de transportes, a Política Ambiental do Ministério dos Transportes[1] tem como referência três princípios básicos: a viabilidade ambiental dos empreendimentos, o respeito às necessidades de preservação e o alcance do patamar de sustentabilidade dos sistemas de transportes. De acordo com o artigo 225, § 1º, inciso V, as atividades ferroviárias (construção, manutenção, duplicação, transporte) enquadram-se na definição de atividades potencialmente causadoras de significativa degradação do meio ambiente, sendo amplamente recepcionadas pelos instrumentos constitucionais. A Política Nacional de Meio Ambiente, consolidada na Lei Federal nº6938, de 31 de Agosto de 1981, bem como a Resolução CONAMA nº349, de 16 de Agosto de 2004[2], promovem, como um dos seus instrumentos, o licenciamento ambiental das atividades efetivas ou potencialmente degradadoras.

No Brasil, para processos de licenciamento ambiental e regularização dos empreendimentos ferroviários em operação, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis (IBAMA) prevê a implantação de planos e programas ambientais que alcancem o cumprimento das condicionantes necessárias à regularização e funcionamento adequado das atividades em operação no país. Tais programas visam à minimização de danos provenientes da operação da malha, resultando no gerenciamento eficaz dos riscos de suas atividades, possibilitando a mitigação em caso de eventuais impactos aos

[1] **POLÍTICA AMBIENTAL DO MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES DE 04 DE MAIO DE 2002.** Diretrizes e elaboração de manuais de orientação para licenciamento e inserção da variável ambiental em todo o ciclo de vida do empreendimento de transportes.

[2] **RESOLUÇÃO CONAMA Nº349 DE 16 DE AGOSTO DE 2004**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental de empreendimentos ferroviários de pequeno potencial de impacto ambiental e a regularização dos empreendimentos em operação.

meios físicos, bióticos e socioeconômicos. Dessa forma, um dos aspectos abordados dentre os programas exigidos é a análise das ocorrências de processos erosivos ao longo da faixa de domínio da malha, o diagnóstico da gravidade dos processos, sua espacialização e padrões de distribuição, ações de prevenção, recuperação das áreas afetadas e riscos oferecidos.

Em geral, na literatura, os estudos relativos às analises de dinâmica de desenvolvimento e ocorrência de processos erosivos, bem como o risco oferecido ao meio, estão inseridos em abordagens ambientais teórico-metodológicas consagradas nas áreas de ciências da terra e engenharias, a maioria subsidiada pela utilização da ciência e sistemas de informação geográfica (SIG) em plataformas computacionais (Hyun-joo Oh e Pradhan, 2011; Pradhan e Lee, 2010; Pourghasemi *et. al.*, 2012; Devvkota *et. al.*,2013; Bui *et. al.*, 2014; Regmi *et. al.*, 2014; Correia *et al*., 2007; Castro *et al.,* 2006; Souza, 2001; Burroughs e King, 1989; Kochenderter, 1970, etc). Tais aplicações consistem em uma das principais ferramentas e formas de avaliação utilizadas por pesquisadores e especialistas da área, por órgãos federais e estaduais e departamentos públicos e privados na elaboração das etapas de diagnósticos preliminares, análise ambiental, territorial, planejamento e monitoramento. Em suma, são aplicações que potencializam tanto o uso do território quanto as políticas públicas envolvidas, apresentando as informações necessárias para que planejadores possam decidir as melhores condutas a serem realizadas e a identificar áreas de interesse.

Especificamente no campo de engenharia de transportes, as abordagens estão relacionadas aos estudos das áreas de influência pertencentes aos traçados e domínio de empreendimentos lineares (rodovias e ferrovias) em operação ou em implantação, atuando como ferramenta de gestão e monitoramento de tais sistemas frente a requisitos ambientais exigidos pela legislação vigente e almejados pelas concessionárias responsáveis pelas vias.

1.1. HIPÓTESES

Para a presente pesquisa, algumas hipóteses serão testadas:

A. Geotecnologias são ferramentas fundamentais em estudos de planejamento e gestão em transportes. É possível utilizá-las no desenvolvimento de indicadores de suscetibilidade à erosão de áreas de entorno de sistemas de transportes lineares (como ferrovias);
B. O procedimento metodológico proposto para geração do indicador de suscetibilidade à erosão da área de análise é satisfatório e seus resultados são condizentes com a situação real relacionada à quantidade de processos erosivos mapeados na região de estudo;
C. O desenvolvimento da metodologia de análise de risco de processos erosivos em relação à linha férrea é de grande utilidade em estudos de licenciamento ambiental e operacional da linha, colaborando em processos relacionados à sua regularização e funcionalidade, conforme quesitos ambientais e de segurança exigidos pelos órgãos responsáveis.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

A área de estudo do presente trabalho é parte da bacia do Tietê-Sorocaba, região por onde percorre a Malha Paulista, operada pela concessionária América Latina Logística - ALL, uma das principais vias férreas do estado de São Paulo. Inserido no viés da problemática ambiental envolvendo o setor ferroviário e a legislação vigente, o presente trabalho tem como objetivo principal a elaboração de um estudo que realize a análise do risco oferecido à linha férrea pelos processos erosivos identificados ao longo do traçado da malha e limitados a uma faixa de 5 km em torno da linha.

Através da utilização de informações espaciais em plataformas SIG, será apresentada a aplicação de um conjunto de metodologias que compõem todo o procedimento, desde o registro dos pontos mapeados, espacialização, o fornecimento de mapas temáticos ambientais intermediários, a identificação de

graus de suscetibilidade da área de estudo até a definição de parâmetros para a análise de risco dos processos erosivos em relação à linha férrea em análise.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mapeamento temático e a leitura das propriedades ambientais da área de estudo. Tal leitura tem como foco principal a análise das características que estão relacionadas a fatores desencadeadores dos processos erosivos em geral, tais como características topográficas, tipos de solo (pedologia), regime pluvial e distribuição da precipitação, geologia e uso e ocupação do solo . O conhecimento de tais propriedades pode auxiliar, também, no desenvolvimento de outros programas ambientais exigidos no processo de licenciamento e regularização da linha;
- Fornecimento do mapa de suscetibilidade à erosão da área de trabalho;
- Identificação, classificação e espacialização de dados de erosão ao longo da via;
- Colaborar no fornecimento de propostas de monitoramento de erosões em linhas férreas ou outros tipos de empreendimentos lineares na área de engenharia de transportes, além de contribuir na análise de áreas indicadas para receber novos empreendimentos ferroviários.

1.3. JUSTIFICATIVA

A discussão sobre quais são os elementos de maior importância para o desenvolvimento de países e regiões deve necessariamente considerar a importância de se ter um sistema de transporte eficiente. O modal ferroviário, em função de suas características que lhe proporcionam grande eficiência, consagrou-o como um veículo de transformação econômica para o transporte

de carga, assumindo um importante papel estratégico na composição da matriz de transporte.

A ampliação das linhas férreas tem sido alvo do governo federal e das respectivas concessionárias responsáveis pela operação. Estima-se que nos próximos dez anos a malha aumentará dos atuais 29 mil km para 40 mil km de extensão no território nacional. De acordo com a Associação Nacional dos Transportes Ferroviários, a expansão da malha com os novos projetos pode fazer as ferrovias responderem por até 32% da carga movimentada no país em 2020 (ANTF, 2014).

A manutenção de ações de monitoramento, o conhecimento do potencial do terreno à ocorrência de processos erosivos e a análise do risco oferecido (pelas erosões) ao funcionamento das vias férreas são temas tratados pelos programas ambientais exigidos pelo órgão responsável pelo licenciamento ambiental. O acompanhamento de tais programas são rotinas adaptadas e utilizadas para o bom funcionamento da ferrovia, contribuindo não só para o aumento geral das condições de segurança, tráfego e prevenção de acidentes decorrentes de danos causados, como também para garantir a sustentabilidade do meio ambiente onde está inserido os atuais e futuros empreendimentos.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este material de pesquisa está organizado em 5 capítulos principais: Introdução, Revisão Bibliográfica, Procedimentos Metodológicos, Resultados e Considerações Finais.

O Capítulo 2 aborda a revisão da literatura relacionada aos principais temas discutidos: Processos Erosivos – conceitos gerais, classificações de processos erosivos e fatores controladores, Ciência da Informação Geográfica – conceitos básicos associados e exemplos de aplicações de estudos de erosão e uso de sistemas de informação geográfica e Estudos de Erosão – origens teóricas – metodológicas e técnicas de análise de risco e suscetibilidade.

O Capítulo 3 discute todo o procedimento metodológico adotado organizado em 4 etapas distintas: 1ª. Etapa: Procedimentos preliminares – definição da área de estudo e escala de trabalho, 2ª Etapa: Dados de processos erosivos: registro e espacialização dos pontos, 3ª Etapa: Modelo de suscetibilidade

ambiental – mapeamentos das variáveis ambientais, aplicação da técnica de análise multivariada de dados e geração do indicador de suscetibilidade à erosão e 4ª Etapa: Análise de risco do processo erosivo em relação à linha férrea.

Já o Capítulo 4 apresenta os resultados oriundos de todas as etapas discutidas no capítulo anterior. O foco principal é o mapeamento de suscetibilidade da área de entorno da linha férrea e a análise de risco de cada processo erosivo em relação à malha.

Por fim, o Capítulo 5 - Considerações finais, traz reflexões acerca dos principais pontos abordados pelo trabalho apresentado: o processo metodológico, os resultados alcançados e a relevância e aplicabilidade da temática em questão. Algumas recomendações para o processo de continuidade da pesquisa também são apontadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O levantamento bibliográfico foi realizado levando em consideração as três principais áreas do conhecimento pertinentes ao tema abordado neste trabalho. Desta forma, para a presente pesquisa, foram selecionados conceitos e classificações referentes às tipologias e à dinâmica de desenvolvimento de processos erosivos, conceitos e definições associados ao campo da Ciência da Informação Geográfica (IG) e uma breve revisão teórico-metodológica das técnicas de análise de risco e suscetibilidade aplicadas nos estudos de controle e desenvolvimento de processos erosivos.

2.1. PROCESSOS EROSIVOS

2.1.1. CONCEITOS GERAIS

A palavra erosão vem do Latin “erosio”, que significa corroer, separar. Estudos iniciados principalmente na década de 1980 (IPT, 2013), ligados às Ciências da Terra, assinalam que o termo é aplicado aos processos de desgaste da superfície terrestre pela ação da água, do vento, do gelo e de organismos vivos (plantas e animais), além da ação do homem.

Originalmente, o termo erosão foi utilizado pela área da Geologia, a fim de descrever a desagregação de material sólido pela ação das águas de rio (Zachar, 1982). Para Leinz e Leonardos (1977), no sentido lato, erosão é o efeito combinado de todos os processos degradacionais terrestres, incluindo intemperismo, transporte, ação mecânica e química da água corrente, vento, gelo, etc.; no sentido estrito, é o desgaste gradativo das rochas sólidas pela ação dos rios, ventos, geleiras e mar. Kirkby e Morgan (1980) classificam a erosão como um grupo definido de forma ampla dos processos que envolvem a movimentação de solo e rocha, sendo um dos aspectos do desenvolvimento normal da paisagem.

No Brasil, O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) é um dos maiores responsáveis pelo desenvolvimento de pesquisas e análises referentes ao desenvolvimento de processos erosivos, principalmente no Estado de São Paulo. A década de 1980 foi marcada por uma série de estudos e projetos que

tiveram como objetivo principal identificar áreas com maior potencial ao desenvolvimento de processos erosivos para subsidiar ações de governo no sentido do controle destes processos. O próprio IPT (1980) definiu erosão como um processo de desagregação e remoção das partículas do solo pela ação combinada da gravidade com a água, gelo, vento e/ou organismos, e abrange dois eventos principais:

- o impacto das gotas de chuva na superfície do solo;
- o escoamento superficial das águas (*runoff*).

De acordo com Ponçano e Prandini (1987), a maior parte da literatura que se propôs a contribuir para o conhecimento das erosões, principalmente as boçorocas, tendeu a tratar do assunto de maneira global, ou seja, buscando explicá-las por meio da interação de vários fatores, notadamente a ação das águas, o tipo de substrato, e a intervenção humana. Estudos mais recentes, porém, vêm tornando mais precisos alguns aspectos previamente abordados de modo genérico, destacando-se a realização de balanços hídricos e a caracterização geotécnica dos materiais das áreas afetadas por boçorocas (IPT, 2013). Uma revisão da evolução dos conceitos, a partir da década de 1970, pode ser observada em Merritt *et al.* (2003). Os autores também apresentam as evoluções dos modelos de predição de erosão a partir do aprofundamento do conhecimento relativo ao desenvolvimento dos processos erosivos e suas causas. Através da revisão citada, podemos observar que pouco evoluíram os conceitos de definição de erosão e seus diferentes tipos; o que avançou foram as formas de avaliação e os modelos desenvolvidos.

Vilar *et al.* (1993) definem erosão como sendo um conjunto de processos pelos quais os materiais da crosta terrestre são desagregados, dissolvidos ou desgastados e transportados de um ponto a outro pelos agentes erosivos (geleiras, rios, mares, ventos ou chuva). Kehew (1995) define erosão como sendo o destacamento e transporte de partículas da superfície sob a ação de uma ou mais forças ou agentes intempérico (gravidade, água, vento, gelo e ondas). Diz ainda que os materiais susceptíveis a erosão incluem não somente material residual alterado, desenvolvido a partir de rochas, como também qualquer depósito superficial inconsolidado na superfície da Terra. O mesmo autor comenta, também, que as erosões causadas pela água e vento são as

duas principais formas de ocorrência e desenvolvimento de processos erosivos no mundo.

Guerra (1999) define erosão como a destruição das saliências ou reentrâncias do relevo, tendendo a um nivelamento. A uma fase de erosão (gliptogênese) corresponde, de modo simultâneo, uma fase de sedimentação (litogênese).

Em países tropicais, como o caso do Brasil, análises de suscetibilidade à erosão estão contextualizadas em estudos que envolvem a problemática agrícola, por ser um problema que compromete a produtividade dos solos das regiões onde ocorrem. Para Moura (2007) erosão significa desgaste, que, se continuado, ocasionará a ruína do solo agrícola. Desse ponto de vista, a erosão é o arrastamento das partes constituintes do solo, através da água, colocando a terra transportada em locais onde não podem ser aproveitadas pela agricultura. Pelo processo erosivo, o solo não somente perde nutrientes nutritivos que possui, como também os constituintes do seu corpo; isso significa que um terreno fértil, em que a erosão atua acentuadamente, em breve se tornará pobre, apresentando baixa produção.

Para o presente trabalho, adotaram-se, como definição de erosão os conceitos desenvolvidos pelos principais autores responsáveis pelos estudos de erosão e a consagração de metodologias de monitoramento e prevenção desses eventos, particularmente preocupados com o desenvolvimento das erosões e perdas do solo causadas pela ação das águas da chuva (Moura, 2007; IPT, 1980 e Guerra, 1995 e 1999).

2.1.2. CLASSIFICAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS

Zachar (1982) propõe uma terminologia para a classificação dos principais tipos de erosão, enfatizando o caráter combinado entre os agentes e a ação da gravidade. A Tabela 1 mostra esta classificação com pequena modificação (adaptado de Carvalho *et al.,* 2006). Outra abordagem é feita por Holanda (1999), que classifica os tipos de erosão considerando a sua origem e o agente erosivo, conforme mostra a Figura 1.

Tabela 1. Classificação da erosão pelos fatores ativos (Carvalho, 2006)

FATOR	TERMO
1. ÁGUA	Erosão hídrica
1.1. Chuva	Erosão pluvial
1.2. Fluxo superficial	Erosão laminar
1.3. Fluxo concentrado	Erosão linear (sulco, ravina e boçoroca)
1.4. Rio	Erosão fluvial
1.5. lago, reservatório	Erosão lacustrina ou límica
1.6. mar	Erosão marinha
2. GELEIRA	Erosão glacial
3. NEVE	Erosão nival
4. VENTO	Erosão eólica
5. TERRA, DETRITOS	Erosão soligênica
6. ORGANISMOS	Erosão organogênica
6.1. plantas	Erosão fitogênica
6.2. animais	Erosão zoogênica
6.3. homem	Erosão antropogênica

Segundo Carvalho *et al.* (2006), o mais comum é classificar a erosão em quatro grandes grupos: erosão hídrica, erosão eólica, erosão glacial e erosão organogênica.

Este trabalho dará ênfase às erosões de origem hídrica geradas pela ação das águas das chuvas nas formas de fluxo concentrado. Os processos erosivos desenvolvidos a partir da ação da água são geralmente classificados em dois tipos principais: a erosão superficial (laminar) e a erosão linear (sulco, ravina e

boçoroca), detalhadas nos itens a seguir. Em síntese, a evolução das áreas afetadas por erosões hídricas apresentam um primeiro estágio de erosão laminar que vai intensificando com a chuva, levando à formação de sulcos rasos e profundos. Não havendo medidas de controle, os sulcos evoluem rapidamente formando as ravinas de portes variados. Se as condições dos terrenos forem favoráveis, as ravinas podem evoluir até atingir o nível d'água subterrânea, passando a se desenvolver a boçoroca (ou voçoroca), que evolui de modo acelerado e complexo em função da ação combinada das águas superficiais e subsuperficiais.

Os subitens a seguir definem as formas de processos erosivos desenvolvidos pela ação da água.

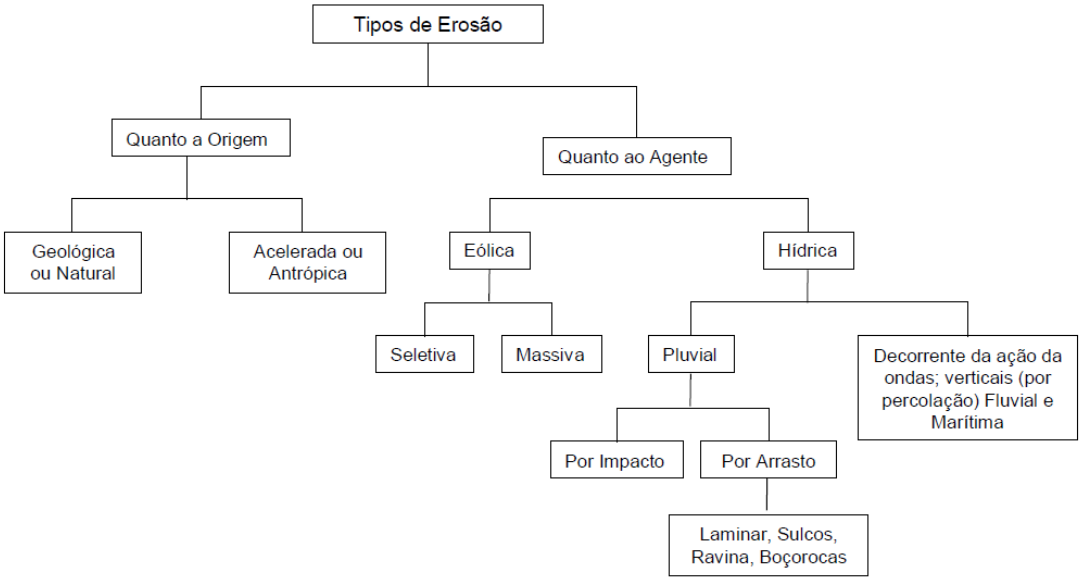


Figura 1. Tipos de processos erosivos (Holanda, 1999)

2.1.2.1. EROSÃO LAMINAR

A erosão laminar (Bertoni e Lombardi Neto, 1985), ou erosão em lençol (Guerra, 1978), ou, ainda, erosão superficial, surge do escoamento da água que não se infiltra, por meio do escoamento superficial difuso, após o impacto das gotas da chuva ao atingir o solo. É o processo de lavagem da superfície do terreno com transporte das partículas sólidas do solo. Inicia-se com a desagregação destas partículas pela energia das gotas de chuva. Estando

livres, são facilmente carreadas pelo escoamento superficial da água, formado pela junção das gotas de chuva que caem sobre a superfície do terreno. Notadamente, as chuvas tropicais torrenciais produzem gotas com um potencial erosivo muito grande, ou seja, uma erosividade elevada. A desagregação do solo será tanto mais fácil quanto menor a coesão entre as partículas. Nesse sentido, solos arenosos são mais suscetíveis à erosão laminar que os solos argilosos (erodibilidade). Sérias dificuldades são discutidas na literatura quanto às perdas de solo por erosão laminar (perdas parciais ou totais dos horizontes superficiais e subsuperficiais do perfil do solo), vistas a inexistência de evidências que regionalmente indiquem as quantidades de perdas já ocorridas. Por ser um processo que age superficialmente, a principal causa da ocorrência de erosões laminares é a ausência de cobertura vegetal dos solos.

O estudo da erosão laminar tem sido realizado, essencialmente, no campo agronômico, uma vez que este processo é comum às áreas de práticas agropecuárias e, portanto, menos recorrente em áreas urbanizadas. A ação da erosão laminar, mais comum em áreas agrícolas (Figuras 2 e 3), lentamente retira o horizonte superficial do solo, rico em nutrientes, fertilizantes, corretivos e defensivos aplicados no solo, que é carreado, contaminando os cursos d'água e reservatórios, provocando, entre outros, o fenômeno da eutrofização das águas. A erosão laminar não provoca incisões significativas nem permanentes nos terrenos, sendo seus efeitos mais pronunciados notados com o passar do tempo. Para Bertoni e Lombardi Neto (1985), a erosão laminar "é uma forma de erosão dificilmente perceptível", mas cuja ação pode ser denunciada pela coloração mais clara dos solos, pela exposição das raízes e pela queda da produtividade agrícola. Segundo Lepsch (1983), a erosão laminar pode ser identificada pela ausência parcial ou total de horizontes superficiais de perfis do solo, fundamentando, assim, uma classificação de intensidades deste tipo de erosão, com dificuldade de se realizar esta avaliação no campo, sendo necessária a análise das amostras dos solos expostos pela ação de remoção superficial dos seus horizontes. Fendrich (1984) também concorda com a dificuldade de observá-la, destacando, como aspectos sugestivos de sua ação, o decréscimo da produção de culturas (lixiviação dos nutrientes) e o aparecimento das raízes na superfície dos terrenos. IPT (1986)

apresentou um esboço da distribuição de áreas intensamente afetadas por erosão laminar, na Bacia do Peixe-Paranapanema (São Paulo), por meio da análise de produtos digitais TM/LANDSAT, processados em escala aproximada de até 1:50.000.

Figura 2. Solo exposto na execução de terraplenagem gerando potencial para ocorrer erosão laminar, município de Barueri (SP). Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

Figura 3. Solo exposto em área agrícola (preparação do solo para cultivo) favorecendo a erosão laminar em períodos chuvosos, no município de Ouro Verde (SP). Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

2.1.2.2. EROSÃO LINEAR

Entre os processos erosivos de ação hídrica, a erosão linear é a que ocasiona mais danos à população, às obras públicas e ao meio ambiente, sejam em área rural ou em área urbana. O impacto ambiental gerado é flagrante e imediato devido ao grande volume de solo removido e transportado para as drenagens situadas à jusante, com consequente assoreamento dos corpos d´água. Outros aspectos também devem ser analisados, tais como impacto visual (degradação da área) e as dificuldades de recuperação das mesmas. A erosão linear é associada de forma mais evidente ao desequilíbrio hidrológico causado pelo homem com o desmatamento, bem como por outras formas de concentrar o escoamento, como carreadores e divisas de glebas agrícolas, estradas, ferrovias, além de outras intervenções antrópicas em áreas de expansão urbana (IPT, 2013).

Os fatores condicionantes para o desenvolvimento da erosão linear são os mesmos apontados para a erosão laminar, potencializados por todas as características que induzem ao escoamento d'água concentrado e o comportamento da água subterrânea (posição do nível d'água e infiltração da água no solo).

A erosão linear instala-se a partir do momento em que a velocidade do fluxo superficial vence a resistência mecânica do solo e consegue fazer incisões no terreno. A intensificação do escoamento superficial leva à formação de fluxo concentrado, promovendo o desenvolvimento das feições erosivas lineares de maior porte definidas neste trabalho como sulcos, ravinas e boçorocas (também chamadas voçorocas), descritas a seguir.

SULCOS E RAVINAS

Sulcos e ravinas são normalmente diferenciados pela profundidade de penetração no solo por conta da ação da água. Na visão agronômica, são em geral classificados segundo as dificuldades de manejo do solo, conforme os manuais de levantamento da capacidade de uso da terra disponíveis na literatura, tais como: Marques (1971); Lepsch *et al.* (1983); Lemos e Santos (1984), entre outros.

Bigarella e Mazuchowski (1985) definem que a erosão em sulcos sucede a laminar, podendo igualmente originar-se de precipitações muito intensas. Para Bertoni e Lombardi Neto (1990), as erosões em sulco são também formadas por concentrações do escoamento que podem formar filetes, mais ou menos profundos, em consequência do volume e velocidade do escoamento superficial. FAO (Food Agriculture Organization,1967) declara não existir nenhum limite definido que assinale o final da erosão laminar e o começo da erosão em sulcos (linear) e a passagem de sulcos para ravinas.

Os sulcos, pertencentes às feições lineares, são pouco profundos (inferior a 50 cm), sendo que suas bordas possuem pequenas rupturas na superfície do terreno e podem ser mais facilmente corrigidos por meio da melhoria do manejo do solo. A erosão em sulcos pode passar despercebida até que comece interferir no trabalho de preparo do solo nas áreas agrícolas e na diminuição da produtividade e nas trilhas de gado (Figura 4). Nas áreas urbanas, essas feições ocorrem na fase da implantação de loteamentos, abertura de ruas, solo exposto, movimento de terra e outras intervenções antrópicas (Figura 5).

Figura 4. Formação de processo de sulcos em área rural no município de Cunha (SP). Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT

Figura 5. Formação de sulcos em área de entorno de sistema viário devido à falta de pavimentação no município de Porto Feliz (SP). Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT

Na erosão em sulcos, o desprendimento das partículas se dá principalmente pela energia do fluxo superficial e não pelo impacto da gota de chuva, como na erosão laminar. Dessa forma, via de regra, embora dependa de vários fatores, como do tipo de solo e declividade, o volume de material erodido é muito maior na erosão em sulcos do que na erosão intersulcos, que corresponde à erosão laminar (Prandini, 1985).

A erosão em sulco está geralmente associada a áreas rurais e ocorre sob a forma de áreas de concentração, sendo induzidas pelos seguintes fatores:

a) manejo agrícola inadequado em áreas de cultura, sem a adoção de práticas conservacionistas, como o simples plantio sem obedecer às curvas de nível e sem a implantação de terraços e canais escoadouros vegetada; solos preparados de forma inadequada e culturas de má cobertura; além de outras situações. Normalmente ocorre a formação de sulcos de forma generalizada em toda a vertente, sendo comum a evolução para ravinas e boçorocas nos pontos de concentração do escoamento superficial; e

b) modificação do escoamento das águas pluviais condicionado por trilhas de gado, carreadores, cercas, divisas antigas e áreas de empréstimo, que aduzem e concentram as águas pluviais.

Já a ravina é aprofundamento das feições de sulco provocado pela ação erosiva da água de escoamento superficial concentrado, e que não pode ser combatido pelos métodos simples de conservação do solo. O processo de ravinamento é definido pela erosão causada simplesmente pela concentração do escoamento superficial, processo este que, na maioria das vezes, coroa a degradação do solo iniciada pela erosão laminar. As ravinas são feições de maior porte, profundidade variável (acima de 50 cm), de forma alongada e não atingem o nível d'água subterrânea, onde atuam mecanismos de desprendimento de material dos taludes laterais e transporte de partículas do solo (Figuras 6 e 7).

Figura 6. Processo de ravinamento em área rural, município de Itaquaquecetuba (SP). Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT

Figura 7. Ravina desencadeada pelo lançamento das águas pluviais de área urbana no município de Presidente Venceslau (SP). Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT

De acordo com Cavaguti (1994), Canil *et al.* (1995) e Almeida (2000) a ravina é um tipo de erosão que não pode ser extinta por operações normais de preparo do solo, desencadeando entre os eixos de drenagens associadas a estradas, trilhas de gado e carreadores. As ravinas urbanas estão associadas principalmente ao processo desorganizado de urbanização que se concentram, em geral, nas áreas periféricas das cidades.

Imeson e Kwaad (1980) notam que as feições de ravinamento são muito semelhantes em várias partes do mundo, o que leva à necessidade de examinar conjuntamente morfologia e processos atuantes, ao se analisarem essas feições. Ainda neste trabalho, os autores se propõem a equacionar a complexidade de mecanismos de evolução de ravinas, o que é normalmente omitido na bibliografia nacional e internacional. Admitem também a profundidade mínima para as ravinas em torno de 50 cm.

BOÇOROCAS OU VOÇOROCAS

Quando o processo do ravinamento atinge um limite, que é o lençol freático, atuam processos ligados à circulação das águas subterrâneas, fazendo com que o ravinamento atinja grandes dimensões, originando as boçorocas ou voçorocas.

As boçorocas representam a forma de erosão mais complexa e mais destrutiva no quadro evolutivo da erosão linear. A bibliografia é quase unânime em associar o surgimento das boçorocas à alterações no equilíbiro morfo-hidro-pedológico, causadas por intervenções humanas, especialmente por meio do desmatamento, atividades agrícolas e, mesmo, urbanas.

De acordo com Prandini (1985), essa denominação é atribuída no Brasil a toda forma de ravina de dimensões descomunais. As boçorocas ocorrem de forma acentuada em regiões tropicais com variações pluviométricas bem definidas (contraste entre a estação seca e chuvosa), afetando principalmente o oeste paulista (paisagem de cerrado). São mais frequentes nas encostas convexas. Nas mais comuns, a profundidade vai de 15 a 30 metros, em comprimento podem alcançar centenas de metros, com perfil transversal em forma de “V” (Figura 8). O desenvolvimento desse fenômeno apresenta velocidades muito aceleradas, resultando normalmente em um sistema erosivo ramificado, podendo envolver, assim, áreas consideráveis que apresentam contornos eliptiformes, estreitos a jusante, alargando-se a montante.

Figura 8. Boçoroca de evolução acelerada, comum no planalto ocidental, município de Pardinho (SP). Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

Já de acordo com IPT (1986), boçorocas são formas de ravinamento ocasionadas pela articulação entre erosão ocasionada por escoamento d'água superficial concentrado, e subsuperficial, com erosão interna (*piping*) provocada pela concentração de água do nível freático, que se caracteriza pelo avanço para o interior do solo na forma de tubos (Figura 9).

Figura 9. Detalhe da formação de orifício na base do talude, devido à concentração de água do lençol freático (fenômeno de piping), no município de Paraguaçu-Paulista (SP). Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

Os vazios destes tubos, ao se tornarem significativos, originam colapsos do terreno, com desabamentos que alargam a boçoroca ou criam novos ramos. Durante os processos de erosão interna, ocorrem os descalçamentos e solapamentos da base das paredes da boçoroca, provocando liquefação de areia, desmoronamentos e escorregamentos de solo, principalmente em cabeceiras de drenagens, onde há uma convergência e concentração natural dos fluxos d'águas superficiais e águas subterrâneas, favorecendo o desenvolvimento de processos que caracterizam esse tipo de erosão (Figura 10).

Figura 10. Escorregamentos generalizados dos taludes da boçoroca devido a ação do piping, município de Bauru (SP). Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT

Conforme IPT (1986), a maioria dos autores é unânime em apontar que as boçorocas atuam preferencialmente sobre depósitos arenosos (semi ou inconsolidados), cenozóicos, que apresentam profundos desenvolvimentos pedológicos, sendo que a fase inicial do ravinamento atinge de preferência solos com horizonte B textural, do tipo Argissolos (Podzólicos, na classificação antiga). O caráter arenoso destes solos e sua baixa compacidade favorecem os fenômenos de erosão superficial e interna. Uma vez implantada, a boçoroca pode evoluir afetando toda a espessura de rocha alterada (inclusive abaixo da formação cenozóica). Ramificam-se, podendo atingir mais de 50 metros de profundidade, poucas dezenas de metros de largura, e comprimentos que podem ultrapassar quilômetros. No estado de São Paulo, o Oeste Paulista é a região mais afetada pelas boçorocas, ocorrendo ainda em alguns setores da Depressão Periférica paulista e algumas ocorrências no Planalto Cristalino de São Paulo (IPT, 1986).

De acordo com IPT (1986), causas das boçorocas são em função de fatores antrópicos e naturais. Como fatores antrópicos têm-se o uso e ocupação irracional do solo: desmatamentos, cultivos inadequados, sistemas de transportes lineares mal planejados, expansão urbana desordenada, etc. Sobre

este cenário “catastrófico”, formado pela ação antrópica, atuarão os fatores naturais: chuva, relevo, solos, rocha e vegetação, que controlarão a intensidade do processo erosivo. Um dos maiores impactos das boçorocas é o assoreamento formado pelo material proveniente das erosões. A quantidade de material pode ser tão significativa que chega a constituir extensos bancos de areia (depósitos) ao longo dos cursos d´água. Dessa forma, ressalta-se a importância do controle dos processos erosivos durante a sua fase “primária”, ou seja, enquanto a erosão ainda é laminar. Tal controle deve ter como princípio minimizar o impacto das gotas das chuvas e a energia da água no processo de escoamento superficial.

2.1.3. FATORES CONTROLADORES DOS PROCESSOS EROSIVOS

Os fatores controladores são aqueles que determinam as variações nas taxas de erosão. Por conta da interação desses fatores, certas áreas erodem mais do que as outras. De um modo geral, as pesquisas sobre erosão do solo consideram como sendo fatores dos processos erosivos a erosividade da chuva, as propriedades dos solos, cobertura vegetal e características das encostas (Morgan, 1986; Ellison, 1993; Guerra,1999). A intervenção do homem pode alterar esses fatores e, consequentemente, apressar ou retardar o aparecimento de processos erosivos. Como afirma Morgan (1986), é necessário estudar esses fatores com bastante detalhe para se compreender como, onde e porque a erosão ocorre.

No Brasil, a precipitação pluviométrica é reconhecida como o principal agente deflagrador ("gatilho") dos processos de erosão dos solos e movimentos de massa. Os efeitos observados estão fortemente ligados às características físicas do meio e à associação dessas características com ações antrópicas, geralmente as ocupações de encostas íngremes com lavouras, pastagens ou moradias. Iwasa (1998) inclui o desmatamento, cultivo de terras, corte de estradas e expansão de cidades como algumas das ações antrópicas deflagradoras do processo erosivo, que é então influenciado pela água e pelas condições naturais do terreno (cobertura vegetal, topografia e tipo de solo).

Bertoni e Lombardi Neto (1990) ressaltam que os processos erosivos são decorrentes dos seguintes fatores: declividade, pluviosidade, comprimento da

encosta, capacidade de absorção da água pelo solo, resistência do solo à erosão e densidade da cobertura vegetal, sendo a água o mais importante agente erosivo e o escoamento concentrado ocasiona entalhes profundos, bem como o movimento de grandes massas de solo. Já para para Cooh (1995) a erosão de uma superfície é uma função das características do solo, quantidade de chuva, tipo de vegetação, forma da encosta, ventos e uso da terra.
Pejon (1998) enfatiza que os processos erosivos dependem de uma série de fatores naturais, tais como: clima, geomorfologia, natureza do terreno (substrato rochoso e tipo de solo) e cobertura vegetal. Estes fatores podem ser modificados pelo homem, gerando uma mudança nos processos erosivos de uma determinada região, geralmente intensificando-os.

Grande parte dos estudos de erosão dos solos é oriunda de trabalhos empíricos, nos quais vasta gama de dados sobre perda de solo e agentes controladores é coletada. As análises finais são baseadas em ponderações estatísticas dos fatores analisados, realidade de campo e experiências de especialistas da área. Em função disso, uma grande quantidade de variáveis são apontadas, nas diversas partes do mundo, como sendo significativas para explicar e predizer o processo erosivo.

2.2. CIÊNCIA DA INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

O termo *ciência da informação geográfica* (IG) foi cunhado em um artigo publicado por Michael Goodchild, em 1992. Nele, o autor argumenta diversas questões levantadas sobre o uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e seus usuários, concepções de SIG, dados e métodos. Longley *et al*. (2013) afirma que a ciência da informação estuda os temas fundamentais decorrentes da criação, manuseio, armazenamento e uso da informação. De modo similar, a ciência da informação geográfica deveria estudar os temas fundamentais decorrentes da informação geográfica, com uma classe bem definida da informação em geral. Outros termos têm o mesmo significado: *geoinformática, ciência da informação espacial* e *engenharia da geoinformação*. Todas sugerem uma abordagem científica para os temas fundamentais decorrentes do uso do SIG e tecnologias relacionadas. Assim, podemos dizer que temas relacionados ao tratamento de dados espaciais e localização geográfica constituem o domínio da ciência da informação geográfica. Definida por Longley *et al.* (2013) como sendo a "ciência da resolução de problemas", esse campo de rápido desenvolvimento preocupa-se com o contexto científico e com as bases dos sistemas de informação geográfica, fornecendo um quadro na quais novas evidências, conhecimentos e sabedoria sobre a Terra podem ser criados de modo eficiente, efetivo e para uso seguro.

No campo da IG, vários conceitos e definições estão associados ao uso de SIG, técnicas, ciências e ferramentas. A Figura 11 esquematiza, resumidamente, a associação entre eles.

2.2.1. GEOTECNOLOGIAS: DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS ASSOCIADOS

O avanço tecnológico que tem causado maior influência na pesquisa geográfica está relacionado ao advento das geotecnologias. Atualmente, o conceito de geotecnologias está associado ao somatório dos esforços de inúmeros setores que têm possibilitado a aproximação entre disciplinas

diversas relacionadas com a aquisição, o registro, a análise e a representação dos fenômenos geográficos através de informações espaciais.

De acordo com Rosas (2005) e Florenzano (2005) geotecnologias são o conjunto de ciências e ferramentas para coleta, processamento, análise e oferta de informações com referência geográfica. As geotecnologias são compostas por soluções em *hardware*, *software* e *peopleware* que juntos constituem poderosas ferramentas de análise. Matias (2001) conceitua as geotecnologias como um conjunto de tecnologias baseadas em ambiente computacional com finalidade de promover o tratamento da informação espacial. O autor as define como sendo todas as ciências e ferramentas envolvidas na Cartografia Digital, Sensoriamento Remoto, Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Sistemas de Posicionamento Global por Satélite (GPS), Geodésia e Topografia (Figura 11).

Druk (2004) aponta que, decorrente da convicção de que não é possível compreender perfeitamente os fenômenos ambientais sem analisar seus componentes, os estudos que utilizam as geotecnologias buscam sempre um ferramental que permita uma visão integrada do meio ambiente, atuando de forma interdisciplinar. Tais ferramentas podem produzir informações em pouco tempo e com baixo custo, combinando dados espaciais multi-fontes a fim de analisar as interações existentes entre as variáveis examinadas, elaborar modelos preventivos e dar suporte as tomadas de decisões (Longley *et al.*, 2013).

Em estudos capazes de subsidiar processos de licenciamento, controle, análise e monitoramento ambiental, vários autores discutem a utilização de sistemas de informações geográficas, técnicas de geoprocessamento (análise espacial), sensoriamento remoto (processamento digital de imagens) e o uso de GPS, enfatizando a capacidade de manuseio de dados espaciais em SIG´s, sua eficácia de análise e rapidez de processamento, contextualizando-os nas questões que contemplam os desafios de conciliar o desenvolvimento econômico à conservação do meio ambiente. Em Gajos e Sierka (2012), é possível encontrar uma revisão de alguns autores, na literatura internacional, responsáveis pela publicação de trabalhos com enfoque na relação entre estudos socioambientais e o uso de sistemas de informações geográficas.

Os subitens descritos a seguir referem-se aos conceitos básicos associados às geotecnologias mais aplicadas aos estudos de erosão e a eventos de risco associados, tais como: deslizamentos de terra, ocupações de em áreas de risco, movimentos de massa, etc. As associações entre os conceitos, duas definições e a organização do quadro foram definidas pela autora.

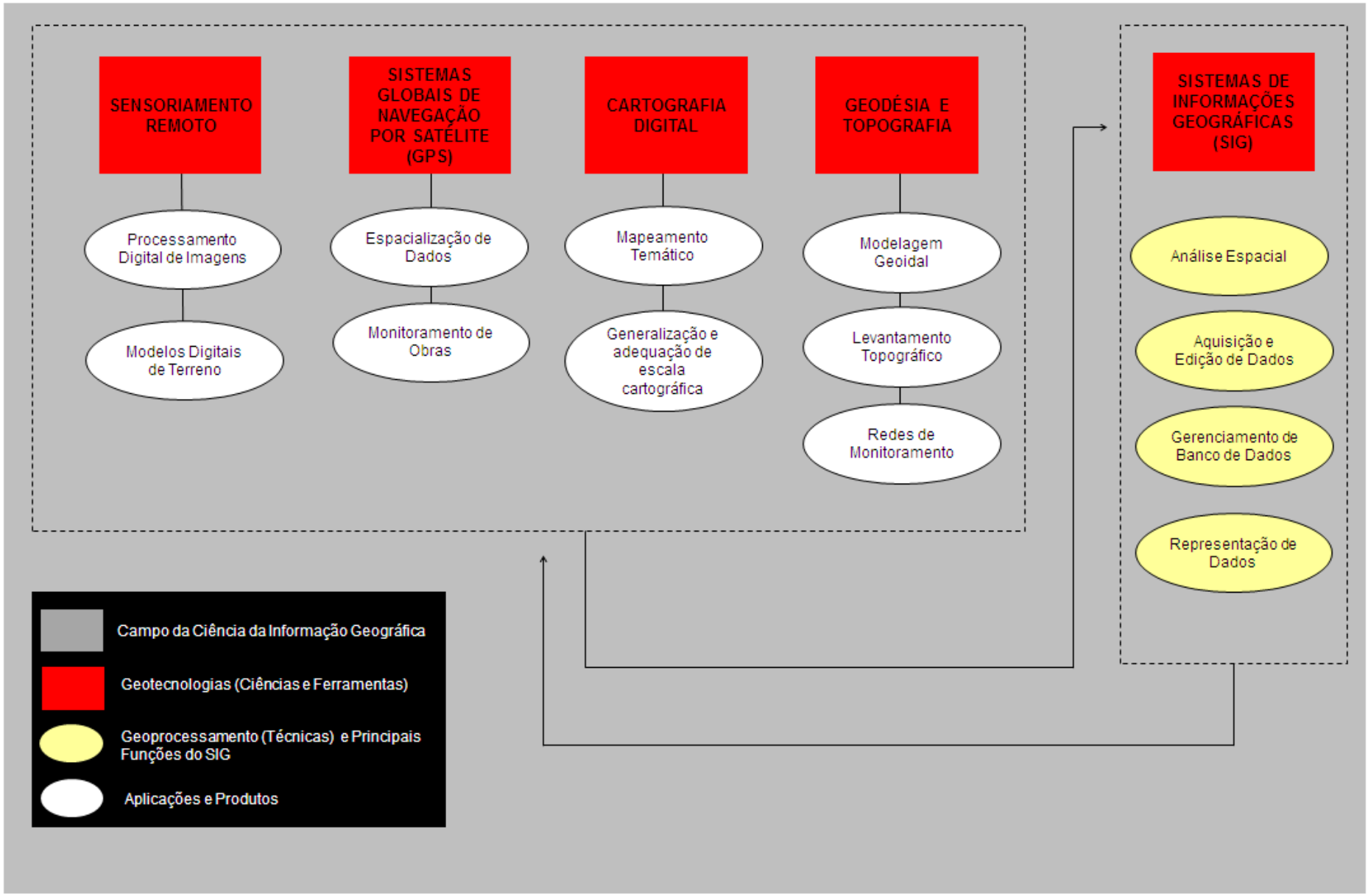


Figura 11. Esquematização de conceitos associados ao campo da Ciência da Informação Geográfica (IG). Fonte: Organizado pela autora

2.2.1.1. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Antes de se entender o que é um SIG é necessário conhecer a definição de alguns conceitos que são comumente utilizados pelos profissionais que trabalham com esta ferramenta (Teixeira *et al*. (1992):

- **Sistema** – Arranjo de entidades (elementos ou coisas) relacionadas ou conectadas, de tal forma que constituem uma unidade ou um todo organizado, com características próprias e subordinadas a processos de transformação conhecidos.
- **Entidades** – Elementos ou objetos tomados como unidades básicas para a coleta dos dados. Os dados relacionam-se com os atributos, que caracterizam e fornecem significado à unidade. Por exemplo: pode-se tomar um determinado lugar como entidade e as suas características de solo, relevo e uso da terra como alguns de seus atributos.
- **Dado** – Símbolo utilizado para a representação de fatos, conceitos ou instruções. São conjuntos de valores numéricos ou não, sem significado próprio.
- **Informação** – Conjunto de dados que possuem significado para determinado uso ou aplicação.
- **Informação Geográfica** – Conjunto de dados cujo conteúdo apresenta uma relação ou associação de natureza espacial. Tais dados podem ser apresentados de forma gráfica (pontos, linhas e polígonos), numérica (caracteres numéricos) ou alfa- numérica.

