



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA



**MODELAGEM DO CONHECIMENTO APLICADA AO
ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE
INCÊNDIOS NO PARQUE NACIONAL DO ITATIAIA**

TESE DE DOUTORADO

GUSTAVO MOTA DE SOUSA
ORIENTADOR: PROF. MANOEL DO COUTO FERNANDES

Rio de Janeiro
Agosto de 2013

**MODELAGEM DO CONHECIMENTO APLICADA AO ESTUDO DA
SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS
NO PARQUE NACIONAL DO ITATIAIA**

Gustavo Mota de Sousa

Tese de Doutorado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências: Geografia.

Prof. Dr. _____ - Orientador
Manoel do Couto Fernandes
Departamento de Geografia – UFRJ

Prof. Dr. _____
Mauro Antonio Homem Antunes
Departamento de Engenharia - UFRJ

Prof. Dr. _____
Gilson Alexandre Ostwald Pedro da Costa
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC Rio

Prof. Dra. _____
Carla Bernadete Madureira Cruz
Departamento de Geografia – UFRJ

Prof. Dr. _____
Rafael Silva de Barros
Departamento de Geografia – UFRJ

Sousa, Gustavo Mota de.

Modelagem do conhecimento aplicada ao estudo da susceptibilidade à ocorrência de incêndios no Parque Nacional do Itatiaia – Rio de Janeiro: [s.n.], 2013.

161 fls., 30 cm.

Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

Referências bibliográficas fl.132-145.

1. Incêndios Florestais, 2. Cartografia Geoecológica, 3. GEOBIA, 4. Mineração de dados.

***É graça divina começar bem. Graça maior
persistir na caminhada certa. Mas graça das
graças é não desistir nunca.***

Dom Hélder Câmara

Aos meus pais, Francisco e Maria que me deram o dom da vida e as oportunidades que dela surgem. E para a minha esposa Alessandra que é o meu amor da vida e que me ajudou a acreditar nos desafios dessa nova etapa que estou vivendo hoje!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus que me deu a vida e essa oportunidade que nunca esquecerei de participar deste Programa de Pós-Graduação.

Ao meu irmão Prof. Dr. Denis Mota de Sousa que é o meu parceiro de vida e que sempre me apoiou na realização deste sonho que estamos sonhando juntos de vivenciar o dia a dia das Universidades em que trabalhamos além do convívio da nossa família.

À minha esposa Alessandra Sá Sousa que junto dos nossos pais sempre me fizeram acreditar que a realização deste trabalho seria possível.

Agradeço ao meu orientador e amigo Prof. Manoel do Couto Fernandes que desde o mestrado sempre teve o carinho de um pai em mostrar os melhores caminhos da pesquisa que me levaram hoje a trabalhar na UFRRJ nos cursos de Geografia e Geologia. Nunca esquecerei desses conhecimentos e sempre estarei por perto para continuar aprendendo.

Ao Prof. Paulo Márcio Leal de Menezes pelo total e irrestrito apoio dado desde que me aceitou para participar do Laboratório de Cartografia (GEOCART) que se tornou a minha segunda casa e que continuará assim sempre para a minha vida.

À Prof^a. Carla B. Madureira Cruz por todo o aprendizado que me trouxe ainda mais para perto do Sensoriamento Remoto. Os incentivos e novidades dessa área que é uma das minhas paixões da vida e nunca serão esquecidos!

Aos Professores Gilson A.O.P. Costa e Raul Queiroz Feitosa que deram total apoio com a estrutura do Laboratório de Visão Computacional através do desenvolvimento do InterIMAGE. Além dos seus alunos Rodrigo Ferreira e Patrick Happ que sempre se mostraram disponíveis às minhas dúvidas e sugestões que foram importantíssimas para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Mauro A. Homem Antunes que ajudou bastante na etapa final da pesquisa em relação ao uso da correção atmosférica que gerou uma nova parceria de pesquisa além da sua amizade que irá dar novos frutos para o novo momento que vive a UFRRJ.

Agradeço ao Prof. Rafael Barros pela sua participação na banca e ensinamentos durante as disciplinas do doutorado que se mostraram importantes para a construção deste trabalho.

Agradeço também aos amigos Fábio Ventura dos Santos, Marlon Thiago de Oliveira Nunes e Igor Vieira Vargas Colares que encararam juntos comigo os inúmeros desafios dessa tese de doutorado que nos deram resultados importantes durante os SBSR de 2011 e 2013.

Aos amigos do Geocart: Pedro Coura, Danielle Cintra, Aline Colli, Pablo Nunes, Anniele Freitas, Allan Naue, Dayana Silva, Kairo Santos, Beatriz Souza, Tatiana Ferreira, Pamela Dionísio, Filipe Dias, Tainá Laeta, Rodrigo Araújo, Rayanne Seidel, Amanda Sardella, Alan Salomão, Paulo Alves, Luciana Temponi, Thiago Colman e Leandro Ribeiro.

Aos meus colegas Professores do Departamento de Geociências da UFRRJ que me deram apoio para conclusão desse trabalho, em especial a Prof^a Regina Cohen Barros.

À administração do Parque Nacional do Itatiaia que através do amigo Gustavo Wanderley Tomzhinski sempre se mostraram prontos para as questões referentes a pesquisa além dos auxílios durante os trabalhos de campo e curso de brigadistas.

Ao PPGG, em especial à Ildione e Evanir sempre bastante atenciosas durante o meu período de mestrado e doutorado nesta instituição.

RESUMO

Os incêndios florestais são alguns dos desafios enfrentados pelo Parque Nacional do Itatiaia (PNI) e são decorrentes de inúmeras práticas em que o homem é o principal agente deflagrador. Por isso, é importante o conhecimento das variáveis geológicas da paisagem que podem indicar o comportamento dos incêndios para o melhor combate. O mapeamento das variáveis geológicas é realizado por meio de modelos de análise que indicam a representação do fenômeno na paisagem e tornam possível o planejamento dos gestores das Unidades de Conservação (UC) mediante o conhecimento das áreas mais susceptíveis aos incêndios florestais. O objetivo desse trabalho é contribuir metodologicamente para a construção de um mapeamento da susceptibilidade à ocorrência de incêndios através de modelagem do conhecimento com o suporte conceitual da geologia e das técnicas de mineração de dados e Análise de imagens baseada em objetos geográficos (GEOBIA). Para o desenvolvimento da metodologia foram utilizados dados múltiplos da paisagem compostos por imagens AVNIR-2/ALOS, Modelos Digitais de Elevação (MDE) e dados de áreas queimadas (ROI) adquiridas em campo através da equipe de brigadistas do PNI. Os métodos aplicados seguiram a realização de correção atmosférica da imagem para geração do NDVI, mapeamento da cobertura da terra, aquisição de amostras das variáveis geológicas com características de susceptibilidade à ocorrência de incêndios visando a extração de atributos para mineração de dados, elaboração do índice de susceptibilidade (ISOI), além da classificação da susceptibilidade por meio de diferentes técnicas em que a GEOBIA se apresentou com o melhor resultado. O mapeamento da susceptibilidade à ocorrência de incêndios tomou o ano de 2009 como base utilizando os ROI de 2008 e 2009 para calibração do modelo de conhecimento por meio da extração de atributos das variáveis geológicas e utilizou os ROI do período entre 2010 a 2012 que foram comparados ao modelo apresentando uma correlação de valores para identificação das áreas de validação definidas como alta, média e baixa susceptibilidade com 59,9%, 38,1% e 1,6% respectivamente, indicando a eficácia da metodologia que pode ser replicada para outras UCs.

Palavras-chave: Incêndios Florestais, Cartografia Geológica, GEOBIA, Mineração de Dados.

ABSTRACT

Wildfires are some of the challenges faced by the Itatiaia National Park (PNI) and are due to numerous practices where the man is the main triggering agent. So it is important to know the geoecology variables of landscape that may indicate the behavior of fires to find the best strategies of firefighting. The mapping of geoecology variables is accomplished through analysis models that indicate the representation of the phenomenon in the landscape and make possible the planning of managers of Conservation Units (UC) by the knowledge of the areas most susceptible to wildfires. The aim of this work is to contribute methodologically to build a mapping of susceptibility to fires through knowledge modeling with the support of geoecology conceptual and data mining techniques and Geographic object-based image analysis (GEOBIA). For the development of the methodology we used multiple landscape data composed AVNIR-2/ALOS images, Digital Elevation Models (DEM) and burned areas records (ROI) acquired on the field by the team of PNI firefighters. The methods used followed the realization of atmospheric correction of image for generation of NDVI, land cover mapping, acquisition of samples of geocology variables with characteristics of fire susceptibility in order to extract attributes for data mining, preparation of susceptibility index (ISOI), and the susceptibility classification through different techniques that GEOBIA presented with the best result. The susceptibility mapping to wildfires took the year of 2009 as a base using the ROI in 2008 and 2009 for model calibration of knowledge by extracting the attributes of the variables used geoecology and the ROI of the period between 2010 to 2012 were compared the model having a correlation value for identifying validation areas set to high, medium and low susceptibility to 59.9%, 38.1% and 1.6% respectively, indicating the effectiveness of the methodology that can be replicated to other Conservation Units.