Nos exemplos citados, os SIG são como cadeias automatizadas de informações que partem de uma base de dados geográficos para realizar diferentes tipos de análises e obter resultados significativos do ponto de vista territorial. São formados por uma série de programas e processos cuja característica principal é focalizar o relacionamento de determinado fenômeno da realidade com sua localização espacial.

Marble (1984) define SIG como sendo sistemas voltados à aquisição, análise, armazenamento, manipulação e apresentação de informações referenciadas

espacialmente. Burrough (1986) afirma que os SIG´s constituem um conjunto de ferramentas para coleta, armazenamento, recuperação, transformação e exibição de dados espaciais do mundo real para um conjunto particular de propósitos. Dale e Mc Laughlin (1989) definem um Sistema de Informações Geográficas como sendo a combinação de recursos técnicos computacionais e humanos que, unidos a um conjunto de procedimentos organizacionais, é capaz de produzir informação para o auxílio de algum requerimento gerencial. Os SIG podem também ser definidos como sendo sistemas automatizados usados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la (Câmara *et al.,* 1996). Ainda para Câmara (2004), o termo SIG é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e armazenam as geometrias e os atributos dos dados que estão georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica.

Longley *et al.* (2013), em seu trabalho, aponta que muitas definições de SIG têm sido sugeridas ao longo dos anos e nenhuma delas é inteiramente satisfatória. Atualmente, o rótulo SIG está ligado a muitas coisas, incluindo uma coleção de ferramentas de softwares para realizar certas funções bem definidas (software de SIG); a representação digital de vários aspectos do mundo geográfico na forma de banco de dados (dados de SIG); uma comunidade de pessoas que usam e defendem o uso dessas ferramentas para vários propósitos (comunidade SIG). O simples rótulo funciona em todos esses modos e seu significado certamente depende do contexto no qual é usado. Certas definições de SIG (e o público para o qual ele pode ser útil) são sintetizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Diferentes definições de SIG e os grupos para os quais cada uma é mais apropriada. Fonte: LONGLEY *et al* (2013)

DEFINIÇÃO	GRUPOS
Um repositório de mapas em meio digital	O público em geral
Uma ferramenta computadorizada para resolver problemas geográficos	Tomadores de decisão, grupos sociais, planejadores
Um sistema de apoio à decisão espacial	Administradores, pesquisadores em gestão operacional
Um inventário mecanizado da distribuiçãi geográfica de feições e infraestrutura	Gestores de serviços públicos, técnicos de transportes, gestores de recursos
Uma ferramenta para mostrar o que, de outra forma, é invisível na informação geográfica	Cientistas, pesquisadores
Uma ferramenta para realizar operações sobre dados geográficos muito trabalhosas, caras ou sujeitas a erros se feitas manualmente	Gestores de recursos, planejadores

Atreladas a essas definições, as metas da resolução de problemas aplicados aos SIG incluem, embora não estejam restritas a (Longley *et al.,* 2013):

- Gerenciamento de operações espaciais como parte de uma estratégia corporativa por informação para a gestão;
- Alocação de recursos de forma racional, eficaz e eficiente de acordo com critérios pré-estabelecidos, como por exemplo, na construção de serviços públicos;
- Monitoramento e compreensão de da distribuição espacial de atributos diversos observados;
- Entendimento sobre a diferença que o faz o *lugar* – identificando quais características são similares entre lugares e o que distinto ou possivelmente único neles (padrão de distribuição);
- Compreensão dos processos em ambientes naturais: prescrição, modelos de previsibilidade e estratégias para conservação ambiental.

Nitidamente, a gama e complexidade dos princípios científicos e das técnicas empregadas na resolução de problemas variam entre as aplicações. Porém, embora com inúmeros conceitos e definição direcionados a diversos grupos de pessoas, no âmbito do domínio espacial, as funções atribuídas a um SIG são semelhantes e devem atender a requisitos básicos associados a necessidades de cada usuário. Em linhas gerais, podemos resumir tais funções em (Fitz, 2008):

- Aquisição e edição de dados;
- Gerenciamento de banco de dados;
- Análise espacial de dados; e
- Representação de dados

De acordo com Câmara *et al.* (2004), essas funções básicas e resumidas ajudam a definir também outro conceito bastante conhecido e diretamente ligado aos SIG: o termo geoprocessamento. Para os autores, os SIG´s nada mais são que os instrumentos e as ferramentas utilizadas para se aplicar as técnicas de geoprocessamento. Como completa Silva e Souza (1987), constitui o tipo de estrutura mais importante em termos de viabilização do geoprocessamento, sendo um conjunto de procedimentos computacionais que, operando sobre bases de dados geocodificados ou mais evoluidamente, sobre bancos de dados geográficos, executa análise, reformulações e sínteses sobre os dados ambientais disponíveis.

Nesse contexto, o termo geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais, em plataforma SIG, para o tratamento da informação geográfica.

A Figura 11 aponta as principais técnicas de geoprocessamento trabalhadas em ambiente SIG. A análise espacial, comum na aplicação de geoprocessamento para estudos de meio ambiente (álgebra de mapas, correlação espacial de áreas, composição de modelos de previsão e cenários, geração de indicadores socioeconômicos e ambientais, etc) pode ser definida como o estudo da distribuição espacial de qualquer fenômeno. Sua ênfase é mensurar propriedade e relacionamentos, levando em conta sua localização. Em suma, a idéia central é incorporar o espaço na análise que se deseja fazer

(Câmara, 2004). Para Longley *et al.* (2013) a análise espacial é, em muitos sentidos, o ponto crucial do SIG e do geoprocessamento, pois ela inclui todas as transformações, manipulações e métodos que podem ser aplicados aos dados geográficos para adicionar valor a eles, para apoiar decisões e para revelar padrões e anomalias que não são óbvios à primeira vista. Em outras palavras, análise espacial é o processo pelo qual transformamos dados brutos em informação útil na busca pela descoberta científica ou por uma tomada de decisão mais eficiente.

2.2.1.2. SENSORIAMENTO REMOTO E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

É comum, na literatura sobre geotecnologias, encontrar relação direta entre o uso de SIG e o tratamento e aquisição de imagens por meio do sensoriamento remoto, principalmente a partir das duas últimas décadas. Para Fitz (2008) a interpretação de imagens e sua classificação digital talvez se constituam na melhor tradução dessa interação entre as tecnologias citadas.

O conceito faz uso do termo “sensores”, os quais, dentro do contexto apresentado, podem ser entendidos como dispositivos capazes de captar a energia refletida ou emitida por uma superfície qualquer e registrá-la na forma de dados digitais diversos (imagens, gráficos, dados numéricos, etc). Estes, por sua vez, são passíveis de serem armazenados, manipulados e analisados por meio de *softwares* específicos.

Para Florenzano (2005), sensoriamento remoto é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados, da superfície terrestre, através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície terrestre. Lillesand *et al.* (2004) os define como a ciência e a arte de obtenção de informação de um objeto, de uma área ou de um fenômeno através da análise de dados adquiridos por dispositivos que não estão em contato com os elementos supracitados.

Em uma abordagem mais recente e completa, Novo (2008), trata a ciência do sensoriamento remoto como sendo a utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, colocados a bordo de aeronaves, espaçonaves ou outras plataformas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na

superfície do planeta Terra a partir do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias que o compõem em suas mais diversas manifestações.

Para Crosta (1999), um dos principais objetivos do sensoriamento remoto é o de identificar e distinguir as composições de diferentes materiais superficiais, sejam eles tipos de vegetação, padrões de uso do solo, rochas e outros. Essa distinção e identificação tornam-se possíveis devido ao fato de que os materiais superficiais apresentam comportamentos específicos ao longo do espectro eletromagnético, comportamentos estes que podem ser utilizados para identificá-los e classifica-los. Assim, sistemas e técnicas computacionais são utilizados para atividades interativas de análises, manipulação e classificação de imagens brutas. A esse procedimento dá-se o nome de processamento digital de imagens (PDI).

O processamento de uma imagem consiste em transformá-la sucessivamente com o objetivo de extrair mais facilmente a informação nela presente. O processo de classificação de imagens consiste na associação de cada *pixel* da imagem a uma determinada classe, correspondendo esta a um objeto real da área imageada. Cada *pixel* possui uma coordenada espacial x e y e um valor de *digital number* – DN, ou nível de cinza, que corresponde à radiância de um alvo no intervalo de comprimento de onda de uma banda spectral. O objeto identificado pode ser representado por um único pixel ou por um conjunto de *pixels* adjacentes, formando uma entidade geográfica (Beltrame, 2008). Como resultado final, tem-se um mapa temático com as diferentes classes de uso e cobertura do solo, o qual será posteriormente utilizado, de forma a compor uma base de dados de um SIG. Conforme Tso e Mather (2001), cada pixel possui um determinado padrão, sendo este constituído pela distribuição dos DNs nas várias bandas espectrais que compõem a imagem. A partir desta distribuição, pode-se representar os valores encontrados nas diferentes bandas num gráfico de “n” dimensões, cujo número de eixos iguala-se à quantidade de bandas da imagem, chamado espaço de atributos. A Figura 12 exemplifica um espaço de atributos, em que x1, x2 e x3 correspondem às três bandas, ou dimensões, de uma imagem e w1, w2 e w3 as classes identificadas.

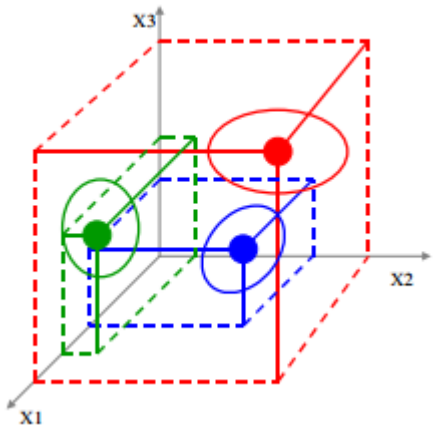


Figura 12. Representação das classes no espaço de atributos. Fonte: CROSTA, 1999

O gráfico resultante é denominado espaço de atributos, ou seja, representação gráfica das frequências de distribuição de intensidade das bandas de uma imagem multiespectral (Crosta, 1999). O processo de classificação consiste na divisão deste espaço de atributos em regiões homogêneas de acordo com critérios pré-definidos.

2.2.2.2 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DO USO DE GEOTECNOLOGIAS NO ESTUDO DE EROSÃO E EVENTOS DE RISCO ASSOCIADOS

Como dito anteriormente, no âmbito acadêmico, a grande maioria de trabalhos envolvendo o uso de geotecnologias em estudos que abordam a dinâmica do desenvolvimento de processos erosivos - e riscos associados - concentra-se na exploração de metodologias que contemplam, principalmente, a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, análise espacial e a utilização de sistemas globais de navegação por satélite em ambientes SIG. O uso combinado de informações espaciais e de geotecnologias possui grande eficiência, potencializa o mapeamento de áreas de risco e permitir a análise integrada da vulnerabilidade e da possibilidade de ocorrência de que outros eventos da mesma natureza aconteçam.

Especialmente na área de processamento digital de imagens, diversos trabalhos têm utilizado a grande diversidade de dados, especificidades dos satélites disponíveis e os avanços nas tecnologias de processamento digital de imagens para auxiliar no mapeamento e prevenção de fenômenos associados

à riscos ambientais (Hsieh *et al.,* 2014, Dong *et al*., 2014; Roessner *et al*., 2014).

Como exemplos gerais da utilização de geotecnologias no estudo de erosão e eventos de riscos, podemos citar as publicações de revistas internacionais renomadas como a *Natural Hazards*, *Applied Geography*, *Earthquake Spectra*, *Hydrological Sciences Journal, Natural Hazards Review*, *Geomorphology* e a *Flood Control*. Nestes materiais é possível identificar a produção técnico-científica direcionada ao desenvolvimento de modelagens, indicadores socioambientais e métodos orientados à discussão e solução das problemáticas relacionadas aos fenômenos de riscos ambientais mais frequentes e associados ao desenvolvimento de processos erosivos, tais como: deslizamentos de terra, o controle de enchentes e áreas alagáveis, o adensamento e ocupação de populações em áreas inapropriadas, etc.

Em um dos exemplos, L. Ai e Shi (2013), realizam a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e análise espacial em plataforma SIG através de uma metodologia nomeada de “árvore difusa de decisão” (FDT) em que variáveis ambientais foram ponderadas através de análises baseadas nas chamadas *erosion response units*. Tal pesquisa alerta sobre a necessidade do desenvolvimento de metodologias de análise da suscetibilidade ambiental em grandes áreas, enfatizando a dificuldade de transposição dos modelos ambientais de predição de perdas de solo para outras regiões que não as mesmas testadas na área de estudo selecionada. Ainda, como justificativa da pesquisa, também são questionados a necessidade da grande quantidade de dados de entrada para aferição de modelos quantitativos, uma vez que modelos qualitativos, de acordo com os autores, traduzem-se em métodos simplificados e altamente eficientes, capazes de facilitar a investigação sobre mecanismos físicos responsáveis pelo processo erosivo. Além disso, tais modelos possibilitam manuseio de quantidades menores de informações mesmo se tratando de áreas tão extensas. Como resultado, é proposta uma metodologia concisa de análise de suscetibilidade do meio ambiente de uma região central da China, capaz de refletir a heterogeneidade de características dos solos e a complexa sinergia existente entre as variáveis ambientais avaliadas. O método, além de utilizar de técnicas ainda pouco exploradas para medição de índices qualitativos de suscetibilidade ambiental, contou com a

validação do modelo e indicadores de acurácia de 76%. Nesse caso, especificamente, os dados de entrada como topografia, solos e cobertura vegetal apresentavam escalas e resoluções que poderiam, se talvez melhorados, garantir melhores resultados obtidos.

Lee *et al.* (2004) utilizaram fotografias aerofotogramétricas para a identificação de cicatrizes de deslizamento na Coréia do Sul. Além da cobertura do solo informações sobre o relevo, tipo de solo e geologia foram utilizadas e processadas em ambiente SIG. Os autores encontraram grande similaridade entre os resultados obtidos com o uso de geotecnologias e os dados existentes para cicatrizes de deslizamentos na região.

Spörl (2004 e 2007) discute, em um primeiro momento, duas consagradas metodologias de suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos já citadas anteriormente. Dos três modelos metodológicos aplicados, dois foram propostos por Ross (1994), um com apoio nos Índices de Dissecação do Relevo, e o outro nas Classes de Declividade. O terceiro modelo foi proposto por Crepani *et al.* (2001) baseado nas Unidades Territoriais Básicas - UTB´s. As áreas de estudo são caracterizadas por diversos atributos: rochas, relevo, solo, cobertura vegetal/uso da terra e pluviosidade e os mapeamentos identificam e analisam os ambientes em função de seus diferentes níveis de fragilidade. No entanto, estes modelos apresentam diferenças na operacionalização dos métodos, e também nas variáveis analisadas. Destas divergências resultam três mapeamentos diferenciados. Tais diferenças são discutidas pela autora apenas do ponto de vista das ponderações consideradas e dos procedimentos metodológicos e variáveis utilizados na elaboração de cada um. Ou seja, nenhum dos três modelos discutidos é validado a partir de registros de processos erosivos obtidos em campo, o que, de certa forma, limita as análises referentes as suas aplicabilidades. Ancorada na necessidade de considerar a reengenharia de modelos existentes através da Computação Inteligente, e a fim de explorar a não-linearidade, adaptabilidade e incerteza desses modelos, Spörl (2007) desenvolve, na sequência, uma nova metodologia para a elaboração de modelo de suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos aplicando-se técnicas de Inteligência Artificial (redes neurais artificiais - RNAs), buscando a minimização das limitações apresentadas nos modelos já discutidos anteriormente. Os

resultados comprovam a expectativa inicial de que é possível emular, com razoável confiabilidade, o padrão de avaliação de especialistas na definição da suscetibilidade dos sistemas ambientais, ou seja, houve eficiência da RNA em reconhecer o padrão de avaliação adotado.

É comum também a análise da suscetibilidade de terrenos para eventos decorrentes do desenvolvimento de processos erosivos intensos, como é o caso dos deslizamentos de terra. Em Mantovani *et al.* (1996) é apresentado um inventário de técnicas de sensoriamento remoto para estudos de suscetibilidade de terrenos utilizadas em zoneamento de risco de deslizamento de terra oriundos do agravamento de processos erosivos urbanos nos países da Comunidade Européia. Os autores revisam um panorama da aplicabilidade do sensoriamento remoto nas seguintes fases de estudos de deslizamento: detecção e classificação de deslizamentos de terra (ênfase especial é dada aos tipos de imagens necessárias em diferentes escalas de análise), acompanhamento dos processos de deslizamentos de terra existentes usando GPS, técnicas de fotogrametria, interferometria radar e análise e previsão no espaço e no tempo de desabamentos. Pradahn *et al.* (2011) enfatiza o risco de deslizamento de terras na porção sul da Ilha de Penang, na Malásia, também utilizando técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas. De acordo com os autores, é recente, na literatura, o uso de modelos probabilísticos na análise risco de deslizamentos de terra associados ao desenvolvimento de erosões aceleradas. A proposta dos autores foi oferecer o desenvolvimento de uma metodologia baseada em um modelo de "relação de freqüência" (*frequency ratio model*). As abordagens de relação de freqüência são baseadas na observação da distribuição de cada ponto de deslizamento de terra e cada fator relacionado ao deslizamento (erosões, ocupações irregulares, etc), de forma a revelar a correlação entre a ocorrência de deslizamentos e os fatores envolvidos. Tais correlações foram cruzadas com características socioeconômicas e estruturais da área de estudo, como demografia e sistemas de transporte. A metodologia proposta revelou uma exatidão de 89%. A utilização de imagens de alta resolução aliada às técnicas de aerofotogrametria foram decisivas tanto para diferenciar o método proposto de outros parecidos quanto para adequar a precisão do modelo testado.

Em um dossiê sobre as principais contribuições de trabalhos e relatórios técnicos relacionados ao estudo de erosão no Estado de SP nas últimas décadas, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2013) destaca o uso geotecnologias nos procedimentos metodológicos dessas aplicações. Como exemplo, são citados diversos autores na área de engenharia civil, mapeamento geotécnico e cartografia de risco. Em alguns dos exemplos, compondo o Projeto "Base de Dados Geoambientais em Sistema de Informações Geográficas - SIG, como subsídio ao desenvolvimento da Hidrovia Tietê - Paraná", Diniz *et al.* (2001) desenvolve uma metodologia de mapeamento temático que compreendeu a interpretação de imagens de satélite, investigação de campo e integração de dados em Sistema de Informações Geográficas. Dentre os diversos aspectos analisados (uso do solo, infraestrutura, unidades de conservação e meio físico), os processos de erosão e assoreamento foram considerados relevantes, na avaliação de 14 áreas quanto aos seus limites e ao potencial do meio físico, para uso do solo, especialmente os portos intermodais. Também utilizando recursos de geoprocessamento, Fujihara (2002) testou quatro modelos de predição do risco de erosão e capacidade de uso da terra: Risco de Erosão Natural, Risco de Erosão Simulado, Expectativa de Erosão e Capacidade de Uso da Terra. Esses modelos permitiram diagnosticar as áreas potenciais e restritas ao uso agrícola em uma microbacia hidrográfica localizada na região do Oeste Paulista. Foram definidos 33 setores para identificar e classificar as áreas mais críticas da microbacia. Observou-se o predomínio das classes de risco de erosão natural de moderado a alto em 65,7% da área (3.649,2ha). Para condições simuladas de pastagem degradada, a área da microbacia que apresentou perda de solo em níveis toleráveis corresponde a 65,4% da área (3.634,6ha) para fator topográfico (LS) obtido pelo método das rampas e 83,1% (4.623,2ha) para o método automatizado. A estimativa de perda de solo média anual por setor variou de 7 a 40 toneladas por hectare para as condições simuladas e considerando-se os valores de LS do método automatizado. O uso com pastagem e reflorestamento foi indicado como o mais adequado para 90,1% (5.022,7ha) da microbacia. Já pelo modelo de Capacidade de Uso da Terra de 0,3% (16,0ha) da área total foram recomendados para fins de preservação da vida silvestre. O modelo de risco de erosão simulado, utilizando valores de LS

automatizado, foi o que apresentou a melhor correlação visual com os processos erosivos levantados na microbacia com equipamento GPS. A ocorrência de erosões lineares (sulcos, ravinas e voçorocas) foi relacionada ao caminhamento do gado e dimensionamento incorreto dos terraços, que intensificaram os efeitos erosivos da concentração do escoamento superficial. Galiano e Lorandi (2001) apresentam os resultados de estudos na área de expansão urbana da cidade de Porto Ferreira (SP), relacionados com a possível ocorrência e avaliação dos processos erosivos sob condições geológicas naturais. A análise dos dados de laboratório possibilitou classificar áreas homogêneas em termos desse fenômeno exógeno. Como produto final foi confeccionado uma Carta de Risco Potencial à Erosão Acelerada dessa área, usando sistema de informações geográficas.

Ribeiro (2002) criou um banco de dados com informações cadastrais, caracterizando regiões quanto à erosão, tipo de solo, geologia, entre outros, utilizando o Software SPRING, e elaborou um mapa temático de suscetibilidade natural à erosão para possibilitar um futuro zoneamento ecológico da área do Alto Rio Pardo – Botucatu (SP). A partir das informações obtidas sobre a área de estudo nesse trabalho, foi gerada uma tabela cadastral, que foi utilizada como um cadastro espacial inteligente do banco de dados. De acordo com os resultados obtidos nessa pesquisa, 95% da área total apresenta grau de vulnerabilidade classificado como medianamente e moderadamente estável, devido à presença de solos de relativamente jovens (pouco desenvolvido), em relevo suave ondulado (declividade de 5 a 20%) e coberto na maior parte por pastagem e cultura anual nas unidades de paisagem. Além disso, a região de estudo apresenta mais de 3/4 da sua área com grau de vulnerabilidade moderadamente estável. Como último exemplo, o Instituto Geológico da Secretaria Estadual de Meio Ambiente de São Paulo (IG-SMA) por meio do PROJETO SIIGAL (2005) desenvolveu um Sistema Integrador de Informações Geoambientais (SIIGAL) a partir de uma parceria entre várias instituições estaduais. Foram elaborados planos de informação cartográfica georeferenciados contendo milhares de informações em bancos de dados (Produtos Básicos), que permitirão diagnósticos e prognósticos sobre o meio físico (Produtos Intermediários e Finais), com ênfase em problemas geoambientais como: situações de risco a movimentos de massa, inundação,

erosão costeira, poluição e contaminação de águas, solos e ar; áreas degradadas por processos geológicos, mineração e poluição por disposição de resíduos líquidos e sólidos; áreas com suporte ambiental crítico. Esse sistema, inédito para o litoral brasileiro, deverá ser alimentado a partir de informações geológicas, geomorfológicas, geotécnicas, oceanográficas, climatológicas, hidrogeológicas, de uso e ocupação do solo, legislação ambiental e sobre poluição e contaminação de solos, águas superficiais e subterrâneas e ar. Os resultados obtidos no SIIGAL serão disponibilizados para os usuários por intermédio de meios de comunicação gráfica e digital, inclusive via internet. A área de estudo do SIIGAL compreende 18 municípios, 16 dos quais são litorâneos e 2 pertencentes ao baixo Vale do Rio Ribeira de Iguape. Embora a área de estudo do SIIGAL, originalmente previa 18 municípios costeiros, foi escolhida como área piloto o Litoral Norte, que compreende os municípios de Ubatuba, Caraguatatuba, São Sebastião e Ilhabela.

Pradhan e Lee (2010) apresentam a utilização de redes neurais artificiais, regressão logística e análise frequência para a análise de estudos da paisagem e riscos ambientais (*"landslide hazards").* Dados de topografia, dados geológicos e imagens de satélite foram coletados, processados e manuseados em um banco de dados espaciais utilizando SIG e técnicas de sensoriamento remoto. Para testar os modelos gerados, alguns dados de deslizamentos de terra e erosões foram utilizados. Os autores também utilizaram a técnica das redes neurais artificiais para a ponderação da significância das variáveis consideradas na confecção dos mapeamentos de risco. A comparação entre o mapeamento de risco e deslizamentos de terra utilizando os métodos de análise multivariada de dados citadas mostrou maior eficiência das redes neurais artificiais em relação às outras. Os resultados da validação apresentou concordância suficiente entre os mapas de suscetibilidade gerados e os dados existentes em áreas de deslizamento de terra. Oh e Pradhan (2011) apresentam um método de mapeamento de risco de deslizamento de terra e suscetibilidade à erosão utilizando um sistema adaptativo neuro-fuzzy de inferência (ANFIS) em plataforma SIG. Os locais de deslizamentos já ocorridos da área de estudo foram identificados através da interpretação de fotografias aéreas e conferidos em campo. Dados de altitude, ângulo de declividade, curvatura, distância da rede de drenagem, distância das rodovias e tipos de

solo foram extraídos de Modelos Digitais de Terreno e mapeamentos pedológicos. Os resultados da classificação do modelo gerado revelaram que os mapas de suscetibilidade construídos pelos modelos preditivos ANFIS produziram resultados razoáveis (84,39%) que podem ser usados para o planejamento preliminar do uso da terra. Por fim, os autores concluíram que ANFIS é uma ferramenta muito útil e eficaz em uma avaliação regional de deslizamento de terra.

Pourghasemi *et al.* (2012) testaram modelos de mapeamento de suscetibilidade ambiental para áreas de alto risco no Irã através da comparação da aplicação de lógica fuzzy *(fuzzy logic)* e análise hierárquica de pesos *(AHP - analytical hierarchy process)* em SIG. Tais métodos são comumente utilizados em abordagens que envolvem a análise de grande número de variáveis, de forma que o processo de mapeamento exige a ponderação dos dados analisados. O procedimento baseia-se na definição do grau de pertinência de cada plano de informação e de cada um de seus atributos para a construção do resultado final. Para este caso, os resultados da verificação mostraram que o modelo de lógica fuzzy (89,7%) teve melhor desempenho do que AHP (81,1%). Devvkota *et al*. (2013) apresentam uma aplicação de técnicas de análise de dados bivariada (fator de segurança e índice de entropia) e multivariada (regressão logística) para geração de mapas de suscetibilidade ambiental na estrada de Mugling – Narayanghat, no Nepal. Os modelos foram manuseados em ambiente SIG e validados a partir de amostras coletadas em campo e de fotografias aéreas. Dos três modelos gerados, o mapeamento utilizando o índice de entropia mostrou-se mais preciso em relação aos mapas oriundos da aplicação de regressão logística e fator de segurança.

Por fim, como exemplos aplicados envolvendo gestão e monitoramento específicos para a área de engenharia e sistemas de transportes, Miller *et al.,* (2012) discute a instabilidade de taludes em rodovias e ferrovias, enfatizando os riscos associados à abertura de áreas de aterros e cortes relacionados à ocorrência de movimentos de massa. Aterros e cortes são parte integrante de redes rodoviárias e ferroviárias, mas pode ser propenso a instabilidade, necessitando de um acompanhamento rigoroso e contínuo. De acordo com os autores, até o momento, o potencial do sensoriamento remoto para a avaliação

de risco terraplenagem tem sido largamente ignorado. No entanto, técnicas como a varredura a laser aerotransportado (ALS) estão agora mais consolidados para enfrentar estes desafios. A pesquisa apresenta uma estratégia de avaliação de risco, combinando sensoriamento remoto de alta resolução e uma abordagem de modelagem numérica implementada em uma área teste com presença de ferrovias localizada no norte da Inglaterra, Reino Unido. Os dados da varredura a laser e das imagens aéreas multiespectrais facilitaram a determinação de estabilidade de taludes que foram então usados para parametrizar um modelo hidrológico-geotécnico associado, a fim de simular o comportamento do talude sob climas atuais e futuros. Um conjunto de ferramentas de software foram desenvolvidos para integrar os elementos fundamentais da metodologia e determinar a resultante "inclinação-perigo-falha" que poderia, então, ser mapeados e consultados em um ambiente de sistema de informação geográfica. A abordagem desenvolvida proporciona um método eficaz e viável para quantificar remotamente risco de ruptura do talude em escalas espaciais (0,5 m) e para a priorização e reduzindo inspeção no local.

Em Tien Bui *et al.* (2014) foram aplicadas análises de árvore de decisão e um conjunto técnicas de avaliação de suscetibilidade e deslizamento de terra ao longo da Estrada Nacional 32 do Vietnã. Com dados pré-processados em ambiente SIG, três modelos de suscetibilidade foram processados e testados com algoritmos de árvores de decisão, a fim de analisar qual apresentava a melhor capacidade de previsão de deslizamentos e, consequentemente, processos erosivos. Para análise dos resultados, foram utilizados dados coletados, na área de estudo, de onde ocorreram tais eventos. A comparação entre os modelos gerados e a aplicação das técnicas de árvore de decisão apontou diferenças das capacidades de previsão e os resultados foram satisfatórios em relação a trabalhos já desenvolvidos, tais como Saito *et al.* (2009) e Tien Bui *et al*. (2012).

Por fim, Em Manfré (2015) é possível encontrar o desenvolvimento de metodologias de processamento digital de dados de sensoriamento remoto para a identificação de cicatrizes de deslizamentos adjacentes a rodovias, contemplando variáveis do relevo e da cobertura do solo. Com o uso integrado de sistemas de informações geográficas (SIG), processamento digital de

imagens e outros produtos oriundos do sensoriamento remoto, o autor aponta métodos eficazes para detalhamento do relevo na identificação de áreas potenciais de deslizamentos e de risco para outros desastres naturais.

2.3. ESTUDOS DE EROSÃO: ORIGENS TEÓRICAS – METODOLÓGICAS E TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RISCO E SUSCETIBILIDADE

2.3.1. A CIÊNCIA DA VULNERABILIDADE – BASE CONCEITUAL E METODOLÓGICA PARA ESTUDOS DE RISCOS AMBIENTAIS

Os estudos sobre riscos já têm uma longa tradição em diferentes ciências. Partindo de um contexto de estudos empíricos e circunscritos espaço-temporalmente, pesquisadores de áreas como Geografia, Ciências da Saúde, Ciências Sociais, Demografia, Ciências da Terra, Psicologia, Engenharia e Economia, têm enfatizado, com diferentes níveis de subjetivismo, as relações entre fatores de risco e a probabilidade de ocorrência de certos fenômenos. Especificamente à partir da década de 70, tais estudos têm recebido atenção redobrada, ampliando suas inserções na ciência, no debate político e na sociedade civil. O risco, juntamente com a vulnerabilidade, entraram no jargão científico, midiático e sociopolítico. De acordo com Marandola Jr. e Hogan (2004), o conceito de vulnerabilidade têm sido, inclusive, uma *idée force* que têm motivado estudos sobre pobreza e exclusão social, sendo as diferentes concepções e índices muito propalados, mostrando assim sua vinculação direta, neste cenário, com a questão social.

Uma análise detalhada sobre a evolução do tema e o contexto relacionado à inserção do conceito, em diferentes abordagens, escalas e áreas do conhecimento é tratada por Almeida (2010), Marandola Jr. E Hogan (2004 e 2006) e Cutter (2003) que enfatizam a relação entre a chegada da década de 1980 e emergência da Ciência da Vulnerabilidade. Segundo Cutter (2011), a Ciência da Vulnerabilidade consiste na integração multidisciplinar das ciências sociais, ciências naturais e das engenharias na compreensão das circunstâncias que colocam as populações e os locais em risco devido aos perigos, e dos fatores que aumentam ou reduzem a capacidade de resposta e de recuperação das populações, dos sistemas físicos ou das infraestruturas em

relação a ameaças ambientais. Na definição da autora, em particular, a Ciência da Vulnerabilidade procura analisar os fatores que influenciam as capacidades locais na preparação para resposta e recuperação de desastres, examinando de forma comparativa os vários padrões daí resultantes.

As condições naturais ou ambientais que ajudam a compreender a exposição ao risco têm por base, geralmente, informações provenientes das ciências naturais (Cutter, 2011). No campo das Ciências Ambientais e na Engenharia, a Ciência da Vulnerabilidade pode contribuir para o entendimento das circunstâncias e das condicionantes que reduzem a habilidade com que as pessoas e os lugares respondem às ameaças ambientais. Definida *grosso modo* como o potencial de perda de um sistema, a abordagem da fragilidade do meio ambiente no campo da ciência da vulnerabilidade tornou-se essencial nos estudos de riscos e perigos, e central para o desenvolvimento de estratégias de redução e mitigação das consequências dos desastres naturais e degradação ambiental nas diversas escalas de análise (Almeida, 2010).

De acordo com Almeida (2010), o crescimento das desigualdades sociais, da pobreza e da segregação sócio-espacial advinda com o trinômio capitalismo-industrialização-urbanização, em correlação com a conseqüente degradação do ambiente nas suas diversas facetas, fez surgir uma abordagem teórico-metodológica que procurou enfocar os desastres do ponto de vista não apenas de seus fatores físicos desencadeantes, mas com embasamento no prisma das populações e lugares atingidas e/ou ameaçados.

Na literatura, pode-se observar a concentração dos estudos referentes à ciência da vulnerabilidade em três áreas temáticas principais: as contradições e confusões no significado e definição do termo, a sua medição e as causas das resultantes espaciais associadas às análises realizadas. Embora nas últimas décadas tenha ocorrido um crescente avanço técnico-científico em relação à área de conhecimento sobre riscos naturais, a terminologia usualmente empregada pelos profissionais que atuam com o tema ainda encontra algumas variações e divergências em sua definição. Neste trabalho, adotou-se a terminologia definida em Ministério das Cidades (2006), assim descrita:

- ***evento:*** fenômeno com características, dimensões e localização geográfica registrada no tempo, sem causar danos econômicos e/ou sociais;

- ***perigo (Harzard):*** condição ou fenômeno com potencial para causar uma consequência desagradável;

- ***suscetibilidad*e:** indica a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma dada área, expressando-se segundo classes de probabilidade ou níveis de ocorrência;

- ***vulnerabilidade:*** grau de perda para um dado elemento, grupo ou comunidade dentro de uma determinada área passível de ser afetada por um fenômeno ou processo;

- ***risco:*** relação entre a possibilidade de ocorrência de um processo ou fenômeno e a magnitude de danos ou consequências sociais e /ou econômicas sobre um dado elemento, grupo ou comunidade. Quanto maior a vulnerabilidade, maior o risco;

- ***área de risco:*** área passível de ser atingida por fenômenos ou processos naturais e/ou induzidos que causem efeito adverso. As pessoas que habitam essas áreas estão sujeitas a danos à integridade física, perdas materiais e patrimoniais.

2.3.2. TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RISCO E SUSCETIBILIDADE À EROSÃO

As técnicas de análise para os estudos de risco e da dinâmica de desenvolvimento de processos erosivos constituem-se em instrumentos metodológicos que representam, através de um indiciador sintético, a tentativa de mensuração dos graus de suscetibilidade das variáveis ambientais, das características de ocupação da área de estudo e dos riscos oferecidos ao meio, associados ao desenvolvimento desses processos.

Baseado em Spörl (2007), podemos afirmar que os estudos de erosão realizam-se através do emprego de modelos ambientais. De acordo com a autora, modelos ambientais são representações criadas para simular fenômenos ou processos que ocorrem no meio ambiente. São formas simplificadas da realidade para facilitar a descrição, a compreensão do funcionamento atual e do desempenho futuro de um sistema. Como completa

Moore (1993), os modelos são usados para aumentar o conhecimento sobre um fenômeno, predizer valores ou comportamentos em áreas não observadas e comprovar, ou não, hipóteses feitas sobre as observações. Em outras palavras, são métodos limitados de representação e compreensão da natureza. Tais metodologias foram desenvolvidas para subsidiar o planejamento com pressupostos para o desenvolvimento econômico e a conservação do meio ambiente. Ainda de acordo com Spörl (2007), é importante detectar os lugares em que a erosão apresenta-se em estágio mais avançado, visando definir medidas de correção e proteção ao meio, determinar as zonas mais sensíveis ao se planejar uma mudança de uso do solo e detectar os lugares em que o fenômeno erosivo é ou pode ser mais ofensivo. Torna-se relevante, portanto, dimensionar nos estudos a erosão atual (erosão que existe num determinado lugar e oferece riscos, no momento presente) e a erosão potencial (suscetibilidade à erosão).

Com origens nas concepções abordadas pela intitulada Ciência da Vulnerabilidade (Figura 13), os estudos relativos às analises de risco e da dinâmica de desenvolvimento e ocorrência de processos erosivos estão inseridos nas abordagens ambientais teorizadas como Análise Integrada da Paisagem (Tricart, 1974; Ross, 1994 e 1995; Crepani, 2001) e nas análises de riscos e suscetibilidades (*hazard*) subsidiada pela Cartografia Geotécnica e Geoambiental (Diniz, 2010; Zuquette, 1998 e Pejon, 1998). Ambas apresentam técnicas diversas de análise de risco e de suscetibilidade para estudos de erosão. Seus principais conceitos e métodos de destaque estão descritos nos subitens que seguem.

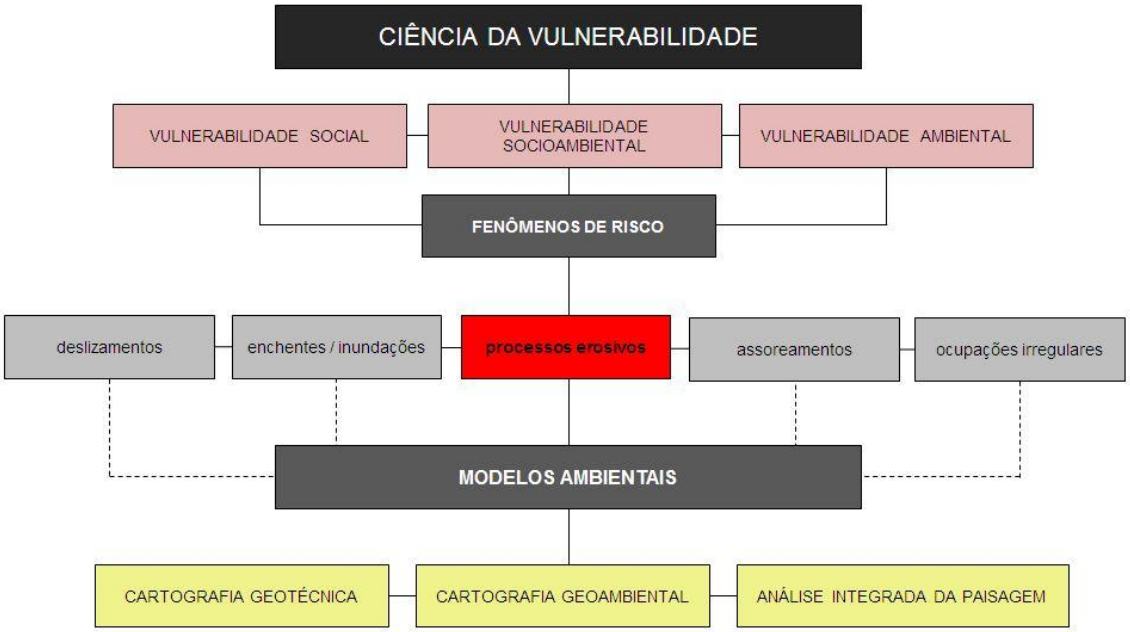


Figura 13. Bases e origens teóricas dos estudos de análise de risco (erosão). Fonte: organizado pela autora

2.3.2.1. ANÁLISE INTEGRADA DA PAISAGEM

A *Análise Integrada da Natureza* é uma abordagem sistêmica que visa à compreensão do ambiente físico e dos processos antrópicos, de forma simultânea. A degradação decorrente das modificações ambientais induzidas pelo homem no processo de utilização dos recursos naturais é inúmera e está relacionada, principalmente, com ocupações desordenadas, retirada da cobertura vegetal das encostas, exploração agrícola em áreas de instabilidade ambiental, desmatamento indiscriminado, mineração, abertura de sistemas de transportes, entre outros. Sendo assim, além dos aspectos e condicionantes naturais, a intervenção humana é parte fundamental no entendimento da paisagem e suas alterações. Segundo Bertrand (1971) a paisagem não é a simples adição de elementos geográficos disparatados. É, em uma determinada porção do espaço, o resultado da combinação dinâmica, portanto instável, de elementos físicos, biológicos e antrópicos que, reagindo dialeticamente uns sobre os outros, fazem da paisagem um conjunto único e indissociável, em perpétua evolução.

Os sistemas ambientais naturais, face às intervenções humanas, apresentam maior ou menor vulnerabilidade e correm mais ou menos risco em função de suas características genéticas. A princípio, salvo em algumas regiões do planeta, os ambientes naturais mostram-se ou mostravam-se em estado de equilíbrio dinâmico, até que as sociedades humanas passaram progressivamente a intervir cada vez mais intensamente na apropriação dos recursos naturais. As condições de estabilidade/equilíbrio do sistema podem ser rompidas através de alterações realizadas em qualquer um dos componentes da natureza, gerando instabilidade. Qualquer intervenção realizada, não respeitando as fragilidades do sistema, pode acarretar alterações na sensibilidade da paisagem em função do rompimento de seus limiares, resultando então em sua fragilização (Ross, 1995).

De acordo com Spörl (2007), a vulnerabilidade ambiental está ligada à suscetibilidade do sistema de sofrer intervenções, ou de ser alterado. Quando é quebrado o estado de equilíbrio dinâmico, o sistema pode entrar em colapso, passando para uma situação de risco. A maior ou menor facilidade com que este limiar pode ser rompido depende tanto das características genéticas dos sistemas ambientais quanto do uso que se faz da terra. A partir da observação destas variáveis, o ambiente pode ser classificado em diferentes níveis de vulnerabilidade. Dessa forma, os termos vulnerabilidade do meio ambiente podem aparecer relacionados aos ambientes de risco, ou risco ambiental, os quais podem ser definidos como perigo e possibilidade de perigo ou perda. Dentre os fenômenos de risco mais freqüentes abordados pela Análise Integrada da Paisagem destacam-se as erosões e a evolução/desenvolvimento/monitoramento de processos erosivos, os deslizamentos de encostas, o assoreamento de cursos de água e as inundações (Figura 13).