Keywords: Wildfires, Geoecology Cartography, GEOBIA, Data Mining.

SUMÁRIO

Lista de figuras	xii
Lista de tabelas	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos	4
1.1.1. Objetivo geral	4
1.1.2. Objetivos específicos	4
1.2. Estrutura da tese.....	4
2. REVISÃO TEÓRICA.....	7
2.1. Base conceitual	7
2.1.1. Geoecologia	7
2.1.2. O conceito de paisagem	9
2.1.3. Risco e os estudos ambientais	11
2.2. Base operacional	16
2.2.1. Geoprocessamento e estudos geoecológicos	16
2.2.2. Sistemas de interpretação de imagens baseados em conhecimento	18
2.2.2.1. Análise de imagens baseada em objetos geográficos (GEOBIA)	20
2.2.2.2. Sistemas baseados em conhecimento	22
2.2.2.3. Software InterIMAGE	24
2.2.3. Mineração de dados.....	27
2.2.3.1. Descoberta de conhecimento e mineração de dados	28
3. O PARQUE NACIONAL DO ITATIAIA E A PROBLEMÁTICA DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS	32
3.1. Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI)	36
4. ANÁLISE COMPARATIVA DAS VARIÁVEIS GEOECOLÓGICAS E OS INCÊNDIOS NO PNI	42
4.1. Forma da encosta	43
4.2. Exposição à radiação solar	47
4.3. Declividade	53
4.4. Comparação e avaliação das variáveis	59
5. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE IMAGENS COM O MODELO 6S	61
5.1. Modelo 6S	62
5.2. Índices espectrais de vegetação	64

5.3. Metodologia	65
5.4. Resultados e discussões	67
6. Mapeamento de cobertura da terra	70
6.1. Materiais e Métodos	70
6.2. Resultados e Discussão	78
7. MINERAÇÃO DE DADOS PARA OBSERVAÇÃO DE ÁREAS DE ALTO E BAIXO SOI	82
7.1. Materiais e métodos	83
7.1.1. Dados de entrada	83
7.1.2. Métodos	84
7.1.2.1. Entrada de dados no software WEKA	88
7.1.2.2. Classificação das variáveis de Susceptibilidade	91
7.1.2.3. Elaboração do Índice de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios (ISOI)	99
7.3. Classificação da Susceptibilidade com base no ISOI	104
8. APLICAÇÃO DA GEOBIA PARA CLASSIFICAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS	108
8.1. Metodologia para a área teste	109
8.2. Metodologia para toda a área de estudo	120
8.3. Análise dos resultados	125
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	128
BIBLIOGRAFIA	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Inter-relacionamento das tecnologias envolvidas no geoprocessamento	18
Figura 2	Componentes do processo de interpretação no InterIMAGE	27
Figura 3	Etapas de mineração de dados	30
Figura 4	Tarefas e técnicas na mineração de dados	31
Figura 5	Delimitação da área de estudo	33
Figura 6	Pico das Agulhas Negras	35
Figura 7	Turma do curso de brigadistas e materiais utilizados durante o treinamento, março de 2012	37
Figura 8	Brigadistas do PNI (com uniforme amarelo) realizando a verificação de área queimada através do auxílio do GPS Navegador, setembro de 2011	38
Figura 9	Localização dos ROIs (Período 2008 a 2012)	39
Figura 10	Classificação de áreas através da curvatura horizontal	44
Figura 11	Mapa de forma de encosta	45
Figura 12	Gráfico comparativo do percentual de área de cada forma de relevo na Área de Estudo, nos polígonos de incêndios analisados e nas três maiores ocorrências	47
Figura 13	Componentes da radiação solar	48
Figura 14	Histograma de classificação de quebra-natural de valores	50
Figura 15	Distribuição da variável de exposição à radiação solar	51
Figura 16	Mapa de Exposição à Radiação Solar anual	52
Figura 17	Mapa de declividade do PNI	54
Figura 18	Mapa de declividade do PNI dividido em duas classes	57
Figura 19	Gráfico comparativo do percentual de área das classes de declividade em relação a área de estudo, áreas queimadas e três maiores ocorrências	58
Figura 20	Fluxograma metodológico da correção atmosférica.....	66
Figura 21	Reflectância bidirecional da vegetação dos alvos de floresta, água e solo exposto	67
Figura 22	Comparação das imagens corrigida e não corrigida com base no NDVI	

	para identificação de áreas de floresta. Composição colorida das imagens: R (Infravermelho), G (vermelho) e B (verde)	68
Figura 23	Carta Imagem da área do PNI com 5 km de ampliação dos limites	71
Figura 24	Rede semântica elaborada para o estudo	72
Figura 25	Mapa de cobertura da terra – resultado da classificação	79
Figura 26	Fluxograma metodológico da mineração de dados	83
Figura 27	Área de ROI utilizada para extração de dados de alta susceptibilidade.	85
Figura 28	Resultado de amostras construídas pelo InterIMAGE para exportação de atributos para o WEKA	86
Figura 29	Exemplo de árvore de decisão simples visualizada no WEKA	88
Figura 30	Resultado da classificação da Combustibilidade por meio do NDVI	93
Figura 31	Resultado da classificação da exposição à radiação solar	94
Figura 32	Resultado da classificação da variável geocológica de forma das encostas – segmentação com MDE	96
Figura 33	Resultado da classificação da variável geocológica de declividade	98
Figura 34	Resultado da estatística das 157 amostras utilizadas	102
Figura 35	Mapa de susceptibilidade a ocorrência de incêndios pelo método de combinação de variáveis e inserção do ISOI – ano base de 2009.....	105
Figura 36	Fluxograma metodológico da SOI para a área teste	110
Figura 37	Mapa de localização da área teste	111
Figura 38	Rede semântica do projeto de classificação da área teste	112
Figura 39	Exemplo de árvore de decisão para classificação de SOI baixo inserida no InterIMAGE	114
Figura 40	Diferenças entre segmentações pela escala Baatz	115
Figura 41	Susceptibilidade a ocorrência de incêndios com escala Baatz 5	116
Figura 42	Susceptibilidade a ocorrência de incêndios com escala Baatz 10	117
Figura 43	Susceptibilidade a ocorrência de incêndios com escala Baatz 20	118
Figura 44	Fluxograma metodológico da SOI aplicado para a área de estudo	121
Figura 45	Rede semântica dos projetos 1 (A) e 2 (B)	122
Figura 46	Exemplo da árvore de decisão da combinação das variáveis para a classe de médio SOI Projeto 1 (A) e Projeto 2 (B)	122
Figura 47	Mapa de susceptibilidade à ocorrência de incêndios do projeto 1	123
Figura 48	Mapa de susceptibilidade à ocorrência de incêndios do projeto 2	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Conceitos relacionados aos cenários de avaliação	16
Tabela 2	Características de objetos em imagens de alta resolução espacial .	21
Tabela 3	Lista de operadores do InterIMAGE	26
Tabela 4	Quantidade de ROIs durante o período de 2008 a 2012	38
Tabela 5	Classificação dos registros históricos de incêndios segundo a estimativa de área atingida	46
Tabela 6	Distribuição das ocorrências de incêndios analisadas em função da curvatura horizontal	46
Tabela 7	Classes de declividade relacionadas ao risco de ocorrência de incêndios	55
Tabela 8	Distribuição do número de ROIs conforme a declividade média, segundo as classes de tamanho estabelecidas	56
Tabela 9	Quantidade de ROI por variável condicionada pela geomorfologia .	59
Tabela 10	Parâmetros de correção atmosférica aplicados no modelo 6S para a imagem AVNIR-2	63
Tabela 11	Características do sensor AVNIR-2/ALOS	65
Tabela 12	Chave de classificação utilizada	73
Tabela 13	Operadores e atributos utilizados para a classificação	77
Tabela 14	Matriz de confusão	80
Tabela 15	Lista dos atributos extraídos com auxílio do InterIMAGE	87
Tabela 16	Resultados comparativos entre os resultados das variáveis no WEKA	90
Tabela 17	Árvores de decisão extraídas do WEKA para cada variável de susceptibilidade	91
Tabela 18	Construção dos pesos para geração do ISOI	100
Tabela 19	Combinação das variáveis para geração dos valores de ISOI	101
Tabela 20	Classes de susceptibilidade	102
Tabela 21	Combinação das variáveis para geração das classes de ISOI	103
Tabela 22	Resultados de validação dos registros de ROI (2010 a 2012)	106
Tabela 23	Combinação das variáveis para geração dos valores de baixo e médio SOI	113

Tabela 24	Árvores de decisão extraídas do WEKA para as variáveis de Combustibilidade e Exposição à Radiação solar	113
Tabela 25	Resultados da sobreposição dos ROIs em diferentes parâmetros de segmentação com o operador Baatz e método de combinação de variáveis para classificação da SOI para a área teste do PNI	119
Tabela 26	Total de áreas por classe de SOI por método aplicado	125
Tabela 27	Validação da SOI por método aplicado e os ROI 2010-2012	126

1. INTRODUÇÃO

Os incêndios florestais são vistos como um dos principais desafios dos gestores das diversas Unidades de Conservação (UC) existentes no Brasil. Essa problemática é decorrente de inúmeras práticas em que o homem é o principal agente deflagrador devido a diversos interesses que vão desde a necessidade de ocupar a terra até as práticas criminosas. Além disso, existem variáveis ambientais que propiciam o espalhamento do fogo e que merecem ser observadas tendo em vista o melhor combate por equipes especializadas.

As UCs necessitam de planejamento para o combate aos incêndios florestais dentro dos seus limites e para isso é importante a elaboração de mapeamentos que indiquem o comportamento deste fenômeno propiciando a obtenção de recursos e melhores respostas de ação para os gestores. Essa necessidade vai além dos limites da UC porque é necessário também o controle de queimadas nas proximidades o que é observado por meio de uma zona de amortecimento que aumente a proteção das áreas protegidas.

Os mapeamentos em questão são elaborados por meio de modelos de análise que indicam a representação da paisagem em relação aos incêndios florestais e que tornam possível o planejamento dos gestores das UCs. Para a construção desses modelos de análise é necessária a observação dos conceitos e técnicas baseadas no entendimento do fenômeno.

A base conceitual é verificada através da geoecologia que faz a observação da paisagem através de suas partes que são construídas com base no fenômeno em estudo que neste caso são os incêndios. A análise geoecológica só é possível diante dos olhares da Geografia e da Ecologia que lançam mão das geotecnologias que possibilitam a junção das variáveis geoecológicas. Exemplos do uso da Geoecologia auxiliada por Geotecnologias podem ser vistos em FERNANDES (2009), MATEO RODRIGUEZ *et al.* (2007), COELHO NETTO *et al.* (2007), BRIDGEWATER (1993) e NAVEH & LIEBERMAN (1993).

Entretanto, a partir do processo de elaboração de modelos conceituais representativos da realidade, inerente à utilização das geotecnologias, alguns questionamentos surgem e necessitam de investigações científicas para serem solucionados. Esses questionamentos são basicamente reflexos da construção de representações computacionais da realidade, ou seja, modelos conceituais

que buscam retratar a paisagem a ser estudada. Assim, a construção de um modelo é diretamente ligada à qualidade de representação dos elementos estruturados na paisagem, o que certamente influencia nas suas análises de funcionalidade e dinâmica (FERNANDES, 2009).

Dentre as geotecnologias utilizadas para este trabalho se destacam o geoprocessamento, a análise de imagens baseada em objetos geográficos (*Geographic Object-Based Image Analysis – GEOBIA*), a mineração de dados e a modelagem do conhecimento. Esse conjunto de técnicas torna possível a construção do modelo de análise geoecológica através do conhecimento da susceptibilidade à ocorrência de incêndios.

Para a construção do modelo de conhecimento foi necessária a utilização de softwares que tornaram possível a elaboração da metodologia para outras UCs que desejam a implantação das técnicas desenvolvidas neste trabalho. Os *softwares* InterIMAGE (COSTA *et al.*, 2008), WEKA (WITTEN & FRANK, 2005) e o modelo 6S (VERMOTE *et al.*, 1997) foram adotados com o propósito da utilização de sistemas livres, capazes de disseminar as experiências realizadas.

O trabalho contou com a realização de técnicas de correção atmosférica de imagens orbitais realizadas no modelo 6S, que tornaram possível a aplicação do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) utilizado na identificação da variável geoecológica de combustibilidade da biomassa. Além disso, o NDVI fez parte dos parâmetros de construção da classificação de cobertura da terra realizada através do InterIMAGE que indicou as áreas não susceptíveis aos incêndios florestais.

A utilização do *software* neo-zelandês WEKA trouxe o conhecimento de áreas teste para a construção do mapeamento da susceptibilidade que foi elaborada através de árvores de decisão advindas da mineração de dados decorrente das variáveis geoecológicas de Combustibilidade, Exposição à Radiação Solar, Declividade e Forma das Encostas. Os relatórios da mineração de dados e a classificação das variáveis geoecológicas por meio das árvores de decisão inseridas no InterIMAGE fomentaram a obtenção do Índice de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios (ISOI).

A verificação do comportamento das variáveis geoecológicas que resultaram na elaboração do ISOI possibilitou a geração do mapeamento da

susceptibilidade à ocorrência de incêndios através da modelagem do conhecimento que foi realizada no *software* InterIMAGE. Além disso, foi possível a comparação de diferentes técnicas de classificação por meio de álgebra de mapas (pixel a pixel) e de diferentes escalas de segmentação para auxílio na classificação através de GEOBIA.

O trabalho foi aplicado no Parque Nacional do Itatiaia (PNI) que faz parte do Mosaico de Unidades de Conservação da Mantiqueira que é localizado em bioma Mata Atlântica e, apresenta os incêndios florestais como a sua principal problemática. A administração do PNI deu total apoio à realização deste trabalho através da cessão de dados de campo com destaque para as áreas queimadas identificadas pelos Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI) identificados no período entre 2008 a 2012, imagens do sensor AVNIR-2/ALOS (2009) e base cartográfica em escala 1:50.000.

As inovações do estudo estão na utilização das áreas queimadas para amostragem de calibração do modelo de conhecimento com os dados de 2008 a 2009 por meio da mineração de dados e GEOBIA e, a validação da classificação da susceptibilidade à ocorrência de incêndios verificada através dos anos de 2010 a 2012. A técnica de GEOBIA é utilizada por meio de dados múltiplos da paisagem em *softwares* comerciais como eCognition que é o mais desenvolvido e utilizado no mercado atualmente. No caso deste estudo foi adotado o *software* livre e de código aberto InterIMAGE desenvolvido pelo Laboratório de Visão Computacional (LVC) da Pontifícia Universidade Católica (PUC-Rio) em conjunto com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

O caráter inovador do estudo está também na utilização da técnica de GEOBIA em imagens orbitais de média resolução espacial através de ferramentas de uso livre propiciando dessa maneira a disseminação desses estudos para o Parque Nacional do Itatiaia dentre outras Unidades de Conservação brasileiras.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral:

Contribuir metodologicamente para a modelagem do conhecimento aplicada à análise da susceptibilidade à ocorrência de incêndios em áreas de Unidades de Conservação tendo como suporte conceitual a geoecologia auxiliada por técnicas de mineração de dados e GEOBIA.

1.1.2. Objetivos específicos:

- Elaborar um índice de vegetação para avaliação da combustibilidade como uma das variáveis da susceptibilidade;
- Propor a elaboração de um mapa de cobertura da terra do Parque Nacional do Itatiaia (1:50.000) através de GEOBIA;
- Avaliar atributos das variáveis geoecológicas utilizadas (combustibilidade, exposição à radiação solar, declividade e forma das encostas) para elaborar um Índice de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios (ISOI);
- Definir um modelo de rotina de obtenção da susceptibilidade à ocorrência de incêndios florestais por meio da definição de melhores parâmetros de segmentação das variáveis geoecológicas;

1.2. Estrutura da tese

A tese está dividida em capítulos que descrevem as etapas realizadas para a modelagem do conhecimento aplicada ao estudo da susceptibilidade à ocorrência de incêndios.

O Capítulo 2 se inicia com a descrição dos principais conceitos utilizados através da revisão teórica que apresenta os conceitos da Geoecologia relacionados ao estudo dos incêndios florestais em direção à leitura do risco aplicado aos estudos ambientais. O capítulo se conclui na base operacional que aponta as geotecnologias utilizadas no trabalho que são o Geoprocessamento, a GEOBIA, a mineração de dados e a modelagem do conhecimento que foi realizada no *software* InterIMAGE.

O terceiro capítulo mostra a área de estudo que é o Parque Nacional do Itatiaia que sofre anualmente com a problemática dos incêndios florestais que é registrada através das características apresentadas nos Relatórios de Ocorrências de Incêndios (ROI). O histórico dos incêndios florestais é utilizado

para a geração do conhecimento da susceptibilidade verificada pela delimitação de áreas queimadas identificadas pelos ROIs. Esse histórico de incêndios observados espacialmente por TOMZHINSKI (2012) possibilitou a sobreposição com as variáveis geoecológicas de cunho geomorfológico que são a forma de encosta, a exposição à radiação solar e a declividade, que foram definidas como indicadores de susceptibilidade à ocorrência de incêndios (Capítulo 4).

A utilização de imagem do sensor AVNIR-2/ALOS trouxe a necessidade de realização da correção atmosférica que foi utilizada para a construção da medição da quantidade de biomassa existente na área do PNI através da aplicação do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI). Essa abordagem é relatada no Capítulo 5 que mostra os passos para a correção atmosférica por meio do modelo 6S que possibilitou o uso do NDVI para a caracterização da variável geoecológica da combustibilidade.