Nessa abordagem, destacam-se os modelos empíricos propostos por Ross (1994), com base nos Índices de Dissecação do Relevo e nas Classes de Declividade, e por Crepani *et al.* (2001), com base em Unidades Territoriais Básicas (Spörl, 2007), ambos apresentando como ponto comum o

entendimento da inter-relação dos elementos do meio físico baseados no conceito de Ecodinâmica de Tricart[3] (1977).

Em Crepani (2001), diversos atributos do meio físico (considerados como sendo principais agentes desencadeadores de processos erosivos) são avaliados segundo suas características propícias a manutenção de um equilíbrio dinâmico entre processos de pedogênese (formação de solos) e processos de saída de locomoção de sedimentos (morfogênese). Os critérios desenvolvidos pelo autor permitiram a criação de um modelo no qual se buscou a avaliação, de forma relativa e empírica, do estágio de evolução morfodinâmica do terreno. Desse modo, os valores de estabilidade foram atribuídos às categorias morfodinâmicas. Nessa análise, são atribuídas 3 classes de suscetibilidade à erosão (alta, média e baixa suscetibilidade), distribuídas entre as situações em que há o predomínio dos processos de pedogênese (valores próximos a 1,0), passando por situações intermediárias (valores ao redor de 2,0) e situações de predomínio dos processos de morfogênese (valores próximos a 3,0).

Em Ross (1994), para se obter um panorama das condições de susceptibilidade do sistema é necessário realizar um estudo integrado dos elementos componentes do estrato geográfico que dão suporte à vida animal e ao homem, os quais analisados e interrelacionados geram um produto analítico-sintético que retrata a situação da área de estudo em relação ao desenvolvimento de processos erosivos. Esta análise integrada permite obter um diagnóstico das diferentes categorias hierárquicas da fragilidade dos ambientes naturais, resultando na carta síntese de fragilidade ambiental, que constitui um dos produtos síntese e representa a contribuição oferecida, pelo meio físico, à ocupação racional do território para identificação de áreas de risco. O autor inseriu novos critérios para definir as Unidades Ecodinâmicas Estáveis e Unidades Ecodinâmicas Instáveis. Essas últimas foram definidas como sendo aquelas cujas intervenções humanas modificaram intensamente os ambientes naturais, através dos desmatamentos e práticas de atividades

[3] Dentro dessa concepção ecológica o ambiente é analisado sob o prisma da Teoria dos Sistemas que parte do pressuposto de que na natureza as trocas de energia e matéria se processam através de relações de equilíbrio dinâmico. Esse equilíbrio, entretanto, é frequentemente alterado pelas intervenções do homem nas diversas componentes da natureza, gerando estados de desequilíbrios temporários, ou até permanentes. Diante disso Tricart (1977) definiu que os ambientes, quando estão em equilíbrio dinâmico, são estáveis, quando em desequilíbrio são instáveis.

econômicas diversas, enquanto as primeiras são aquelas que estão em equilíbrio dinâmico e foram poupadas da ação humana, encontrando-se, portanto, em seu estado natural. Para que estes conceitos pudessem ser utilizados como subsídios aos estudos de planejamento e gestão ambiental, o autor ampliou o uso destes termos, estabelecendo as Unidades Ecodinâmicas Instáveis ou de Instabilidade Emergente em vários graus, desde instabilidade muito fraca até muito forte. O mesmo critério foi aplicado às Unidades Ecodinâmicas Estáveis, que apesar de estarem em equilíbrio dinâmico apresentam-se como áreas de instabilidade potencial em diferentes graus, desde muito fraca a muito forte (ambas variando de 1 a 5 na classificação sugerida). Para esse modelo, as características relacionadas às formas de dissecação do relevo ou classes de declividade (as características geomorfológicas são analisadas de acordo com a escala de detalhe utilizada) é que são determinantes na condição de vulnerabilidade da área analisada.

2.3.2.2. CARTOGRAFIA GEOAMBIENTAL E GEOTÉCNICA

A cartografia geotécnica e geoambiental podem ser consideradas genericamente como a técnica de integração, síntese e representação de informações temáticas da área de geologia de engenharia e geologia ambiental voltadas para o planejamento e gestão ambiental urbana e territorial que permite a formulação de modelos de previsibilidade do comportamento dos terrenos e o estudo de soluções para problemas decorrentes da intervenção antrópica sobre o meio físico, como é o caso do surgimento de processos erosivos. Segundo suas finalidades, ambas podem ser aplicadas aos planejamentos urbano e territorial, onde estariam as cartas de aptidão urbana; à suscetibilidade e riscos geológicos *(hazard)* a processos do meio físico; e à viabilidade à implantação de empreendimentos (processos tecnológicos). A contribuição da cartografia geotécnica ao planejamento regional e urbano utiliza a análise fenomenológica do meio físico, no sentido de identificar e caracterizar processos que condicionem problemas existem ou esperados para melhor orientar o uso e ocupação do solo, a análise ambiental e as obras civis. A geologia de engenharia classifica e avalia os processos do meio físico quanto às limitações e potencialidades, representando estes processos

cartograficamente através do mapeamento geológico-geotécnico. Além disto, avalia esses recursos quanto à adequabilidade, segundo a capacidade de suporte territorial, segundo critérios que visem à minimização de problemas e o desenvolvimento de infraestrutura para estudos de viabilidade, projetos básico e executivo, construção, manutenção e monitoramento de empreendimentos que beneficiem a sociedade.

De acordo com Pejon (1998), as diferenças entre os processos de mapeamento da cartografia geotécnica e geoambiental estão nas finalidades específicas de cada uma e principalmente no enfoque de suas aplicações em relação à área de estudo e escala de trabalho. Para estudos geológicos-geotécnicos, as escalas de detalhe são priorizadas por conta das áreas consideradas na maioria dos estudos (escalas grandes). Além disso, são enfatizadas as soluções de problemas estruturais e o estudo de características físicas (geologia de engenharia). No campo da cartografia geoambiental, adota-se a bacia hidrográfica como unidade de análise e, portanto, admite-se escalas menores de trabalho. São estudos direcionados, na maioria das vezes, a zoneamentos ambientais e planos de ocupação e planejamento do território. Apesar de serem baseados em estudos da área de geotecnia e geologia de engenharia (Zuquette, 1998), ao contrário dos mapeamentos geoténicos, tais estudos não abordam soluções de problemas de estutura e, subsidiados pelas abordagens da geologia ambiental, analisam características do meio que vão além do meio físico, investigando também a interação do meio social e biótico. De acordo com Vedovello (2000), “a cartografia geoambiental pode ser entendida de forma ampla, como todo o processo envolvido na obtenção, análise, representação, comunicação e aplicação de dados e informações do meio físico, considerando-se as potencialidades e fragilidades naturais do terreno, bem como os perigos, riscos, impactos e conflitos decorrentes da interação entre as ações humanas e o ambiente fisiográfico. Pode-se por isso incorporar elementos bióticos, antrópicos e socioculturais em sua análise e representação. Nesta concepção, a cartografia geotécnica estaria incluída no escopo geral da cartografia geoambiental.”

São várias as metodologias desenvolvidas no Brasil e no mundo a acerca da produção de cartas geotécnicas e geoambientais. Especificamente no país, são

destaques os métodos desenvolvidos pela Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), o departamento de Geotecnia da Universidade de São Carlos (UFSCAR), Universidade de Brasília (UNB) e da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Tanto na área de cartografia geotécnica e geoambiental, destacam-se as metodologias de trabalho propostas por Zuquette (1998), Pejon (1998), Salomão (1999), Almeida Filho (2000), e Lorandi (2000).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos dividem-se em quatro etapas distintas, conforme ilustra a fluxograma abaixo (Figura 14). Os materiais utilizados e a descrição de cada etapa seguem definidos nos próximos subítens.

3.1. ETAPA 1: DEFINIÇÕES PRELIMINARES

3.1.1. DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Como dito anteriormente, área de estudo do presente trabalho é parte da bacia do Tietê-Sorocaba (UGRHI – 10) região por onde percorre a Malha Paulista, operada pela concessionária América Latina Logística - ALL, uma das principais vias férreas do estado de São Paulo. Foram analisados os riscos oferecidos pelos processos erosivos identificados ao longo do traçado da malha e limitados a uma faixa de 5 km em torno da linha (Figura 15). Os critérios selecionados para escolha da área de estudo foram (em ordem de importância):

a) Alta intensidade de ocorrência de processos erosivos

Baseado na distribuição espacial de processos erosivos mapeados pelo IPT/DAEE (2013) foram identificadas áreas de alta intensidade de processos em regiões por onde percorrem importantes linhas férreas do estado de SP, como é o caso das bacias hidrográficas localizadas no Oeste Paulista (Planalto Ocidental) e na região denominada Depressão Periférica do Estado (Zona do Médio Tietê e do Paranapanema). Além da atenção dada, pela mídia local, aos impactos negativos gerados pela ocorrência de fenômenos erosivos na área selecionada, foram consideradas também a grande quantidade de pesquisas, relacionadas ao tema, já realizadas na região.

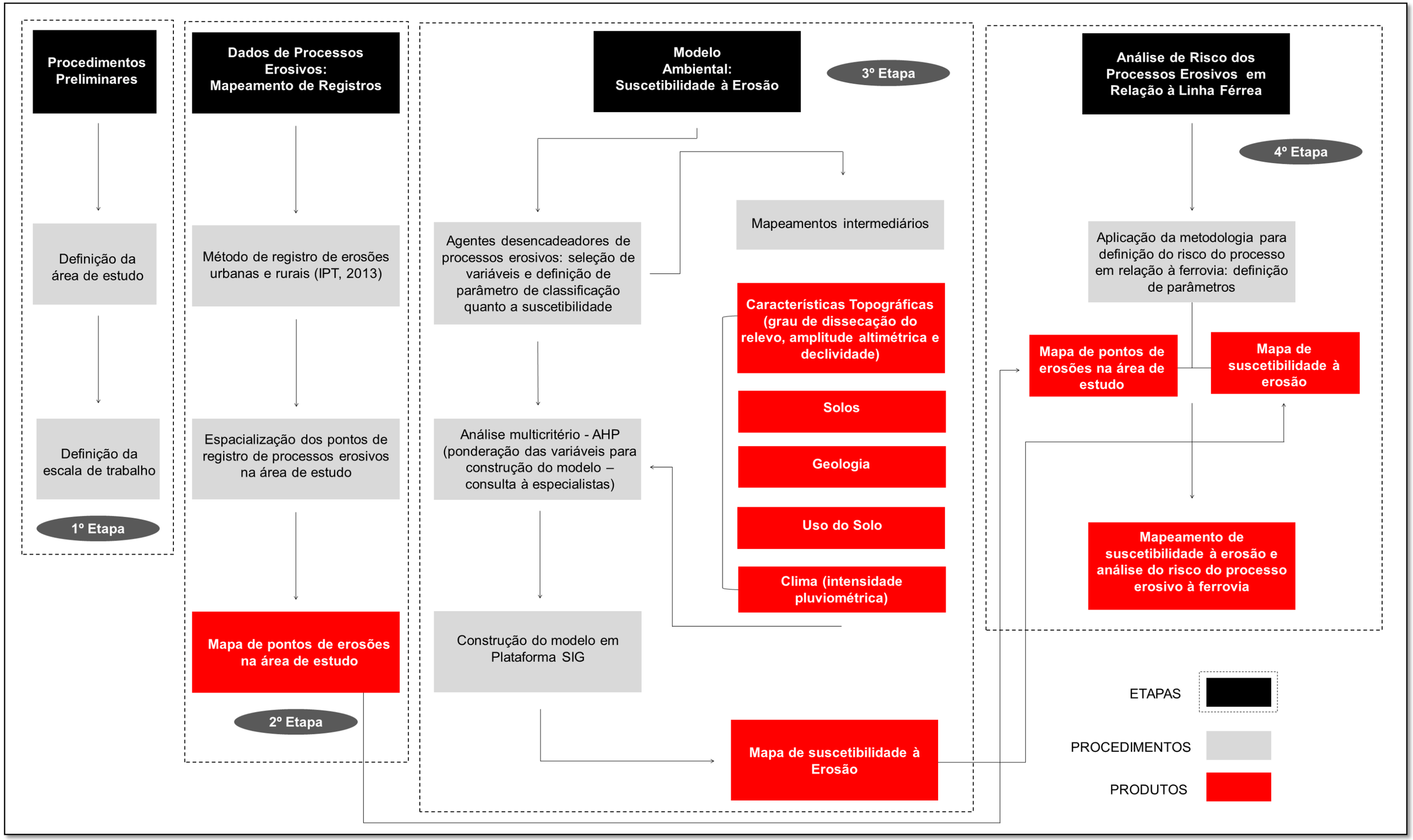


Figura 14. Fluxograma metodológico das atividades envolvidas.

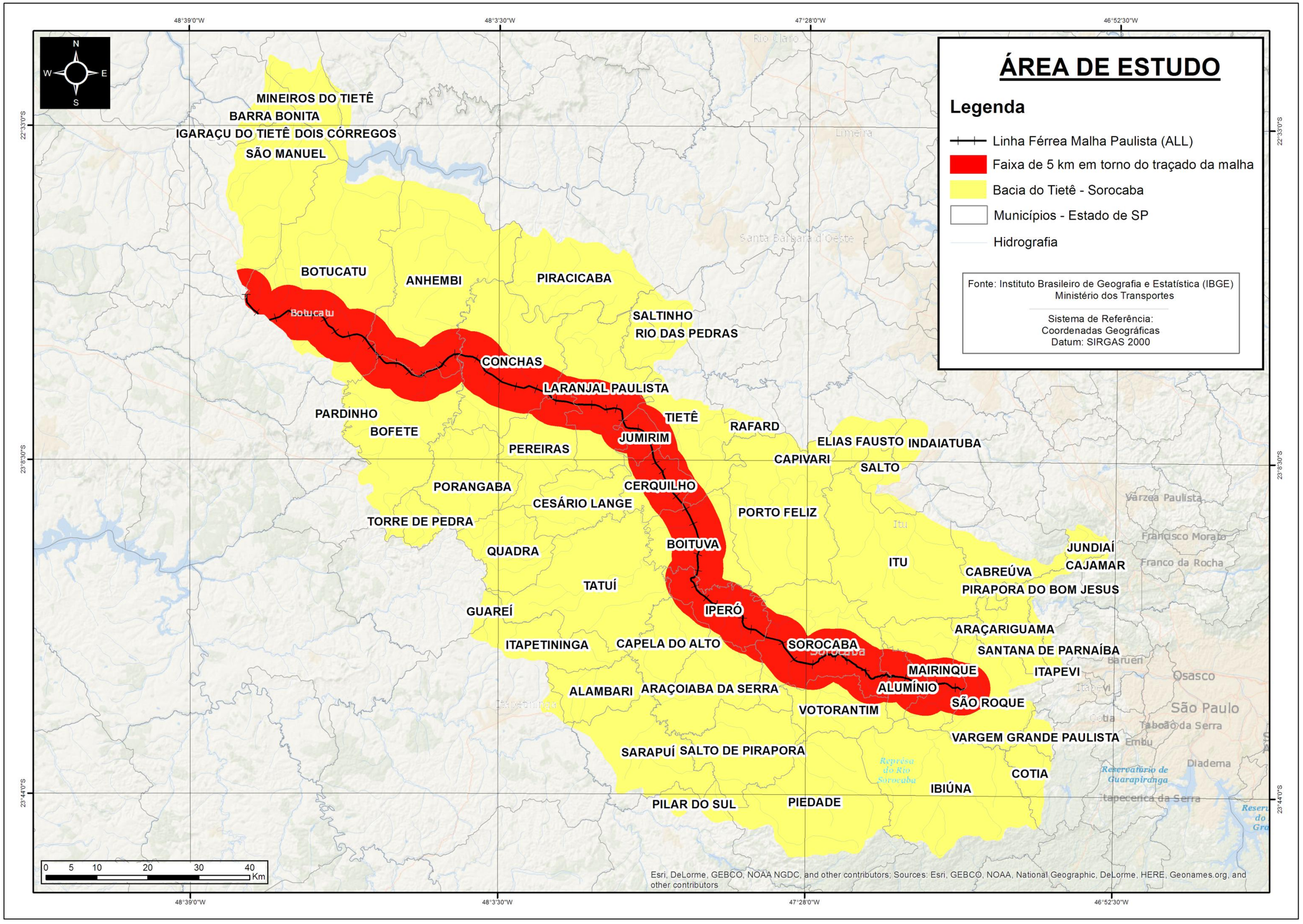


Figura 15. Mapa da área de trabalho.

b) Importância econômica da linha:

A Malha Paulista liga a Baixada Santista/Porto de Santos às cidades de Santa Fé do Sul, Panorâma e Colômbia (SP), totalizando um percurso total de 1.989 km. O trecho em análise corresponde a 9% do trajeto total (170 km) e possibilita o escoamento dos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e São Paulo. A linha é listada entre as 10 principais malhas férreas do Brasil (principal malha férrea do estado de SP) e destaca-se pelo transporte de minérios, grãos e derivados de petróleo e álcool. No trecho estudado, a movimentação é restrita ao transporte de cargas e os principais produtos transportados são: açúcar, cloreto de potássio, adubo, calcário e combustível (óleo diesel e gasolina) (ANTT, 2014)[4].

c) Critérios ambientais:

De forma geral, no estado de SP, os desenhos dos traçados das principais linhas férreas localizam-se nas cabeceiras de drenagem, atuando como divisores de água, coincidindo com os limites topográficos das bacias hidrográficas do estado. Na intenção de facilitar a obtenção de dados, a área de estudo escolhida também buscou considerar o trajeto de malha que estivesse inserido totalmente nos limites definidos de bacias hidrográficas de SP (Legislação Estadual - Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos)[5].

d) Conhecimento prévio da área de trabalho:

Também como critério, considerou-se importante o fato de haver, por parte da autora, um conhecimento prévio da área de estudo. Foram realizados laudos técnicos e análises ambientais (não oficialmente publicadas) dos processos erosivos que ofereciam riscos à ferrovia, em 2011. Todo trabalho foi realizado por demandas de concessionárias responsáveis pelas principais vias férreas do Estado de SP.

---

[4] Agência Nacional de Transportes Ferroviários: Relatório sobre a Evolução do Transporte Ferroviário no Brasil. Acesso em: www.antt.gov.br – Outubro de 2013

[5] Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Acesso em: http://www.sigrh.sp.gov.br – Outubro de 2013

3.1.2. DEFINIÇÃO DA ESCALA DE TRABALHO

A faixa de 5 km definida em torno do traçado da malha foi definida dado que, as faixas de domínio[6] das linhas férreas, pré-estabelecidas judicialmente e com abrangência variando entre 15m a 200m, são insuficientes para estudos de risco e análise da suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos, por serem incompatíveis com as escalas disponíveis dos dados espaciais gerados ou fornecidos.

Priorizou-se o uso e fornecimento de mapeamentos das variáveis ambientais nas escala entre 1:50.000 e 1:150.000, classificadas por Ross (1994) como sendo escalas aplicadas a estudos regionais. Para os dados de pedologia e características topográficas foram selecionadas técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto conhecidas na literatura da ciência da informação geográfica e cartografia digital, de forma a alcançar a menor escala entre o intervalo proposto. Especialmente para o tema de uso e cobertura do solo, a escala de mapeamento do tema foi de 1:150.000, justificada pelas tipologias classificadas na imagem (compatíveis com imagens LANDSAT – 5 – TM) e pela disponibilidade de imagens gratuitas na área de estudo.

Nos casos em que não foi possível atingir o intervalo de escalas propostas, como é o caso dos dados de geologia e pluviometria, foram consideradas as questões levantadas nos trabalhos desenvolvidos por Fagundes (2013) e Spörl (2007). Fagundes (2013), especialmente, afirma que, frente à problemática da disponibilidade de dados em escalas diversas para a aplicação de modelos ambientais de suscetibilidade a erosão, os mapeamentos finais (e também os objetivos específicos relacionados à questão da escala) devem admitir a limitação dos produtos gerados e a necessidade de checagem, em campo, para verificação da base cartográfica gerada. Por conta da diversidade de dados fornecidos e, frente à dificuldade de trabalho em uma única escala, admitiu-se, como escala final do mapa de suscetibilidade gerado, a de menor detalhamento oriunda dos mapeamentos intermediários.

[6] A faixa situada à margem da ferrovia, chamada faixa de domínio, é uma área de terreno com pequena largura em relação à extensão e varia de acordo com cada trecho.

3.2. ETAPA 2: DADOS DE PROCESSOS EROSIVOS: MAPEAMENTO DE REGISTROS E ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS

3.2.1. MÉTODO DE REGISTRO

A base de dados de registro de processos erosivos da área de estudo foi fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT e pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE, fonte de um projeto cujo objetivo principal é fornecer elementos básicos para o planejamento de programas e ações voltadas ao equacionamento dos problemas causados pelas erosões lineares, urbanas e rurais, e pelas inundações/enchentes nas áreas urbanas de todo o território do Estado de São Paulo (2013). Para esta etapa, é importante dizer que não houve participação da autora na coleta de informações em campo relativas ao reconhecimento e mapeamento das feições erosivas identificadas. Todavia, julgou-se necessário descrever como foram feitos os processos referentes ao método de registro das mesmas.

Os trabalhos realizados permitiram a identificação de 1.398 processos erosivos lineares em áreas urbanas e 39.864 processos erosivos lineares em áreas rurais, gerando informações que permitiram caracterizar ravinas e boçorocas de diferentes tipos quanto à origem e forma de ocorrência, bem como relacionar os principais condicionantes do meio físico e as áreas de concentração desse tipo de processo em todo o Estado. Especificamente para a área de trabalho (processos erosivos localizados em até 5 km da malha férrea) foram detectados 833 processos, sendo 773 em áreas rurais (472 boçorocas / 301 ravinas) e 60 processos em áreas urbanas (50 boçorocas / 10 ravinas). A Figura 17 ilustra a espacialização das feições na área de estudo.

Entende-se por processo erosivo urbano aquele deflagrado por ação das águas pluviais urbanas, ou seja, feições erosivas desencadeadas (ou aceleradas) pelo escoamento superficial das águas pluviais provenientes dos sistemas de microdrenagem urbana, por fluxos concentrados (tubulações e galerias). Dentro dos limites das manchas urbanas, as imagens foram sistematicamente

interpretadas, buscando-se nas imagens indícios de processos erosivos. O método de registro dos processos urbanos, em resumo, baseou-se em: a. identificação dos processos erosivos a partir das imagens orbitais em limites administrativos urbanos; b. elaboração de fichas de cadastro; c. visitas de campo; d. compilação dos dados obtidos e comparação dos resultados. Um fluxograma acerca do método utilizado para mapeamento das feições erosivas urbanas está ilustrado na Figura 16. Já para o registro dos processos rurais, o mesmo procedimento foi adotado, porém, sem as etapas de visitas de campo e um fornecimento menor de informações na ficha de cadastro do registro.

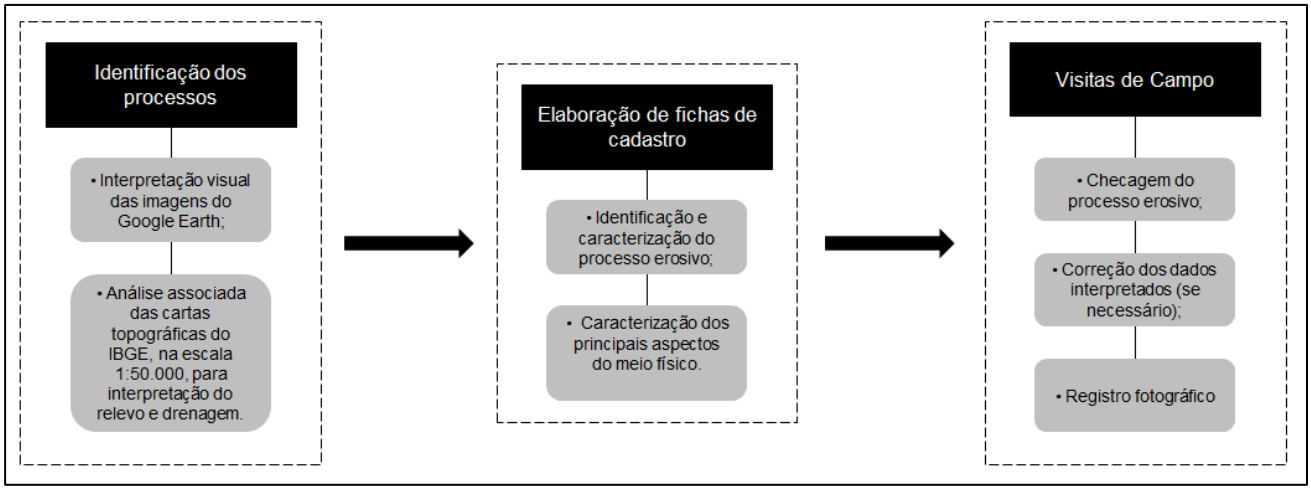


Figura 16. Fluxograma do método para cadastramento dos processos erosivos urbanos.

Fonte: IPT / DAEE (2013)

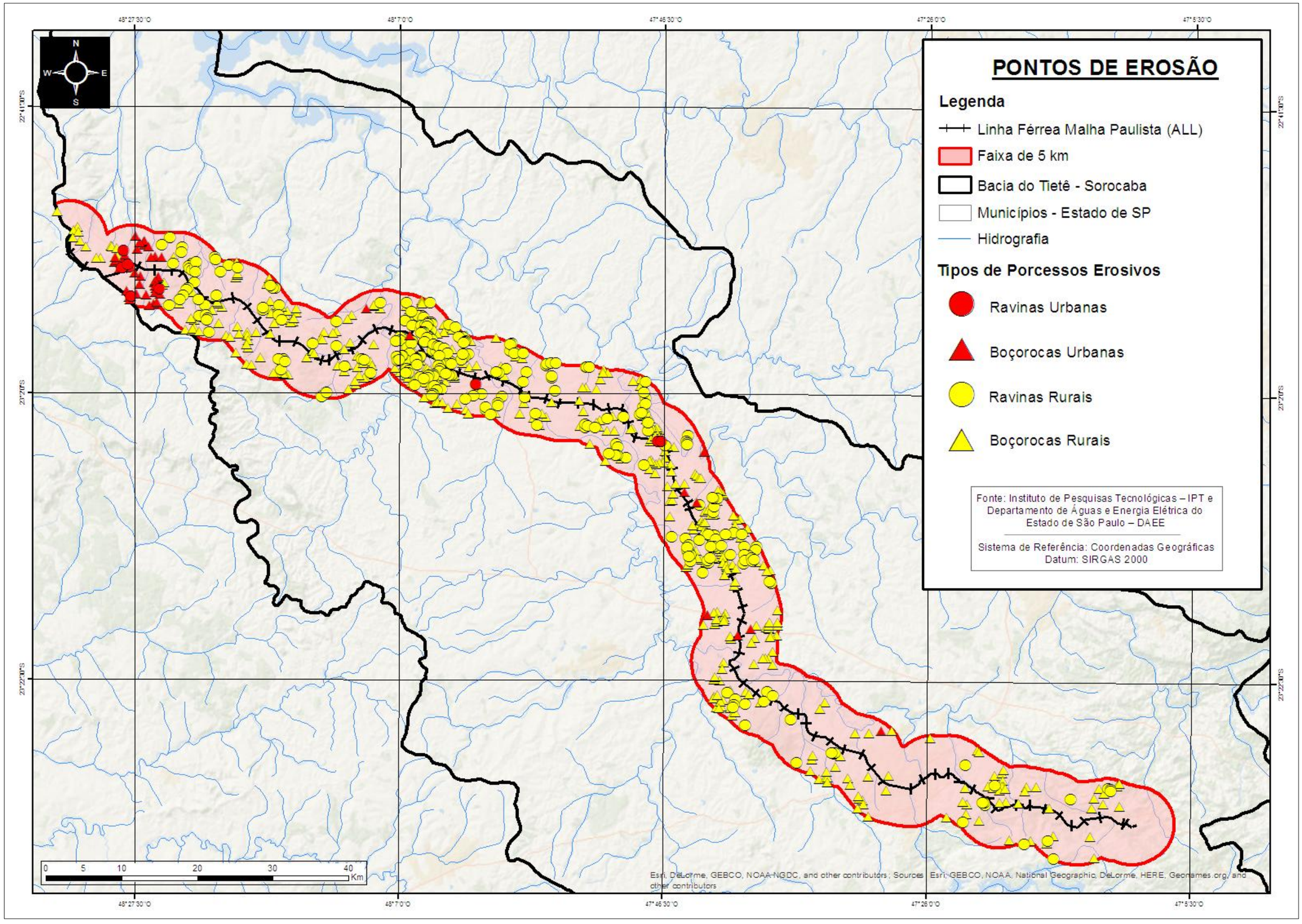


Figura 17. Espacialização das feições erosivas registradas na área de estudo

3.2.2. ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS

A base de dados, fornecida em planilhas eletrônicas, foi organizada de forma a ser convertida em arquivos especializados do tipo ponto. Através das informações cedidas de coordenadas coletadas por GPS ou via imagens de satélite georreferenciadas utilizadas no registro dos processos, os dados foram inseridos em ambiente SIG (software *ArcGis 10.2.2)*. Todos os registros foram coletados no sistema de projeção geográfica associados ao sistema geodésico WGS – 1984 e convertidos para SIRGAS 2000.

A definição da escolha do sistema de projeção utilizado justifica-se pela extensão da área de trabalho, uma vez que o traçado da malha férrea em estudo encontram-se inseridas nos limites dos fusos 22S e 23S da projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), dificultando os processos de geração de dados e manuseio das bases cartográficas em sistemas de referência com projeções UTM.

3.3. ETAPA 3: MODELO AMBIENTAL: SUSCETIBILIDADE À EROSÃO

3.3.1. AGENTES DESENCADEADORES DE PROCESSOS EROSIVOS: SELEÇÃO DE VARIÁVEIS, DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO A SUSCETIBILIDADE À EROSÃO E PROCESSO DE MAPEAMENTO

Na bibliografia, estudos direcionados à análise do meio físico quanto à suscetibilidade de desenvolvimento de processos erosivos estão associados è geração de modelos ambientais. Como dito anteriormente, tais modelos são representações criadas para simular fenômenos ou processos que ocorrem no meio ambiente. São formas simplificadas da realidade para facilitar a descrição, a compreensão do funcionamento atual e do desempenho futuro de um sistema. Para o presente trabalho, a seleção das variáveis utilizadas para compor o modelo gerado, bem como a definição dos parâmetros de classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos utilizou-se do método desenvolvido por Crepani (2001) (ítem 2.3.2.1). A Figura 18 resume o procedimento de classificação das categorias morfodinâmicas referente aos níveis de suscetibilidade do terreno ao desenvolvimento de processos erosivos. Os subitens que seguem descrevem, detalhadamente, os critérios de classificação adotados para análise dos agentes desencadeadores de processos erosivos considerados na metodologia utilizada: Geologia, Características Topográficas (dissecação do relevo pela drenagem e declividade), Pedologia, e Uso da Terra e Clima (intensidade pluviométrica).

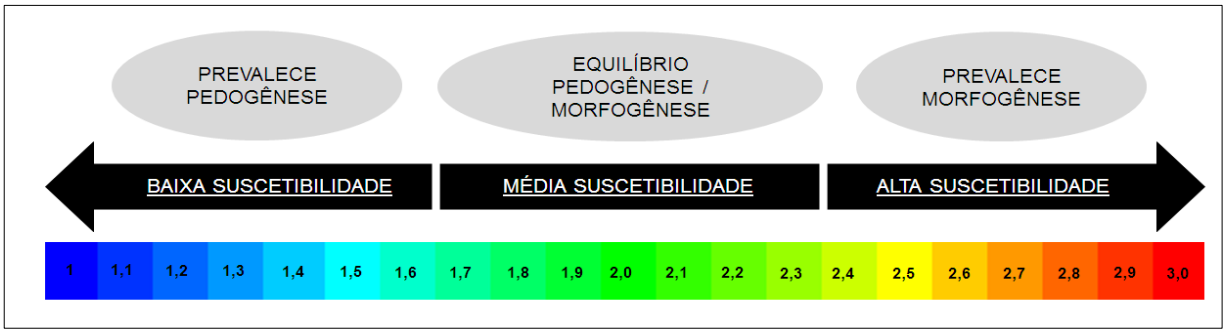


Figura 18. Categorias morfodinâmicas referente aos níveis de suscetibilidade do terreno ao desenvolvimento de processos erosivos (alta, média e baixa suscetibilidade)

Fonte: Adaptado de Crepani (2001)

3.3.1.1. GEOLOGIA

A contribuição da geologia para a análise e definição da categoria morfodinâmica do terreno compreende as informações relativas à história da evolução geológica do ambiente onde a unidade se encontra e ao grau de coesão das rochas que o compõe. Por grau de coesão da rocha entende-se a intensidade da ligação entre os minerais ou partículas que a constituem. Esse grau é a informação básica da geologia a ser integrada a partir da Ecodinâmica, uma vez que, em rochas pouco coesas, prevalecem os processos modificadores das formas de relevo, enquanto nas rochas bastante coesas, prevalecem os processos de formação de solos (Crepani, 2001).

Para mapeamento das propriedades geológicas, as cartas temáticas do Projeto "Mapeamento Geológico Estadual", do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (2004) referentes à área de estudo foram georreferenciadas e vetorizadas em arquivos de polígonos *(shapefile).* Cabe dizer que, para o tema Geologia, não foi gerado o mapeamento no intervalo de escalas proposto (1:50.000 a 1:150.000) devido a falta de informações suficientes para o detalhamento das unidades geológicas encontradas. A base de dados utilizada foi originalmente mapeada na escala de 1:750.00 para todo o estado de São Paulo e dispõe de informações sobre tipos de rocha (litologia, classe de rocha e subclasse), unidades geológicas, era geológica e hierarquia (grupo, formação, etc)

A Tabela 3 resume os critérios de classificação dos principais tipos de rochas mapeados e seus respectivos valores, quanto à suscetibilidade à erosão, adotados por Crepani (2001).

Tabela 3. Geologia - principais tipos de rocha e sua classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos

Fonte: adaptado de CREPANI (2001)

Tipos de Rochas	Classificação (quanto a suscetibilidade à erosão)
Quartzitos metaquartzitos	1,0
Riólito, Granito, Dacito	1,1
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos	1,2
Migmatitos, Gnaisses	1,3
Fonólito, Nefelina, Sienito, Traquito, Sienito	1,4
Andesito, Diorito, Basalto	1,5
Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6
Milonitos, Quartzo, Muscovita, Biotita, Clorita Xisto	1,7
Piroxenito, Anfibolito, Kimberlito, Dunito	1,8
Hornblenda, Tremolita, Actinolita Xisto	1,9
Estaurolita Xisto, Xistos Granatíferos	2,0
Filito, Metassiltito	2,1
Ardósia, Metargilito	2,2
Mármores	2,3
Arenitos Quartzosos ou Ortoquartzitos	2,4
Conglomerados, Subgrauvacas	2,5
Grauvacas, Arcózios	2,6
Siltitos, Argilitos	2,7
Folhelhos	2,8
Calcáris, Dolomitis, Margas, Evaporitos	2,9
Sedimentos incosolidados: Aluviões, Colúvios, etc	3,0

3.3.1.2. CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS

Para estabelecer os valores da escala de suscetibilidade com relação às características topográficas serão analisados os índices morfométricos do terreno referentes à dissecação do relevo pela drenagem e à declividade. A intensidade de dissecação do relevo pela drenagem está diretamente ligada à porosidade e à permeabilidade do solo e da rocha. Já a declividade, inclinação do terreno e relação ao horizonte, tem relação direta com a velocidade de transformação da energia potencial em energia cinética e, portanto, com a velocidade das massas d´água em movimento responsáveis pelo *runoff* (Crepani, 2001). As Tabelas 4 e 5 definem os critérios de classificação para os índices de características topográficas analisadas.

Para mapeamento das características topográficas da área de análise utilizou-se a base de dados gratuita fornecida pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo e pelo Instituto de Pesquisas Espaciais – IPT. Foram utilizadas informações referentes à rede de drenagem, pontos cotados de altimetria e curvas de nível oriundos de cartas de mapeamentos sistemáticos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Geográfico Geológico (IGG) e Departamento de Serviços Geográficos do Exército, na escala 1:50.000 (projeto GISAT).

Para geração do mapa de declividade, foi gerado, a partir das curvas de níveis, pontos cotados e rede de drenagem, um MDT (Modelo Digital de Terreno), com resolução de 50 m² (grid de 25x25m) no programa *ARCGIS 10.2.2* (*Topo to Raster)*. Segundo Rabaco (2005), esse módulo possui como principais vantagens a coerência nas análises hidrológicas e a continuidade da superfície, ausente nos demais métodos (ex. krigagem), resultando em uma estrutura de drenagem conectada e produzindo alta acurácia na superfície. Ainda segundo Guimarães (2000), este módulo utiliza também uma técnica de interpolação de interação de diferenças finitas, combinando a eficiência de uma interpolação local com métodos de interpolação global, os quais utilizam uma superfície de continuidade, como o interpolador *Kriging*. Além disso, segundo o mesmo autor, esse tipo de interpolação gera uma estrutura de drenagem hipotética, eliminando depressões que não estão de acordo com o fluxo gravitacional.

Para geração das classes de declividade definidas na Tabela 4, aplicou-se, ao MDT gerado, a ferramenta *Slope* (módulo *3D Analyst – Surface – Slope*).

Tabela 4. Características topográficas – Declividade: classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. Fonte: CREPANI (2001), adaptado de FLORENZANO (2008)

Declividade (em graus)	Declividade (em percentual)	Classificação (quanto a suscetibilidade à erosão)
< 2	< 3,5	1,0
2 - 2,3	3,5 - 5,8	1,1
3,3 - 4,6	5,8 - 8,2	1,2
4,6 - 5,9	8,2 - 10,3	1,3
5,9 - 7,3	10,3 - 12,9	1,4
7,3 - 8,6	12,9 - 15,1	1,5
8,6 - 9,9	15,1 - 17,4	1,6
9,9 - 11,2	17,4 - 19,8	1,7
11,2 - 12,5	19,8 - 22,2	1,8
12,5 - 13,8	22,2 - 24,5	1,9
13,8 - 15,2	24,5 - 27,2	2,0
15,2 - 16,5	27,2 - 29,6	2,1
16,5 - 17,8	29,6 - 32,1	2,2
17,8 - 19,1	32,1 - 34,6	2,3
19,1 - 20,4	34,6 - 37,2	2,4
20,4 - 21,7	37,2 - 39,8	2,5
21,7 - 23,0	39,8 - 42,4	2,6
23,0 - 24,4	42,4 - 45,3	2,7
24,4 - 25,7	45,3 - 48,1	2,8
25,7 - 27	48,1 50	2,9
> 27	> 50	3,0

Tabela 5. Características topográficas – Intensidade da dissecação do relevo pela drenagem: classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. Fonte: CREPANI (2001)

Índice de dissecação do relevo pela drenaem	Classificação (quanto a suscetibilidade à erosão)
0,0 - 0,50	1,0
0,5 - 1,0	1,1
1,0 - 1,5	1,2
1,5 -2,0	1,3
2,0 - 2,5	1,4
2,5 - 3,0	1,5
3,0 - 3,90	1,6
3,90 - 4,80	1,7
4,80 - 5,70	1,8
5,70 - 6,60	1,9
6,60 - 7,50	2,0
7,50 - 10,0	2,1
10,0 - 12,50	2,2
12,50 - 15,0	2,3
15,0 - 17,50	2,4
17,50 - 20,0	2,5
20,0 - 25,0	2,6
25,0 - 30,0	2,7
30,0 - 35,0	2,8
35,0 - 50,0	2,9
50,0 - 100,00	3,0

Quanto à dissecação do relevo, segundo Crepani *et al.* (2001) e Florenzano (2008), a intensidade de dissecação pela drenagem pode ser obtida através de medidas nas cartas topográficas da amplitude dos interflúvios (distância entre os canais de drenagem) ou da densidade de drenagem, sendo este parâmetro inverso ao primeiro. Para o presente trabalho, foram extraídos índices de densidade de drenagem por m² através do somatório dos comprimentos da rede de drenagem (em metros) por unidade de área (m²). Baseado em Arnesen (2009) e Florenzano (2008), a unidade de área é definida a partir da obtenção do mapeamento de compartimentos geomorfológicos da área de estudo. Nesse caso, foi utilizado a base vetorial digital disponibilizada pela CPRM referente ao projeto de "Mapeamento Estadual de Geodiversidade", na escala de 1:750.000 e a mesma base vetorial digital referente à drenagem utilizada para obtenção do Modelo Digital de Terreno. Para o procedimento de obtenção do índice, o arquivo de polígonos referente às unidades de área dos diversos compartimentos geomorfológicos existentes foi convertida em arquivo matricial (*raster)* e cruzado com o mapeamento da rede de drenagem (também convertido em arquivo matricial). Os arquivos foram manuseados no módulo *3D Analyst* através da ferramenta *Raster Calculator (ARCGIS 10.2.2*), que realiza a operação de *overlay* entre as informações selecionadas, informando o índice de dissecação para cada unidade de área, definida pela Equação 1:

$$(1) \qquad \text{índice de dissecação do relevo} = \frac{\text{comprimento da rede de drenagem } (m)}{\text{área } (m^2)}$$

3.3.1.3. SOLO

Na análise da suscetibilidade dos tipos de solo, considera-se o seu grau de maturidade, produto direto do balanço morfogênese/pedogênese. Ela indica claramente se prevalecem os processos erosivos da morfogênse, que geram solos jovens, pouco desenvolvidos, ou se, no outro extremo, as condições de estabilidade permitem o predomínio dos processos de pedogênse, gerando solos maduros, profundos, lixiviados e bem desenvolvidos (CREPANI, 2001).

O processo de mapeamento de solos da área de estudo baseou-se na proposta de Hermuche *et al.* (2002) que discute a geração de produtos

cartográficos referente à pedologia baseados na análise estatística da distribuição do histograma de frequência de atributos topográficos. O histograma de frequência dos dados de declividade e hipsometria indicam onde estão as zonas de transições entre as principais classes de solos. Dessa forma, esse tipo de análise pode indicar a divisão das unidades de solo no terreno tendo como referência padrões morfométricos (Hermuche *et al*., 2002). Como exemplo de aplicação da técnica em estudos de suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos, Manfré (2013) utiliza o método descrito para orientação de diretrizes de zoneamento ambiental através da análise de dois modelos de suscetibilidade na região de Ibiúna – SP.

Para análise dos atributos topográficos e geração dos histogramas de frequência foi utilizado o Modelo Digital de Terreno gerado no item 3.3.1.2 do presente capítulo. Um mapeamento pedológico na escala 1:500.000 fornecido pela Escola Superior de Agricultura (ESALQ-USP) para o Estado de São Paulo também foi utilizado para comparação dos resultados do produto gerado para a área de estudo.

Por fim, a Figura 19 resume o processo de geração do mapeamento dos tipos de solo. A Tabela 6 indica os critérios de classificação, quanto à suscetibilidade à erosão, para os principais tipos de solo encontrados na região e os mais comuns encontrados no Brasil.