Além do NDVI, a imagem AVNIR-2/ALOS, com correção atmosférica, foi utilizada em conjunto com dados altimétricos de Modelo Digital de Elevação (MDE) para a elaboração do mapeamento da cobertura da terra do PNI, descrita no Capítulo 6, com objetivo de identificar as Áreas Não Susceptíveis à Ocorrência de Incêndios (ANSOI). A metodologia foi aplicada no *software* InterIMAGE e possibilitou a inserção dos dados com base em idas a campo além de consultas bibliográficas para a determinação das classes.

O Capítulo 7 faz leitura da técnica de mineração de dados que foi baseada na utilização de amostras de áreas queimadas e áreas que possuem características de baixa susceptibilidade a incêndios. A metodologia foi realizada no *software* WEKA que resultou na geração de árvores de decisão e relatórios detalhados sobre as 4 variáveis geoecológicas de susceptibilidade (combustibilidade, exposição à radiação solar, declividade e forma de encosta) que contemplaram a criação do Índice de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios (ISOI).

O oitavo capítulo trata do uso da GEOBIA e realizou a comparação dessa técnica com a álgebra de mapas realizada através da sobreposição das variáveis geoecológicas visando o mapeamento da susceptibilidade à ocorrência de incêndios. Os resultados indicaram através de área teste e de

áreas queimadas a eficácia da GEOBIA como melhor representação da susceptibilidade à ocorrência de incêndios utilizando dados de validadores de áreas queimadas posteriores ao ano de 2009.

O texto da tese se conclui com as considerações finais sobre os resultados dos capítulos anteriores e indicando também sugestões para trabalhos futuros sobre a temática da GEOBIA aplicada aos estudos da susceptibilidade à ocorrência de incêndios.

2. REVISÃO TEÓRICA

O trabalho sobre a construção da modelagem do conhecimento aplicada ao estudo da susceptibilidade à ocorrência de incêndios é realizado por meio do conhecimento de conceitos e técnicas que facilitem a identificação do fenômeno. Para isso, a revisão teórica é dividida em base conceitual e base operacional que visam realizar o entendimento para elaboração da metodologia proposta.

2.1. Base conceitual

2.1.1. Geoecologia

A Geoecologia, segundo a escola alemã, ou Ecologia da Paisagem, de acordo com a escola americana, é uma disciplina que realiza a interface entre a geografia e a ecologia, através de uma estrutura multi e inter-disciplinar.

A Geoecologia foi trabalhada pela primeira vez pelo geógrafo alemão Carl Troll (1939) que buscando colaboração estreita entre geógrafos e ecólogos a definiu como a união entre a Geografia e a Ecologia. TURNER (1989) entende que na análise geoecológica da paisagem é fundamental entender a estrutura, funcionalidade e dinâmica das variáveis bióticas, abióticas e humanas.

Os termos ecologia da paisagem e geoecologia serão vistos nesse trabalho como sinônimos, abordando tanto as ciências biológicas como as relações ambientais. Dessa forma a pesquisa geoecológica procura estabelecer os relacionamentos qualitativos e quantitativos, entre os elementos da biosfera e litosfera.

Na década de 1980, inicia-se um resgate dos conceitos estabelecidos por TROLL (1939), operacionalizando a leitura da paisagem em termos biológicos e em termos de biodiversidade, estabelecendo-se uma predileção para o referenciamento da Geoecologia como Ecologia da Paisagem. Por sua vez, a abordagem geográfica estabelecida passa a privilegiar o termo Geoecologia, buscando novos indicadores, diversificados da fauna e flora, o homem, para a verificação da condição da biodiversidade, buscando desenvolver os estudos ambientais de caráter integrativos pautados no entendimento do relacionamento da sociedade com a natureza.

McGARIGAL & MARKS (1994) observam que a geoecologia estuda os padrões da paisagem, as interações entre as suas unidades dentro de um mosaico de paisagens, e como esses padrões e interações mudam durante o tempo. Desta forma, esta disciplina analisa a interação entre os padrões espaciais e os processos ecológicos, ou seja, as diferenciações existentes na superfície geográfica (REIS, 2008).

METZGER (2001) completa afirmando que a Geoecologia tem como ponto central a existência de uma dependência espacial entre as unidades de paisagem: o funcionamento de uma unidade depende das interações que ela mantém com as unidades vizinhas. A Geoecologia busca realizar a compreensão no estabelecimento de uma teoria de mosaicos que entenda como os diferentes padrões de organização espacial e dos seus constituintes influem sobre o seu funcionamento.

A análise dos conceitos apontados por geógrafos e biólogos permite estabelecer que os seus elementos comuns são as relações e inter-relacionamentos existentes em/ou entre domínios de paisagens, suas qualificações e quantificações, incluindo as causas e efeitos das ações antrópicas, dentro de um espaço geográfico limitado e em ciclos ecológicos e temporais determinados (MENEZES, 2000).

A extensão da geoecologia às ações antrópicas, interações e relacionamentos sociais, cria uma grande complexidade no que se refere as interações com o meio físico e biológico, pelas próprias características comportamentais destes fenômenos, de modelagem difícil, face aos demais, associadas a elementos por vezes imprevisíveis na sua atuação sobre o ambiente.

Diante das necessidades impostas aos estudos geoecológicos fomentou-se o avanço tecnológico voltado para o trabalho com grande número de variáveis que levam ao reconhecimento da necessidade das tecnologias de geoprocessamento para o suporte à criação, manipulação e consulta de dados espaciais. Através dessa abordagem, vários autores como, STOW (1993), FORMAN (1995), BURROUGH & MCDONNELL (1998), ASPINALL (1999), CRUZ (2000), MENEZES (2000), dentre outros, apontam o uso de tecnologias de geoprocessamento, principalmente os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), como ferramenta indispensável para análises integrativas.

BONHAM-CARTER (1996) nos confirma essa tendência apontando que o geoprocessamento é visto como um ramo do conhecimento intensamente aplicável às investigações ambientais.

Um dos produtos da análise geoecológica é a Cartografia Geoecológica, que segundo MENEZES (2000) é a *“representação de dados ou informações oriundas de processos analíticos, mostrando através dos inter-relacionamentos entre os elementos da paisagem, as consequências imediatas ou futuras sobre o meio ambiente definido pelo recorte espacial da paisagem estudada”*. Dessa maneira, SOUSA *et al.* (2010) completam que esta realiza o mapeamento de fenômenos e elementos da paisagem provenientes de uma grande quantidade de informações para a geração dos mapas geoecológicos e posteriormente das análises propriamente ditas sendo fundamental para essas análises.

2.1.2. O conceito de paisagem

A paisagem é apontada por uma grande diversidade de conceitos dentro da Geografia e de outras ciências afins. O conceito de paisagem observado na Geografia seguiu dois caminhos através de uma vertente biofísica baseada nas escolas alemã e russo soviética (HUMBOLDT e DOKUCHAEV) que concebem a paisagem como um complexo natural integral. Já a outra vertente é voltada para o predomínio sociocultural que verifica a paisagem como um espaço social proveniente das escolas francesa, anglo saxônica e europeia-ocidental (MATEO RODRIGUEZ *et al.*, 2007). Em ambos os casos, a paisagem é observada pelos geógrafos através da análise do todo, de maneira espacial.

Como relatam FORMAN & GODRON (1986) que observam a paisagem como uma área heterogênea, composta por grupos de ecossistemas que interagem de forma semelhante no seu todo. Assim, os autores verificam essa heterogeneidade como uma composição de conjuntos (cluster) de ecossistemas que interagem repetitivamente de forma similar.

Dentro da ecologia, a paisagem também é observada como uma área heterogênea, mas definida como um mosaico ambiental (TURNER & GARDNER, 1991). VINK (1983) a concebe como uma esfera, dentro da qual as demais esferas interagem, apontando o conceito de geocosfera (ou esfera da paisagem) que caracteriza a dinâmica de interação de sistemas ecosféricos. Dessa forma, HUGGETT (1995) vê a paisagem como um sistema

geoecológico, definido como qualquer unidade de paisagem, na qual a ecosfera, juntamente com os processos biofísicos formadores, podem ser vistos como um todo unitário.

FORMAN & GODRON (1986) apontam que a geoecologia é a *“ciência que estuda a estrutura, funções e alterações em uma área heterogênea, composta por ecossistemas que interagem entre si”* apontando estas características como principais fatores da paisagem e vêem ainda que, o desenvolvimento da paisagem é resultado de três aspectos operacionais dentro de seus limites:

- processos geomorfológicos específicos em um longo período de tempo;
- padrões da organização de organismos;
- perturbações locais de unidades de ecossistemas, em um período curto de tempo.

Estes autores apresentam dessa forma que a paisagem pode ser medida e definida segundo suas características de repetitividade de conjuntos de ecossistemas e suas interações, a geomorfologia e elementos perturbadores.