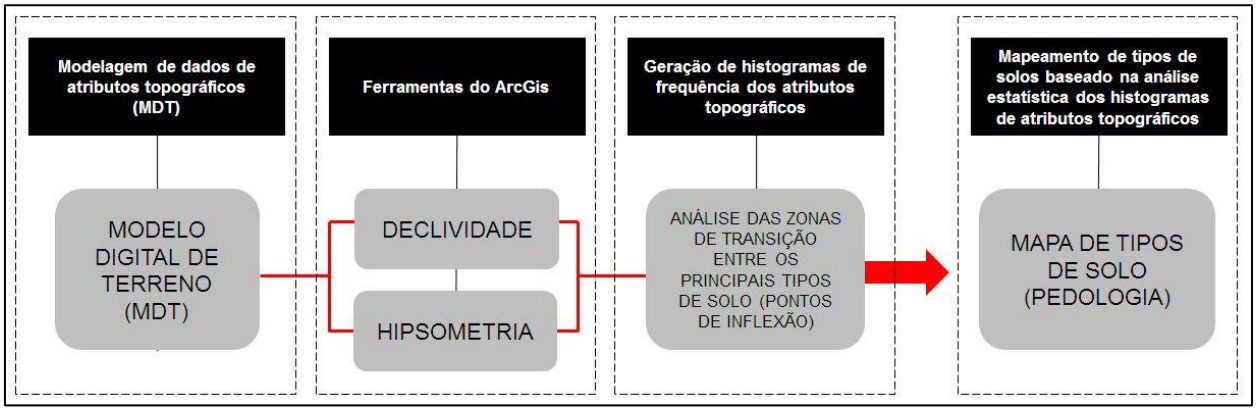


Figura 19. Procedimento para geração de mapeamento de solos baseado na análise estatística de frequência de características topográficas

Fonte: Adaptado de Manfré (2013)

Tabela 6. Tipos de solos - principais tipos de solos e classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. Fonte: CREPANI (2001)

Tipos de Solos (EMBRAPA, 1999)	Classificação (quanto a suscetibilidade à erosão)
Latossolo vermelho-amarelo, Latossolo amarelo, Latossolo vermelho, Latossolos brunos, Latossolos húmicos, Latossolos bruno-húmicos	1,0
Argissolo, Luvissolo, Alissolo, Nitossolo, Chernossolo, Planossolo, Espodossolo,	2,0
Cambissolo	2,5
Neossolo litólico, Nessolo flúvico, Neossolo regolítico, Neossolo quartzarênico, Vertissolo, Organossolo, Gleissolo, Plitonssolo e Afloramento rochoso	3,0

3.3.1.4. CLIMA

As principais características físicas da chuva envolvidas nos processos erosivos são: a quantidade, ou pluviosidade total; a intensidade, ou intensidade pluviométrica; e a distribuição sazonal. Entre essas três características, é especialmente importante conhecer a intensidade pluviométrica, pois representa uma relação entre as outras duas características (quanto chove/quando chove), resultado que determina, em última análise, a quantidade de energia potencial disponível para ser transformada em energia cinética. A maior importância da intensidade pluviométrica é facilmente verificada quando se observa que uma elevada pluviosidade anual, mas com distribuição ao longo de todo o período chuvoso, tem um poder erosivo muito menor do que uma baixa precipitação, mas que ocorre torrencialmente num determinado período do ano. Essa última situação é responsável pela intensa denudação das regiões semi-áridas, caracterizadas pela abundância de afloramentos rochosos e pequena espessura do solo.

Quanto ao processo de mapeamento, particularmente no caso das análises de características climáticas, a geração de dados referentes ao regime pluviométrico através do uso de técnicas de geoestatística é bastante comum. Uma vez calculados ou estimados valores pontuais, mapas de erosividade podem ser obtidos por meio de métodos de interpolação que usam os valores amostrados para estimativas de valores em locais com ausência ou informações restritas de precipitação. O processo de interpolação é comumente realizado utilizando métodos que consideram as informações uniformemente distribuídas na região de interesse ou que consideram apenas os dados pontuais mais próximos, ignorando outros efeitos que podem interferir na distribuição das chuvas.

Uma revisão dos principais métodos utilizados pode ser observada nos trabalhos realizados por Montebeller, 2007; Viola, 2010; Sediyama, 2006; Assad, 2003; Carvalho, 2012 e Wanderley, 2013. Em geral, os trabalhos focam-se na comparação de métodos interpoladores para geração de análises espaciais e leitura de dados de pluviometria. Na maioria dos casos, as técnicas de krigagem e co-krigagem apresentam melhores resultados quando

comparadas às outras, como máxima verossimilhança (MV) e dos mínimos quadrados ponderados (MQP).

Para geração do mapeamento de comportamento pluviométrico da área de estudo foram aplicadas técnicas de interpolação através da krigagem ordinária. A krigagem compreende um conjunto de técnicas de estimação e predição de superfícies utilizadas para aproximar dados. O princípio consiste na existência de correlação entre os elementos amostrados, isto é, um ponto geográfico tem maior semelhança com os pontos vizinhos se comparado aos elementos mais distantes. Esse princípio traduz um conceito que representa a estrutura teórica da krigagem que é o conceito de variável regionalizada, desenvolvido por Georges Matheron (Marques, 2012). Segundo Matheron (1971), uma variável não deve ser tratada de forma independente, mas autocorrelacionada no espaço, pois um valor elevado possivelmente terá próximo de si outro valor também elevado, o que reflete a autocorrelação entre os elementos, isto é, a dependência espacial. O termo "dependência espacial" consiste na relação existente entre os elementos amostrais, portanto, quando ocorrer dependência entre as observações pode-se afirmar que os elementos próximos tendem a ser mais semelhantes, caso contrário, essa afirmativa não será verdadeira (Jacomo, 2011). Nesse sentido, uma vez que a krigagem pressupõe a existência de dependência entre os dados, uma necessidade refere-se a conhecer até onde espacialmente esta correlação importa (MARQUES, 2012). Assim, a estimativa por krigagem ordinária de um atributo *z*, na posição *i* e com coordenadas dado pelo vetor *x*, é dada pela Equação 2 (Marques, 2012):

$$z(x_i) = \sum_{i=1}^{n} Z(x_i) \times \lambda_i \qquad (2)$$

Em que, λ_i são as ponderações aplicadas aos i-ésimos valores dos atributos que possuam dependência espacial com o valor da variável a ser estimado na posição xi . As ponderações são calculadas em função da matriz de semivariâncias (k) entre os pares de pontos utilizados na interpolação e o vetor de semivariância (k) referente a cada ponto usado na interpolação e o ponto de interesse (xi) (Equação 3).

(3) $$\lambda = K^{-1} \times k$$

Quanto às variâncias, estas são determinadas por modelos ajustados ao variograma experimental (Equação 4), em que $N(h)$ é o número de pares de pontos amostrais do atributo z, separados por uma distância h, também denominada de distância de lag. A representação gráfica entre $g(h)$ e a distância h caracteriza o variograma experimental.

(4) $$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \left\{ \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \right\}$$

O variograma descreve quantitativamente a variação de um fenômeno no espaço e permite evidenciar sua estrutura espacial (Landim, 2004), portanto, representa o grau de dependência espacial entre os elementos e define parâmetros para a estimativa de valores em locais não amostrados. A partir do variograma experimental é realizado o ajuste de um ou mais modelos teóricos, e dentre os principais modelos destaca-se o modelo gaussiano. Os parâmetros envolvidos nos modelos teóricos são: alcance (a), patamar (c) e efeito pepita (Co). O alcance é a distância a partir da qual as amostras tornam-se independentes, não ocorrendo mais dependência espacial. O efeito pepita é o valor da função na origem ou descontinuidade do variograma, para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. O patamar, por sua vez, consiste no valor onde o variograma se estabiliza e as amostras se tornam independentes (Isaaks e Srivastava, 1989).

A estimativa adequada dos índices de erosividade em uma região exige séries históricas confiáveis e distribuição uniforme de pluviógrafos. A coleta da série histórica dos postos disponíveis para consulta foi feita através do banco de dados pluviométricos do Estado de São Paulo disponibilizados em conjunto pela ANA e DAEE (SIGRH – Estado de São Paulo). Os dados foram organizados em planilhas (*software Microsoft Excel*) e a determinação dos valores para interpolação de pontos não-amostrados foi o resultado da divisão

das médias mensais referentes aos registros dos anos de funcionamento de cada posto coletado. Todos os postos localizados na área de estudo, sua localização geográfica, os anos de funcionamento e seus respectivos códigos serão indicados no ítem de apresentação dos resultados.

A Tabela 7 resume os critérios de classificação das características climáticas relacionados à erosividade da chuva na determinação da suscetibilidade do terreno ao desenvolvimento de processos erosivos propostos por Crepani (2001).

Todos os processos envolvidos na geração do mapeamento de comportamento pluviométrico, no ajuste e análise dos variogramas foram processados no *software Isatis*, desenvolvido pelo Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGC – USP).

Tabela 7. Clima – Intensidade pluviométrica / Erosividade da chuva: classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. Fonte: Crepani (2001)

Intensidade pluviométrica / Erosividade da chuva	Classificação (quanto a suscetibilidade à erosão)
< 50	1,0
50 - 75	1,1
75 - 100	1,2
100 - 125	1,3
125 - 150	1,4
150 - 175	1,5
175 - 200	1,6
200 - 225	1,7
225 - 250	1,8
250 - 275	1,9
275 - 300	2,0
300 - 325	2,1
325 - 350	2,2
350 - 375	2,3
375 - 400	2,4
400 - 425	2,5
425 - 450	2,6
450 - 475	2,7
475 - 500	2,8
500 - 525	2,9
> 525	3,0

3.3.1.5. USO E COBERTURA DO SOLO

As formas de uso e cobertura do solo possuem um papel importante no trabalho de retardar o ingresso das águas provenientes das precipitações pluviais nas correntes de drenagem, pelo aumento da capacidade de infiltração. A infiltração diminui o escoamento superficial e, consequentemente, a capacidade de erosão. A participação da cobertura vegetal na caracterização morfodinâmica da unidade de paisagem está, portanto, diretamente ligada à sua capacidade de proteção. Assim, aos processos morfogenéticos relacionam-se as coberturas vegetais de densidade (cobertura do terreno) mais baixa, enquanto os processos pedogenéticos ocorrem em situações em que a cobertura vegetal mais densa permite o desenvolvimento e a maturação do solo (Crepani, 2001). Como completa Spörl (2007), informações atualizadas sobre o uso da terra e sua distribuição são essenciais para o manejo eficiente dos recursos agrícolas, florestais e hídricos. A caracterização do uso da terra contribui para o entendimento da distribuição das principais atividades econômico-produtivas da região e uma compreensão das inter-relações entre as formas de ocupação e a intensidade dos processos responsáveis pela degradação do meio físico O levantamento do uso da terra torna-se, então, um aspecto de interesse fundamental para a compreensão dos padrões de organização do espaço.

Para o mapeamento das classes de uso e cobertura do solo foram utilizadas imagens cedidas pela Secretaria do Meio Ambiente, do Governo do Estado de São Paulo (SMA – SP), por meio da Coordenadoria de Planejamento Ambiental (CPLA), responsável pela disponibilização de cenas de imagens do satélite LANDSAT - TM - 5 do ano de 2010.

A escala de mapeamento (definida no ítem 3.1.2) foi de 1:150.000. Justifica-se a geração do produto cartográfico gerado, na escala proposta, por conta das tipologias definidas no processo de classificação da imagem (Tabela 8) e a disponibilidade de cenas gratuitas que recobrem a totalidade da área de estudo. Imagens com resoluções melhores e também gratuitas, como as do satélite CBERS – 2B (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres) com

resolução de 2,7m no sensor HRC, não apresentava disponibilidade total de imagens para a área de estudo.

As áreas de interesse, todas, apresentam grandes extensões territoriais (acima de 30m), sendo facilmente identificadas no tipo de imagem selecionada. O processo de definição de escala foi fundamentado no Manual de Cartografia do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que define parâmetros cartográficos baseados no conceito de precisão gráfica (menor grandeza medida no terreno capaz de ser representada em desenho na mencionada escala).

Por convenção, o menor comprimento gráfico que se pode representar em um mapa é de 1/5 de milímetro, ou 0,2 mm, sendo este o erro admissível. Fixado esse limite prático, podemos ver que é possível determinarmos o erro tolerável nas medições de desenho feitas em uma determinada escala. Esse erro de medição permitido (que, nesse caso, é representado pela resolução espacial da imagem utilizada – indicadora do menor objeto que pode ser observado) foi calculado através da seguinte formulação matemática:

$$E = \frac{1}{N}$$

$EM = 0{,}002\ metros\ x\ N$, ou seja: $N = \frac{EM}{0{,}0002\text{metros}}$

Sendo:

$$N = denominador\ da\ escala$$

$$EM = precisão\ gráfica\ (erro\ tolerável, em\ metros)$$

Portanto:

Resolução espacial da imagem = 30m (precisão gráfica) – erro tolerável

$$N = \frac{30\ metros}{0{,}0002\ \text{metros}}$$

$$N = \frac{1}{150.000}$$

Quanto ao processo de classificação, as técnicas de processamento digital das imagens foram:

a) Composição colorida:

Foram utilizadas duas combinações com as bandas do TM, a 5(R) 4(G) 3(B) que apresentou uma boa discriminação de alvos como desmatamentos, áreas degradadas, área urbana entre outros; e também a 4(R) 5(G) 3(B) que mostrou melhores resultados na identificação da vegetação.

b) Segmentação por crescimento de regiões:

A técnica de segmentação foi feita para separar a área de estudo em regiões homogêneas de ocupação e cobertura do solo. Utilizando o método de crescimento de regiões, o qual consiste na agregação de pixels com propriedades similares em conjuntos denominados regiões, cujas bordas definem os seus contornos. Desta forma, uma região é um conjunto de pixels adjacentes que exibe uma homogeneidade com relação aos seus atributos (número digital), tais como: média, variância, área, perímetro, etc.

c) Treinamento:

É necessário quando a classificação é supervisionada. Consiste em obter amostras de regiões representativas de cada classe de interesse. As amostras são retângulos ou polígonos que delimitam uma região pertencente a uma classe ou tema. Na fase de treinamento foram definidos os temas das feições mapeadas, baseadas no prévio reconhecimento da área de estudo, da literatura de mapeamento de uso e cobertura do solo para estudos de erosão e dos critérios definido por Crepani (2001) para o tema de uso e cobertura do solo à suscetibilidade erosiva das feições presentes no terreno analisado.

d) Análise das amostras:

Permite verificar a qualidade das amostras adquiridas com base nas matrizes de confusão.

e) Classificação supervisionada por regiões:

Ao invés de considerar as características espectrais de um determinado pixel no processo de decisão, um agrupamento de pixels é selecionado e usado como unidade de classificação. O classificador procura simular o comportamento de um fotointérprete, ao reconhecer áreas homogêneas nos dados orbitais, baseados nas propriedades espectrais e espaciais dessas áreas na imagem. A informação de borda é utilizada inicialmente para separar regiões, e as propriedades espaciais e espectrais agrupam áreas com mesma textura. Usualmente, essa técnica é empregada após o procedimento de segmentação. O classificador utilizado foi o *Bhattacharya* que usa as amostras de treinamento para estimar a função densidade de probabilidade para as classes apontadas.

f) Análise da Classificação:

A avaliação da classificação é feita a partir de análises estatísticas, verificando se a classe a qual um determinado alvo foi incluído corresponde à sua classe verdadeira.

Para a avaliação da acurácia da classificação, foram coletadas cerca de 300 amostras. Procurou-se obedecer ao número mínimo de 50 amostras por classe, definido por Congalton e Green (2009), para mapas cobrindo menos de um milhão de acres (aproximadamente 4.050 km²) e com menos de 12 classes. No entanto, devido à reduzida área de algumas classes, não foi possível a observância deste número para todas elas. Em seguida, foram construídas as matrizes de erros, compostas, nas colunas, pelas amostras de referência, e nas linhas, pelas classes obtidas na classificação. Na matriz, são expressos os erros de omissão, ou seja, amostras que não foram classificadas de acordo com as classes de referência, e os erros de comissão, correspondentes a amostras de referência classificadas erroneamente como pertencentes a outras classes. A partir das matrizes, foram calculados os seguintes índices:

(a) exatidão global - relação entre o número de amostras classificadas corretamente sobre o número total de amostras de referência;

(b) exatidão do produtor – relativa aos erros de omissão, a qual representa a relação entre o número de amostras classificadas corretamente da classe k e o número total de amostras de referência da classe k;

(c) exatidão do usuário - referente aos erros de comissão, a qual representa a relação entre o número de amostras classificadas corretamente da classe k e o número total de amostras classificadas da classe k;

(d) Kappa (K) e (e) Kappa Condicional.

O índice Kappa (Equação 1) varia de -1 a 1, e quanto mais próximo de 1, maior a precisão da classificação. De acordo com Landis e Koch (1977), a qualidade da classificação pode ser definida em função dos seguintes intervalos de índice Kappa: [< 0,00]: muito ruim; [0,00 - <0,20]: ruim; [0,20 – < 0,40]: aceitável; [0,40 - < 0,60]: bom; [0,60 - < 0,80]: muito bom; [0,80 –1,00]: excelente. O índice Kappa condicional avalia a acurácia de cada classe e é calculado com base no mesmo princípio do índice Kappa utilizado para a avaliação global da classificação, assim como a interpretação dos resultados obedece aos mesmos princípios. O índice Kappa condicional do usuário avalia os erros de comissão (Equação 2), e o do produtor, os erros de omissão (Equação 3)

Equação 1:

$$K = \frac{n\sum_{i=1}^{k} n_{ii} - \sum_{i=1}^{k}(n_{i+}n_{+i})}{n^2 - \sum_{i=1}^{k}(n_{i+}n_{+i})}$$

nii – número total de amostras corretamente classificadas da classe k;

ni+ – número total de amostras classificadas da classe k;

n+i – número total de amostras coletadas da classe k; e

n – número total de amostras.

Equação 2 :

$$K_p = \frac{nn_{ii} - n_{ii}\, n_{+i}}{nn_{i+} - n_{i+}\, n_{i+}}$$

Equação 3 :

$$K_u = \frac{nn_{ii} - n_{i+}\, n_{+i}}{nn_{i+} - n_{+i}\, n_{i+}}$$

Por fim, a Tabela 8 traz as classes de uso do solo mapeadas, a descrição de cada uma e suas classificações segundo a metodologia de suscetibilidade adotada. O processo de definição das tipologias analisadas foi baseado na distribuição das principais feições ao longo da área de estudo e, principalmente, em estudos de definição da suscetibilidade dos terrenos ao desenvolvimento de processos erosivos que utilizaram a mesma metodologia de classificação (Fagundes, 2013; Manfré, 2012; Spörl, 2007).

Tabela 8. Uso e cobertura do solo – Tipologias mapeadas na área de estudo: classificação quanto à suscetibilidade ao desenvolvimento de processos erosivos. Fonte: Adaptado de Fagundes (2013) e Crepani (2001)

Classes de Uso do Solo	Descrição	Classificação (quanto a suscetibilidade à erosão)
Corpos d´água	Incluem-se todas as águas interiores, como cursos d'água e canais (rios, riachos, canais e outros corpos d'água lineares), corpos d'água naturalmente fechados, sem movimento (lagos naturais regulados) e reservatórios artificiais (represamentos artificiais d'água construídos para irrigação, controle de enchentes, fornecimento de água e geração de energia elétrica).	1,0
Áreas úmidas	Áreas onde o lençol freático se encontra na superfície ou próximo a ela. Nestas áreas geralmente se estabelece uma vegetação aquática. Incluem-se áreas de brejos, pântanos situados às margens de lagos, lagoas, cursos d´água e reservatórios, bem como extensas áreas junto às várzeas inundáveis de rios e áreas de mineração inundáveis.	
Cobertura arbórea	Inclui-se nesta classe formação vegetal composta predominantemente por elementos arbóreos. Essa classe inclui as matas ciliares que acompanham os cursos d' água, floresta estacional semidecídua, floresta ombrófila densa e floresta ombrófila mista, além de área de cerrado, mangue e restinga, quando estas apresentam vegetação de maior porte. Incluemse também as formações arbóreas homogêneas plantadas, como pinus, eucalipto, seringueira e citrus, entre outras culturas arbóreas em estágio avançado.	1,5
Área construída	Constituída por áreas de uso intensivo, estruturadas por edificações e sistema viário, onde predominam as superfícies artificiais não-agrícolas. Estão incluídas nessa categoria áreas urbanas de uso residenciais, comerciais e de serviços, além de condomínios residenciais e ocupações esparsas, com baixa concentração de edificações como chácaras residenciais e de lazer, pequenos sítios, localizados distantes da mancha urbana principal ou ao longo de rodovias e vias de acesso.	2,5
Áreas agropastoris	Caracteriza-se pela presença de formação herbácea e/ou arbustiva. Nessas áreas o solo está coberto por vegetação de gramíneas ou leguminosas, cuja altura pode variar de alguns decímetros a alguns metros. Pode incluir áreas de pasto melhoradas ou cultivadas destinadas ao pastoreio. Também se encontram inseridas nesta categoria as culturas temporárias, semi-perenes e perenes. Inclui todas as terras cultivadas, caracterizadas pelo delineamento de áreas cultivadas, podendo se constituir em zonas agrícolas heterogêneas ou homogêneas. Também inclui áreas remanescentes de cerrado e restinga.	2,7
Solo exposto	Incluem-se nesta classe as áreas de intervenção antrópica que foram terraplenadas ou aradas, constituindo áreas em transição de uso ou uma fase intermediária do mesmo uso ou ainda áreas onde processos erosivos expuseram o solo.	3,0

3.3.2. ANÁLISE MULTICRITÉRIO - AHP (*Analytic Hierarchy Process*)

Os métodos de análises multicritérios são procedimentos metodológicos de cruzamento de informações amplamente aceitos nas análises espaciais com SIG. O procedimento baseia-se na definição do grau de pertinência de cada plano de informação e de cada um de seus atributos para a construção do resultado final. A matemática empregada é a simples média ponderada, mas há pesquisadores que já utilizam a lógica *Fuzzy* para atribuir os pesos e notas (Moura, 2007).

Para o presente trabalho, adotou-se como procedimento a aplicação da técnica AHP. O AHP é um método de análise multicritério baseado na decomposição e síntese das relações entre as variáveis e grupos de critérios, resultando na priorização dos seus indicadores, aproximando-se de uma melhor resposta de medição única de desempenho. É baseada na escala de julgamento definida por Saaty (1977). A escala, conhecida como escala fundamental de Saaty (Figura 22) fornece classificações utilizadas para a ponderação das variáveis par a par, com 1 significando a indiferença de importância de uma variável em relação ao outra, e 9 significando a extrema importância de uma variável sobre outra, com estágios intermediários de importância entre 1 e 9. Esse processo resulta em uma matriz de comparação para a avaliação de cada variável analisada.

Na matriz, o *autovetor* dá a ordem de prioridade, e o *autovalor* é a medida de consistência do julgamento. O método da análise hierárquica busca o autovalor máximo, λmax, que pode ser calculado pela multiplicação da matriz de julgamentos pelo vetor coluna de prioridades computado w, seguido da divisão desse novo vetor encontrado, Aw pelo primeiro vetor w, chegando-se ao valor de λmax. Cabe lembrar que $Aw = \lambda w$ e, que no método da análise hierárquica, $\mathrm{A}w = \lambda\, max\, w$. Para o cálculo de λmax, utiliza-se a fórmula abaixo:

$$\lambda\, max = média\ do\ vetor\ \mathrm{A}w/w$$

Como regra geral, se o índice de consistência for menor do que 0.1, então há consistência para prosseguir com os cálculos do AHP. Se for maior do que 0.1 recomenda-se que julgamentos sejam refeitos. Na literatura, em geral, os

julgamentos par a par são subsidiados pelas considerações e resultados das pesquisas referentes ao tema e, principalmente, pelo conhecimento de especialistas da área. No presente trabalho, a definição dos parâmetros de ponderação das variáveis foram analisados por especialistas do Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT do Laboratório de Riscos Ambientais (LARA), responsáveis pelo desenvolvimento de estudos relacionados ao controle de erosão. A escala (Tabela 9), com as classificações para ponderação das variáveis, foi fornecida, de modo que todas fossem analisadas.

Tabela 9. Escala fundamental de Saaty (1977) para julgamentos de variáveis par a par

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Recíprocos dos valores acima de zero	Se a atividade i recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i.	Uma designação razoável.
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n, somente para completar a matriz.

Todo o processo de julgamento citado foi modelado no software Microsoft Excel, utilizando o princípio do AHP para gerar os percentuais das relevâncias para os dados de saídas manuseados para a construção da expressão algébrica do processo de mapeamento. O julgamento par a par das variáveis e o índice resultante da comparação serão apresentados no capítulo de resultados obtidos.

3.3.3. CONSTRUÇÃO DO MODELO EM PLATAFORMA SIG

O processo de mapeamento utiliza-se de toda preparação de dados das etapas anteriores e da geração de produtos cartográficos através de operações espaciais de álgebra de mapas. O conceito de álgebra de mapas ou álgebra de campos pode ser visto como uma extensão da álgebra tradicional, com um conjunto de operadores e algoritmos matemáticos, em que as variáveis manipuladas são campos geográficos (Berry, 1993).

No programa *ArcGis 10.2.2* foi utilizada a ferramenta *weigheted overlay* que constrói e executa uma única expressão de álgebra de mapas composta pelos valores fornecidos das ponderações resultantes da aplicação do método AHP (ítem 3.3.2) e dos critérios de classificação adotados pela metodologia de Crepani (2001) quanto aos níveis de suscetibilidade das variáveis analisadas (ítem 3.3.1). A Figura 20 resume o procedimento de construção do modelo no SIG.

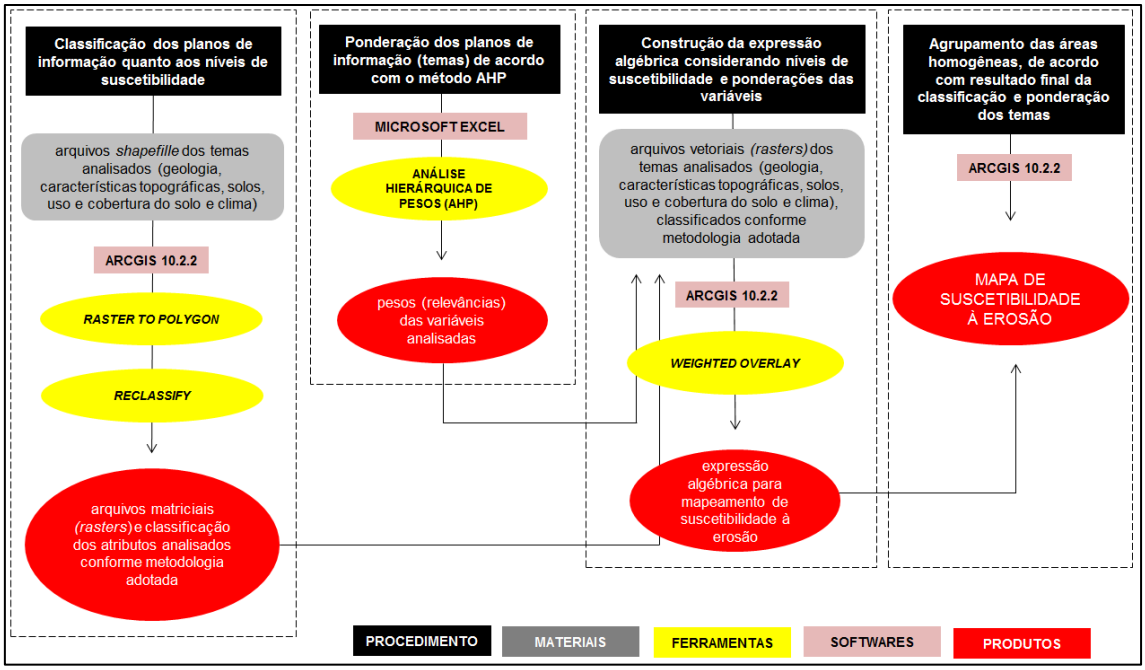


Figura 20. Fluxograma de procedimentos para construção do modelo de suscetibilidade à erosão no SIG

3.4. ETAPA 4: ANÁLISE DE RISCO DOS PROCESSOS EROSIVOS EM RELAÇÃO À LINHA FÉRREA

A metodologia para análise de risco dos processos erosivos em relação à linha férrea em estudo é baseada na proposta do IPT (2013), desenvolvida especialmente para análise dos processos erosivos mapeados em todo o Estado de SP, fonte do projeto desenvolvido ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), descrito no subitem 3.2.2 (página 58).

No decorrer das atividades relativas ao cadastramento dos processos erosivos urbanos e durante as vistorias de campo, constataram-se diferentes situações que ofereciam, aparentemente, maior ou menor risco aos elementos passíveis de serem atingidos (pessoas, bem como moradias, prédios públicos, sistema viário, redes de abastecimento de água e gás, redes de esgoto, galerias de águas pluviais, redes de distribuição de energia, fibras óticas etc). A partir dessas constatações detectou-se a necessidade da elaboração de uma metodologia capaz de quantificar o grau de risco que o elemento de estudo está submetido. Para tanto, seria necessário estabelecer critérios para determinar o grau de suscetibilidade do terreno para a reativação/evolução do processo e o grau de vulnerabilidade do elemento sob risco.

Conforme Ministério das Cidades/Cities Alliance (2006), a análise do conceito de risco (R), pode ser feita a partir da seguinte expressão:

$$R = P(A) * \frac{C(V)}{G}$$

Essa expressão indica que o risco (R) é a probabilidade (P) de ocorrência de um acidente associado a um determinado perigo ou ameaça (A), no caso, os processos erosivos, que podem resultar em consequências (C) danosas em função da vulnerabilidade (V) do meio exposto. Estes podem ter seus efeitos reduzidos pelo grau de gerenciamento (G) colocado em prática pela execução de medidas estruturais ou não estruturais, que visam erradicar ou reduzir a situação de risco no local.

Ainda segundo os órgãos citados, essa equação indica que, ao se olhar para uma “situação de risco”, deve-se, em primeiro lugar, identificar qual é o perigo,

que processos naturais ou da ação humana o estão produzindo, em que condições a sua evolução poderá produzir um acidente e qual a probabilidade deste fenômeno físico ocorrer. Após chegar a este ponto – o de vislumbrar o processo gerador do acidente – devem-se avaliar as consequências que ele causará. Não há risco sem alguma probabilidade de acidente nem acidente sem qualquer consequência de perda ou de dano. Finalmente, pode-se atuar sobre o problema, diminuindo o risco através de um melhor gerenciamento.

Na proposta adotada procurou-se estabelecer um método visando quantificar o grau de risco que os processos erosivos podem oferecer à linha férrea e aos elementos que a compõe. Os fatores que estruturam essa proposta são simplificados, agrupados e avaliados de forma qualitativa, a partir da experiência adquirida dos técnicos envolvidos, das observações diretas realizadas em campo e dos critérios obtidos em Ministério das Cidades/Cities Alliance (2006; 2007). O método apresentado contempla somente os processos erosivos que foram cadastrados neste trabalho, ou seja, erosões do tipo ravina e boçorocas que são definidas conforme Almeida Filho et al. (2001).

Nesse sentido, foram avaliados os seguintes fatores, considerados como essenciais à análise do risco:

- Tipologia do processo erosivo e a suscetibilidade do terreno em que está localizado para ocorrência de reativação/evolução de processos;

- Vulnerabilidade dos elementos sob risco; e

- Possibilidade da reativação/evolução do processo erosivo atingir o meio urbano.

Para avaliar o grau de suscetibilidade do terreno, obteve-se, para cada registro, a classificação adotada pelo modelo de suscetibilidade à erosão gerado, definido no ítem 3.3 (etapa 3, página 60). Já para a vulnerabilidade dos elementos sob risco é relativa à maior ou menor distância desses em relação à cabeceira do processo erosivo ou de uma determinada ramificação. Ressalta-se que essa relação de distância está associada ao tipo de solo predominante

na área de estudo. Conforme apresentado nas Tabelas 10 e Tabela 11, determinaram-se, em função da experiência adquirida dos técnicos envolvidos, intervalos de distância para solos predominantemente arenosos (Planalto Ocidental e Depressão Periférica) e outro intervalo para solos predominantemente argilosos (Planalto Atlântico). A obtenção das distâncias de cada processo erosivo em relação à linha férrea foi definida com o uso do *software ArcGis 10.2.2.*

Tabela 10. Grau de vulnerabilidade da linha férrea em função da distância da cabeceira da erosão e suas laterais – solos predominantemente arenosos. Fonte: IPT (2013)

Classe	Intervalo de Distância (m)
Alto	0 - 300
Médio	300 - 500
Baixo	> 500

Tabela 11. Grau de vulnerabilidade da linha férrea em função da distância da cabeceira da erosão e suas laterais – solos predominantemente argilosos. Fonte: IPT (2013)

Classe	Intervalo de Distância (m)
Alto	0 - 150
Médio	150 - 300
Baixo	> 300

A partir da associação do grau de suscetibilidade com o grau de vulnerabilidade da linha férrea (distância em relação à cabeceira ou ramificações da erosão e tipo de solo da área), pode-se determinar o grau de risco que a linha está sujeita, conforme apresentado na Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 12. Graus de risco. Fonte: IPT (2013)

Suscetibilidade	Vulnerabilidade		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	Muito Alto	Alto	Médio
Médio	Alto	Médio	Médio
Baixo	Médio	Médio	Baixo

Tabela 13. Graus de risco da linha férrea em relação aos processos erosivos identificados na área de estudo. Fonte: IPT (2013)

Grau de Risco	Descrição
Muito Alto	A suscetibilidade associada à vulnerabilidade indica MUITO ALTA POTENCIALIDADE para o desenvolvimento de processo erosivo que pode atingir os elementos sobre risco (edificações e infraestrutura) situados na área urbana. Mantidas as condições atuais é MUITO PROVÁVEL que os elementos de risco sejam atingidos pelo processo de erosivo.
Alto	A suscetibilidade associada à vulnerabilidade indica ALTA POTENCIALIDADE para o desenvolvimento de processo erosivo que pode atingir os elementos sobre risco (edificações e infraestrutura) situados na área urbana. Mantidas as condições atuais, é PROVÁVEL que os elementos de risco sejam atingidos pelo processo erosivo.
Médio	A suscetibilidade associada à vulnerabilidade indica MÉDIA POTENCIALIDADE para o desenvolvimento de processo erosivo que pode atingir os elementos sobre risco (edificações e infraestrutura) situados na área urbana. Mantidas as condições atuais, é REDUZIDA A POSSIBILIDADE que os elementos de risco sejam atingidos pelo processo erosivo.
Baixo	A suscetibilidade associada à vulnerabilidade indica BAIXA POTENCIALIDADE para o desenvolvimento de processo erosivo que pode atingir os elementos sobre risco (edificações e infraestrutura) situados na área urbana. Mantidas as condições atuais, NÃO SE ESPERA que os elementos de risco sejam atingidos pelo processo erosivo.

4. RESULTADOS

A primeira parte da apresentação dos resultados aborda os mapeamentos intermediários das variáveis analisadas e as ponderações estatísticas referentes aos questionários aplicados para compor o modelo proposto de suscetibilidade à erosão. Já a segunda trata da análise, propriamente dita, do risco oferecido pelos processos erosivos à linha férrea da área de estudo selecionada.

4.1. MAPEAMENTOS INTERMEDIÁRIOS: VARIÁVEIS AMBIENTAIS

4.1.1. GEOLOGIA

O mapeamento geológico da área de estudo evidenciou a presença de 21 unidades geológicas formadas por mais de 40 tipos de rochas. A Tabela 14 resume os resultados encontrados e sua classificação quanto à suscetibilidade à erosão. O mapeamento do tema Geologia segue representado pela Figura 21.

Através da análise dos dados é possível observar que mais de 70% da área de estudo analisada apresenta unidades geológicas e tipos litológicos classificados como de alta suscetibilidade à erosão (argilitos, folhelhos, depósitos de cascalhos e arenito), originados de rochas sedimentares, as mais suscetíveis na escala de classificação utilizada. As rochas sedimentares são formadas, em parte, pelos grãos e poeiras de origem continental. Estas partículas resultam da desagregação e da decomposição das rochas eruptivas, metamórficas e mesmo sedimentares, que são carregadas pelos ventos, pelo lençol d´água de escoamento superficial e mesmo pela ação da gravidade. Em relação ao grau de dureza, são rochas menos resistentes em relação aos outros tipos (ígneas e metamórficas), sendo mais suscetíveis aos processos de intemperismo. Com classificações de suscetibilidade à erosão acima de 2,8, as formações de Pirambóia e Itararé são as unidades que ocupam maiores proporções de área e concentram-se entre os trechos de Sorocaba e Botucatu.

Tabela 14. Unidades Geológicas: principais tipos de rochas e classificação de suscetibilidade à erosão

Unidades Geológicas	Litologia	Hierarquia	Classe	Área	Área	Classificação
Nome	Tipo de Rochas	Nome	Nome	(Km²)	(%)	Suscetibilidade (CREPANI)
Alcalina Ipanema	-	-	-	3,5384	0,1868	0,0
Granito São Francisco	Monzogranito, Granito, Sienogranito	Corpo	Ígnea	29,3527	1,5499	1,1
Granito Sorocaba	Monzogranito, Sienogranito, Granodiorito, Granito	Corpo	Ígnea	63,3437	3,3447	1,1
Granitoides tipo I, tardi-orogenicos, do Socorro - Guaxupe	Monzogranito, Granodiorito, Granito, Sienogranito	-	-	10,7900	0,5697	1,1
Serra Geral	Dacito	Formação	Ígnea	71,4360	3,7720	1,1
Granito Ibuiúna	Monzogranito, Granodiorito, Quartzo monzonito	Corpo	Ígnea	5,4962	0,2902	1,2
Granitóide São Roque	Granodiorito, Biotita monzogranito	Corpo	Ígnea	40,9062	2,1600	1,7
Serra do Itaberaba	Xisto, Rocha metapelitica	Grupo	Metamórfica	27,3914	1,4463	1,9
Botucatu	Arenito	Formação	Sedimementar	9,5773	0,5057	2,0
São Roque - Formação Piragibú	Filito, Metaconglomerado, Metabasito, Metabrecha	Grupo	Metamórfica	166,4472	8,7889	2,1
Votuverava - Unidade indígena	Metasiltito, Filito, Metaconglomerado, Metarenito	Grupo	Metamórfica	0,2395	0,0126	2,1
São Roque - Formação Pirapora do Bom Jesus (unidade metavulcânica)	Rocha metavulcanica, Rocha vulcânica piroclástica	Grupo	Ígnea	7,8965	0,4170	2,5
Tatuí	Siltito	Formação	Sedimentar	138,0700	7,2905	2,7
Teresina	Siltito argiloso	Formação	Sedimenar	72,9760	3,8533	2,7
Irati	Folhelho	Formação	Sedimentar	38,9703	2,0577	2,8
Itararé	Arenito, Folhelho, Diamictito, Ritmito	Grupo	Sedimentar	604,5323	31,9210	2,8
Marília	Arenito	Formação	Sedimentar	85,4238	4,5106	2,8
Pirambóia	Arenito, Folhelho, Diamictito, Ritmito	Formação	Sedimentar	439,8449	23,2251	2,8
Serra Alta	Argilito, Folhelho, Siltito	Formação	Sedimentar	59,6588	3,1502	2,8
São Roque - Formação Pirapora do Bom Jesus (unidade carbonatica)	Calcifilito, Metacalcario dolomito	Grupo	Metamórfica	0,0045	0,0002	2,9
Depósitos Aluvionares	Depositos de areia, Depósitos de cascalho	Não definida	Sedimementar	17,9418	0,9474	3,0
Total				**1.893,8376**	**100,0000**	

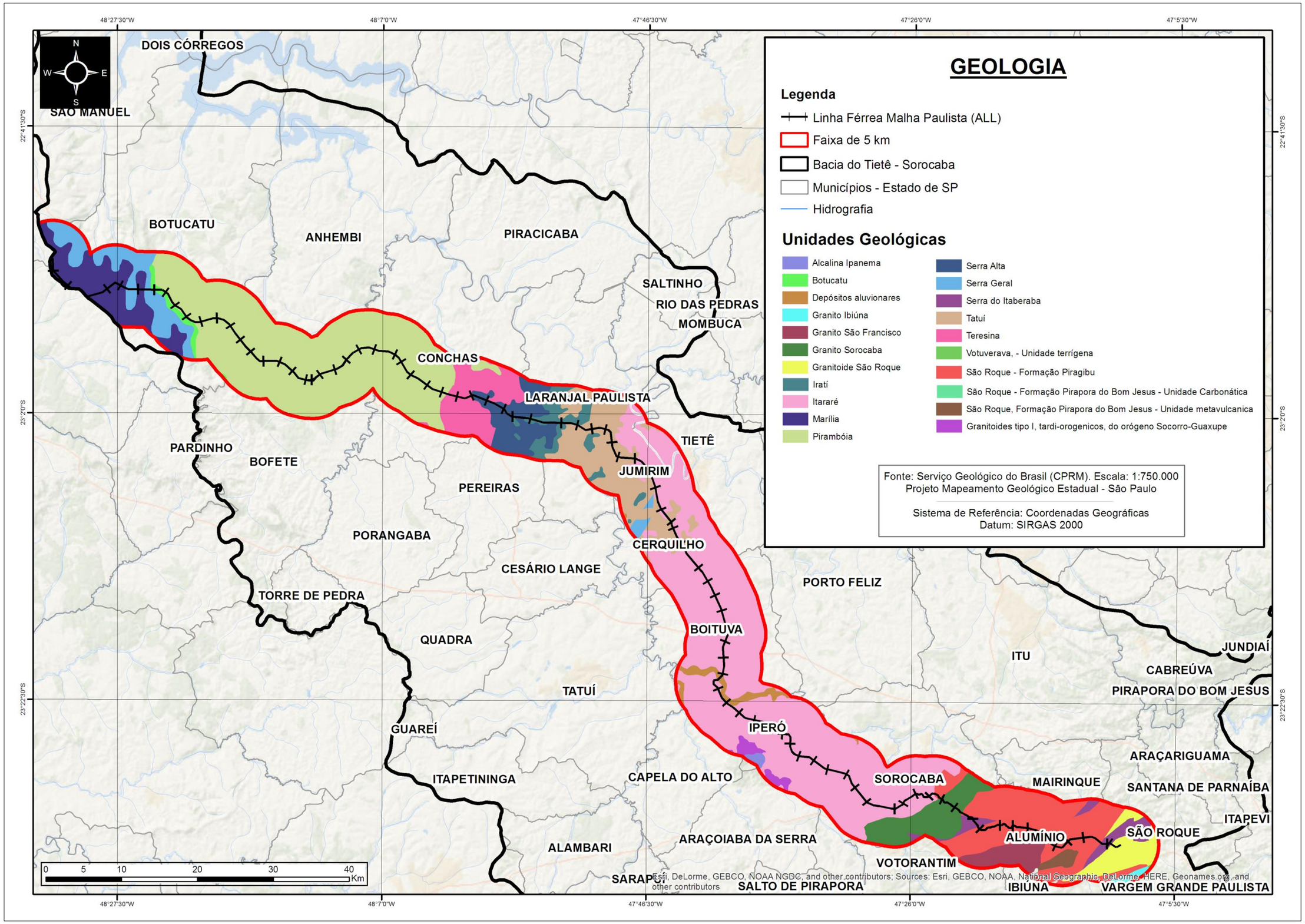


Figura 21. Mapeamento geológico

4.1.2. CARACTERÍSTICAS TOPOGRÁFICAS

Os resultados que seguem são referentes aos mapeamentos de declividade e dissecação do relevo pela drenagem, ambos relacionados às características topográficas da área de estudo.

4.1.2.1. DECLIVIDADE

Para mapeamento do tema de declividade (Figura 23), seguiu-se o método anteriormente descrito no ítem 3.3.1.2 (página 64). A geração do modelo digital de terreno está ilustrada através do mapa de hipsometria (Figura 22). Referente ao modelo gerado foi possível traçar um perfil topográfico correspondente ao desenho do traçado da linha férrea (Figura 24).

A sobreposição das informações de declividade com a área de estudo possibilitou extrair o percentual de cada intervalo mapeado encontrado ao longo do trajeto da linha e da área considerada para análise *(buffer).* A Figura 22 apresenta o resultado final do mapeamento de declividade. Já a tabela 15 resume os resultados encontrados.

Através do mapa e dados expostos, é possível observar que a Malha Paulista apresenta maiores percentuais de áreas com valores de declividade com valores de até 2º e acima de 2º até 4,6º, sendo uniforme a distribuição desses intervalos por toda área de análise. De modo geral, declividades de até 6º são classificadas como intervalos de terrenos propensos a níveis com fragilidade ambiental muito baixa (Ross, 1995; Crepani, 2001; Salomão, 1999).

As demais classes mapeadas apresentam distribuições similares quanto o percentual de área contida em cada intervalo. Os trechos com maiores declividades estão concentrados nos extremos da linha férrea, nos municípios de Botucatu, Mairinque e Alumínio. De acordo com Ross (2000), classes de declividade acima 15º estão propensas às classificações de alta a muito alta fragilidade ambiental e suscetibilidade à erosão.

Em relação aos dados de hipsometria, o trecho da Malha Paulista concentra aproximadamente 70% da área de análise considerada no intervalo de até 700 m. Assim como nos trechos com registros de maiores declividades, os registros de maiores altitudes (acima de 900 m) estão localizados nos extremos da região de análise. Em relação aos intervalos menores, o trecho não apresenta altitudes inferiores a 100m, classes correspondentes aos fundos de vales principais e ao terço inferior das vertentes. Isso se deve ao fato de, no estado de SP, os desenhos dos traçados das principais linhas férreas localizam-se nas cabeceiras de drenagem, atuando como divisores de água, coincidindo com os limites topográficos das bacias hidrográficas do estado.

Tabela 15. Declividade – Área (km² e %) por intervalo de classe mapeado e classificação de suscetibilidade à erosão

Declividade	Área de análise (buffer - 5km)	Área de análise (buffer - 5km)	Classificação
Intervalos (em graus)	Área (km²)	Área (%)	Suscetibilidade (CREPANI)
< 2	499,870	26,305	1,0
2 - 2,3	351,500	18,497	1,1
3,3 - 4,6	455,570	23,974	1,2
4,6 - 5,9	132,360	6,965	1,3
5,9 - 7,3	170,480	8,971	1,4
7,3 - 8,6	58,000	3,052	1,5
8,6 - 9,9	45,570	2,398	1,6
9,9 - 11,2	63,410	3,337	1,7
11,2 - 12,5	22,010	1,158	1,8
12,5 - 13,8	18,670	0,982	1,9
13,8 - 15,2	25,400	1,337	2,0
15,2 - 16,5	8,910	0,469	2,1
16,5 - 17,8	8,310	0,437	2,2
17,8 - 19,1	12,030	0,633	2,3
19,1 - 20,4	4,740	0,249	2,4
20,4 - 21,7	4,370	0,230	2,5
21,7 - 23,0	5,730	0,302	2,6
23,0 - 24,4	2,170	0,114	2,7
24,4 - 25,7	1,950	0,103	2,8
25,7 - 27	2,810	0,148	2,9
> 27	6,400	0,337	3,0
Total	**1.900,260**	**100,000**	

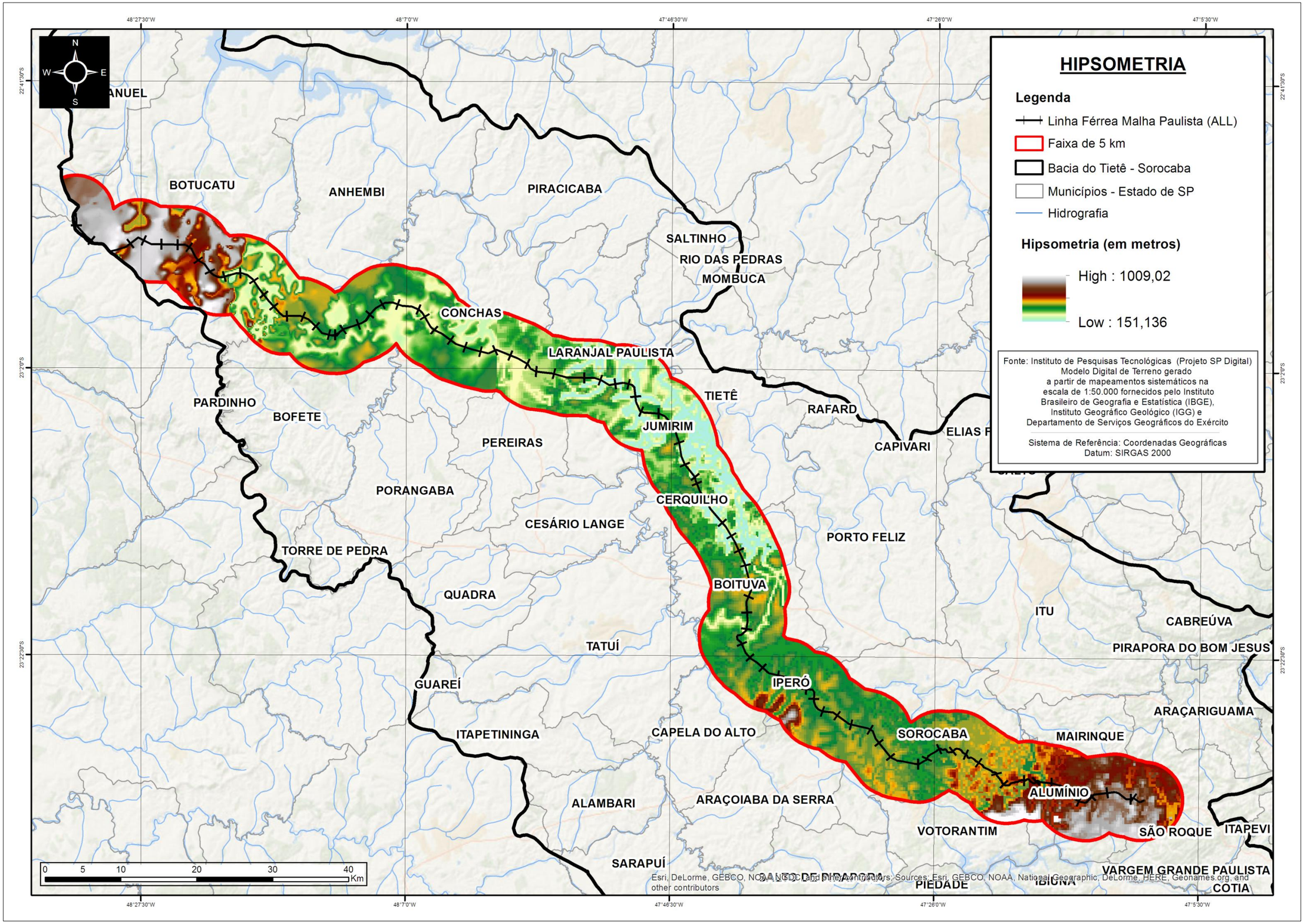


Figura 22. Modelo digital de terreno (MDT) gerado – Mapeamento hipsométrico

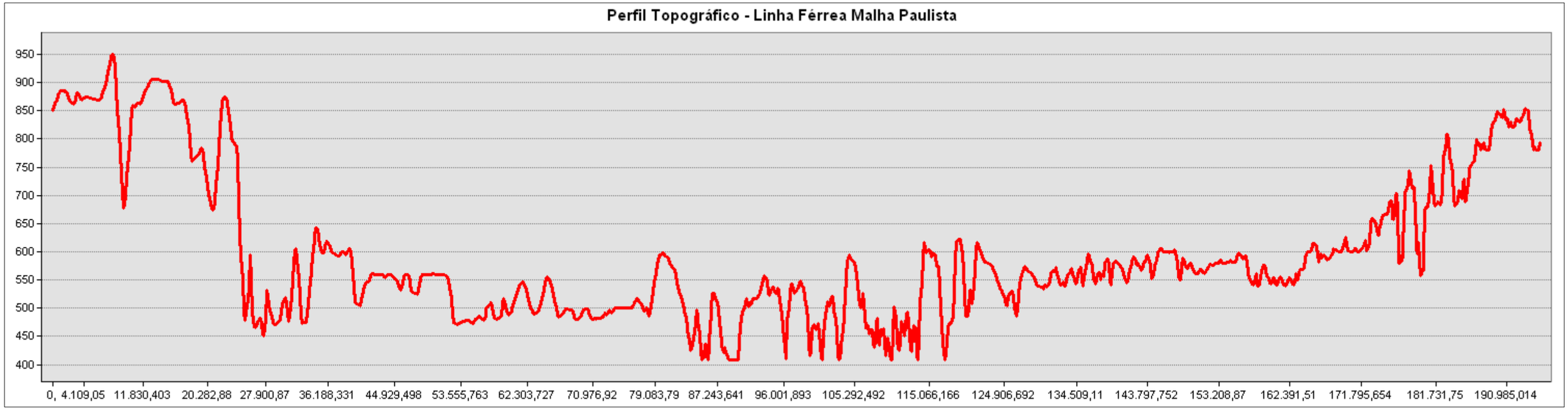


Figura 23. Perfil topográfico – Traçado da linha férrea Malha Paulista

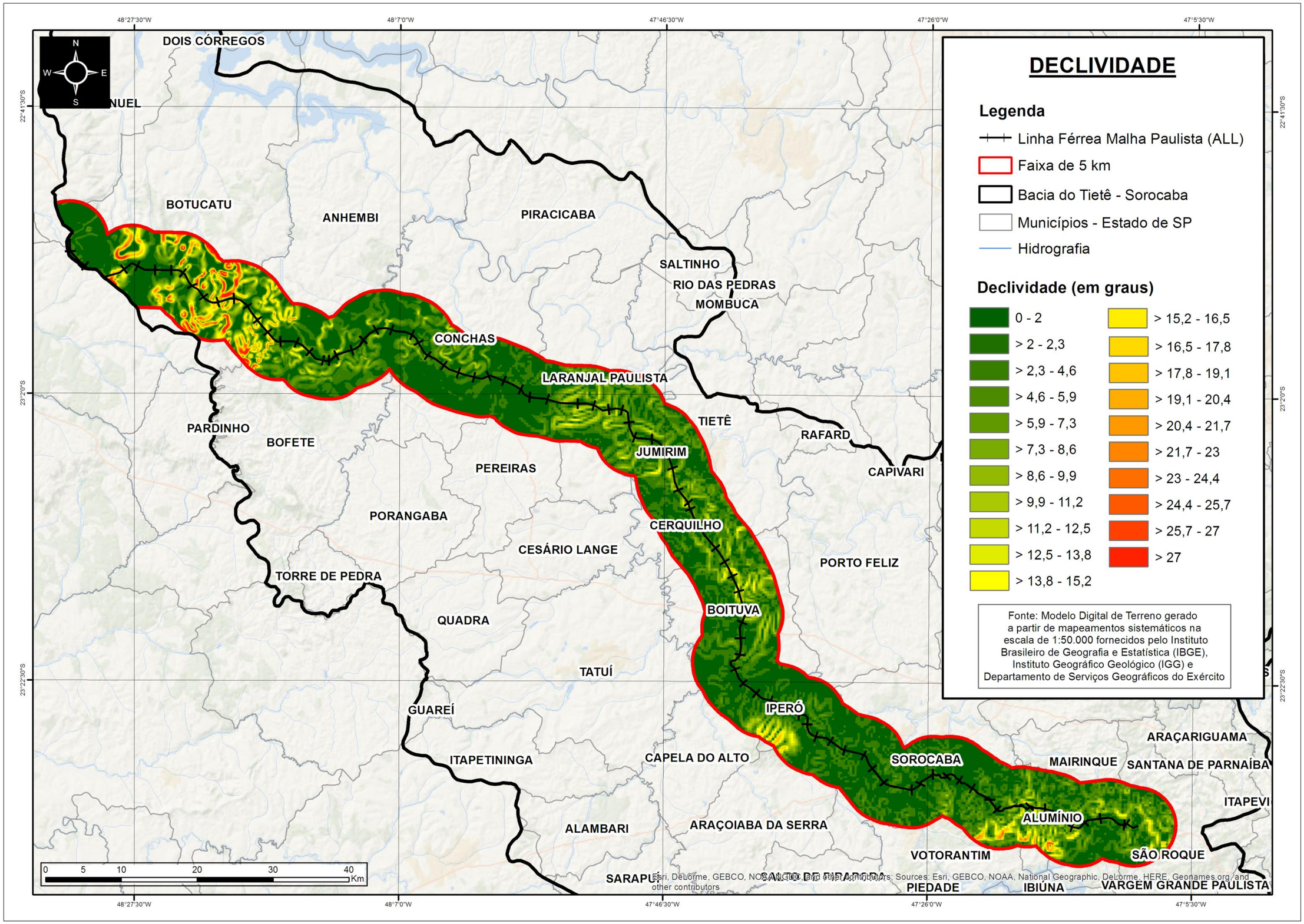


Figura 24. Mapeamento de declividade

4.1.2.2. DISSECAÇÃO DO RELEVO PELA DRENAGEM

A Figura 25 apresenta o mapeamento geomorfológico e a rede de drenagem (descritos no ítem 3.3.1.2) utilizados para obtenção do índice de dissecação do relevo referente à área de estudo. Já a Tabela 16 resume os valores de área e comprimento da rede de drenagem encontrados para cada unidade de área, responsável pela geração do índice proposto.

Mais de 90% da área de estudo é formada basicamente por domínios de colinas amplas e suaves, colinas dissecadas, morros e serras baixas. Esses domínios concentram um total de mais de 2.386 metros de rios, igarapés, córregos e riachos, classificados como permanentes ou intermitentes. No total, a área de estudo apresenta um índice de dissecação pela drenagem, médio, de 0,00428 (baixa suscetibilidade). De acordo com a classificação adotada, os compartimentos geomorfológicos analisados apresentam baixos índices de dissecação do relevo pela drenagem, com valores variando entre 0,000 e 3,272 (baixa suscetibilidade à erosão). Os domínios que apresentaram maiores índices de dissecação do relevo pela drenagem foram os de morros e serras baixas. Tais domínios representam mais de 30% da área total de análise e estão concentrados no traçado da linha que liga os municípios de Alumínio à Iperó. O mapeamento do índice de dissecação pela drenagem está representado pelo mapa apresentado na Figura 25.

Tabela 16. Índice de Dissecação do Relevo pela Drenagem: Total de drenagem (m) / área (m²) e classificação de suscetibilidade à erosão

Compartimentos Geomorfológicos		Total de Drenagem	Área	Índice de Dissecação do Relevo pela Drenagem	Classificação
Código no mapa	Domínio	Comprimento (m)	Área (m)	Drenagem (m) / Área (m²)	Suscetibilidade (CREPANI)
1	Morros e serras baixas	0,000	4.518,166	0,000	1,0
11	Colinas dissecadas e morros baixos	0,000	1.434,000	0,000	1,0
31	Colinas amplas e suaves	0,000	25,470	0,000	1,0
32	Colinas amplas e suaves	0,000	1.462,000	0,000	1,0
41	Colinas dissecadas e morros baixos	0,000	55.240,653	0,000	1,0
44	Morros e serras baixas	9.361,070	18.954.844,050	0,0005	1,0
42	Colinas amplas e suaves	761.223,773	583.984.665,793	0,001	1,0
43	Montanhoso	12.515,927	5.496.206,923	0,002	1,0
13	Colinas dissecadas e morros baixos	850,367	2.906,000	0,293	1,0
30	Colinas dissecadas e morros baixos	438,727	1.219,000	0,360	1,0
15	Colinas dissecadas e morros baixos	1.681,000	4.060,000	0,414	1,0
9	Morros e serras baixas	724,529	1.587,000	0,457	1,0
38	Morros e serras baixas	1.764,777	3.538,000	0,499	1,0
28	Colinas dissecadas e morros baixos	2.301,680	4.267,000	0,539	1,1
36	Colinas dissecadas e morros baixos	69.666,830	92.975,000	0,749	1,1
10	Morros e serras baixas	186,730	236,233	0,790	1,1
16	Colinas dissecadas e morros baixos	8.547,000	10.526,000	0,812	1,1
35	Colinas dissecadas e morros baixos	27.259,351	33.147,000	0,822	1,1
17	Colinas amplas e suaves	50.515,156	59.658,000	0,847	1,1
26	Colinas amplas e suaves	686,315	764,136	0,898	1,1
33	Escarpas serranas	9.102,763	9.577,000	0,950	1,1
21	Morros e serras baixas	10.936,931	10.798,000	1,013	1,2
18	Planaltos e baixos platôs	90.492,840	85.423,000	1,059	1,2
37	Colinas dissecadas e morros baixos	133.019,389	121.809,000	1,092	1,2
39	Escarpas serranas	74.845,788	65.893,000	1,136	1,2
40	Colinas dissecadas e morros baixos	510.140,565	435.784,305	1,171	1,2
22	Planícies Fluviais ou flúvio-lacustres	511,840	429,000	1,193	1,2
4	Morros e serras baixas	304,166	239,000	1,273	1,2
12	Colinas amplas e suaves	713,713	448,870	1,590	1,3
3	Morros e serras baixas	46.730,070	29.000,000	1,611	1,3
34	Planícies Fluviais ou flúvio-lacustres	653,439	404,112	1,617	1,3
14	Colinas amplas e suaves	1.355,000	747,504	1,813	1,3
25	Planícies Fluviais ou flúvio-lacustres	26.711,321	14.611,000	1,828	1,3
27	Colinas amplas e suaves	2.936,368	1.518,000	1,934	1,3
6	Morros e serras baixas	33.680,192	16.439,000	2,049	1,4
23	Morros e serras baixas	132.169,319	63.343,732	2,087	1,4
2	Morros e serras baixas	17.938,169	7.895,000	2,272	1,4
20	Colinas dissecadas e morros baixos	21.713,975	8.996,000	2,414	1,4
19	Morros e serras baixas	386.662,335	157.450,000	2,456	1,4
5	Morros e serras baixas	20.970,786	8.078,000	2,596	1,5
24	Planícies Fluviais ou flúvio-lacustres	6.606,821	2.495,000	2,648	1,5
7	Morros e serras baixas	7.816,882	2.873,000	2,721	1,5
8	Morros e serras baixas	120.776,846	40.906,000	2,953	1,5
29	Colinas amplas e suaves	6.419,151	1.962,000	3,272	1,6

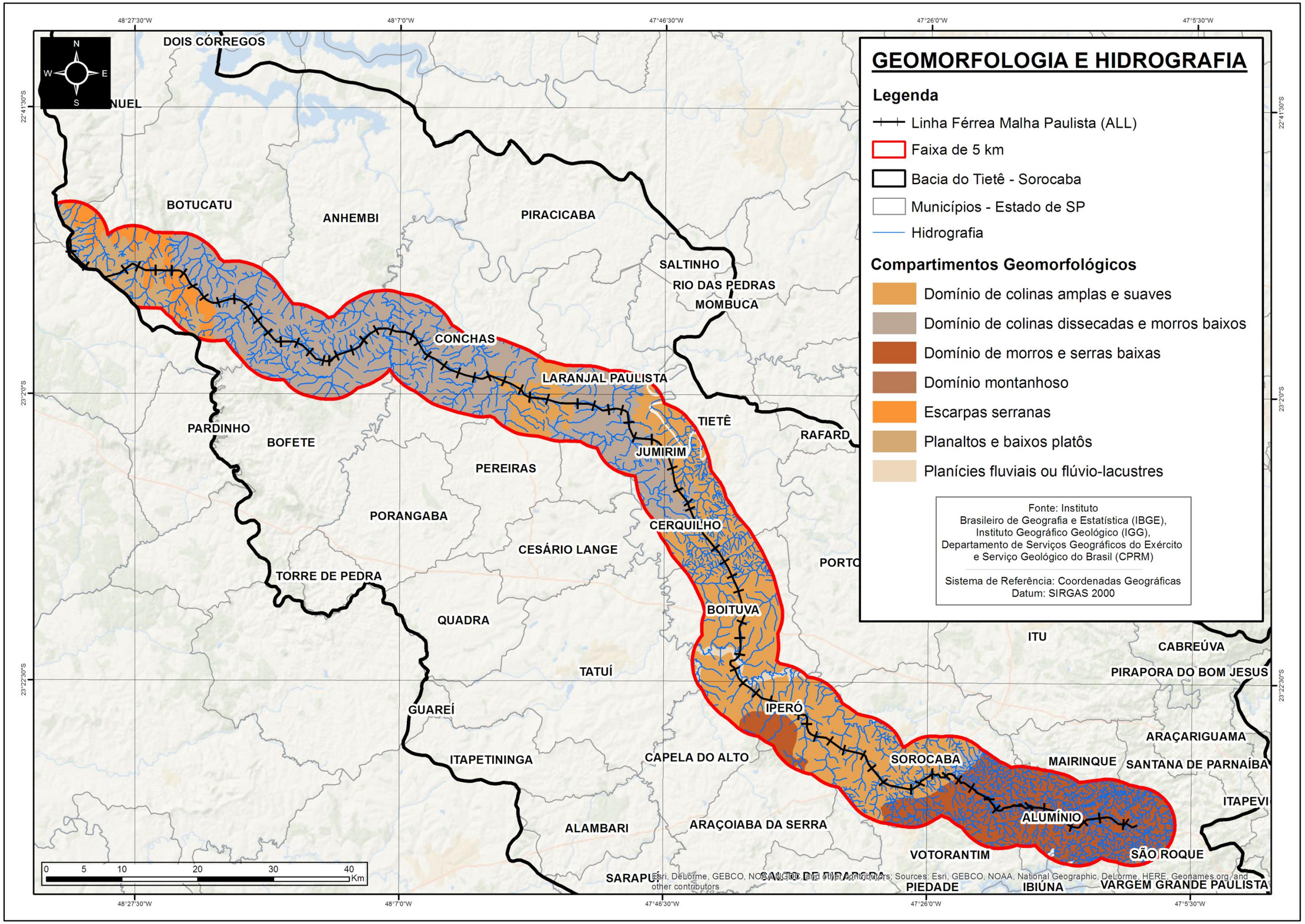


Figura 25. Mapeamento de compartimentos geomorfológicos e da rede de drenagem utilizados na obtenção do índice de dissecação do relevo pela drenagem

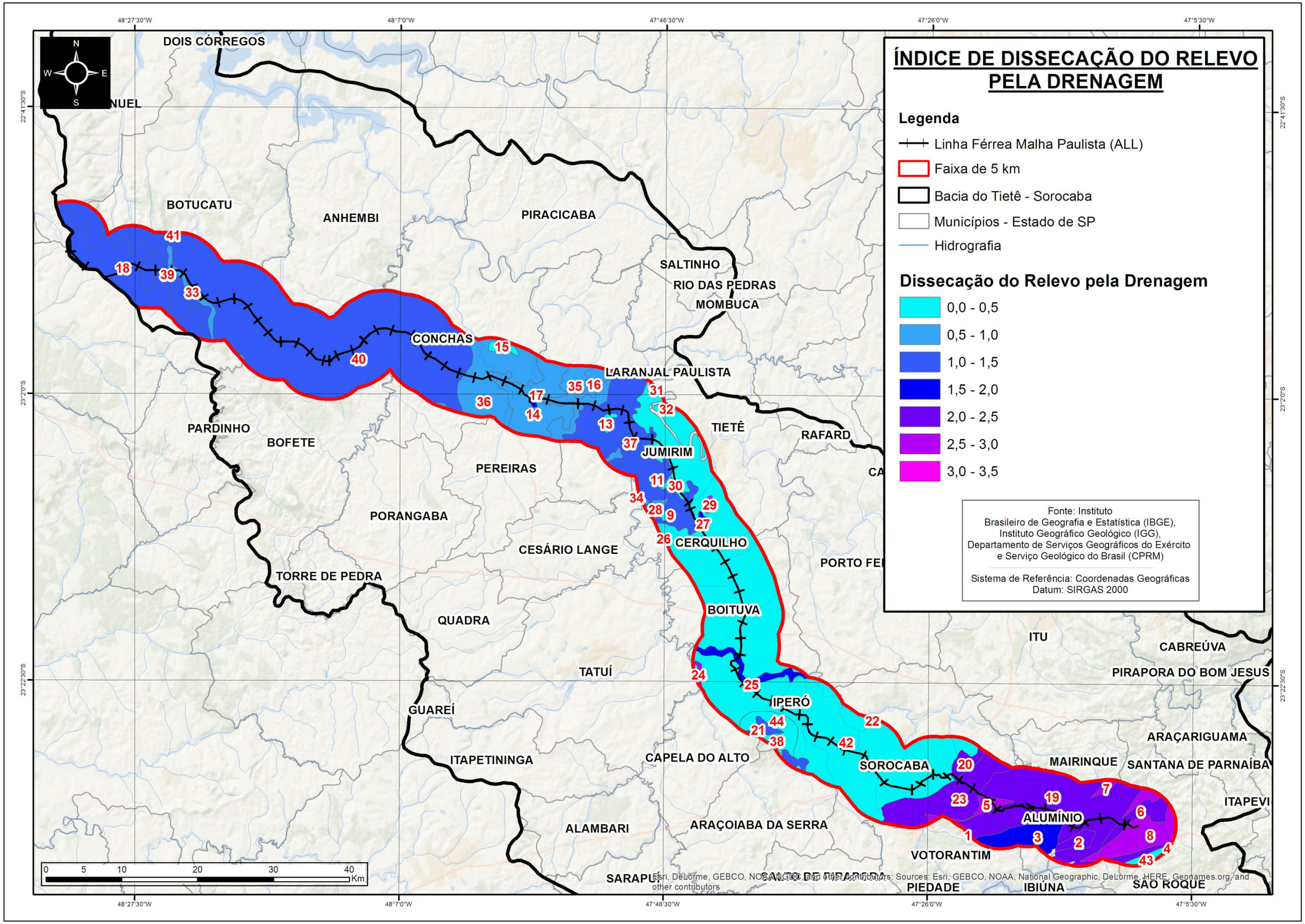


Figura 26. Mapeamento do índice de dissecação pela drenagem

4.1.3. SOLO

A espacialização das classes de solo apresenta-se ordenada com forte influência das variações morfométricas ao longo das vertentes, apresentando uma ligação de causa e efeito entre a topologia e a distribuição dos tipos de solo (Hermuche *et al.,*2002). Para aplicação da técnica de mapeamento de solo proposta foi necessário, de antemão, uma verificação de tipos de solos existentes na área de estudo, identificadas através de mapeamentos secundários disponíveis. Tal verificação permitiu identificar o comportamento das características topográficas das classes de tipos de solo existentes na região. O mapa utilizado segue representado pela Figura 27. Através do cruzamento do mapeamento pedológico com os mapeamentos de declividade e hipsometria da área de estudo foi possível traçar o perfil de distribuição das diferentes tipologias de solo e suas características topográficas. Os histogramas de declividade e hipsometria gerados auxiliaram na análise da diferenciação entre uma classe e outra, indicando zonas de transição através da distribuição de frequências (Figuras 28, 29, 30, 31, 32 e 33).

Sobre os tipos de solos encontrados, podemos dizer que os Latossolos são solos profundos, bem drenados, com textura média ou mais fina e pequena variação de argila entre os horizontes, o que permite uma maior infiltração d'água no sentido vertical e, consequentemente, apresenta menor densidade de drenagem superficial. Geralmente ocorrem em relevos planos ou suavemente ondulados, com baixa declividade, onde é menor o grau de erosão. Já os Argissolos também são solos profundos, porém com maior teor de argila no horizonte B, fazendo com que a infiltração d'água seja mais lenta, aumentando a drenagem superficial, bem como sua capacidade erosiva. Geralmente ocorrem em relevos ondulados ou fortemente ondulados, com declividade um pouco mais acentuada. Por fim, os Nitosolos formam-se sobre rochas básicas e ocupam as porções média e inferior de encostas onduladas até fortemente onduladas. Apresentam riscos de erosão se estiverem localizados em relevos ondulados. Em vista de suas características, à exceção do relevo, esses solos têm aptidão boa para lavouras e demais usos agropastoris.

A definição dos parâmetros estatísticos das classes de solos identificadas está definida na Tabela 17. Já a Tabela 18 traz a comparação entre os dois mapeamentos de solos da região e a classificação dos tipos de solos segundo a metodologia adotada de suscetibilidade à erosão. Por fim, a Figura 33 é o resultado do mapeamento final de solos gerado para a área de estudo.

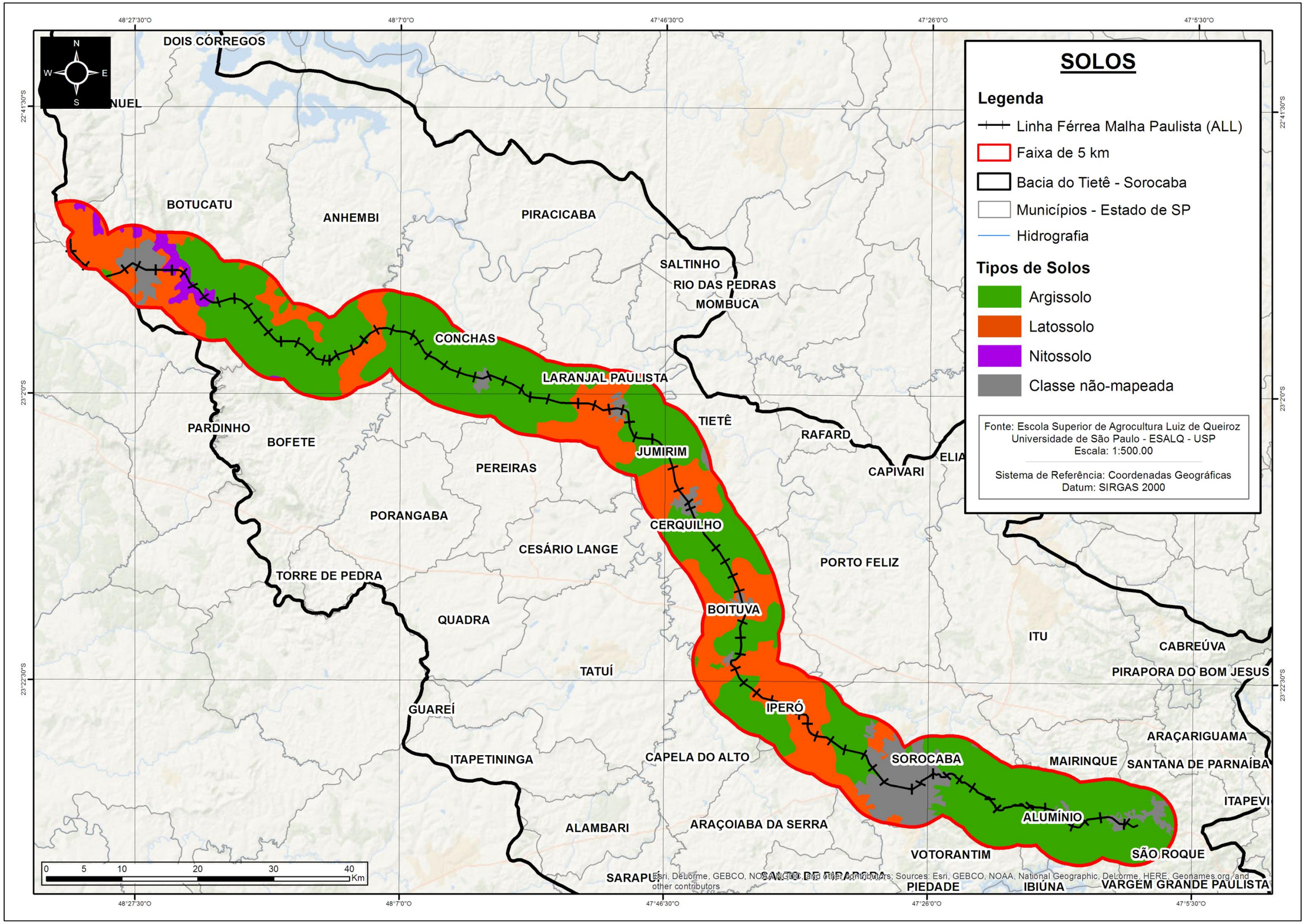


Figura 27. Mapeamento de tipos de solo (pedologia) – Mapeamento ESALQ – Escala 1:500.000