A geoecologia aborda a paisagem através de três elementos característicos que são (FORMAN & GODRON, 1986):

- Estrutura: definida pelas relações espaciais entre os ecossistemas diversos presentes na paisagem. Corresponde à distribuição de energia, composição e espécies, em relação ao seu tamanho, forma, quantificações de seus componentes e configurações dos ecossistemas.

- Função: estabelece as interações entre os elementos espaciais. Isto é caracterizado pelos fluxos de energia, componentes e espécies entre os ecossistemas componentes da paisagem.

- Alterações: definidas pelas mudanças sofridas na estrutura e funções da paisagem, abordadas pelo aspecto ecológico, em uma escala de tempo pré-determinado.

Ainda segundo esses autores, as paisagens têm uma estrutura comum e fundamental composta pelos componentes: fragmento - superfície não linear, inserida na matriz e que difere em aparência do seu entorno, variando em tamanho, tipo de heterogeneidade e limites; matriz - elemento com maior

conectividade e que apresenta maior extensão na paisagem; e corredor - estruturas lineares que diferem das unidades vizinhas. É, portanto, essencial o conhecimento dos elementos de uma paisagem para a caracterização de sua estrutura e identificação de seus padrões (REIS, 2008).

COELHO NETTO (2000), vê a paisagem como um conjunto de objetos ou elementos geobiofísicos e sócio-culturais que compõem os sistemas ambientais, materializando o espaço-ambiente tri-dimensional ao nível da superfície terrestre, a estruturação desses elementos governa as relações funcionais que regulam as mudanças ambientais no decorrer do tempo e, por conseguinte, da paisagem.

MENEZES (2000) observa que juntando conceitos de FORMAN & GODRON (1986) ao de COELHO NETTO (2000), no entorno do domínio perceptivo e ao de NAVEH & LIEBERMAN (1993), no domínio dos relacionamentos estabelece a paisagem como *“uma área heterogênea, ilimitada, composta de grupos de ecossistemas que interagem e relacionam-se entre si, juntamente com as ações antrópicas, dentro da capacidade e dimensão da percepção humana”*.

2.1.3. Risco e os estudos ambientais

O risco dentro da sociedade encontra-se em toda a parte, ele torna-se “invisível” quando se percebe uma sensação de segurança que, com o avanço da ciência e das técnicas tem se sofisticado cada vez mais. O risco possui diversas dimensões e características que estão sendo analisadas por cientistas há décadas.

A conceituação de risco dentro da Geografia é abordada por autores como CASTRO *et al.* (2005), que verifica nas Geociências o risco nos processos de estudos catastróficos e rápidos. Enquanto VEYRET (2007) aponta o risco como participante do quadro das relações natureza/sociedade que fundam a abordagem ambiental e fazem parte da temática geográfica.

A Defesa Civil Nacional (CASTRO, 1998), em seu glossário que aborda os *“Estudos de riscos e medicina de desastres”*, define o *risco* na forma do produto principal de análise (mapa de risco) em que define como *“um mapa topográfico, de escala variável, no qual se grava sinalização sobre riscos específicos, definindo níveis de probabilidade de ocorrência e de intensidade*

de danos previstos”. Concluindo, os autores alertam para a *prevenção de riscos* verificando que estas ações visam minimizar os riscos de desastres, buscando aumentar as margens de segurança e reduzir as probabilidades de ocorrência de acidentes ou minimizar os danos causados pelos mesmos.

O conceito de risco ambiental foi abordado por Talbot Page (1978) através da relação entre a incerteza e o desconhecimento das verdadeiras dimensões do problema ambiental (EGLER, 1996). Em uma visão mais ampla, VEYRET (2007) aponta o risco como a tradução de uma ameaça, de um perigo para aquele que está sujeito a ele e o percebe como tal.

Os riscos ambientais, para FREIRE (2006), constituem uma nova preocupação que está presente nas decisões dos gestores públicos e privados e nos programas de imagem institucional das empresas e do setor público que, para competir em um mercado aberto e globalizado, precisarão se adequar às normas ambientais que tratam da gestão da qualidade ambiental. Uma crise que é, na verdade, ecológica (esgotamento progressivo da base de recursos naturais) e ambiental (redução da capacidade de recuperação dos ecossistemas).

Diante dessa crise, as análises de risco têm o desafio de trabalhar na predição de eventos e na prevenção destes para com a sociedade e os gestores que desejam decisões acertadas e em curto prazo. *“A avaliação de risco se baseia na relação entre confiabilidade e criticidade de sistemas complexos, onde o comportamento dinâmico de inúmeras variáveis deve ser capturado em um seletivo conjunto de indicadores capaz de monitorar as interações que se processam na realidade em distintos períodos de tempo, isto é – a curto, médio e longo prazo”* (EGLER, 1996).

VEYRET (2007) apresenta dentro da análise de risco a existência das zonas de risco que *“são definidas por formas e superfícies variáveis, mapeáveis em diferentes escalas espaciais e temporais”*. As interações existentes dentro e fora dessas “zonas de risco” entre as diversas variáveis ambientais existentes e outros fatores são fonte de grande complexidade para a análise de risco.

A modelagem da análise de risco é uma simplificação da realidade, ou seja, o fenômeno é abstraído à medida que as informações complexas são construídas concluindo o processo em representação do risco. Essa

simplificação viabiliza a funcionalidade do modelo nas respostas do fenômeno observado. *“Na abordagem do risco, por mais complexos que sejam os modelos de análise, são sempre reduções do real, e alguns aspectos do fenômeno estudado são desconsiderados”* (GONDIM, 2007).

Para a realização dessa avaliação de risco são necessários os conhecimentos do perigo presente no processo e da vulnerabilidade da população. Isso nos remete à disponibilidade de informação referente à população afetada e instalações físicas expostas ao risco, além da localização, distribuição espacial, variáveis ambientais e outros fatores.

Outra abordagem para a compreensão do risco e seus desdobramentos está na definição de vulnerabilidade, embora, segundo GONDIM (2007), não haja ainda sobre ela consenso, no que tange aos enfoques voltados para os indivíduos e para o ambiente, quando relacionados aos riscos biológicos, físicos, químicos, tecnológicos e sociais. Para O’RIORDAN (2002) a vulnerabilidade a desastres naturais pode ser descrita como a incapacidade de uma pessoa, sociedade ou grupo populacional, de evitar o perigo relacionado a catástrofes naturais ou a situação de ser forçado a viver em tais condições de perigo. Tal situação decorre de uma combinação de processos econômicos, sociais, ambientais e políticos.

A temática da vulnerabilidade é definida em diversos desdobramentos que atingem basicamente de acordo com a proposta que a pesquisa deseja atingir. Os aspectos abordados dentro da vulnerabilidade são em sua maior parte aspectos voltados às atividades do homem e aos consequentes efeitos dessas atividades numa visão preditiva que busca apontar ações que evitem que os riscos se concretizem. O risco pode ser visto como resultado de alguma probabilidade de ocorrência de eventos particulares e de previsão de perda devendo ser avaliado de acordo com as tendências históricas. Os detalhes da vulnerabilidade devem ser incorporados na avaliação do risco (FREIRE, 2006).

A vulnerabilidade é vista por GONDIM (2007) como uma noção relativa, dado que está sempre referida ou associada à exposição aos riscos produzidos socialmente e denota a maior ou menor susceptibilidade de pessoas, lugares, infra-estruturas ou ecossistemas virem a sofrer algum tipo particular de dano ou agravo.

Dentre estudos físicos existem abordagens que envolvem riscos relacionados a cheias apresentados nos estudos de SOUZA (2003) que envolve a geração de cartas de vulnerabilidade no âmbito da cidade envolvendo metodologia que sobrepõe mapas de aspectos físicos com o uso do solo possibilitando a identificação de conflitos de uso do solo e degradação ambiental.

Diversos estudos geomorfológicos apresentam temáticas expressas pela vulnerabilidade, susceptibilidade ou fragilidade dos sistemas relacionados aos eventos em questão, em geral de origem antrópica que são os potencializadores dos riscos.

Os incêndios florestais, assim como os deslizamentos e as inundações são vistos como os fenômenos naturais que mais causam danos ao homem e que podem propiciar diversos prejuízos relacionados principalmente a perda de vidas humanas além de diversas espécies endêmicas. Devido a essa problemática, é importante o estudo do risco relacionado aos incêndios florestais que podem ser realizados por diferentes metodologias (RIVERA-LOMBARDI, 2001) além de serem tratados em escala local até continental, como foi observado para a América do Sul por SISMANOGLU & SETZER (2005) por meio de sensores remotos.

Nos Estados Unidos, o estudo de constantes incêndios é visto como um grande desafio para as autoridades da Cidade de San Diego/Califórnia, por exemplo, em que os moradores realizam a prevenção em conjunto com os bombeiros auxiliando na construção de verdadeiras zonas de segurança próximas às áreas de vegetação que oferecem perigo (NEUBERT *et al.*, 2008). Por esse motivo, os autores realizaram um mapeamento do material combustível existente nessa região através do uso de índices de vegetação e diferentes técnicas de classificação (pixel a pixel, regiões e conhecimento) em que os resultados apontaram 5 classes de risco que tiveram a cooperação do Corpo de Bombeiros.

Na região do Colorado, o estudo de PLATT & SCHOENNAGEL (2008) identificou características existentes na paisagem que são propícias à geração de incêndios florestais por meio da classificação orientada a objetos. As características observadas foram de altitude, forma das encostas, declividade e o tipo de vegetação dominante observado através de registros históricos. Neste

caso, a espécie conhecida como *Ponderosa pinus*, que se trata de um pequeno pinheiro altamente combustível, é observada neste estudo para a contabilização do risco de incêndios na região.

A Península Ibérica também sofre com constantes incêndios de grande magnitude registrados durante o período de verão que ocorrem devido aos fatores climáticos mediterrâneos além de mudanças antrópicas. ALONSO-BENITO *et al.* (2012) realizou na Ilha de Tenerife um mapeamento dos tipos de combustível existentes através da GEOBIA aplicada em imagens Worldview-2, que são de alta resolução espacial e que possuem faixas espectrais diferenciadas como amarelo e azul costeiro. Outro exemplo é realizado por FERNANDEZ-MANSO *et al.* (2009), na região noroeste da Espanha através da metodologia para avaliação dos níveis de severidade que afetam os grandes incêndios florestais na área. Os níveis de severidade são delimitados pelas classes de alta, média e baixa utilizando imagens ETM/Landsat 5, de média resolução espacial, e a metodologia foi realizada através da combinação das técnicas de Análise de Mistura Espectral (*Spectral Mixture Analysis – SMA*) e GEOBIA atingindo excelentes resultados comparados com outras técnicas de classificação mais simples.

Neste estudo, a medição do risco é realizado através da metodologia de susceptibilidade à ocorrência de incêndios através de variáveis geoecológicas da própria paisagem. Os estudos de SILVA *et al.* (2009), SOUSA *et al.* (2010), FERNANDES *et al.* (2011) e TOMZHINSKI (2012) realizam essa metodologia que segue a abordagem de MENEZES (2000) sobre cenários de avaliação que são compostos pelos termos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Conceitos relacionados aos cenários de avaliação.

Termo	Conceito associado
Risco	Pressupõe o impacto de uma perturbação sobre a paisagem (COELHO NETTO, 2000)
Susceptibilidade	Sensibilidade da paisagem à degradação ou perda de capacidade produtiva – pressupõe o que pode ocorrer (MATEO & MAURO, 1994)
Fragilidade	Expressa uma combinação do nível de degradação de uma paisagem, através das ações antropogênicas, pela susceptibilidade à uma perturbação. (QUINTELLA, 1994)
Vulnerabilidade	Incapacidade de lidar com fatores naturais ou antrópicos, que causem degradação ao geocossistema (KRUIJF & SCHOUTEN, 1987)
Potencialidade	Define a aptidão para aproveitamento ou realização de determinadas atividades (SMITH & THEBERGE, 1986)

Fonte: MENEZES (2000).

Os cenários de avaliação são inter-relacionados e possuem trocas de elementos entre si como ocorre dentro dos estudos geoecológicos. Os conceitos de risco e susceptibilidade são os norteadores deste estudo e, diante disso o risco é definido como a percepção que a sociedade possui do perigo de uma ameaça possível para o sujeito, já a susceptibilidade é observada como a forma de medir o risco através de variáveis existentes na paisagem.

2.2. Base operacional

2.2.1. Geoprocessamento e estudos geoecológicos

A fim de elucidar a temática em questão, é necessária a compreensão conceitual de Geoprocessamento e de algumas tecnologias.

Na literatura especializada existem diversas definições sobre Geoprocessamento. Dentre estas se destacam CÂMARA E MEDEIROS (1998), que definem como *uma disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas*. XAVIER DA SILVA (2000) define como um conjunto de técnicas computacionais que opera sobre bases de dados georreferenciados, para transformá-los em informações relevantes, através de análises, sínteses e reformulações desses dados, tornando-os utilizáveis em um sistema de processamento automático. De uma maneira mais ampla, CRUZ (2000) avalia

que essas tecnologias objetivam a localização, delimitação, quantificação, equacionamento e monitoramento da evolução de fenômenos ambientais.

A utilização do Geoprocessamento em análises geoecológicas traz uma série de potencialidades e limitações que são reflexos da vasta complexidade dos dados geográficos (físicos e sócio-econômicos) e dos próprios questionamentos conceituais e metodológicos impostos aos estudos de caráter integrativo, como os geoecológicos.

A construção de um modelo da paisagem através da utilização do Geoprocessamento possibilita a construção de mapas provenientes de outros mapas agregados pela análise espacial, além de outras informações não gráficas que oferecem suporte ao produto final (BONHAM-CARTER, 1994; MEIRELLES, 1997). Neste contexto, MENEZES (2000) apresenta a Cartografia Geoecológica que realiza a interface entre os fenômenos e elementos da paisagem provenientes de diversas fontes possibilitando a geração dos mapas geoecológicos e análises propriamente ditas. Esse aspecto mostra a necessidade das ferramentas do geoprocessamento dentro da abordagem geoecológica e da funcionalidade da Cartografia Geoecológica durante esse processo.

LANG & BLASCHKE (2009) apresentam que os métodos de processamento de informações geográficas são adequados para apoiar as mais diferentes tarefas de planejamento, no que se refere à detecção da situação real e de uma flexível combinação de diferentes camadas de dados. Além disso, os autores mencionam que essa tecnologia trabalha em diferentes escalas e, em razão disso, consideram particularidades do espaço natural, não obstante, como relações paisagísticas amplas. A harmonização e integração desses conjuntos de dados é um dos desafios atuais também no planejamento da paisagem.

Das tecnologias que englobam o Geoprocessamento, ressaltam-se como as mais comuns a Modelagem Digital de Elevação (MDE) ou Modelagem Numérica de Terreno (MNT), o Sensoriamento Remoto, o Banco de Dados Geográficos (BDG) e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG). É importante ressaltar que essas técnicas são complementares e podem ser utilizadas isoladamente ou em conjunto como é verificado na Figura 1.

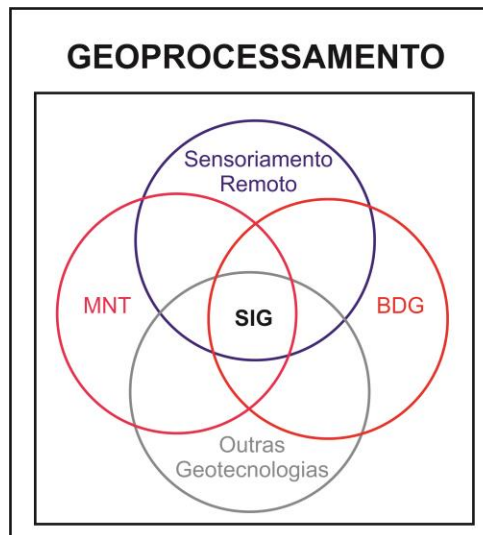


Figura 1. Inter-relacionamento das tecnologias envolvidas no geoprocessamento (MENEZES & FERNANDES, 2013).

O Sensoriamento Remoto apresentou diversos avanços que são apontados por BLASCHKE & KUX (2007) que vão desde o desenvolvimento de satélites com instrumentos sensores com resoluções espacial, espectral e temporal cada vez maiores e o desenvolvimento de *softwares* com novas concepções metodológicas de interpretação de imagens. Isso é importante quando se trata de propiciar a produção de mapas temáticos utilizando técnicas de modelagem do conhecimento relacionados ao controle do uso e cobertura da terra (CRUZ *et al.*, 2007; CINTRA *et al.*, 2010), expansões urbanas (PINHO, 2005; NOVACK, 2009; RIBEIRO, 2010), identificação de estágios sucessionais de vegetação (VICENS *et al.*, 2009; ROSÁRIO *et al.*, 2009) e estudos geomorfológicos (CAMARGO, 2008) de maneira que sejam proporcionadas respostas mais rápidas para tomadas de decisão em diversas esferas públicas.

2.2.2. Sistemas de interpretação de imagens baseados em conhecimento

Os sistemas baseados em conhecimento são definidos por FEITOSA *et al.* (2005) como aqueles que modelam em um ambiente computacional o conhecimento do foto-intérprete emulando a sua capacidade de combinar dados de diferentes fontes e formatos na análise de imagens de sensores remotos. Esses sistemas abrem a possibilidade de extração automática de informações de imagens de Sensoriamento Remoto que torna esse processo mais dinâmico para as inúmeras temáticas existentes nas ciências ambientais.

A abordagem baseada em conhecimento tem como objetivo a identificação de objetos que têm uma existência concreta no mundo real e que expressam características de cor, forma, textura, padrão e contexto na imagem analisada (PINHO, 2005).