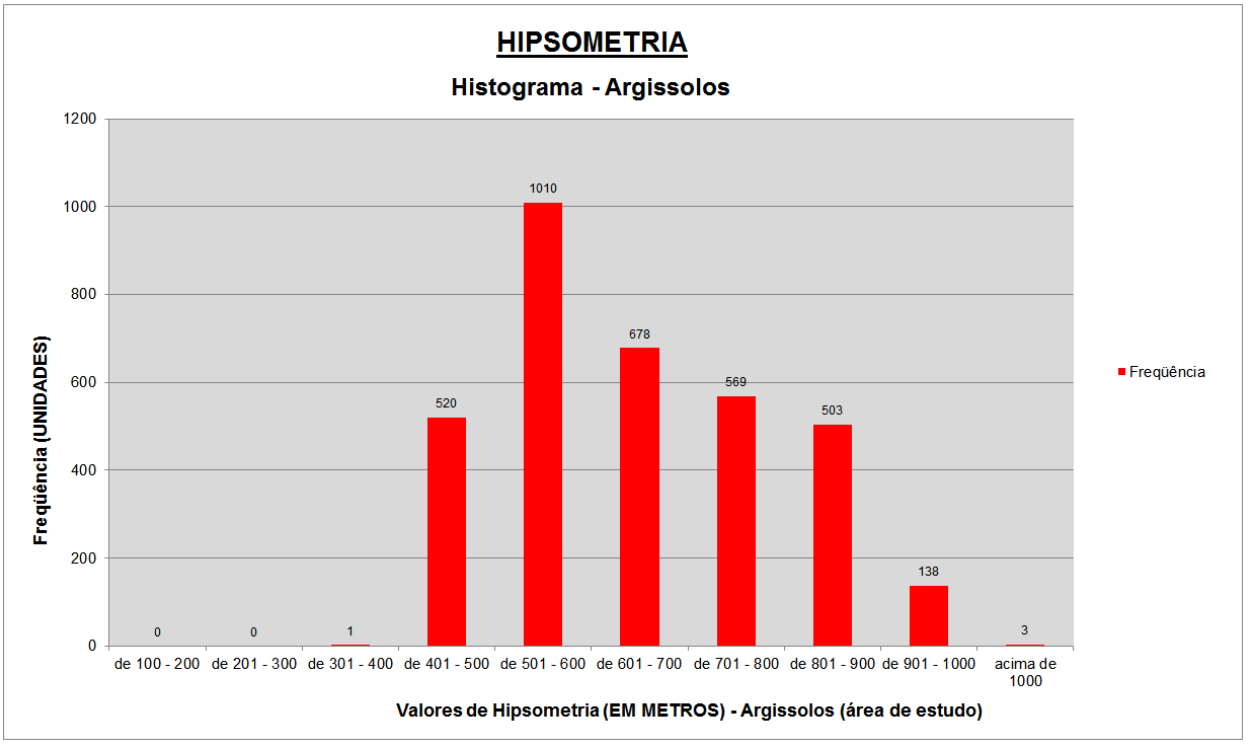


Figura 28. Hipsometria **-** Histograma de Frequência – Argissolos

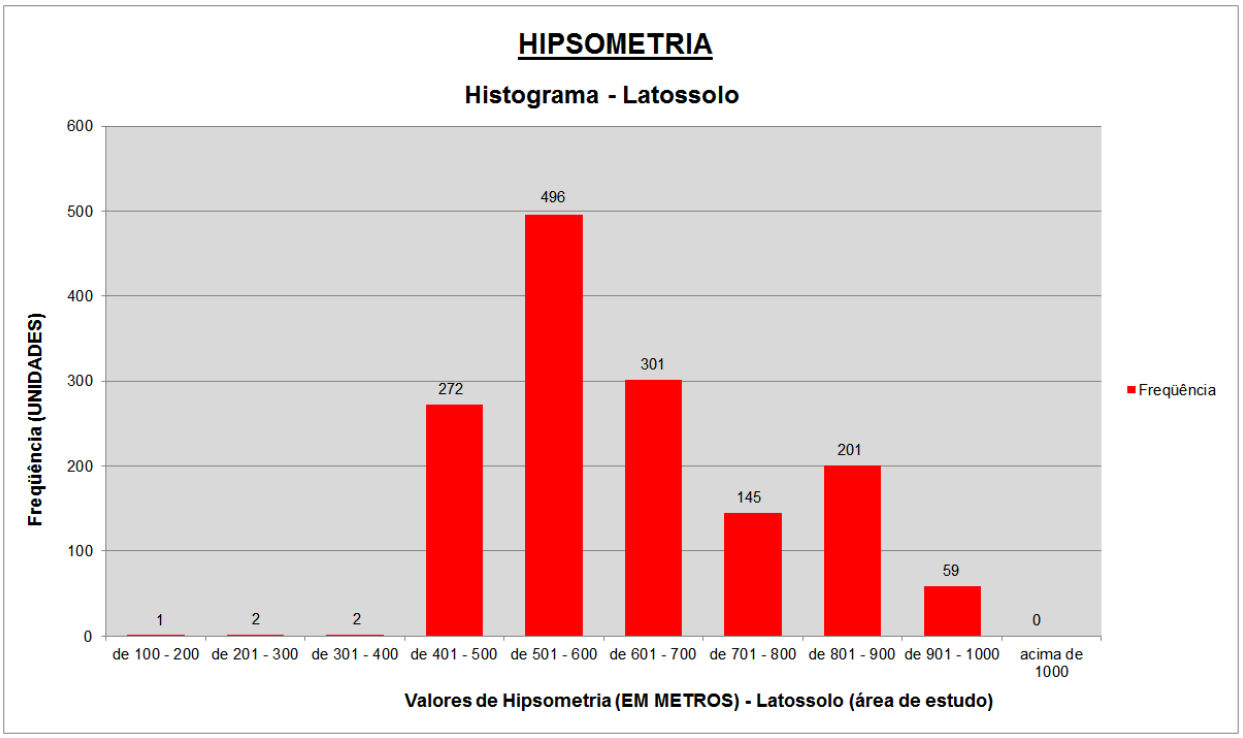


Figura 29. Hipsometria **-** Histograma de Frequência – Latossolos

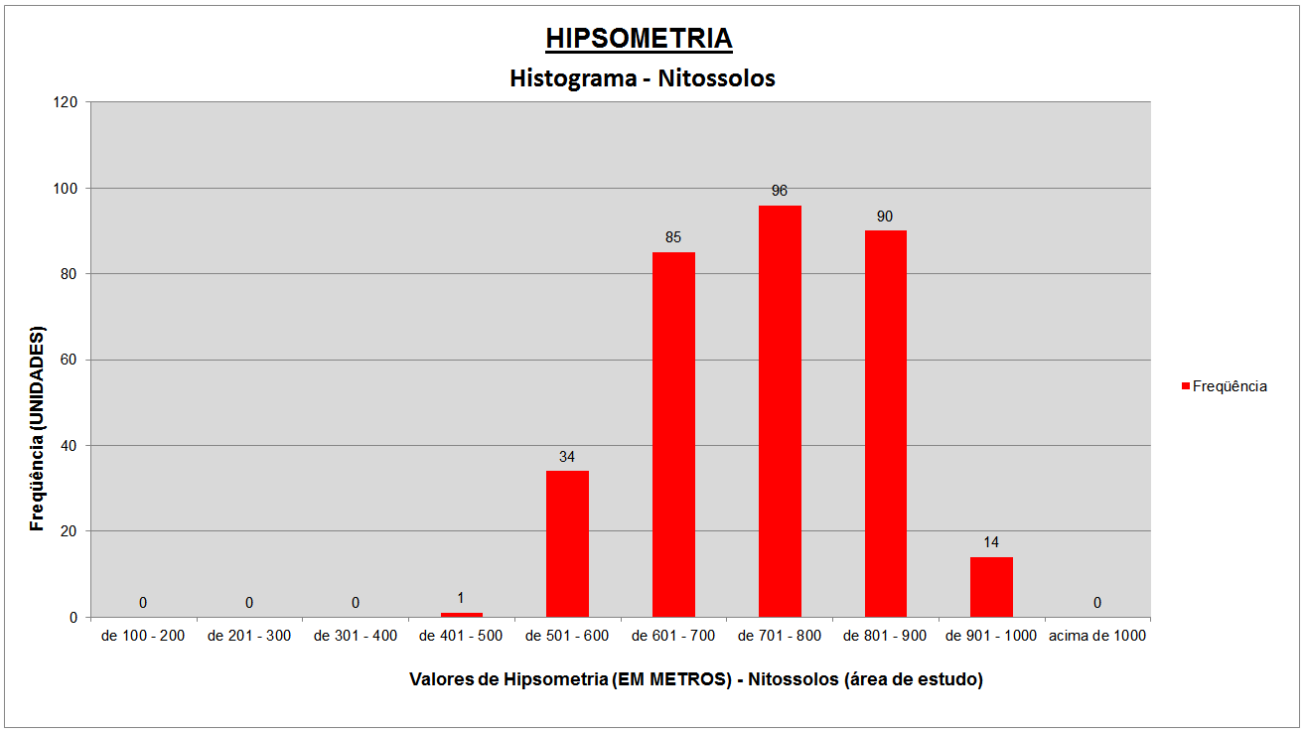


Figura 30. Hipsometria **-** Histograma de Frequência – Nitossolos

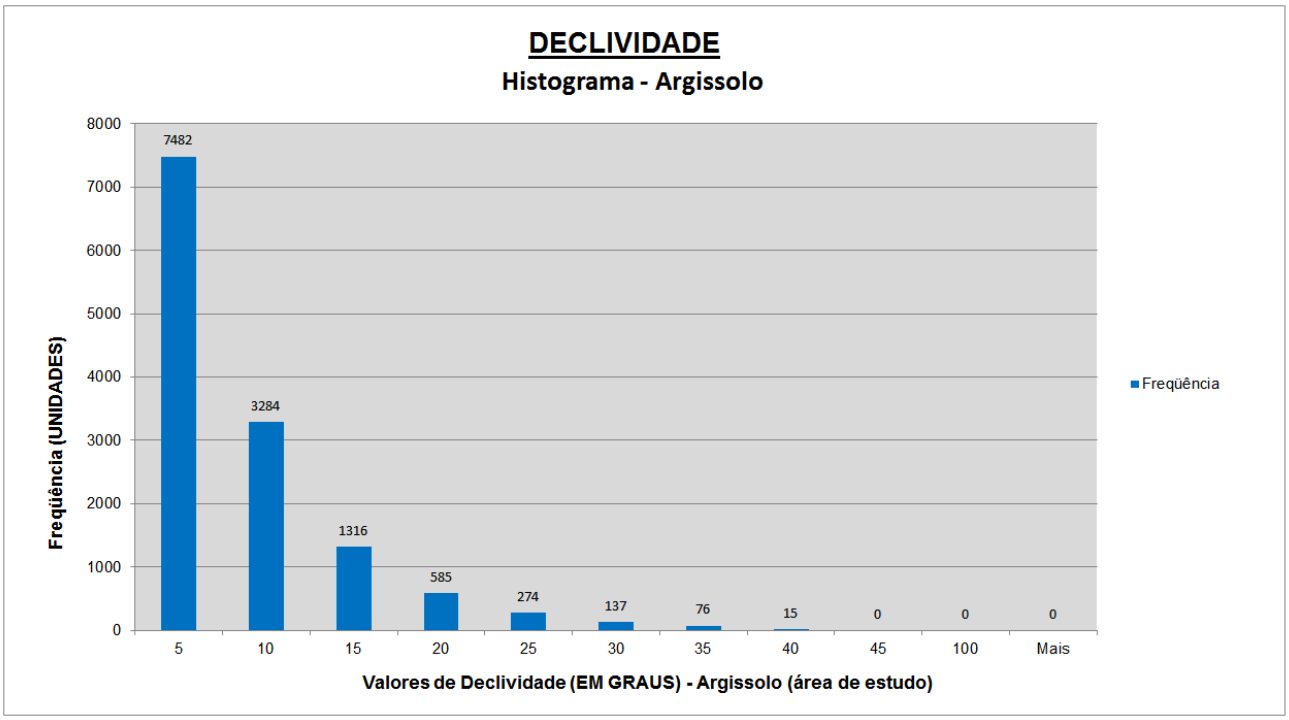


Figura 31. Declividade **-** Histograma de Frequência – Argissolos

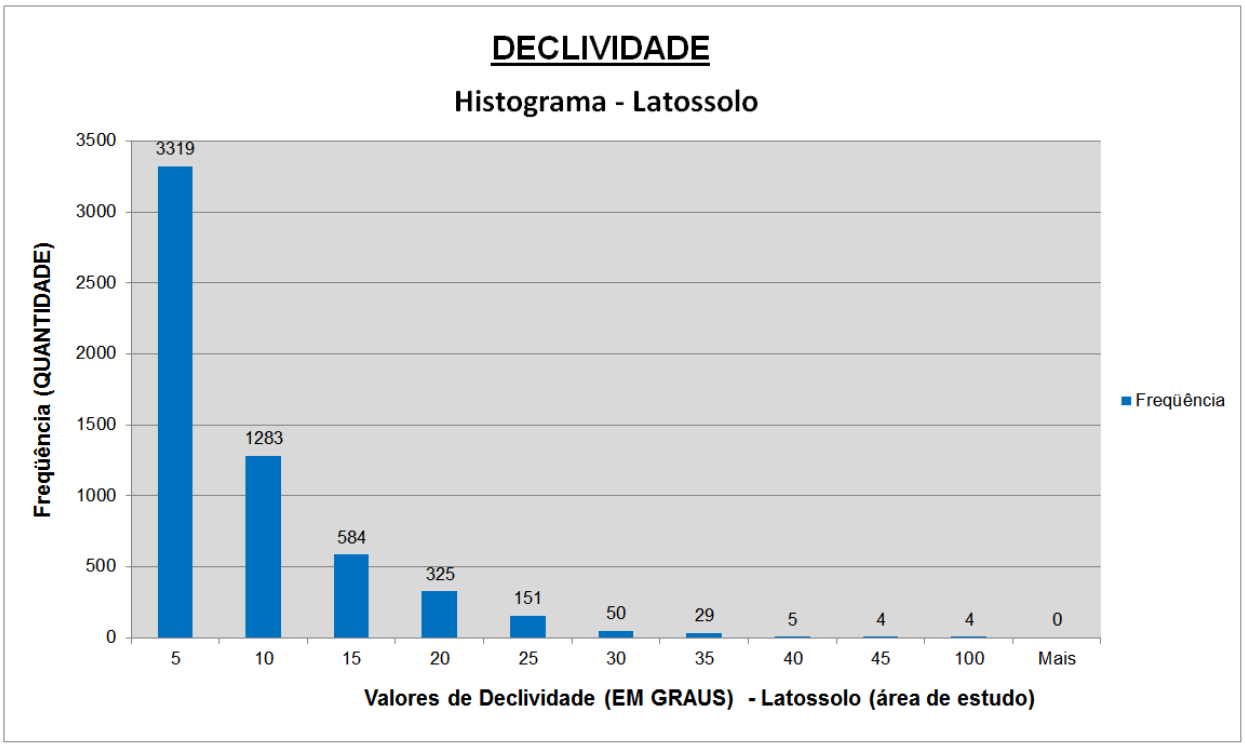


Figura 32. Declividade **-** Histograma de Frequência – Latossolo

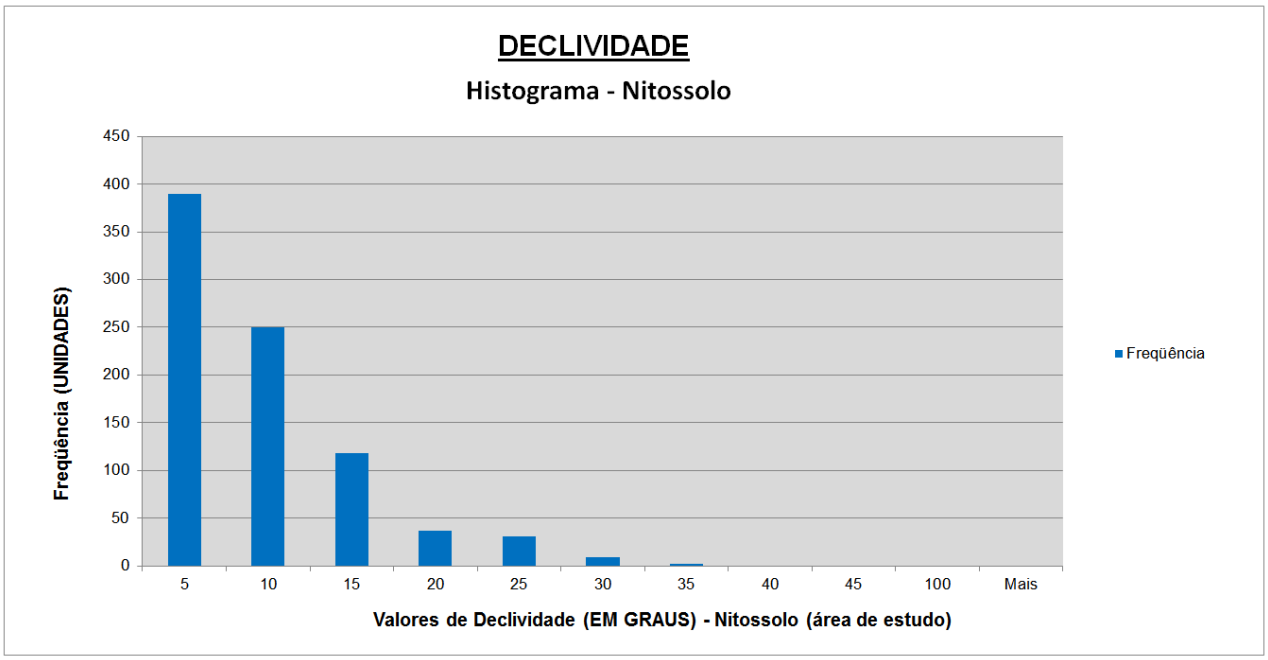


Figura 33. Declividade **-** Histograma de Frequência – Nitossolo

TIPOS DE SOLOS - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS - DECLIVIDADE				
Tipo de Solo	Menor Valor	Maior Valor	Média	Desvio Padrão
Argissolo	1	39	6	5,93
Latossolo	1	52	7	6,28
Nitossolo	1	33	9	5,88

TIPOS DE SOLOS - PARÂMETROS ESTATÍCOS - HIPSOMETRIA				
Tipo de Solo	Menor Valor	Maior Valor	Média	Desvio Padrão
Argissolo	399	1099	650	139,65
Latossolo	151	946	626	140,251
Nitossolo	492	916	738	102,92

Tabela 18. Tipos de solos mapeados (mapeamento ESALQ e mapeamento gerado) – Área equivalente e classificação de suscetibilidade à erosão

Mapeamento gerado (metodologia HERMUCHE,2002)		
Tipo de Solo	Área (km²)	Classificação
Latossolo	520	1,0
Argissolo	1.112	2,0
Nitossolo	279	2,0
Total	3.822,00	

Mapeamento ESALQ - 1:500.000		
Tipo de Solo	Área (km²)	Classificação
Latossolo	521	1,0
Argissolo	1.343	2,0
Nitossolo	47	2,0
Total	3.822,00	

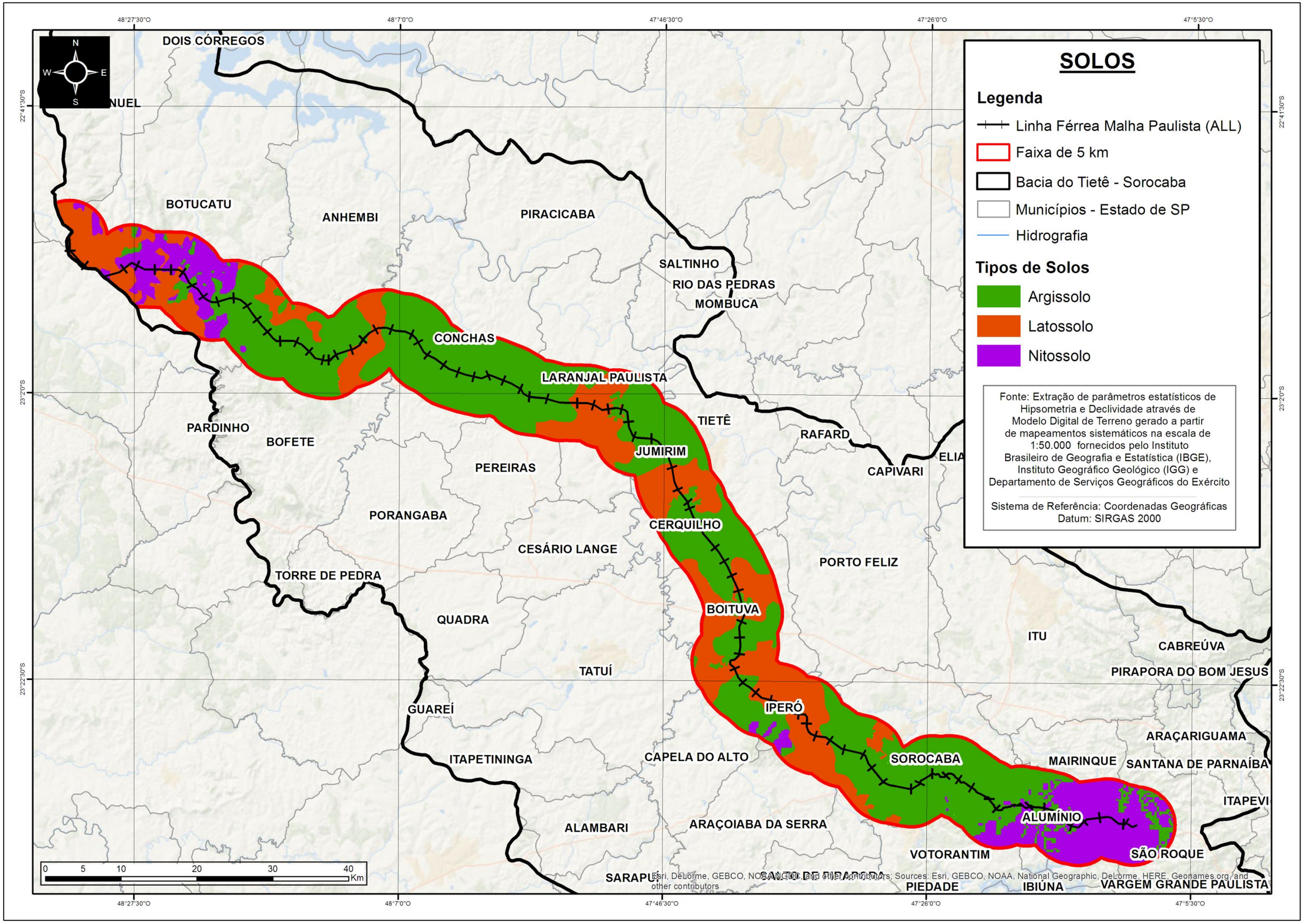


Figura 34. Mapeamento de tipos de solos segundo metodologia adotada (HERMUCHE, 2002)

4.1.4. CLIMA

A Tabela 19 discrimina todos os postos localizados na área de estudo, sua localização geográfica, os anos de funcionamento e seus respectivos códigos. O mapeamento do comportamento pluviométrico e a geração do variograma para interpolação dos dados não-amostrados foram baseados nos valores apresentados na coluna “média final total”.

O primeiro passo para construção do variograma é a análise exploratória dos dados. Através dela é possível identificar a forma como o fenômeno se manifesta e características básicas dos dados analisados. O mapa base e o histograma (Figuras 35 e 36, respectivamente) apresentam a espacialização das amostras e estatísticas básicas como média, desvio padrão, máximo, mínimo, frequências, etc.

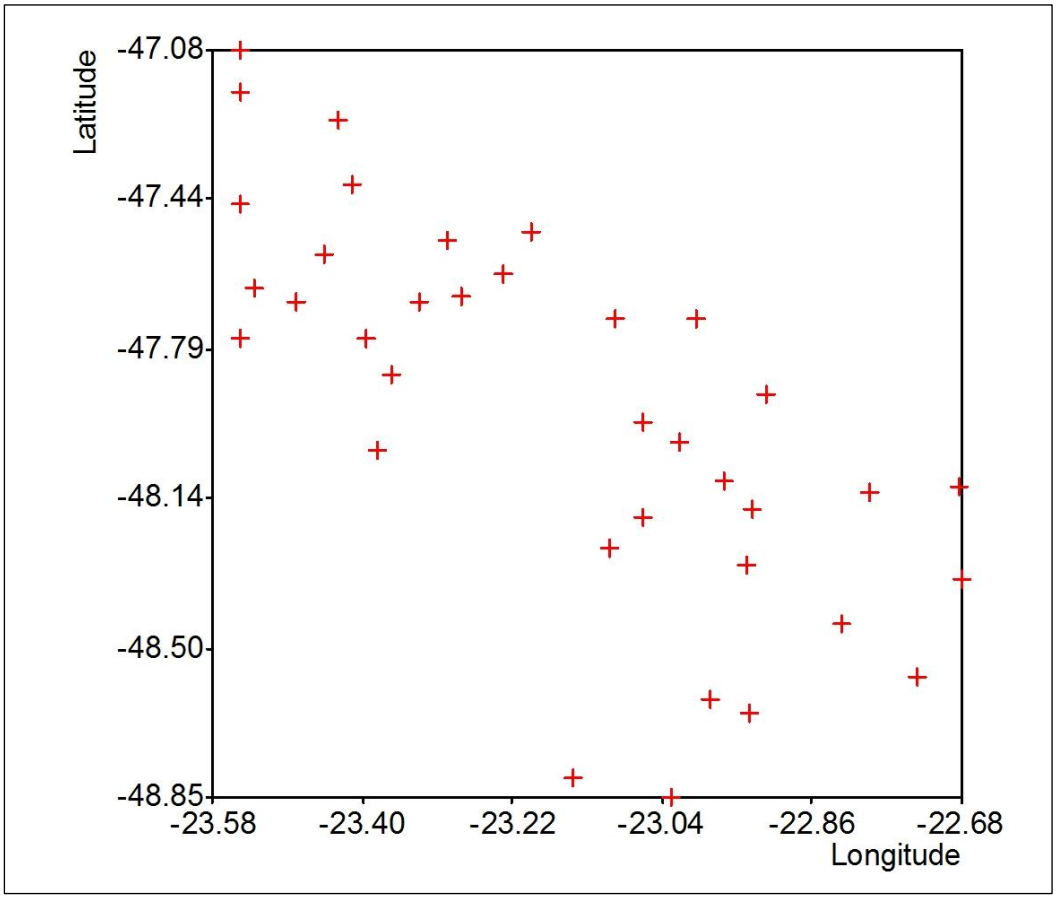


Figura 35. Mapa base. Fonte: Geovisual – IGC – Instituto de Geociência – USP

Tabela 19. Valores das médias mensais e anuais dos postos pluviométricos utilizados para krigagem ordinária dos dados de chuva

Fonte: Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo – SIGRH - SP

							Média Mensal (anos de funcionamento)													
Municipio	Nome	Altitude	Latitude	Longitude	Prefixo ANA	Funcionamento	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Anual Médio	Média Final Total
ALUMÍNIO	CARAFA	900	23° 35' 00"	47° 19' 00"	E4-125	1970 - 1999	265,6	212,63	165,59	88,67	91,53	70,64	44,28	41,68	86,28	130,06	138,45	226,77	1562,18	130,1816667
ANHEMBI	FAZENDA BOA VISTA	477	22° 56' 00"	48° 10' 00"	D5-086	1984 - 2014	240,62	187,98	150,07	76,37	72,23	47,89	36,9	28,11	63,02	106,48	120,72	178,87	1309,26	109,105
ANHEMBI	PIRAMBÓIA	490	22° 56' 00"	48° 10' 00"	D5-083	1973 - 2000	222,45	190,77	158,84	71,16	80,61	60,14	38,09	31,58	82,75	107,11	139,03	202,31	1384,84	115,4033333
ANHEMBI	FAZENDA DO BARREIRO RICO	570	22° 41' 06"	48° 06' 49"	D5-044	1939 - 2013	230,3	187,15	136,79	68,05	60,96	49,75	35,46	30,65	64,02	115,16	124,89	193,9	1297,08	108,09
ANHEMBI	ANHEMBI	520	22° 47' 40"	48° 07' 39"	D5-037	1937 - 2014	209,44	177,29	129,29	66,36	59,86	51,59	38,83	32,28	66,33	120,03	122,91	185,32	1259,53	104,9608333
ARAÇOIABA DA SERRA	BAIRRO IPERO	560	23° 29' 00"	47° 41' 00"	E4-018	1954 - 2000	206,09	173,69	135,99	60,1	69,21	56,3	45,86	42,47	76,48	115,05	110,1	168,96	1260,3	105,025
ARAÇOIABA DA SERRA	COLÔNIA	620	23° 32' 00"	47° 39' 00"	E4-126	1970 - 2001	193,01	175,28	140,19	60,73	78,5	63,8	46,84	38,39	82,12	110,34	106,66	184,01	1279,87	106,6558333
BOFETE	BOFETE	539	23° 06' 17"	48° 15' 43"	E5-016	1958 - 2014	256,68	199,02	165,05	77,36	82,66	61,87	46,23	36,52	77,89	127,97	131,23	217,87	1480,35	123,3625
BOFETE	FAZENDA SANTA TEREZINHA	590	23° 03' 54"	48° 11' 09"	E5-064	1970 - 2013	240,62	173,01	150,29	78,38	78,59	61,16	49,52	37,67	84,23	121,88	131,44	190,66	1397,45	116,4541667
BOITUVA	BOITUVA	630	23° 17' 00"	47° 40' 00"	E4-046	1941 - 1998	202,95	169,82	138,58	62,85	66,34	48,2	39,12	30,59	68,59	113,61	105,76	175,65	1222,06	101,8383333
BOITUVA	USINA SANTA ROSA	520	23° 14' 00"	47° 37' 00"	E4-121	1970 - 2011	216,15	168,42	142,63	62,58	76,1	65,11	47,09	36,36	77,58	107,8	108,24	180,04	1288,1	107,3416667
BOTUCATU	FAZENDA MORRINHOS	760	22° 59' 00"	48° 37' 00"	D5-079	1972 - 2000	239,6	195,65	161,82	83,54	86,22	67,43	43,08	36,13	91,65	121,52	133,29	198,77	1458,7	121,5583333
BOTUCATU	BAIRRO ANHUMAS	529	22° 56' 26"	48° 17' 51"	D5-075	1970 - 2014	264,02	183,75	164,16	77,92	78,39	53,15	44,4	38,2	74,25	120,42	132,38	210,71	1441,75	120,1458333
BOTUCATU	FAZENDA MORRINHOS	760	22° 59' 00"	48° 37' 00"	D5-079	1972 - 2000	239,6	195,65	161,82	83,54	86,22	67,43	43,08	36,13	91,65	121,52	133,29	198,77	1458,7	121,5583333
BOTUCATU	RIO BONITU	470	22° 41' 00"	48° 20' 00"	D5-063	1970 - 2001	203,28	177,68	154,12	75,53	71,02	54,37	34,3	33,86	75,71	105,51	132,77	186,67	1304,82	108,735
BOTUCATU	FAZENDA MONTE ALEGRE	800	22° 52' 16"	48° 39' 08"	D5-029	1937 - 2014	235,41	194,9	140,44	67,11	77,21	58,95	41,77	35,82	67,63	121,9	132,63	183,63	1357,4	113,1166667
BOTUCATU	SÃO JOÃO DO MORRO VERMELHO	781	22° 49' 34"	48° 26' 15"	D5-019	1954 - 2014	258,27	199,58	157,94	81,2	75,8	56,82	40,68	35,77	72,46	128,87	124,01	217,77	1449,17	120,7641667
CAPELA DO ALTO	PORTO	580	23° 33' 00"	47° 46' 00"	E4-117	1970 - 1995	158,29	154,31	127,03	58,51	75,86	70,31	49,61	33,1	74,21	95,69	97,62	163,7	1158,24	96,52
CONCHAS	JUQUIRATIBA	470	22° 58' 00"	48° 06' 00"	E5-056	1966 -1973	150,88	184,63	89,74	55,81	46,1	50,03	26,83	36,1	84,67	127,65	64,72	142,38	1059,54	88,295
CONCHAS	CONCHAS	546	23° 01' 16"	48° 00' 41"	E5-001	1956 - 2014	224,17	160,01	131,3	68,07	64	48,32	39,68	31,19	64,66	121,66	111,71	178,82	1243,59	103,6325
IPERÓ	IPERÓ	540	23° 20' 00"	47° 41' 00"	E4-019	1957 - 2014	228,84	159,05	136,68	61,54	67,94	57,52	47,31	32,89	71,98	116,08	116,98	191,46	1288,27	107,3558333
IPERÓ	GEORGE OETTERER	600	23° 27' 00"	47° 34' 00"	E4-101	1966 - 1997	218,28	151,29	136,72	59,38	70,04	57,73	38,79	32,48	77,04	106,21	114,17	179,26	1241,39	103,4491667
JUMIRIM	BAIRRO REPRESA	490	23° 09' 00"	47° 48' 00"	E4-053	1941 - 1999	204,25	166,41	143,58	60,12	61,79	49,48	36,69	29,63	64,07	118,22	104,68	174,29	1213,21	101,1008333
LARANJAL PAULISTA	LARANJAL PAULISTA	490	23° 02' 00"	47° 51' 00"	E4-050	1943 -2014	210,16	157,66	116,82	54,99	63,92	45,6	34,41	28,37	57,94	108,24	104,65	163,69	1146,45	95,5375
LARANJAL PAULISTA	LARAS	470	22° 55' 00"	47° 54' 00"	D4-022	1956 - 1995	211,53	182,27	132,86	69,18	69,91	53,55	35,98	32,52	68,85	119,33	108,74	185,94	1270,66	105,8883333
MAIRINQUE	DONA CATARINA	810	23° 26' 00"	47° 15' 00"	E4-043	1942 - 2014	236,39	183,23	139,08	65,96	60,17	56,5	45,5	36	68,65	122,61	120,5	191,7	1326,29	110,5241667
MAIRINQUE	MAIRINQUE	870	23° 33' 00"	47° 11' 00"	E4-041	1940 - 2013	244,87	180,91	149,53	69,1	73,61	60,17	54	34,44	80,45	124,07	138,27	193,71	1403,13	116,9275
PEREIRAS	PEREIRAS	510	23° 04' 00"	47° 58' 00"	E4-010	1956 - 2013	225,51	160,3	129,59	65,53	61,41	51,25	40,01	30,89	65,04	115,33	105,25	180,88	1230,99	102,5825
PORTO FELIZ	BAIRRO BANANAL	600	23° 18' 00"	47° 32' 00"	E4-122	1970 - 2000	206,32	153,32	129,23	62,63	70,46	65,33	47,41	34,29	72,48	104,06	107	172,88	1225,41	102,1175
PORTO FELIZ	PORTO FELIZ	540	23° 12' 00"	47° 31' 00"	E4-114	1970 - 2014	219,83	151,6	130,91	71,65	66,97	59,41	48,74	33,7	73,8	108,59	120,54	183,08	1268,82	105,735
SÃO MANUEL	SÃO MANUEL	635	22° 44' 12"	48° 34' 04"	D5-047	1940 - 2014	257,72	206,58	162,46	79,73	70,66	60,85	39,62	36,84	72,77	137,75	135,6	206,02	1466,6	122,2166667
SÃO ROQUE	MAILASKI	920	23° 33' 00"	47° 05' 00"	E4-099	1966 - 1996	237,45	213,16	168,61	81,51	84,05	73,43	50,2	44,42	93,39	121,18	142,78	211,05	1521,23	126,7691667
SOROCABA	EDEN	570	23° 25' 00"	47° 24' 00"	E4-128	1974 - 2012	253,73	160,86	121,3	64,92	70,82	55,01	52,85	29,18	74,99	106,37	124,91	195,46	1310,4	109,2
TATUÍ	TATUÍ	640	23° 23' 01"	48° 01' 40"	E4-062	1970 - 2012	231,82	180,5	141,09	74,36	75,83	58,72	51,09	37,21	79,18	121,28	118,75	185,74	1355,57	112,9641667
TATUÍ	TATUÍ	610	23° 22' 00"	47° 51' 00"	E4-036	1939 - 2007	211,56	177,52	136,24	56,96	64,21	53,27	39,18	32,01	67,49	118,13	108,99	180,56	1246,12	103,8433333
TATUÍ	BAIRRO SARAPU	540	23° 24' 00"	47° 46' 00"	E4-026	1957 - 2014	210,39	151,58	137,5	65,04	63,1	51,88	42,5	33,62	72,71	112,88	103,14	166,71	1211,05	100,9208333
TATUÍ	AMERICANA VELHA	540	23° 19' 00"	47° 47' 00"	E4-020	1954 - 2011	222,17	162,29	146,55	59,37	67,82	45,41	47,93	34,1	72,39	114,59	110,19	176,66	1259,47	104,9558333
TIETE	TIETE	470	23° 06' 00"	47° 43' 00"	E4-120	1970 - 2014	206,56	139,83	135,57	63,58	66,24	52,58	43,58	30,66	68,21	97,95	106,59	165,15	1176,5	98,04166667
TIETE	VISTA REDONDA	570	23° 00' 00"	47° 43' 00"	E4-037	1939 - 2001	202,8	164,37	127,04	61,47	59,05	47,41	34,23	28,58	63,97	113,66	119,19	173,68	1195,45	99,62083333
VOTORANTIM	VOTORANTIM	630	23° 33' 00"	47° 27' 00"	E4-024	1937 - 1971	228,27	176,3	132,98	62,14	52,23	45,51	36,72	31,15	53,45	115,55	119,8	179,38	1233,48	102,79

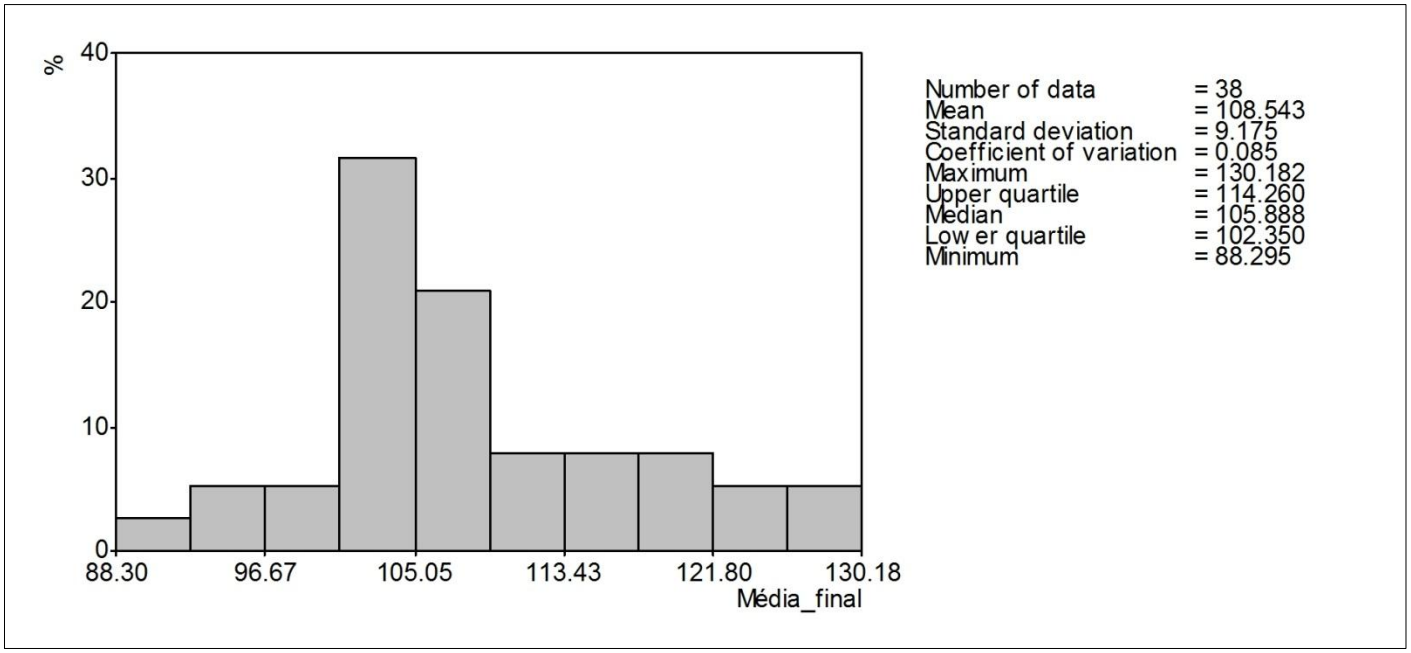
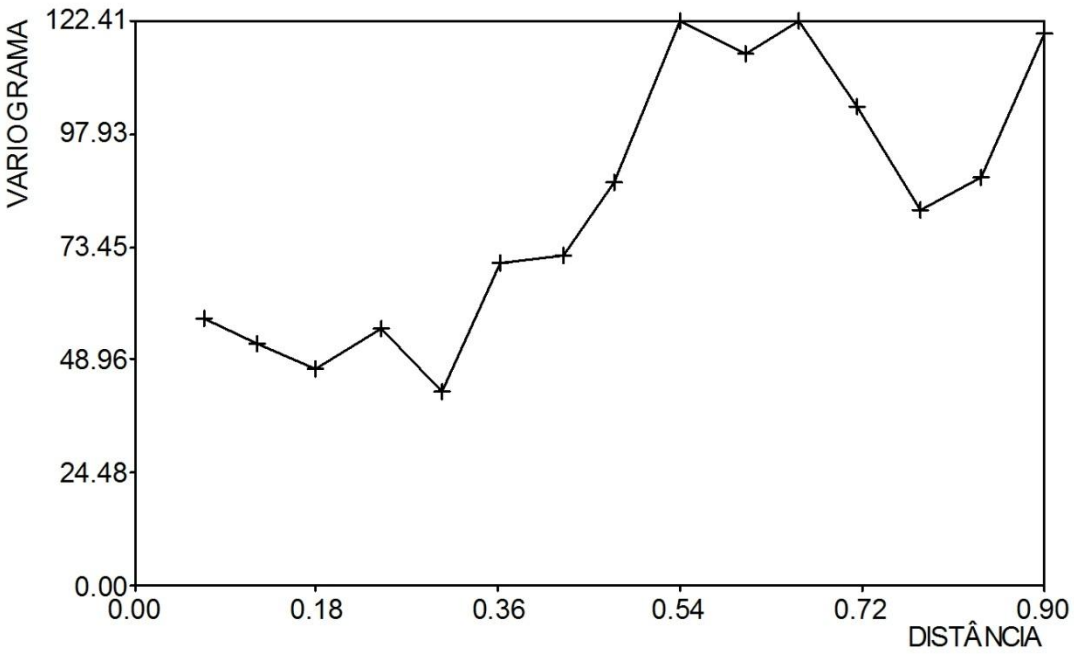


Figura 36. Histograma. Fonte: Geovisual – IGC – Instituto de Geociência – Universidade de São Paulo

Para verificar se o fenômeno apresenta anisotropia, são identificadas as direções que de maior continuidade, geralmente com maior amplitude e/ou menor variância espacial. Nesse caso, principalmente pela quantidade de amostras, foi desconsiderada a anisotropia do fenômeno. Foram testados variogramas direcionais (0º, 45º, 90º e 135º) e chegou-se a conclusão que o variograma experimental poderia ser calculado considerando o fenômeno como sendo isotrópico. A Figura 37 é o resultado do cálculo do variograma experimental calculado. Os parâmetros utilizados, como tamanho do passo, campo geométrico e número de passos estão discriminados na mesma figura. Já a Figura 38 apresenta o variograma teórico, originado do processo de ajuste do variograma experimental. Para o melhor ajuste alcançado, os valores de patamar, efeito pepita e alcance também seguem especificados.

Pode-se dizer que, na escala amostrada, é impossível identificar uma correlação espacial clara através do modelo de variograma.



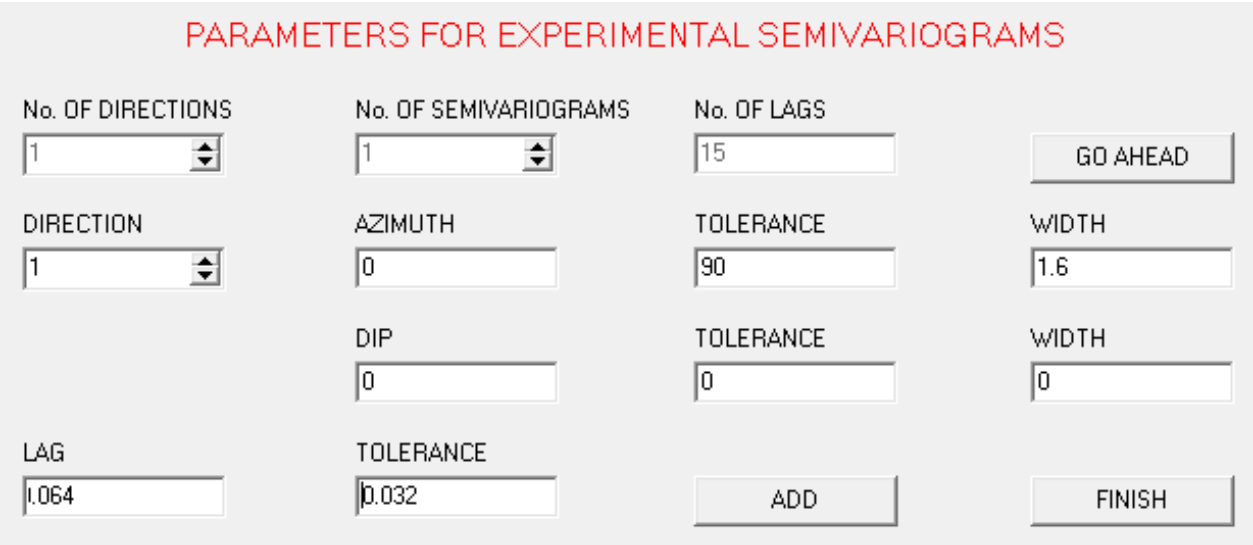


Figura 37. Variograma experimental e parâmetros utilizados. Fonte: Geovisual – IGC – Instituto de Geociência – Universidade de São Paulo

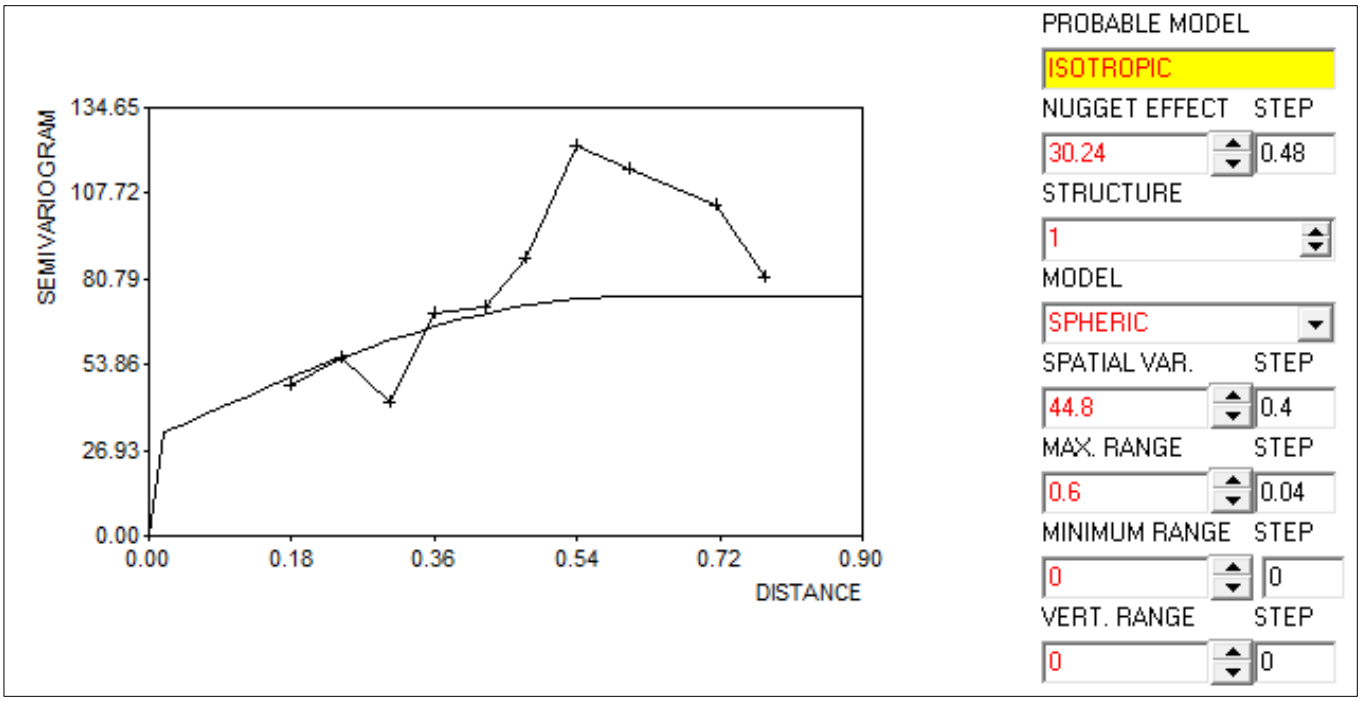


Figura 38. Variograma teórico (linha de ajuste) e parâmetros utilizados. Fonte: Geovisual – IGC – Instituto de Geociência – Universidade de São Paulo

A validação cruzada é um método de seleção do modelo de variograma teórico, pois permite selecionar o modelo matemático que melhor descreve a dependência espacial das observações das variáveis em função das distâncias. A idéia da validação cruzada consiste em validar a capacidade do modelo ajustado de variograma associado à incerteza do atributo não-amostrado. Na validação cruzada supõe-se que um elemento da amostra não tenha sido observado. Para isto, retira-se o valor amostrado e obtém-se a estimativa do mesmo pela krigagem, usando os valores dos pontos vizinhos. Este processo é realizado para todos os pontos amostrados. Ao final para cada ponto existirá o valor verdadeiro e o valor estimado e, portanto, o erro de estimação. Para análise do processo, utiliza-se como padrão os valores entre os intervalos de 0 a 1, 0 significando baixa similaridade entre os valores amostrados e valores encontrados e 1 significando alta similaridade. O processo de validação cruzada baseado no variograma teórico apresentado anteriormente pode ser observado na Figura 39.

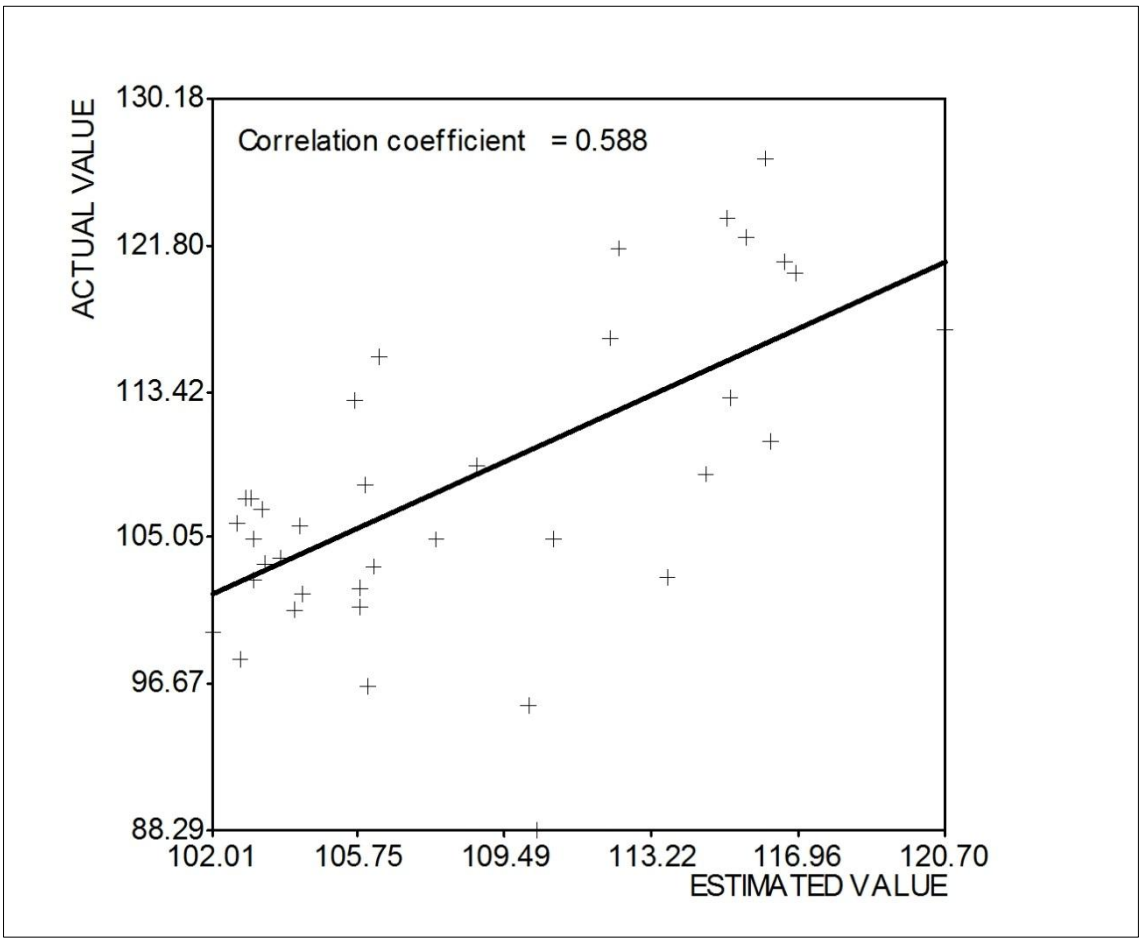


Figura 39. Validação cruzada. Fonte: Geovisual – IGC – Instituto de Geociência – Universidade de São Paulo

Por fim, o processo de krigagem dos valores de pluviometria é ilustrado no mapa da Figura 40. Observa-se uma variação de médias anuais de volumes de chuva que vão de 101 mm a 123 mm. Os valores mais altos são observados nas áreas dos municípios de Mairinque e Botucatu (nos extremos da linha férrea). Na relação dos valores de pluviometria com outras particularidades ambientais, notou-se uma importante correlação dos maiores valores encontrados de pluviometria com os de índices de dissecação do relevo pela drenagem e declividade.

A tabela 20 resume os intervalos pluviométricos mapeados e a classificação de cada um deles quanto ao nível de suscetibilidade à erosão. Embora o intervalo de médias mensais encontrado na região varie entre 100 à 120 mm/mês, toda a área analisada encontra-se classificada como de baixa suscetibilidade.

Tabela 20. Pluviometria (em mm) e classificação de suscetibilidade à erosão

Pluviometria	Área de análise (buffer - 5km)	Área de análise (buffer - 5km)	Classificação
Intervalos (em mm)	Área (km²)	Área (%)	Suscetibilidade (CREPANI)
101	0,0552	0,0029	1,3
102	206,6694	10,8908	1,3
103	414,6507	21,8507	1,3
104	194,9968	10,2757	1,3
105	77,3467	4,0759	1,3
106	66,8407	3,5223	1,3
107	55,7422	2,9374	1,3
108	45,6866	2,4075	1,3
109	44,1843	2,3284	1,3
110	38,4325	2,0253	1,3
111	35,7400	1,8720	1,3
112	35,5251	1,8720	1,3
113	39,9015	2,1976	1,3
114	41,7038	2,1976	1,3
115	43,1104	2,2718	1,3
116	46,5739	2,4543	1,3
117	51,1227	2,6940	1,3
118	57,4512	3,0275	1,3
119	76,9937	4,0573	1,3
120	111,9209	5,8978	1,3
121	100,4769	5,2948	1,3
122	96,3348	5,0765	1,3
123	16,1984	0,8536	1,3
Total	**1.897,66**	**100,0836485**	

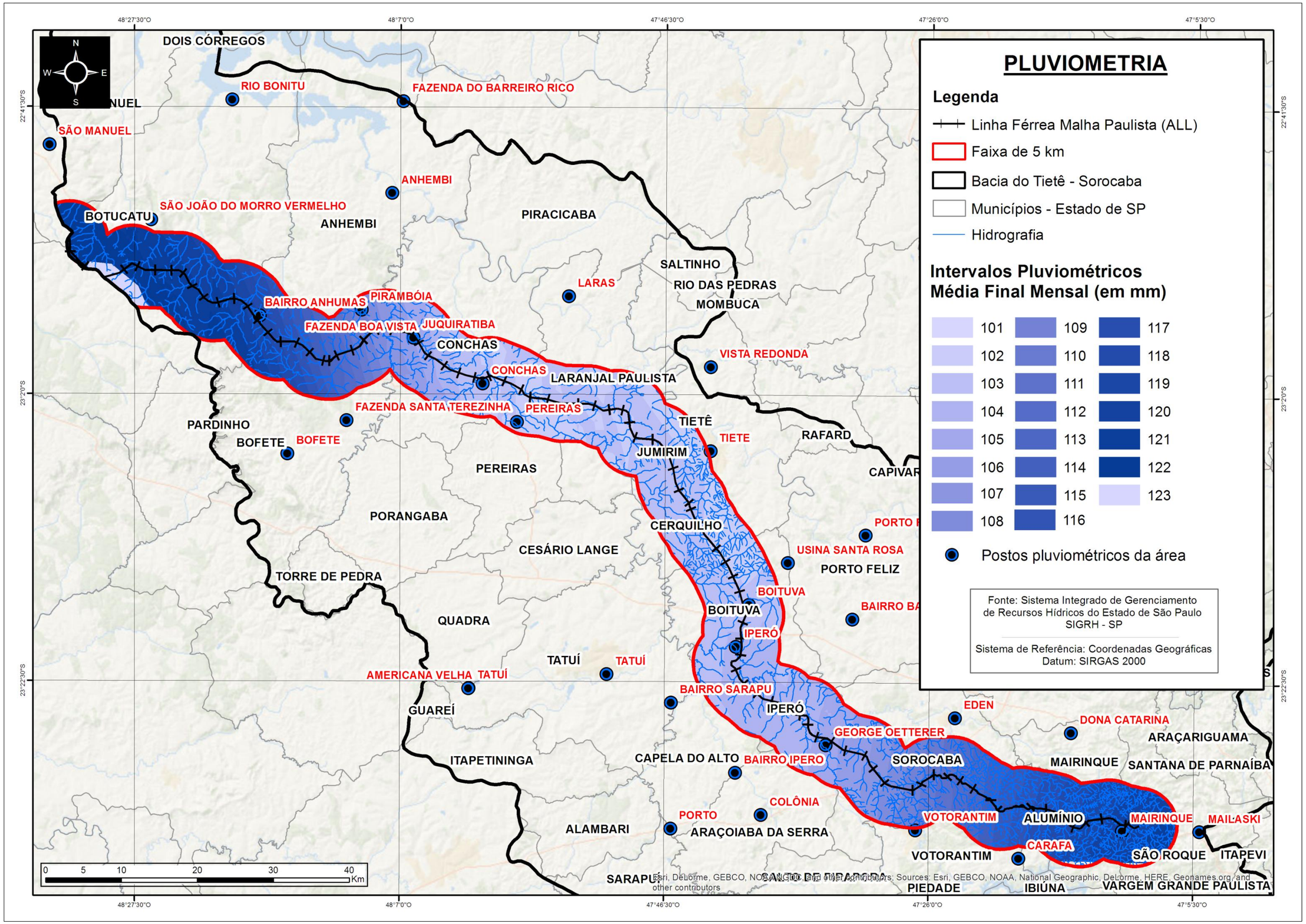


Figura 40. Mapeamento dos dados de pluviometria através da técnica de krigagem

4.1.5. USO E COBERTURA DO SOLO

De acordo com o Comitê de Bacia Hidrográfica Sorocaba e Médio Tietê (CBH-SMT - 2015) toda a área da bacia do Tietê-Sorocaba apresenta cerca de 2.104 km² de cobertura vegetal nativa que ocupa, aproximadamente, 17,5% da área do total da UGRHI. As categorias de maior ocorrência são a Floresta Ombrófila Densa e a Floresta Estacional Semidecidual. Além disso, o cultivo da cana-de-açúcar e do citrus, além da prática da pecuária, são atividades econômicas bastante representativas da área.

O mapeamento de uso e cobertura da área (Figura 20) evidenciou aproximadamente 60% da área total de estudo como pertencentes a áreas agropastoris, definidas previamente como sendo áreas de pasto melhoradas ou cultivadas destinadas ao pastoreio. Também se encontram inseridas nesta categoria as culturas temporárias, semi-perenes e perenes. A Tabela 21 descreve o percentual de cada tipo de uso definido e mapeado. Através dos dados, podemos observar que aproximadamente 70% da área de estudo está inserida em categorias de uso e cobertura classificadas como de alta suscetibilidade à erosão. As classes de baixa suscetibilidade (corpos d´água, áreas úmidas e cobertura arbórea) representam apenas 25% da área considerada.

Tabela 21. Classes de uso e cobertura do solo e classificação de suscetibilidade à erosão

Uso e Cobertura do Solo	Área	Área	Classificação
Classe	**(Km²)**	**(%)**	**Suscetibilidade (CREPANI)**
Corpos d´água	11,8010	0,6207	1,0
Áreas úmidas	0,3628	0,0191	
Cobertura arbórea	451,2990	23,7360	1,5
Área construída	199,2460	10,4793	2,5
Áreas agropastoris	1.124,1760	59,1259	2,7
Solo exposto	114,4400	6,0190	3,0
Total	1.901,3248		

O mapeamento de uso e cobertura gerado segue representado pela Figura 41.

Quanto à análise da classificação realizada, a Tabela 22 refere-se à matriz de erros obtida.

O índice de exatidão global foi de 84%, e o índice Kappa, 0,80, considerado muito bom, de acordo com Landis e Koch (1977). Para esse caso, os erros de omissão e comissão foram pequenos em todas as classes, com a maioria dos índices de exatidão superiores a 70%.

A classe corpos d´água apresentou pior desempenho entre as classes analisadas, com exatidão do produtor correspondendo 74%, e do usuário próxima a 60%, confundindo-se principalmente com a classe que corresponde às tipologias classificadas como áreas úmidas. Esta, por sua vez, destacou-se, apresentando índice de exatidão igual a 100%. Entre as feições classificadas como de maior suscetibilidade à erosão (com índices variando de 2,0 a 3,0 – Tabela 21), as áreas agropastoris apresentou o pior desempenho, com índices de exatidão de 72%, confundindo-se principalmente com áreas construídas e regiões de solo exposto. Do contrário, a classe solo exposto (índice de suscetibilidade à erosão igual a 3,0) apresentou desempenho superior a 90%, com amostras que confundiram-se apenas com as feições de áreas agropastoris.

Tabela 22. Matriz de erros: análise da classificação

	CLASSES	AMOSTRAS DE REFERÊNCIA						
		Corpos d´água	Áreas úmidas	Cobertura arbórea	Área construída	Áreas agropastoris	Solo exposto	Total classificadas
Classificadas	Corpos d´água	23	-	-	-	-	-	23
	Áreas úmidas	5	31	3	-	-	-	39
	Cobertura arbórea	3	-	45	-		-	48
	Área construída	-	-	-	48	6	-	54
	Áreas agropastoris	-	-	5	1	51	5	62
	Solo exposto	-	-	-	6	14	50	70
	Total coletadas	**31**	**31**	**53**	**55**	**71**	**55**	**296**
	Kappa condicional	**0,53**	**0,74**	**0,79**	**0,97**	**0,88**	**0,89**	**EXATIDÃO GLOBAL: 84% KAPPA: 0,80**
	Exatidão do produtor	74%	100%	85%	87%	72%	91%	
	Exatidão do usuário	58%	78%	82%	98%	89%	91%	

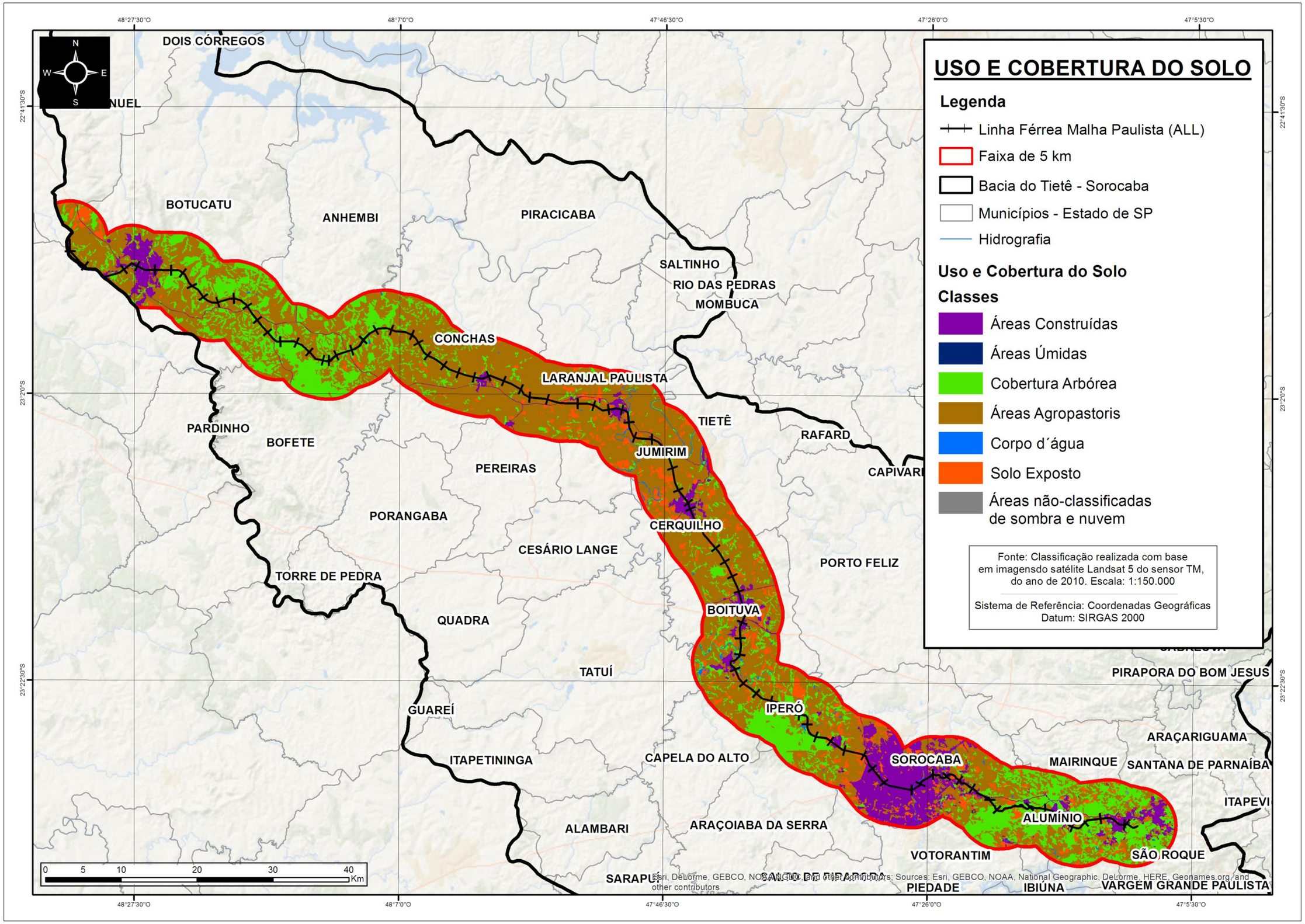
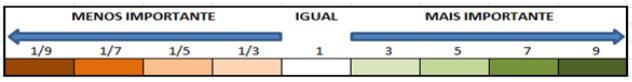


Figura 41. Mapeamento de uso e cobertura do solo

4.2. PONDERAÇÕES ESTATÍSTICAS: ANÁLISE AHP

Para geração do mapa de suscetibilidade à erosão, todas as variáveis mapeadas foram ponderadas, conforme descrito no capítulo de metodologia, pela técnica de análise hierárquica de pesos. No total, foram avaliados 10 questionários respondidos por especialistas de diferentes formações das áreas de Riscos Ambientais, Geotecnia e Meio Ambiente. A Figura 42 ilustra o modelo de questionário aplicado. Em anexo estão todas as ponderações feitas por cada especialista consultado, com indicação do nome do técnico responsável e formação/atuação no órgão de pesquisa.



	Ambientais					Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
	Geologia	Características Topográficas	Pluviometria	Uso e Cobertura do Solo	Tipos de Solo		
Geologia	1,00						
Características Topográficas		1,00					
Pluviometria			1,00				
Uso e Cobertura do Solo				1,00			
Tipos de Solo					1,00		
Σ							

Figura 42. Questionário aplicado a especialistas para geração da ponderação AHP das variáveis analisadas no mapeamento de suscetibilidade à erosão

Para definição da ponderação final, todos os julgamentos par a par das variáveis foram analisados e foi considerada a nota ***média*** para cada caso. A Figura 43 apresenta a matriz final de julgamento oriunda das avaliações dos especialistas.

Por fim, a Figura 44 apresenta os resultados dos parâmetros de peso (relevância - resultantes da análise multicritério) utilizados na equação aplicada ao processamento das bases cartográficas envolvidas e geração do mapeamento de suscetibilidade à erosão.

A variável de maior relevância para geração do mapeamento de suscetibilidade foi “Tipo de Solo” (45%). A variável “Uso e Cobertura do Solo” apresentou importância relativa de 22% e “Pluviometria” de 15%. Por fim, “Características Topográficas” (declividade e índice de dissecação do relevo) representam, cada, apenas 0,9% do peso.

			Variáveis				
			1	2	3	4	5
Variáveis	1	Geologia	1,00	0,64	0,46	0,47	0,35
	2	Características Topográficas	1,56	1,00	0,29	0,34	0,27
	3	Pluviometria	2,16	3,40	1,00	0,38	0,24
	4	Uso e Cobertura do Solo	2,12	2,97	2,63	1,00	0,27
	5	Tipos de Solo	2,85	3,73	4,12	3,67	1,00
		Σ	9,69	11,74	8,51	5,85	2,13

Figura 43. Matriz final de julgamento oriunda das avaliações dos especialistas: média

			Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
Variáveis	1	Geologia	0,547048405	9%
	2	Características Topográficas	0,529304686	9%
	3	Pluviometria	0,92494715	15%
	4	Uso e Cobertura do Solo	1,351926501	22%
	5	Tipos de Solo	2,761839937	45%
		Σ	6,115066678	100%

λ-max	5,429
IC	0,107
Taxa de consistência	10%

Figura 44. Parâmetros de peso das variáveis analisadas na análise multicritério

4.3. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO

O mapeamento de suscetibilidade à erosão gerado está ilustrado pela Figura 47. A Figura 46 é o fluxograma de execução do processo de mapeamento e a Tabela 23 resume os dados encontrados na área.

A metodologia adotada e a ponderação realizada a partir do cruzamento das variáveis consideradas para mapeamento de suscetibilidade à erosão possibilitaram a identificação de áreas de baixa, média e alta suscetibilidade, com níveis variando de 1,5 a 2,7 na escala adotada.

As áreas classificadas como de alta suscetibilidade à erosão (2,4, 2,6 e 2,7) representam aproximadamente 60% da área total da região de estudo e registram 65% dos processos erosivos mapeados. Observa-se uma concentração dessas áreas em regiões localizadas nas extremidades da linha férrea em análise. Nessas regiões estão localizadas as maiores proporções de áreas urbanizadas, maiores índices de pluviometria, de graus de declividade e de tipos de solos mais suscetíveis ao desenvolvimento de processos erosivos.

As áreas de média suscetibilidade representam cerca de 23% da área de estudo e foram identificados 17% do total de registros de pontos de erosão presentes nessas áreas. Essas áreas estão localizadas nas regiões centrais do entorno da linha férrea, entre os municípios de Sorocaba e Cerquilho.

Já as áreas de baixa suscetibilidade à erosão representam apenas 17% da área de estudo. Nelas estão presentes 18% do total de registros de erosão. A concentração de índices de baixa suscetibilidade (1,5 e 1,6) pode ser observada no trecho da linha que interliga as cidades de Laranjal Paulista e Conchas.

Uma forma de testar a validade do mapeamento gerado foi a aplicação do teste de correlação simples entre os índices encontrados e o percentual de processos erosivos mapeados por classes de suscetibilidade. Na análise dos dados resumidos na Tabela 23, é possível observar que existe correlação positiva e direta entre o aumento do nível de suscetibilidade e o número de processos erosivos mapeados por classe. Porém, há um decréscimo da

quantidade de erosões encontradas na classe de maior suscetibilidade (2,7). Uma possível explicação para isso é o fato das áreas classificadas como de maior suscetibilidade à erosão estarem localizadas em altitudes elevadas, dificultando o acesso pelo homem e até mesmo a possibilidade de ocupação do solo por áreas agropastoris, grandes responsáveis pelo desenvolvimento e aceleração da formação de processos erosivos. Nessas regiões, que embora apresentem características ambientais que as definem como áreas altamente suscetíveis ao aparecimento de processos erosivos, a manutenção das áreas de florestas e cobertura vegetal facilitada pela altitude age diretamente no controle do aparecimento de erosões.

O gráfico que segue (Figura 45) ilustra a correlação existente entre os níveis de suscetibilidade mapeados e a quantidade de processos erosivos registrados por classe. A correlação substancial encontrada (0,489) foi testada e resultou significante para um nível de 0,05 de probabilidade. O resultado evidencia que existe correlação direta e positiva entre os níveis de suscetibilidade mapeados e o número de processos erosivos registrados por classe.

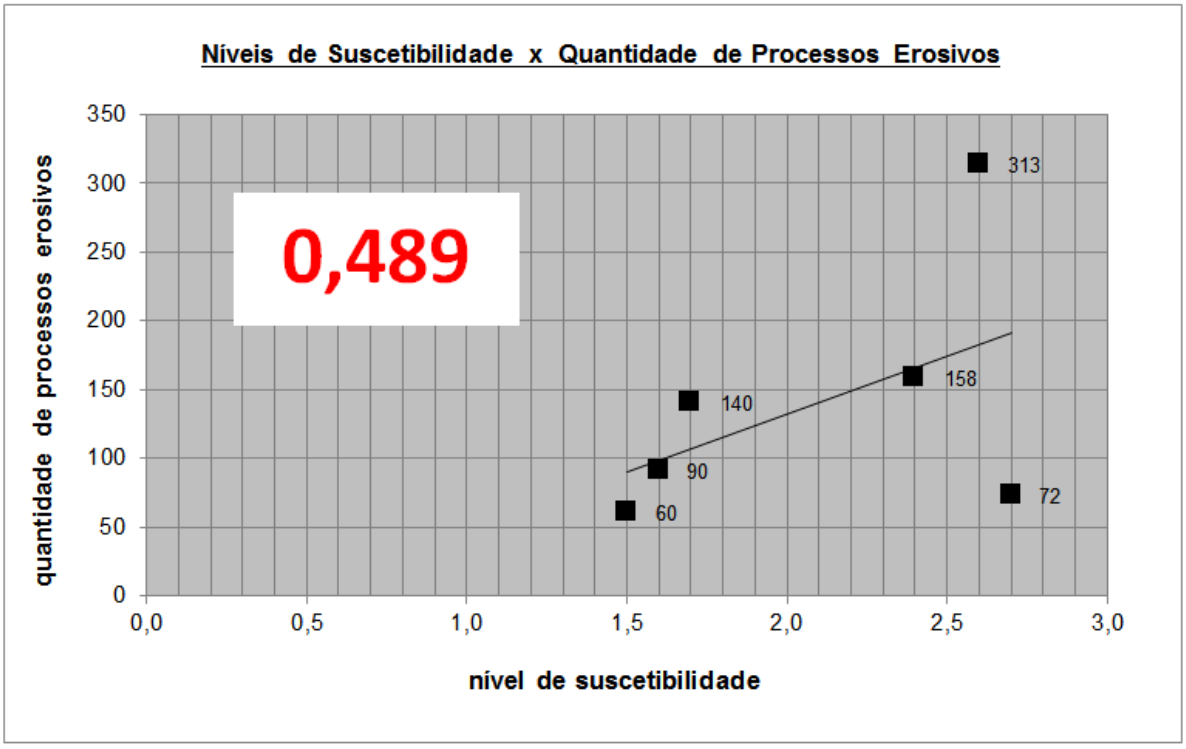


Figura 45. Gráfico de dispersão: correlação entre níveis de suscetibilidade e quantidade de processos erosivos

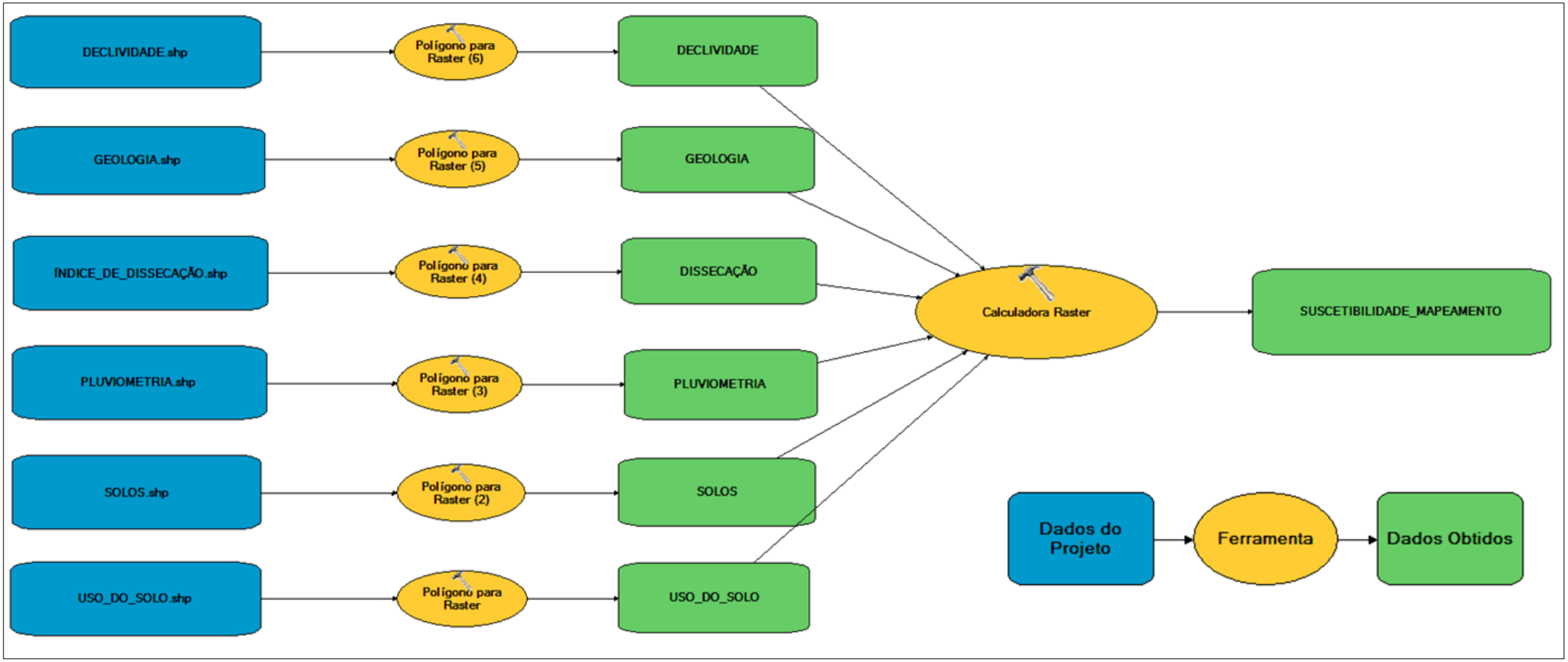


Figura 46. Fluxograma **“**Model Builder”: Modelo para geração de mapeamento de suscetibilidade da área de estudo

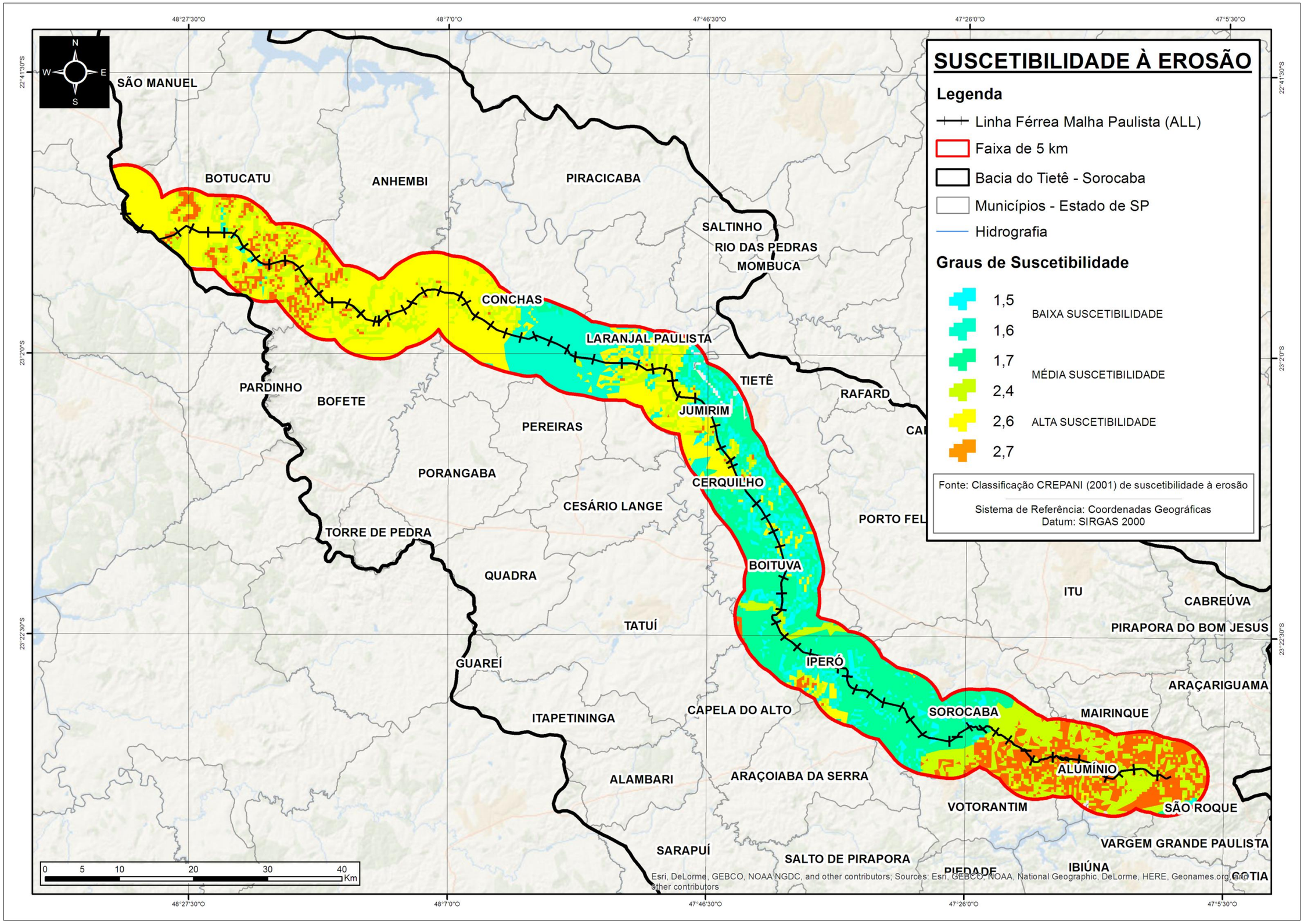


Figura 47. Mapeamento de suscetibilidade à erosão

Tabela 23. Classificação final de suscetibilidade à erosão da área de estudo

Áreas de alta, média e baixa suscetibilidade à erosão – áreas proporcionais e quantidade de processos erosivos mapeados por classe

Classificação	Classificação	Área	Área	Processos Erosivos	Processos Erosivos
Suscetibilidade (Graus)	Suscetibilidade (Classe)	(km²)	(%)	RAVINAS / BOÇOROCAS (Quantidade)	RAVINAS / BOÇOROCAS (%)
1,5	BAIXA	101,6022	5,344	60	7
1,6		236,1578	12,421	90	11
1,7	MÉDIA	423,8796	22,294	140	17
2,4	ALTA	360,6492	18,968	158	19
2,6		530,0400	27,877	313	38
2,7		215,9221	11,356	72	9
		1.901,3258	**100**	**833**	**100**

4.4. ANÁLISE DE RISCO DO PROCESSO EROSIVO À FERROVIA

Conforme a metodologia proposta para identificação do risco do processo em relação à linha férrea, as análises foram feitas baseadas na identificação do grau de suscetibilidade do terreno ao qual estavam inseridos os processos erosivos e alguns parâmetros de distância da linha férrea e tipo de solo da área (vulnerabilidade da linha).

A Tabela 24 é o resultado final e uma ilustração da base de dados resultante da análise de risco dos 833 processos erosivos considerados. O mapeamento da análise de risco está representado pela Figura 45. Já a tabela 25 é um resumo dos processos analisados.

Tabela 24. Análise de risco: base de dados resultante: exemplo

1	RAVINA	-47,74639099900	-23,20624300200	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	2.351,1591	BAIXA	MÉDIO
2	RAVINA	-47,74184000000	-23,21329200100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	2.334,5256	BAIXA	MÉDIO
3	RAVINA	-47,74399500000	-23,21645000100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	2.729,4753	BAIXA	MÉDIO
4	BOÇOROCA	-47,71896999900	-23,19744200100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	587,5219	BAIXA	MÉDIO
5	BOÇOROCA	-47,72031900000	-23,20142300100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	196,1504	MÉDIA	MÉDIO
6	BOÇOROCA	-47,72295600000	-23,19750600200	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	235,6776	MÉDIA	MÉDIO
7	RAVINA	-47,74403500000	-23,21902900100	1,5	BAIXA	ARGILOSO	2.917,9863	BAIXA	BAIXO
8	RAVINA	-47,72891700000	-23,20767600100	1,6	BAIXA	ARGILOSO	923,5311	BAIXA	BAIXO
9	RAVINA	-47,78292659200	-23,08966159200	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	50,6657	ALTA	ALTO
10	RAVINA	-47,79575500000	-23,06759400000	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	2.095,0218	BAIXA	MÉDIO
11	RAVINA	-47,79908300000	-23,03891900100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	3.054,1497	BAIXA	MÉDIO
12	RAVINA	-47,80156200000	-23,03182600000	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	3.403,1489	BAIXA	MÉDIO
13	RAVINA	-47,80136499900	-23,05107400100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	2.268,6331	BAIXA	MÉDIO
14	RAVINA	-47,80160900000	-23,04949400100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	2.287,4627	BAIXA	MÉDIO
15	RAVINA	-47,80676600000	-23,05836500100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	1.612,6076	BAIXA	MÉDIO
16	RAVINA	-47,80377400000	-23,05570700100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	1.952,6026	BAIXA	MÉDIO
17	BOÇOROCA	-47,80313100100	-23,05991300100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	1.962,0183	BAIXA	MÉDIO
18	BOÇOROCA	-47,79769700000	-23,06360400100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	2.465,9862	BAIXA	MÉDIO
19	BOÇOROCA	-47,78039400000	-23,07641100100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	1.494,6942	BAIXA	MÉDIO
20	BOÇOROCA	-47,78628500100	-23,07697100000	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	1.193,8024	BAIXA	MÉDIO
21	BOÇOROCA	-47,78953200000	-23,09061700100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	323,8690	BAIXA	MÉDIO
22	BOÇOROCA	-47,79116500000	-23,08704000100	1,7	MÉDIA	ARGILOSO	22,0336	ALTA	ALTO
23	RAVINA	-47,80037099900	-23,05789000100	1,5	BAIXA	ARGILOSO	2.269,9357	BAIXA	BAIXO
24	RAVINA	-47,79590200000	-23,07707100100	1,5	BAIXA	ARGILOSO	1.046,3298	BAIXA	BAIXO
25	RAVINA	-47,79918400000	-23,04554900100	1,5	BAIXA	ARGILOSO	2.672,6389	BAIXA	BAIXO
26	BOÇOROCA	-47,79246500000	-23,06315400100	1,5	BAIXA	ARGILOSO	2.609,2331	BAIXA	BAIXO
27	BOÇOROCA	-47,78592200000	-23,08439300100	1,5	BAIXA	ARGILOSO	456,5743	BAIXA	BAIXO
28	RAVINA	-47,79906099900	-23,01932200000	1,6	BAIXA	ARGILOSO	4.617,6102	BAIXA	BAIXO
29	BOÇOROCA	-47,78391700000	-23,07583400100	1,6	BAIXA	ARGILOSO	1.407,1578	BAIXA	BAIXO
30	BOÇOROCA	-47,78418800000	-23,07398700000	1,6	BAIXA	ARGILOSO	1.583,1250	BAIXA	BAIXO
31	BOÇOROCA	-47,79000300000	-23,07339800100	1,6	BAIXA	ARGILOSO	1.494,2946	BAIXA	BAIXO
32	BOÇOROCA	-47,78057100100	-23,08543000100	1,6	BAIXA	ARGILOSO	575,5003	BAIXA	BAIXO
33	BOÇOROCA	-47,79207900000	-23,09026800000	2,6	ALTA	ARGILOSO	385,3728	BAIXA	MÉDIO
34	BOÇOROCA	-47,80582100000	-23,01617300100	2,6	ALTA	ARGILOSO	4.548,7426	BAIXA	MÉDIO
35	BOÇOROCA	-47,81456200000	-23,01826000000	2,6	ALTA	ARGILOSO	3.997,0276	BAIXA	MÉDIO
36	BOÇOROCA	-47,80515600000	-23,02425800000	2,6	ALTA	ARGILOSO	3.809,7206	BAIXA	MÉDIO

No total, apenas 2,6% processos erosivos foram classificados como de muito alto risco e alto risco para a linha férrea. Estes processos encontram-se muito próximos à linha e estão localizados, em sua maioria, em áreas de suscetibilidade acima de 2,5, o que favorece o desenvolvimento do processo já formado e o aparecimento de novos outros. Conforme a metodologia proposta, as classificações de processos erosivos de alto e muito alto risco representam

erosões com alta probabilidade de atingir o elemento sob risco; nesse caso, a linha férrea em estudo.

Para esses casos, medidas de gerenciamento de risco devem ser tomadas emergencialmente. Cabe dizer que a concepção de medidas estruturais para estabilização/recuperação de um determinado processo erosivo passa necessariamente pelo perfeito conhecimento dos fatores e mecanismos relacionados às causas do seu desenvolvimento, características do meio físico e as especificidades da erosão e sua dinâmica.

Tabela 25. Análise de risco: resumo dos processos analisados

Tipo de Processo Erosivo	Grau de Risco (%)			
	Muito Alto	Alto	Médio	Baixo
Ravinas	0,322	0,643	77,814	21,222
Boçorocas	1,724	1,916	81,418	14,943
Total	1,200	1,441	80,070	17,280

Os processos classificados como de médio risco à linha férrea representam mais de 80% dos registros analisados. Tais processos estão concentrados nos trechos das extremidades da linha, principalmente no trecho que interliga os municípios de Conchas a Botucatu. De acordo com a metodologia aplicada, mantidas as condições atuais, é reduzida a possibilidade de que o elemento de risco (a linha férrea) seja atingido pelo processo erosivo. Porém, a maioria dos processos pertencentes a essa classe estão localizados em regiões com suscetibilidade acima de 1,8 (alta suscetibilidade), indicando a propensão da área para o desenvolvimento de novos processos e o agravamento dos processos já iniciados. Em Souza *et al.* (2014) é apresentado um estudo sobre a distribuição espacial dos registros de erosão linear da linha férrea em estudo em que trecho citado é caracterizado como área de maior concentração de processos de toda a linha, o que confirma a alta suscetibilidade da região e o possível agravamento das condições dos processos já instalados. Dessa forma, cabe a atenção para os processos classificados como de médio risco

para a linha férrea, porém localizados em regiões de alta suscetibilidade e alta ocorrência de registros.

Por fim, os processos erosivos de baixo risco para a linha férrea representam 17% do total dos registros analisados e estão localizados em regiões de suscetibilidade até 1,6. Como é possível observar no mapa da Figura 45, eles estão concentrados na região central da linha, principalmente no trecho entre os municípios de Boituva e Laranjal Paulista. Acredita-se que o baixo risco oferecido pelos processos, para a linha férrea, dá-se pela predominância de Latossolos da região e dos baixos índices pluviométricos da área em que estão localizados.

Em todos os casos analisados, o risco diminui à medida que aumenta o seu grau de gerenciamento, que poderá ser colocado em prática por meio da execução de medidas estruturais e não estruturais. A execução dessas medidas pode erradicar o risco ou reduzir o grau de risco no local avaliado. Paralelamente, medidas preventivas, visando reduzir a ocorrência de novos processos erosivos, também devem ser implementadas.

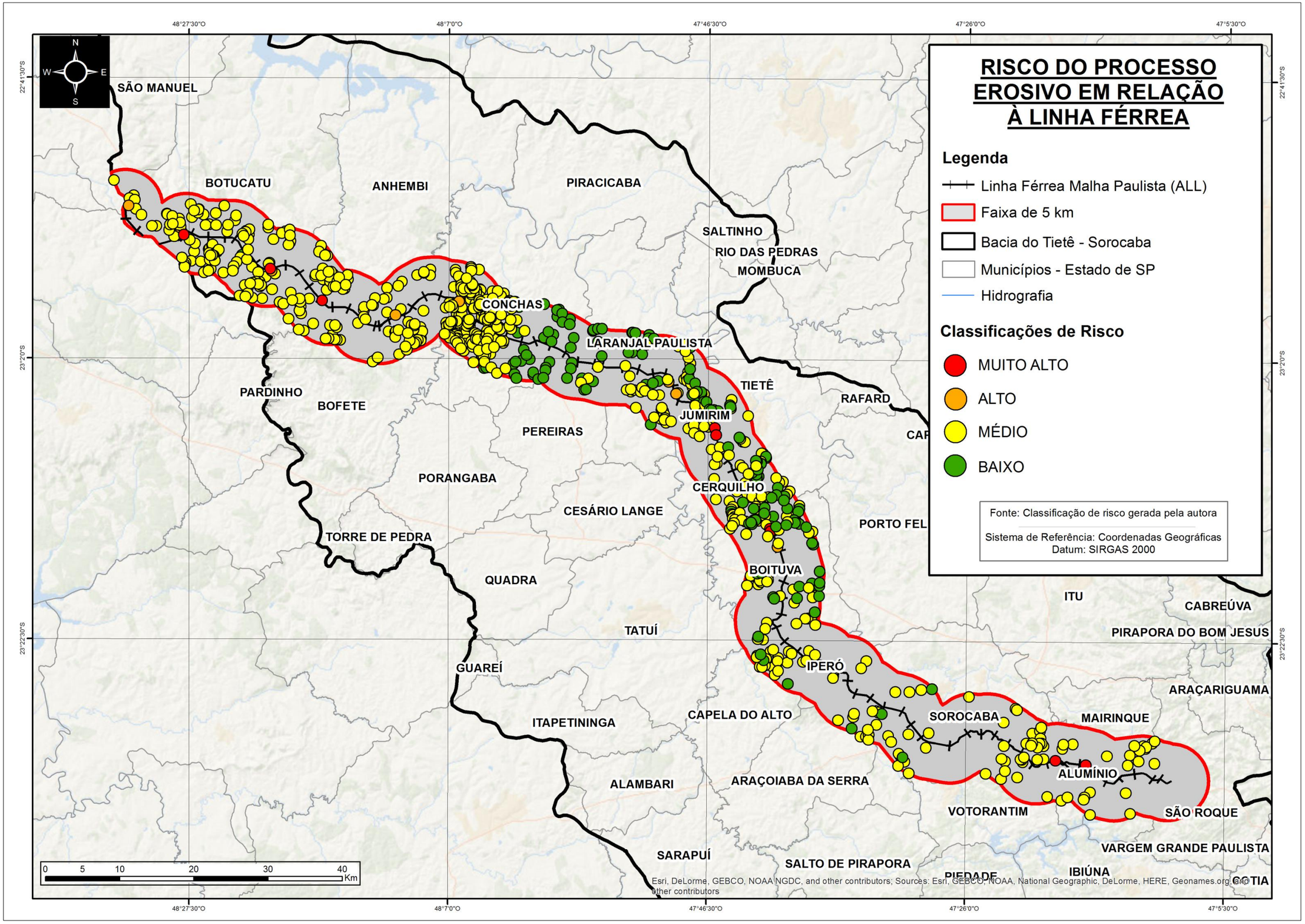


Figura 48. Mapeamento da análise de risco do processo erosivo à linha férrea

5. CONDIDERAÇÕES FINAIS

As considerações finais trazem reflexões acerca dos principais pontos abordados pelo trabalho apresentado: o processo metodológico, os resultados alcançados e a relevância e aplicabilidade da temática em questão. Algumas recomendações para o processo de continuidade da pesquisa também serão apontadas.