A autora ainda enfatiza que o funcionamento desses sistemas baseia-se na introdução do conhecimento do analista a respeito da cena, ou seja, é uma formalização da “visão” de um determinado indivíduo sobre uma paisagem específica. Dessa maneira, o resultado da classificação ocorre de acordo com o conhecimento e capacidade de interpretação do analista que é proveniente de diversas áreas dentro da ciência ambiental e, por isso, pode atingir resultados diferenciados.

Isso é observado dentro da Geoecologia em que geógrafos e biólogos apresentam visões diferenciadas como foram abordadas no item 2.1.1. mostrando a complexidade existente no conceito de paisagem. Através disso, os sistemas baseados em conhecimento são de excelente utilização pelos diversos profissionais existentes na área ambiental, principalmente os que estudam a paisagem como unidade de análise através do Sensoriamento Remoto.

BOCK & LESSING (2002) abordam a existência de diversos sistemas baseados em conhecimento utilizados na interpretação de fotografias aéreas e em imagens orbitais de média resolução espacial: SPAM (McKCOWN *et al.*, 1985); SIGMA (MATSUYAMA & HYANG, 1990); MESSIE (CLÉMENTE *et al.*, 1993); ERNEST (NIEMANN *et al.*, 1990); AIDA (LIEDTKE, 1997) e o GEOAIDA (BÜCKNER *et al.*, 2001).

O principal sistema conhecido e utilizado no Brasil é o *eCognition*, que foi criado, prioritariamente, para atender à classificação de imagens de alta resolução espacial em abordagem orientada a objetos. Este software comercial apresenta ambiente para a classificação de imagens através da adoção de segmentação em diferentes níveis de escala, todos hierarquizados por meio da utilização de descritores variados, disponibilizados ou construídos. Além disso, o *software* tem a possibilidade da elaboração de uma modelagem que propicia uma maior participação do intérprete, através da definição dos melhores descritores e tipos de modelos. Os modelos utilizados podem ser de origem booleana e/ou *fuzzy* que também contam com a relação entre níveis,

garantindo a hereditariedade entre classes (ROSÁRIO *et al.*, 2009) e a versão atual contou com a incorporação de um módulo para mineração de dados.

Outro sistema que vem sendo disseminado no Brasil é o sistema InterIMAGE (COSTA *et al.*, 2008), que se trata de um software gratuito e de código aberto. O InterIMAGE é baseado no sistema GEOAIDA que foi desenvolvido pelo TNT – Instituto para Tecnologia da Informação da Universidade de Hannover, Alemanha e herdou a característica funcional básica atingindo posteriormente uma nova interface gráfica além de novas funções de representação de conhecimento e operadores de processamento de imagens. Este sistema será descrito em detalhes posteriormente.

2.2.2.1. Análise de imagens baseada em objetos geográficos (GEOBIA)

A classificação da cobertura da terra em Sensoriamento Remoto passou por inúmeras fases que ocorreram de acordo com os instrumentos utilizados e as classes que são identificadas pelos diversos sensores a bordo de plataformas orbitais e aéreas.

A classificação é realizada inicialmente por meio da interpretação de foto-intérpretes que realizam o processo de manualmente nas fotografias aéreas. Com a evolução das imagens de sensores remotos tornou-se possível acelerar a classificação através dos classificadores pixel a pixel que possuem bons resultados em escalas de baixa e média resolução. Após a implantação de novos sensores orbitais com alta resolução espacial tornou-se necessária a criação de novas técnicas de classificação devido a complexidade dos elementos representados nas imagens.

Esse desafio foi resolvido a partir da utilização de técnicas de classificação de imagens baseadas em regiões (PINHO, 2005; BLASCHKE & KUX, 2007; NOVACK, 2009). Neste tipo de classificação é realizado um processo de segmentação das imagens que agrupam os pixels adjacentes com atributos semelhantes formando os chamados segmentos ou objetos.

Esses segmentos possuem características que são identificadas pela cor, textura, tamanho, forma, padrão, localização e contexto que foram descritas por PINHO (2005) e são verificadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características de objetos em imagens de alta resolução espacial

Característica	Definição
Cor	Resultado da combinação da resposta dos alvos em uma determinada banda espectral e do tipo de composição colorida utilizada na imagem. Ex.: áreas com vegetação são representadas pela cor verde em composições de cor verdadeira, e na cor vermelha, em composições que utilizam o canal infravermelho.
Textura	Relaciona-se com a frequência de mudanças nos tons e cores de um objeto de imagem, variando de aspecto liso ao rugoso. Ex.: Possibilita a distinção de áreas de vegetação arbórea (textura rugosa) de áreas de vegetação rasteira (textura lisa).
Tamanho	Função da resolução espacial da imagem analisada e da dimensão dos objetos na cena. Ex.: Distingue um carro do telhado de um edifício.
Forma	É um elemento importante na distinção de formas circulares, retangulares, ovais e irregulares. Ex.: Culturas irrigadas com pivô central que se diferenciam das demais por sua forma circular.
Padrão	É o arranjo espacial de determinados objetos em uma superfície. Ex.: uma área residencial planejada pode ser distinguida de uma área de ocupação irregular pelo padrão espacial de quadras regulares.
Localização	Refere-se ao local específico onde um objeto está situado. Ex.: Identificação de determinado tipo de bioma que só ocorre em uma determinada localização geográfica.
Contexto	Posicionamento relativo de um objeto em relação a outros objetos. Ex.: Um estacionamento com pavimentação asfáltica é diferenciado de uma rodovia pelo fato de o primeiro estar localizado dentro de quadras.

Fonte: Adaptado de PINHO (2005).

A inserção das características apresentadas na Tabela 2 proporciona a inclusão do conhecimento do intérprete no processo de classificação dos objetos que são representações do mundo real. As características dos objetos são verificadas através dessas características que servem de suporte para a construção de uma rede semântica que visa realizar a classificação por meio da modelagem do conhecimento.

Um objeto é um elemento do mundo real que possui atributos que são identificados através do conhecimento das suas características. Pode ser definido no meio computacional através de operações aplicadas com base na construção de procedimentos que definem o seu tamanho em uma imagem. O tamanho médio dos objetos é medido através de uma função denominada de

parâmetro de escala, que se trata de um número sem unidade, que define a heterogeneidade máxima permitida dentro dos objetos.

2.2.2.2. Sistemas baseados em conhecimento

A interpretação automática de imagens em sensoriamento remoto parte de uma contradição inexorável: ao mesmo tempo em que o objetivo é processar automaticamente o conhecimento sobre uma imagem, este mesmo conhecimento deve ser fornecido, formalizado e, em muitos casos, atualizado por um especialista humano (PAHL, 2008).

Dentre as abordagens de classificação existentes, a GEOBIA é a forma mais completa e integrada de se representar em termos computacionais o conhecimento de um especialista humano para a interpretação automática de imagens de Sensoriamento Remoto (NOVACK, 2009). Isso se deve ao fato de que a classificação não é realizada apenas por meio das bandas espectrais que passam a ter companhia de outros dados espaciais provenientes de outros sensores de diferentes resoluções além de dados tabulares e vetoriais.

A GEOBIA é iniciada com objetos primitivos que representam um grupo de objetos que serão processados por regras definidas por passos iterativos até atingirem os objetos de interesse. O conhecimento que identifica os objetos são denominados de conhecimento implícito e conhecimento explícito. O conhecimento implícito refere-se aos procedimentos específicos para a detecção das classes existentes na imagem. Este conhecimento é visto como uma tarefa específica realizada por um algoritmo já elaborado para a solução do problema. Já o conhecimento explícito é representado por formas de representação do conhecimento.

As regras inseridas envolvem o conhecimento verificado através dos dados existentes em conjunto com as classes que serão obtidas por meio do conhecimento explícito na rede hierárquica e a rede semântica. A rede hierárquica opera através do relacionamento entre as classes que vão desde uma classe geral até chegar a classes mais específicas. Neste caso, o problema geral será particionado em subproblemas mais simples através das regras do tipo relacionadas – ‘Se, Então’ (RUMBAUGH *et al.*, 1991). No caso da rede semântica são observadas relações entre as classes gerais e

específicas que podem ser tanto hierárquicas quanto topológicas (MOORE, 2000; BITTENCOURT, 2006).

Portanto, PAHL (2008) define os sistemas baseados em conhecimento como aqueles que armazenam o conhecimento específico da aplicação de modo explícito e de modo separado da estratégia geral de solução de problemas. Para diferentes tarefas troca-se apenas a base de conhecimento que é representado por meio das regras e redes semânticas.

RIBEIRO (2010) ressalta ainda que se faz necessário a experiência do intérprete em todo o processo de análise dos dados. Como o funcionamento destes sistemas baseia-se na introdução do conhecimento do analista a respeito da cena, sendo uma formalização da visão de um determinado indivíduo sobre uma imagem específica, o resultado do modelo de classificação passa a ser um reflexo do conhecimento (incluindo informações coletadas *a priori* sobre a área a ser classificada) e da capacidade de compreensão do analista (fortemente influenciada por sua formação profissional e experiência) a respeito de uma determinada área de estudo ou especialidade da pesquisa em questão.