5.1. QUANTO À METODOLOGIA PROPOSTA:

Variáveis ambientais: produção de dados primários

A aplicação das técnicas propostas para geração dos mapeamentos intermediários que deram origem ao mapeamento de suscetibilidade da área de estudo mostraram-se satisfatórias no que diz respeito aos resultados esperados e a escala de mapeamento proposta para o estudo em questão. Tratam-se de métodos já difundidos e testados, amplamente utilizados em estudos de mesma abordagem. Cabe dizer, portanto, que a produção de dados deve atender especialmente às necessidades do analista, podendo ser direcionados a análises mais específicas e de escalas com maiores níveis de detalhamento.

Para os dados de topografia, as análises feitas priorizaram características do terreno de fácil obtenção através do manuseio dos dados em SIG, além de terem relação direta com o desenvolvimento de erosões e o processo de *run off* das águas. É comum, todavia, a obtenção de outras características relevantes, como o ângulo de curvatura das vertentes. A disponibilidade das bases digitalizadas, na escala de 1:50.000, facilitou o processo de mapeamento das características topográficas. Para escalas maiores, o Estado de São Paulo não dispõe de bases vetoriais gratuitas.

A aplicação da técnica de análises de histogramas de frequência para o mapeamento de solos permitiu recobrir, através da característica de solos já existentes, áreas que não apresentavam classes de solos definidas. Tal

procedimento garantiu melhores resultados na geração do mapeamento final, porém, a checagem em campo é importante para garantir a validação do dado gerado e da técnica utilizada.

Quanto aos dados de pluviometria, embora não foram testadas outras técnicas de interpolação, mais simples, para comparação, acredita-se alcançar os melhores resultados através da aplicação da krigagem, que utiliza de parâmetros estatísticos mais robustos. Um melhor resultado apenas seria alcançado se houvesse maior quantidade de dados e distribuição dos postos pluviométricos.

Por fim, o mapeamento de uso e ocupação do solo apresentou ótimos índices de classificação das tipologias selecionadas para mapeamento. A classificação supervisionada atendeu às necessidades do mapeamento, uma vez que não foi preciso a identificação de feições pertencentes ao tecido intraurbano.

Ponderação das variáveis: análise hierárquica de pesos

A técnica da AHP foi de extrema importância para a composição do indicador final de suscetibilidade. Através dela foi possível que os especialistas consultados avaliassem cada variável com critérios baseados em métodos estatísticos. Pelos resultados finais, é possível observar também que a aplicação da técnica junto à classificação de suscetibilidade proposta por Crepani (2001) pareceu representar a realidade do terreno quanto ao desenvolvimento de processos erosivos. A consulta com especialistas da área também foi de extrema importância, uma vez que os técnicos têm conhecimento de campo que influenciam diretamente no julgamento das variáveis analisadas. Para realização desse trabalho, foram encontradas dificuldades na obtenção de versões *free* de *softwares* específicos para aplicação da AHP. Os resultados apresentados foram modelados em *Excell*, o que pode ocasionar algumas variações dos resultados obtidos. A utilização de programas estatísticos de análises hierárquica de pesos proporciona uma análise mais segura, com apresentação de cenários possíveis (dados por julgamentos prováveis entre as variáveis analisadas) e o estudo detalhado de cada cruzamento e suas respectivas ponderações. Importante dizer também que qualquer simples alteração nos dados de entrada, como por exemplo, o

número de especialistas consultados ou as variáveis analisadas, irá afetar diretamente o resultado final do mapeamento.

Mapeamento de suscetibilidade à erosão

A obtenção de informações que validassem o resultado final do indicador foi um diferencial da pesquisa, já que o mapeamento gerado apresentou coerência com os eventos erosivos diagnosticados em campo. Baseado no total de processos erosivos analisados e nas classes de suscetibilidade definidas, é possível afirmar que o mapeamento final apresentou precisão de 91,36%.
De qualquer forma, é importante a aplicação do método proposto em outras regiões, para fins de comparação e comprovação de sua validade.

Análise de risco

A análise de risco proposta é uma adaptação feita aos métodos de análise de risco desenvolvidos pelo Instituto de Pesquisas Espaciais – IPT. Desenvolvido recentemente e aplicado exclusivamente aos registros de processos erosivos do Estado de São Paulo, o método ainda carece de acompanhamento e validação contínua dos resultados obtidos.

5.2. QUANTO AOS RESULTADOS ALCANÇADOS:

Sabe-se que o trecho por onde percorre a linha férrea é uma das regiões do estado de São Paulo com maiores problemas relacionada ao desenvolvimento de processos erosivos. Como se observou na apresentação dos resultados, o mapeamento final indicou aproximadamente 60% da área de estudo como sendo de alta suscetibilidade à erosão, com predominância da classificação 2,6, na escala definida.
Os mapeamentos das variáveis ambientais utilizadas na geração do mapeamento de suscetibilidade poderão beneficiar a produção de demais indicadores ambientais da área e subsidiar, inclusive, outros programas exigidos pelos órgãos federais e estaduais responsáveis pela fiscalização de operação e funcionamento da linha férrea junto à concessionária encarregada,

tais como: controle da área verde desmatada, análise dos reservatórios e controle da carga sedimentar gerada pelo desencadeamento de processos erosivos nos corpos d´água, monitoramento de tipos de uso do solo na área de entorno da linha, etc.

A análise de risco mostrou-se como uma ferramenta prática de monitoramento e gestão da área de entorno da linha férrea em análise, capaz de auxiliar nos processos de licenciamento da via e colaborar na preservação dos recursos ambientais disponíveis.

5.3. QUANTO À RELEVÂNCIA E APLICABILIDADE DO TEMA (GEOTECNOLOGIAS):

Um bom planejamento na área de transportes deve ser um instrumento que parte do princípio do reforço à sustentabilidade ambiental e de fortalecimento da função social. Nesse contexto, o presente trabalho contribuiu para a necessidade de reflexão sobre ferramentas fundamentais no que tange assuntos referentes ao planejamento e monitoramento de processos erosivos.

O crescimento contínuo do uso de geotecnologias reforça o princípio de que a solução de questões ambientais passa, inevitavelmente, pela implantação de um SIG como suporte à tomada de decisão na gestão ambiental e no uso sustentável dos recursos disponíveis. Podemos concluir que os Sistemas de Informações Geográficas e o uso de informações espaciais são exemplos de instrumentos de armazenamento, consulta e análise, eficazes em seus propósitos e dispostos de artefatos tecnológicos que auxiliam na elaboração de ações e medidas.

5.4. RECOMENDAÇÕES FUTURAS:

Embora o índice gerado tenha apresentado precisão de aproximadamente 90%, ficou evidente a limitação do mapeamento final em localizar áreas de alta intensidade relacionadas à localização de maiores quantidades de registros de erosões no terreno. Uma recomendação possível, para continuidade da pesquisa, seria testar tal motivo, seja por meio de checagem em campo ou adaptação do balanço final das variáveis: ponderação das relevâncias de cada

temática cruzada, técnicas de geoprocessamento utilizadas para os mapeamentos intermediários das variáveis ambientais selecionadas (melhores escalas, disponibilidade de dados, etc) variáveis ambientais utilizadas na geração do indicador, número de especialistas envolvidos para julgamento final da etapa de mapeamento, aprimoração da técnica estatística utilizada (AHP), etc.

Por conta do método proposto e da infinidade de metodologias possíveis para mapeamento e controle do aparecimento de processos erosivos, qualquer alteração nas etapas de geração de indicador afetará diretamente o resultado final do mapeamento. Novos resultados podem ser gerados a partir de novos testes, sob novas perspectivas, a fim de melhorar a precisão do resultado final e aproximar os resultados gerados à realidade da região de estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, M. A. T. Estudos de Erodibilidade dos Principais Tipos de Solos do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, 1996.

ALMEIDA FILHO, G. S. de. Diagnóstico de Processos Erosivos Lineares Associados a Eventos Pluviosos no Município de Bauru, SP. 2000. 222f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

ALMEIDA, L. Q. vulnerabilidades socioambientais de rios urbanos. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2010.

ANTF – Associação Nacional de Transportes Ferroviários. Materiais Institucionais ANTF. Acesso em: www.antf.org.br (Março de 2014)

ARAUJO, J. S. ; SILVA, R. F. da. Considerações sobre uma boçoroca em terreno basáltico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27. 1973, Aracaju, SE. Anais... São Paulo: ABG, 1973. v.1, p. 359-364 il.

ARNESEN, A. S.; GENOFRE, F. T.; CURTARELLI, M. P. Análise da vulnerabilidade à erosão através de sig: um subsídio ao zoneamento ecológico-econômico de santo amaro da imperatriz/sc. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande – Mato Grosso do Sul, 2009.

ASSAD, E.D. Avaliação de Métodos Geoestatístocs na Espacialização de Índices Agrometeorológicos para Definir Riscos Climáticos. Pesquisa Agropecuária Brasileira. V 38, n. 2, p. 161-171, 2003.

BARRETO, A. G. O. P. História e geografia da pesquisa brasileira em erosão do solo. Piracicaba, 2007. 117f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

BELTRAME, A. L. K. Mapeamento da cobertura do solo ao longo da faixa de domínio de trem metropolitano: Linha “F” em São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, 2008. Dissertação de Mestrado.

BENNETT, H.H. Soil conservation. New York, McGraw-Hill, 1939.

BERTRAND, G. Paisagem e Geografia Física Global – Esboço Metodológico. Cadernos de Ciências da Terra 13, IGEO/USP, São Paulo, 1971.

BERTONI, J. ; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. Ícone, São Paulo, 1990.

BERRY, J. K. Cartographic modeling: the analitical capabilities of gis. In: GOODCHILD, M. et alli. Environmental modelling with GIS. Oxford: Oxford University Press, 1993. 358p. Cap. 5, 58-74p.

BIGARELLA, J. J. ; MAZUCHOWSKI, J. Z. Visão integrada da problemática da erosão. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 3., 1985. Maringá, PR, Livro Guia… São Paulo: ABGE, 1985. 332p.

BUI, D. T.; PRADHAN, B.; LOFMAN, O.; REVHAUG, I.; DICK, OB. Landslide susceptibility assessment in the Hoa Binh province of Vietnam: a comparison of the Levenberg-Marquardt and Bayesian regularized neural networks. Geomorphology 171 – 172:12–29, 2012.

BUI, D. T.; HO, T. C.; REVHAUG, I.; PRADHAN, B.; NGUYEN, D. B. Landslide susceptibility mapping along the national road 32 of Vietnam using GIS-based j48 decision tree classifier and its ensembles. Cartography from pole to pole, pag. 303-317. Editora Springer Berlin Heidelberg, 2014.

BURROUGHS, Jr., E. R.; KING, J. G. Reduction of Soil Erosion on Forest Roads. USDA Forest Service / UNL Faculty Publications. 1989, paper 121.

BURROUGH, P.A. Principles of Geographic Information Systems for Land Resource Assessment. Monographs on Soil and Resources Survey No. 12, Oxford Science Publications, New York. 1986

CÂMARA, G., CASANOVA, M., HEMERLY, Y. A., MAGALHÃES, G., MEDEIROS, C. Anatomia de sistemas de informações geográficas. Campinas, Instituto de Computação. UNICAMP, 1996, 197 p.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V. & D'ALGE, J.C. (eds). Introdução à Ciência da Geoinformação, São José dos Campos, INPE, 2004.

CANIL, K. et al. Mapa de feições erosivas lineares do Estado de São Paulo: uma análise qualitativa e quantitativa. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE CONTROLE DE EROSÃO, 5., 1995, Bauru, SP. Anais... São Paulo: ABGE, 1995. p. 33-35.

CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; SOUSA, N. M.; MELO, M.S.T. (organizadores). Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. 1.ed. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, 2006. 464 p.

CARVALHO et al. Interpoladores Geoestatísticos na Análise da Distribuição Espacial da Precipitação Anual e de sua Relação com a Altitude. Pesquisa Agropecuária Brasileira. V 47, n. 9, p. 1235-1242, 2012.

CASTRO, R. A.; FERREIRA, H. L.; SANTOS, L. C. dos S. Erosões Às Margens da Br 222 na Cidade De Açailândia – MA. VI Simpósio Nacional de Geomorfologia. Geomorfologia Tropical e Subtropical: processos, métodos e técnicas. Goiânia, 2006.

CAVAGUTI, N. Erosões lineares e solos urbanos: estudos, caracterização e análise da degradação do meio físico em Bauru, SP. 1994. 548f. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Engenharia e Tecnologia – Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus Bauru, Bauru, 1994.

COOH, N. K. Geohazards natural and human. Simon & Shuster Company, New Jersey, 1995. 481p.

COLLARES, E.G. Princípios, evolução e aspectos metodológicos do mapeamento geotécnico. Revisão bibliográfica, Departamento de Geotecnia - EESC, 1992, 50 p.

CORRÊA, C. M. ; ROLOFF, G. ; SILVA, I. C. Erosão Real e Estimada através da RUSLE em Estradas Florestais em Duas Condições de Solo e Relevo e Quatro Perfis de Solo.

CONGALTON, R.G.; GREEN, K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. New York: Lewis Publishers, 2009.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; AZEVEDO, L.G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P.; FLORENZANO, T; BARBOSA, C. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Zoneamento Ecológico - Econômico e ao Ordenamento Territorial. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2001.

CROSTA, A.P. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas: UNICAMP. 1999. 169p.

CUTTER, S. L. (Ed.). The vulnerability of science and the science of vulnerability. Annals of the Association of American Geographers, Washington, v.93, n.1, p.1-12, 2003.

CUTTER, S. A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores », Revista Crítica de Ciências Sociais [Online], 93, 2011.

DE ROO, A. P. Modelling runoff and sediment transport in catchments using GIS. Hydrological Processes". V.12, p. 905–922, 1998.

DEVKOTA, KC; REGMI, A. D; POURGHASEMI, H. R; YOSHIDA, K.;PRADHAN, B.; RYU, I.C; DHITAL, M.R. Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS

and their comparison at Mugling-Narayanghat road section in Nepal Himalaya. Nat Hazards 65:135–165, 2013.

DINIZ, N. C.; et al. (2001). Aspectos da erosão e assoreamento na avaliação para implantação de terminais intermodais na hidrovia Tietê-Paraná, trecho Santa Maria da Serra - Promissão, utilizando base de dados geoambientais em SIG. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 7., 2001. Goiânia, GO. Anais...São Paulo: ABGE, 2001.

DINIZ, N. C. Cartografia Geotécnica por Classificação de Unidades de Terreno e Avaliação de Suscetibilidade e Aptidão. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental – Universidade de Brasília - UNB, 2010.

DONG, J.; LAI, P.; CHANG, C.; YANG, S.; YEH, K.; LIAO, J.; PAN, Y. Deriving landslide dam geometry from remote sensing images for the rapid assessment of critical parameters related to dam-breach hazards. Landslides, v.11, n. 1, p. 93-105. 2014.

DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. (eds) "Análise Espacial de Dados Geográficos". Brasília, EMBRAPA, 2004

FAGUNDES, M. G. Estudo comparativo da variação da escala nos estudos de fragilidade ambiental e vulnerabilidade natural dos solos na bacia hidrográfica do Rio Jundiaí. Universidade de São Paulo, FFLCH, 2013.

FENDRICH, R. Drenagem e controle da erosão urbana. Ed. Univ. Champagnat. Curitiba. Universidade Católica do Paraná, 1984. 396p.

FLORENZANO, T. G. Geotecnologias na geografia aplicada: Difusão e acesso. Revista do Departamento de Geografia, 17, 2005, 24-29. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – Universidade de São Paulo – USP

FITZ, P.R. Geoprocessamento sem complicação. Editora: Oficina de Textos – São Paulo, 2008.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. La erosion del suelo por el agua; algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. Roma: FAO.1967. 204p. (FAO. Coleccion FAO: Fomento de Tierras y Aguas, 7).

FUJIHARA, A. K. Predição de erosão e capacidade de uso do solo numa microbacia do oeste paulista com suporte de geoprocessamento. 2002. 118f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, Campus Piracicaba, Piracicaba, 2002.

FURLANI, G. M. Estudo geomorfológico das boçorocas de Casa Branca. São Paulo. 1980. 376f. il. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geografia Física da FFLCH, USP, São Paulo, 1980.

GALIANO, V. A. ; LORANDI, R. Carta de risco potencial à erosão acelerada da área de expansão urbana da cidade de Porto Ferreira-SP, na escala 1:10.000.In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 7., 2001. Goiânia, GO. Anais... São Paulo: ABGE, 2001.

GAJOS, M.; SIERKAS, E. Gis technology in environmental protection: research directions based on literature review. Pol. J. Environ. Stud. Vol. 21, n. 2, 241 – 248, 2012.

GUERRA, A. J. T. 1978. Dicionário geológico-geomorfológico. 5 ed. Rio de Janeiro, IBGE. 446p.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1995. p. 149-209.

GUERRA, A. J. T. O Início do Processo Erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Erosão e Conservação dos Solos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

GUERRA, A. J. T. Processos Erosivos nas Encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 8º. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2008. p. 149-209.

GOODCHILD, M. F. Geographical Information Science. Journal of Geographical Information System. Vol. 06, (1), 31 – 45.

GUIMARÃES, R. F. Utilização de um Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis a Escorregamentos Rasos com Controle Topográfico: Adequação e Calibração em Duas Bacias de Drenagem. Tese de Doutorado. UFRJ, 2000. 327p.

HERMUCHE, P. M, GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO, A. P. F.; MARTINS, E. S.; DRUCK, S.; CARVALHO, O. A.; SANTOS, N. B. F.; REATTO, A. Morphometry as support for pedological mapping: I. Asymmetric watersheds. Embrapa Cerrados, Planaltina, 2002.

HSIEH, Y.; HOU, C.; CHAN, Y.; HU, J.; FEI, L.; CHEN, H.; CHIU, C. Detection and Volume Estimation of Large Landslides by Using Multi-temporal Remote Sensing Data. In: EGU General Assembly Conference, 2014, Viena. Anais… Gottingen: EGU, 2014. v. 16, p. 5725.

HOLANDA, F.J.M. Erosão do solo: práticas conservacionistas. Fortaleza: SEBRAE/CE – Serviço de apoio às Micro e Pequenas Empresas do Estado do Ceará, 1999, 46p.

IMESON, A. C.; KWAAD, F. J. P. M. Gully types and gully prediction. K.N.A.G. Geografisch Tijdschrift, v.14, n.5, p. 433-441, 1980.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Carta a Geotécnica do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1994. (Relatório Técnico).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Diagnóstico da situação e diretrizes para prevenção e controle dos processos erosivos como base técnica para conservação dos recursos hídricos na Bacia do Alto Tietê – UGRHI 6.São Paulo: IPT, 2004. (Relatório Técnico 67 146).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Diagnóstico dos processos erosivos e de assoreamento nas Microbacias Itaim, Tapera Grande, Criciúma, Tanque Velho/Abreus e Manguinho, da Bacia Hidrográfica do rio Juqueri. São Paulo: IPT, 2010. (Relatório Técnico 119616-205).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Diagnóstico das inundações em áreas urbanas das UGRHIs 1 e 2 – Mantigueira e Paraíba do Sul, SP: Subsídio para o plano de contingência. São Paulo: IPT, 2005a. (Relatório Técnico, 82 383-205).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Erosão no Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1995. (Relatório Técnico 33 402).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Geologia da Folha de São José dos Campos, SP, SF-23-Y-D-II. São Paulo: IPT, 1980. 43 p. il. Publicação IPT, 1113, Monografias 2.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Levantamento e cadastro de áreas de risco de inundação, erosão e escorregamento na unidade hidrográfica de gerenciamento de recursos hídricos do Piracicaba/Capivari/ Jundiaí e parte do Pardo, Mogi-Guaçu e Tietê/Jacaré. São Paulo: IPT, 2005b. (Relatório Técnico, 77 446-205).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, escala 1:1.000.000. São Paulo: IPT, 1981a. Publicação IPT 1183, Monografia, 5. 2v.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Mapa geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500 000. São Paulo: IPT, 1981b. Publicação IPT 1184, Monografia, 6. 2v.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Mapa de Erosão do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. IPT/DAEE, 1997 São Paulo, 1997.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Mapeamento e Gerenciamento de Áreas de Risco de Escorregamento e Inundação no Município de Arujá, SP. São Paulo: IPT, 2012. (Relatório Técnico, 128 764-205).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo – Bacia do Peixe-Paranapanema. São Paulo: IPT, 1986. (Relatório Técnico 24.739, vol. 2).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Baixo Tietê. São Paulo: IPT, 1989a. (Relatório Técnico 26 339).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, Bacia do Pardo-Grande. São Paulo: IPT, 1989b. (Relatório Técnico 28 184).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Subsídios para uma caracterização geológico-geotécnica da área piloto da Região Administrativa 3, Vale do Paraíba, São Paulo. 1977. 17p. il.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS/DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. Manual de Geotecnia: Taludes de rodovias - Orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. São Paulo: IPT/DER-SP, 1991

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Cadastramento de pontos de erosão e inundação no Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 2013 (Relatório Técnico – 364 pgs).

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press, 1989.

IWASA, O. Y. ; FENDRICH, R. Controle da Erosão Urbana. In: GEOLOGIA DE ENGENHARIA. CNPq/FAPESP. ABGE, São Paulo, 1998, Cap.16.

KEHEW, A.E. Geology for engineers and environmental scientists. Prentice Hall, 1995. p. 574.

KIRKBY, M.J.; MORGAN, R.P.C. Soil erosion Chichester: J. Wiley, 1980.

KOCHENDERTER, J. N. Erosion Control In Longging Roads.Northeastern Forest Experiment Station, Upper Darby, Pa. Forest Service, U. S Department Of Agriculture. FOREST SERVICE RESEARCH PAPER NE- 158, 1970

JACOMO, C. A. Modelos Geoestatísticos Espaço-Tempo aplicados a dados pluviométricos no Oeste do estado de São Paulo. Dissertação. (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente – SP, 2011.

L. Ai , N.F.; B. Shi, Z. (2013): Broad area mapping of monthly soil erosion risk using fuzzy decision tree approach: integration of multi-source data within GIS, International Journal of Geographical Information Science, DOI:10.1080/13658816.2012.752095

LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. et al. Soil erosion research methods. Washington: Soil and Water Conservation Society, 1988. p. 141-160.

LANDIM, P. M. B. Introdução à análise variográfica com o variowin: lab. geomatemática. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, 2004.

LANDIS, J.R. e KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics, v.33, n.1, p. 159-174, 1977.

LEE, S.; CHOI, J.; MIN, K. Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and remote sensing data at Boun, Korea. International Journal of Remote Sensing, v. 25, n. 11, p. 2037-2052. 2004.

LEINZ, V. Geologia Geral. 2.ed. São Paulo: Nacional, 1963. 474 p.

LEINZ, V. & LEONARDOS, O.H. Glossário Geológico. 2.ed. São Paulo, Companhia Editora Nacional, 1977. 236p.

LEMOS, R. C. & SANTOS, R. D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Campinas-SP, SBCS/SNLCS, 1984. 46 P

LEPSCH, I. F. (coord.). Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação das terras no sistema de capacidade de uso. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo-SBCS. 1983. 175p.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. Remote Sensing and Image Interpretation, 4. ed., New Jersey: John Willey and Sons. 2004. 768 p.

LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. Sistemas e Ciência da Informação Geográfica. Editora Buckman, 3º Edição, 2013.

LOMBARDO, M. A. e MACHADO, R.P. Aplicação das técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas nos estudos urbanos. Departamento de Geografia da FFLCH/USP, 5, 1995 - 11p.

MANFRÉ, L. A.; HIRATA, E.; SILVA, J.; SHINOHARA, E. J.; GIANNOTTI, M. A.; LAROCCA, A. P. C.; QUINTANILHA, J. A. An Analysis of Geospatial Technologies for Risk and Natural Disaster Management. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2012, 1, 166-185.

MANTOVANI, F.; SOETERS, R.; WESTEN, C. J. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. Landslides in the European Union. Geomorphology. Volume 15, Issues 3–4, April 1996, Pages 213–225

MARANDOLA JR., E.; HOGAN, D. J. Natural hazards: o estudo geográfico dos riscos e perigos. Revista Ambiente & Sociedade 7 (2), 95-109, 2004.

MARANDOLA JR., E.; HOGAN, D. J. As dimensões da Vulnerabilidade. Revista São Paulo em Perspectiva 20 (1), 33-43, 2006.

MARBLE, D. Geographical information system: an overview. In: Pecora, 9 Conference, Sioux Falls, S. D. Proceedings. Sioux Falls, S. D. V.1, p. 18- 24, 1984.

MARCELINO, E. V. Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Caderno didático nº1, Santa Maria – RS, 2008.

MARQUES, J. Q. A. (coord.). Manual brasileiro para levantamento da capacidade de uso da terra, s.1, IBGE. 1971. 433p.

MARQUES, A. P. Aplicação do interpolador krigagem ordinária para a elaboração de planta de valores genéricos. Revista Brasileira de Cartografia. Nº 64/2: 175-186. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto, 2012.

MATHERON, G. The theory of regionalized variables. Paris: École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1971.

MATIAS, L. F. Sistema de informações geográficas: Teoria e método para representação do espaço geográfico. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia, 2001.

MERRITT, W.S.; Letcher, R.A.; Jakeman, A.J. A review of erosion and sediment transport models. Environmental Modelling & Software, Vol. 18, Issues 8–9, pag. 761 – 799. October–November , 2003.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais. Celso Santos Carvalho e Thiago Galvão (organizadores) – Brasília, Cities Alliance, 2006.

MONTEBELLER, C.A. Spatial Variability of the Rainfall Erosive Potential in the State os Rio de Janeiro, Brazil. Revista de Engenharia Agrícola. V, 27, n. 2, 2007.

MORGAN, R.P.C. Soil Erosion and Conservation. Longman Group, Inglaterra, 1986, 298p.

MOURA, A. C. M. Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em análises multicritérios. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento, Florianópolis, p. 2899-2906, 2007.

NISHYAMA, L. Erosão do Solo. Seminários gerais em geotecnia. São Carlos: USP/E.E.S.C, 1995.

NOVO, E. L. M. Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 328 p.

NOVO, E. L. M. Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações. 3ª Edição. São Paulo: Blucher, 2008.

OH, H.-J.; PRADHAN, B. Application of a neuro-fuzzy model to landslidesusceptibility mapping for shallow landslides in a tropical hilly area. Computers & Geosciences 37, 1264–1276, 2011.

OLIVEIRA, J. B. Mapa Pedológico do Estado de São Paulo. Escala: 1:500.000. 1999. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas – IAC. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 1999.

PEJON, O. Estudos geoambientais da região de Piracicaba-SP, focalizando o problema de erosão linear, com auxílio do sistema de informação geográfica. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo – USP, 1998.

PICHLER, E. Boçorocas. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, v.2, n.1, 1953, p. 3-16.

PITOMBO, C. S. ; KAWAMOTO, E. ; SOUSA, A. J. . An exploratory analysis of relationships between socioeconomic, land use, activity participation variables and travel patterns. Transport Policy (Oxford), v. 18, pag. 347 - 357, 2011.

PRADHAN, B.;LEE, S.Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. Environ Earth Sci 60:1037– 1054, 2010.

PRADHAN, B. SHATTRI M.; (2011): Landslide hazard and risk analyses at a landslide prone catchment area using statistical based geospatial model, International Journal of Remote Sensing, 32:14, 4075-4087

PONÇANO, W. L. ; PRANDINI, F. L. Boçorocas no Estado de São Paulo: uma revisão. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 4., 1987, Marília. Anais... São Paulo: ABGE, 1987. p. 149 – 177.

POURGHASEMI, H. R.; PRADHAN, B.; GOKCEOGLU, C. Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. Natural Hazards 63 (2), 135 – 165, 2012.

PRANDINI, F. L. Peculiarities of Geotechnical Behavior of Tropical Lateriticand Saprolitic Soils. Special Types of Gullies. 1985. pg. 135-149.

RABACO, L. M. Avaliação de Modelos de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa numa Faixa de Dutos. Dissertação de Mestrado, UFRJ, 2005. 214p.

REGMI, A. D.; DEVKOTA, K.C.; YOSHIDA, K.; PRADHAN, B.; POURGHASEMI, H. R.; KUMAMOTO, T.; AKGUN, A. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. Arabian Journal of Geosciences 7 (2), pag. 725 – 742, 2014.

RIBEIRO, F. L. Mapa de vulnerabilidade à erosão da Região do Alto Rio Pardo - Pardinho (SP). Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Campus Botucatu, Botucatu, 2002.

ROESSNER, S.; BEHLING, R.; SEGL, K.; GOLOVKO, D.; WETZEL, H.; KAUFMANN, H. Automated Remote Sensing Based Landslide Detection for Dynamic Landslide Inventories. In: Sassa, K.; Canuti, P.; Yin, Y. Landslide Science for a Safer Geoenvironment. Netherlands: Springer, 2014. v. 2. p. 345-350.

ROSAS, R. Geotecnologias na geografia aplicada. Revista do Departamento de Geografia 16, 2005, 81-90. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – Universidade de São Paulo - USP

ROSS, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. Revista do Departamento de Geografia, v. 8, FFLCH - USP, São Paulo, 1994.

ROSS, J. L. S. Análise e Síntese na Abordagem Geográfica da Pesquisa para o Planejamento Ambiental. Revista do Departamento de Geografia, v. 9, FFLCH-USP, São Paulo, 1995.

ROSS, J. L. S. Zoneamento Ecológico-Econômico. Workshop - Metodologia de Zoneamento Ecológico-Econômico para a Região Nordeste. Fortaleza, Ceará, 2000.

SAATY, T. L. A. Scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of mathematical psychology, 15, p. 234-281, 1977.

SAITO, H.; NAKAYAMA, D.; MATSUYAMA, H. Comparison of landslide susceptibility based on a decision-tree model and actual landslide occurrence: the Akaishi Mountains, Japan. Geomorphology 109:108–121, 2009.

SILVA, J. X.; SOUZA, M. Análise ambiental. Ed. da UFRJ, Rio de Janeiro, 1987

SUAREZ DE CASTRO, F.Conservación de suelos. Madri:Slvat, 298p, 1956.

SALOMÃO, F. X. T. Processos erosivos lineares em Bauru (SP): regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano e rural. São Paulo. 1994. 220f. Tese (Doutorado) - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 1994.

SALOMÃO, F. X. T. Controle e Prevenção dos Processos Erosivos. In: Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 1999.

SOUZA, N. C.; LAROCCA, A. P. C.; GIANOTTI, M. A.; QUINTANILHA, J. A.; ALMEIDA, G. Análise da associação entrecaracterísticas topográficas e tipos de ocorrência de processos erosivos ao longo de linha férrea - estudo de caso: malha paulista – ALL (SP). Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, Curitiba, v. 20, no 4, p.948-970, 2014.

SPÖRL, C. e ROSS, J. L. S. Análise Comparativa da Fragilidade Ambiental com Aplicação de Três Modelos. GEOUSP, 2004, nº15, FFLCH-USP, São Paulo - SP.

SPÖRL, C. Modelo de Fragilidade Ambiental Utilizando Redes Neurais Artificiais" II SEPEGE, 2007. FFLCH-USP, São Paulo.

SPÖRL, C. Modelo de Fragilidade Ambiental Utilizando Redes Neurais Artificiais. Tese de Doutorado. USP, 2007. 183p.

TEXEIRA, A.; MORETTI, E.; CRISTOFOLLETTI, A . Introdução aos Sistemas de Informação Geográficas, Rio Claro, SP, 1992. 80 p.

TIEN, B. D.; PRADHAN, B.; LOFMAN, O.; REVHAUG, I. Landslide susceptibility assessment in Vietnam using support vector machines, Decision tree and Naïve Bayes models. Mathl Probl Eng., 2012.

TIEN, B.; REVHAUG, I.; PRADHAN, B.; NGUYEN, D.B. Landslide susceptibility mapping along the National Road 32 of Vietnam using GIS-based decision tree classifier and its ensembles in M. Buchroithner et al. (eds.), Cartography from Pole to Pole, Chapter 21. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, 2013.

TOY, T. J.; FOSTER, G. R.; RENARD, K. G. Soil erosion: processes, prediction, measurement and control. New York: John Wiley, 2002. 338 p.

TRICART, J. Ecodinâmica. FIBGE, Rio de Janeiro, 1977.

TSO, B.; MATHER, P. M. Classification Methods for Remotely Sensed Data. 1º Ed. London: Taylor & Francis, 2001. 331p.

VASCONCELLOS, E. A. Transporte e Meio Ambiente. Editora Annablume, São Paulo, 199 páginas, 2008.

VEDOVELLO, R. Zoneamentos geotécnicos aplicados à gestão ambiental, a partir de Unidades Básicas de Compartimentação - UBCs. 2000. 154p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

VILAR, O. M. ; PRANDI, E. C. Erosão dos solos – Solos do interior de São Paulo. Eds. J.C.A. Cintra ; J.H. Albiero, ABMS, Departamento de Geotecnia, EESC, USP, 1993. p. 177-206.

VIOLA, M. Métodos de Interpolação Espacial para mapeamento da precipitação pluvial. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 14. N. 9, p. 970-978, 2010.

ZACHAR, D. Soil erosion: Developments in Soil Science. New York, Elsevier Scientific, 1982. 547p.

ZUQUETTE, 1987. Análise Crítica da Cartografia Geotécnica e Proposta Metodológica para Condições Brasileiras. Tese de Doutorado. Universidade de SãO Paulo – USP, 1998.

WANDERLEY et al. Interpolação espacial da precipitação no estado de alagoas utilizando técnicas geoestatística. Campo Digital: Rev. Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias, v.8, n.1, p. 34-42, 2013.

WISCHMEIER, W. H. ; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses from cropland East of the Rocky Mountains. Washington: USDA. 1965. 47 p. (Handbook, 282).

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall-erosion losses: a guide to conservation farming. Washington, Department of Agriculture (Agriculture Handbook, 537), 1978.

7. ANEXOS

Questionários

1. Técnico responsável: Samuel Bersanelli Costa – **Formação/atuação**: Engenheiro Ambiental - CTGeo - Seção de Investigações, Riscos e Desastres Naturais – Sirden – IPT

			Ambientais					Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
			1	2	3	4	5		
Ambientais	1	Geologia	1,00	0,33	5,00	5,00	0,33	1,226703205	19%
	2	Características Topográficas	3,00	1,00	3,00	3,00	1,00	1,933182045	30%
	3	Pluviometria	0,20	0,33	1,00	0,33	0,14	0,316473893	5%
	4	Uso e Cobertura do Solo	0,20	0,33	3,00	1,00	0,20	0,525305561	8%
	5	Tipos de Solo	3,00	1,00	7,00	5,00	1,00	2,536517482	39%
		Σ	7,40	3,00	19,00	14,33	2,68	6,538182185	100%

λ-max	5,385	(Quanto mais distante de 5 maior é a variânica)
IC	0,096	
Taxa de consistência	9%	(TEM QUE SER INFERIOR A 20%)

2. Técnico responsável: Aline Fernandes Heleno - **Formação/atuação:** Engenheira Civil - CTObras - Seção de Seção de Geotecnia – IPT

			Ambientais					Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
			1	2	3	4	5		
Ambientais	1	Geologia	1,00	9,00	9,00	3,00	1,00	3	37%
	2	Características Topográficas	0,11	1,00	1,00	0,20	0,11	0,30096015	4%
	3	Pluviometria	0,11	1,00	1,00	0,20	0,11	0,30096015	4%
	4	Uso e Cobertura do Solo	0,33	5,00	5,00	1,00	0,14	1,035485788	13%
	5	Tipos de Solo	1,00	9,00	9,00	7,00	1,00	3,553993358	43%
		Σ	2,56	25,00	25,00	11,40	2,37	8,191399447	100%

λ-max	5,24	(Quanto mais distante de 5 maior é a variânica)
IC	0,06	
Taxa de consistência	5%	(TEM QUE SER INFERIOR A 20%)

3. Técnico responsável: Gerson Salviano de Almeida Filho - **Formação/atuação:** Tecnólogo em Engenharia Civil - CTGeo - Seção de Investigações, Riscos e Desastres Naturais – Sirden – IPT

			Ambientais					Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
			1	2	3	4	5		
Ambientais	1	Geologia	1,00	1,00	1,00	9,00	0,14	1,051547497	13%
	2	Características Topográficas	1,00	1,00	3,00	1,00	0,11	0,802741562	10%
	3	Pluviometria	1,00	0,33	1,00	0,33	0,11	0,415243647	5%
	4	Uso e Cobertura do Solo	0,11	1,00	3,00	1,00	0,11	0,517281858	6%
	5	Tipos de Solo	7,00	9,00	9,00	9,00	1,00	5,515248862	66%
		Σ	10,11	12,33	17,00	20,33	1,48	8,302063425	100%

λ-max	5,571	(Quanto mais distante de 5 maior é a variânica)
IC	0,143	
Taxa de consistência	13%	(TEM QUE SER INFERIOR A 20%)

4. Técnico responsável: Zeno Hellmeister Jr **- Formação/atuação:** Geólogo - CTGeo - Seção de Investigações, Riscos e Desastres Naturais – Sirden – IPT

			Ambientais					Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
			1	2	3	4	5		
Ambientais	1	Geologia	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1	20%
	2	Características Topográficas	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1	20%
	3	Pluviometria	1,00	1,00		1,00	1,00	1	20%
	4	Uso e Cobertura do Solo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1	20%
	5	Tipos de Solo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1	20%
		Σ	5,00	5,00	4,00	5,00	5,00	5	100%

λ-max	4,8	(Quanto mais distante de 5 maior é a variânica)
IC	-0,05	
Taxa de consistência	-4%	(TEM QUE SER INFERIOR A 20%)

5. Técnico responsável: Cláudio Luís Ridente Gomes - **Formação/atuação:** Tecnólogo em Engenharia Civil - CTGeo - Seção de Investigações, Riscos e Desastres Naturais – Sirden – IPT

			Ambientais					Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
			1	2	3	4	5		
Ambientais	1	Geologia	1,00	5,00	1,00	3,00	1,00	1,718771928	28%
	2	Características Topográficas	0,20	1,00	0,14	0,33	0,33	0,316473893	5%
	3	Pluviometria	1,00	7,00		3,00	0,33	1,626576562	26%
	4	Uso e Cobertura do Solo	0,33	3,00	0,33	1,00	0,33	0,644394015	10%
	5	Tipos de Solo	1,00	3,00	3,00	3,00	1,00	1,933182045	31%
		Σ	3,53	19,00	4,48	10,33	3,00	6,239398442	100%

λ-max	5,101	(Quanto mais distante de 5 maior é a variânica)
IC	0,025	
Taxa de consistência	2%	(TEM QUE SER INFERIOR A 20%)

6. Técnico responsável: Aluízio de Souza Frota - **Formação/atuação:** Gestor Ambiental - CTGeo - Seção de Investigações, Riscos e Desastres Naturais – Sirden – IPT

			Ambientais					Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
			1	2	3	4	5		
Ambientais	1	Geologia	1,00	1,00	0,11	0,20	0,14	0,316473893	4%
	2	Características Topográficas	1,00	1,00	0,14	0,20	0,33	0,39424132	5%
	3	Pluviometria	9,00	7,00		0,33	0,33	1,626576562	23%
	4	Uso e Cobertura do Solo	5,00	5,00	3,00	1,00	0,20	1,718771928	24%
	5	Tipos de Solo	7,00	3,00	3,00	5,00	1,00	3,159818306	44%
		Σ	23,00	17,00	6,25	6,73	2,01	7,215882008	100%

λ-max	5,831	(Quanto mais distante de 5 maior é a variânica)
IC	0,208	
Taxa de consistência	19%	(TEM QUE SER INFERIOR A 20%)

7. Técnico responsável: Sérgio Gouveia de Azevedo - **Formação/atuação:** Geólogo (especialista em Hidrogeologia) - CTGeo - LabGeo – IPT

			Ambientais					Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
			1	2	3	4	5		
Ambientais	1	Geologia	1,00	0,33	3,00	5,00	3,00	1,718771928	29%
	2	Características Topográficas	3,00	1,00	3,00	3,00	3,00	2,408224685	40%
	3	Pluviometria	0,33	0,33		0,33	0,33	0,333333333	6%
	4	Uso e Cobertura do Solo	0,20	0,33	3,00	1,00	3,00	0,902880451	15%
	5	Tipos de Solo	0,33	0,33	3,00	0,33	1,00	0,644394015	11%
		Σ	4,87	2,33	12,00	9,67	10,33	6,007604413	100%

λ-max	5,555	(Quanto mais distante de 5 maior é a variânica)
IC	0,139	
Taxa de consistência	12%	(TEM QUE SER INFERIOR A 20%)

8. Técnico responsável: Alessandra Cristina Corsi - **Formação/atuação:** Geóloga - CTGeo - Seção de Investigações, Riscos e Desastres Naturais – Sirden – IPT

			Ambientais					Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
			1	2	3	4	5		
Ambientais	1	Geologia	1,00	0,33	1,00	0,33	0,33	0,517281858	9%
	2	Características Topográficas	3,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,551845574	28%
	3	Pluviometria	1,00	0,33		0,33	0,33	0,438691338	8%
	4	Uso e Cobertura do Solo	3,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,551845574	28%
	5	Tipos de Solo	3,00	1,00	3,00	1,00	1,00	1,551845574	28%
		Σ	11,00	3,67	10,00	3,67	3,67	5,611509917	100%

λ-max	4,838	(Quanto mais distante de 5 maior é a variânica)
IC	-0,04	
Taxa de consistência	-4%	(TEM QUE SER INFERIOR A 20%)

9. Técnico responsável: Filipe Antônio Marques Falcetta - **Formação/atuação:** Engenheiro Civil - CTGeo - Seção de Investigações, Riscos e Desastres Naturais – Sirden - IPT

			Ambientais					Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
			1	2	3	4	5		
Ambientais	1	Geologia	1,00	3,00	0,20	0,14	5,00	0,84412088	11%
	2	Características Topográficas	0,33	1,00	0,14	0,11	0,20	0,254046747	3%
	3	Pluviometria	5,00	7,00	1,00	1,00	5,00	2,809361392	38%
	4	Uso e Cobertura do Solo	7,00	9,00	1,00	1,00	3,00	2,852938178	39%
	5	Tipos de Solo	0,20	5,00	0,20	0,33	1,00	0,581810759	8%
		Σ	13,53	25,00	2,54	2,59	14,20	7,342277956	100%

λ-max	5,524	(Quanto mais distante de 5 maior é a variânica)
IC	0,131	
Taxa de consistência	12%	(TEM QUE SER INFERIOR A 20%)

10. Técnico responsável: Karina Maria Berbet Bruno - **Formação/atuação:** Geógrafa e Geóloga - CTGeo - Seção de Investigações, Riscos e Desastres Naturais – Sirden - IPT

			Ambientais					Auto Vetor	Auto Vetor Normalizado
			1	2	3	4	5		
Ambientais	1	Geologia	1,00	0,33	0,33	0,25	0,20	0,35395292	5%
	2	Características Topográficas	3,00	1,00	0,33	0,25	0,20	0,549280272	8%
	3	Pluviometria	3,00	3,00		0,25	0,20	0,819036259	12%
	4	Uso e Cobertura do Solo	4,00	4,00	4,00	1,00	0,20	1,665106415	24%
	5	Tipos de Solo	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	3,623898318	52%
		Σ	16,00	13,33	9,67	6,75	1,80	7,011274183	100%

λ-max	5,515	(Quanto mais distante de 5 maior é a variânica)
IC	0,129	
Taxa de consistência	11%	(TEM QUE SER INFERIOR A 20%)