Dentre alguns exemplos podemos destacar o estudo de CRUZ *et al.* (2007) que realizou o mapeamento de remanescentes florestais do bioma Mata Atlântica para o Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira - PROBIO, do Ministério de Meio Ambiente - MMA, construído em escala 1:250.000. Os autores utilizaram o software eCognition para a classificação que foi realizada por meio de imagens LANDSAT 7, CBERS 2, SPOT 5, dentre outros dados temáticos existentes.

VICENS *et al.* (2009) aplicaram para os remanescentes florestais da Mata Atlântica, a identificação das diferentes fitofisionomias existentes deste bioma que compreende o Estado do Rio de Janeiro. Para isso, aplicou-se a classificação orientada a objetos através da utilização de imagens de diferentes resoluções por meio da observação da variação temporal do índice de vegetação e da aplicação de modelos de lógica fuzzy em dados espectrais e temáticos. Dentre os resultados obtidos estão a identificação e separação das florestas ombrófila e estacional.

2.2.2.3. *Software InterIMAGE*

O InterIMAGE é uma iniciativa de desenvolvimento de *software* de código aberto que faz parte de um projeto de cooperação científica internacional liderada pelo Laboratório de Visão Computacional (LVC) do Departamento de Engenharia Elétrica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e pela Divisão de Processamento de Imagens (DPI) e Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Trata-se de um sistema multi-plataforma baseado no aplicativo GeoAIDA (BUCKNER *et al.*, 2001), desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia da Informação da Universidade de Hannover, Alemanha, e que herdou deste sistema a sua característica funcional básica, além de estruturas de conhecimento e mecanismos de controle. Uma nova interface gráfica e funcionalidade de representação de conhecimento e operadores de processamento de imagem foram posteriormente adicionados ao sistema (InterIMAGE, 2011).

O InterIMAGE implementa uma estratégia específica de interpretação de imagens, baseada e guiada por uma descrição hierárquica do processo de interpretação, estruturado em uma rede semântica (COSTA *et al.*, 2008). A rede semântica é representada por “nós” que possuem operadores associados que são chamados de holísticos, pois se tratam de operadores que realizam a identificação de objetos correspondentes aos conceitos representados pelos nós da rede semântica.

Os operadores holísticos podem ser conectados a qualquer nó da rede semântica, e sua tarefa básica consiste na realização de uma classificação preliminar da imagem em grupos de regiões, e assim definir quais das etapas subsequentes do processo de interpretação serão aplicadas a cada grupo (COSTA *et al.*, 2008).

O surgimento de conflitos espaciais entre objetos pode ocorrer diante das etapas de desenvolvimento da interpretação dos dados. Esses conflitos podem ser resolvidos recorrendo a alguma forma de conhecimento prévio que é codificado em regras de decisão também associadas aos nós da rede semântica. Além disso, como os diferentes operadores podem processar dados de diversos formatos, o sistema permite a análise integrada de imagens e de

dados de SIG múltiplos. Um exemplo é que o pacote básico do InterIMAGE oferece um conjunto de operadores montados com as funções e classes fornecidas pela biblioteca TerraLib chamado TerraAIDA (InterIMAGE, 2011). A listagem dos operadores implementados na versão 1.35 estão na tabela 3.

Os operadores utilizados expostos na Tabela 3 que foram utilizados durante o trabalho foram *TerraAIDA Arithmetic*, *TerraAIDA Baatz Segmentation*, *TerraAIDA NDVI Segmentation*, *TerraAIDA Region Growing Segmentation* e *TerraAIDA ShapeFile Import*.

Os componentes do processo de interpretação do InterIMAGE são apresentados na Figura 2. O sistema implementa uma estratégia de controle de interpretação específica, direcionada por um modelo de conhecimento estruturado através da rede semântica. Durante a interpretação da cena, os dados de entrada são processados com a ajuda de programas externos, denominados operadores *top-down* e *bottom up*.

Os operadores *top-down* são responsáveis pela partição da cena em regiões, consideradas como hipóteses de objetos. Trata-se de uma classificação preliminar, que identifica segmentos com o potencial de pertencer a cada uma dessas classes. Os operadores *bottom-up* refinam as classificações produzidas na etapa *top-down*, confirmando-as ou rejeitando-as e resolvendo eventuais conflitos espaciais entre elas. No final do processo de interpretação, as hipóteses validadas tornam-se instâncias de objetos (InterIMAGE, 2011).

Tabela 3. Lista de operadores do InterIMAGE (COSTA *et al.*, 2010).

Nome do operador	Descrição das funções
<i>TerraAIDA Arithmetic</i>	Geração de segmentos com base no limiar de uma imagem em tons de cinza resultante de uma operação aritmética definida pelo usuário sobre as bandas de uma imagem de entrada.
<i>TerraAIDA Baatz Segmentation</i>	Realiza uma segmentação de uma imagem de entrada utilizando o algoritmo proposto em (BAATZ & SHAPE, 2000).
<i>TerraAIDA Checkerboard Segmentation</i>	Cria segmentos retangulares em forma de imagem de acordo com as especificações definidas pelo usuário.
<i>TerraAIDA NDVI Segmentation</i>	Gera segmentos com base no limiar de uma imagem em tons de cinza, cujos números digitais são equivalentes ao Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (SELLERS, 1985).
<i>TerraAIDA Region Growing Segmentation</i>	Realiza uma segmentação de uma imagem de entrada através do algoritmo proposto em (BINS <i>et al.</i> , 1996).
<i>TerraAIDA ShapeFile Import</i>	Importa polígonos a partir de um arquivo <i>shapefile</i> (ESRI, 1998) e gera segmentos com base nos polígonos importados.
<i>TerraAIDA ShapeFile Intersection</i>	Cria segmentos a partir da interseção das regiões associadas às hipóteses de nível superior (do pai, nó da rede semântica) e um arquivo <i>shapefile</i> fornecido pelo usuário.
<i>TerraAIDA Decision Tree Classifier C4.5</i>	Classifica regiões com base no algoritmo supervisionado C4.5 (QUINLAN, 1993) através de amostras selecionadas pelo usuário.

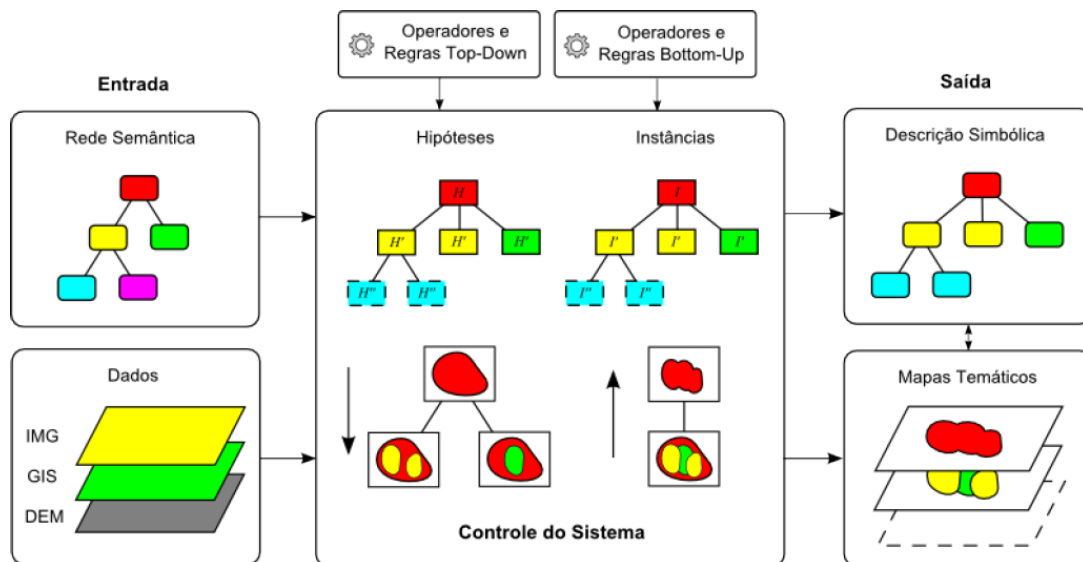


Figura 2. Componentes do processo de interpretação no InterIMAGE.
(InterIMAGE, 2011).

RIBEIRO (2010) destaca que a comunicação entre projetos distintos no software pode ser realizada por meio de operadores de importação de resultados (formato InterIMAGE) e exportação de resultados (*shapefile*). A nova interface apresentada a partir da versão 1.0 conta com ambientes de coleta e edição de amostras (*Samples Editor*), edição de polígonos (*Shapefile Editor*) e visualização de espaço de atributos (*Analysis Manager*).

O resultado do processo de interpretação é a descrição simbólica da cena, consistindo principalmente de uma rede de instâncias de objetos e de imagens rotuladas que correspondem às regiões associadas às classes de objetos. A partir das imagens rotuladas o sistema permite a criação de diferentes mapas temáticos representando os diferentes níveis de conceitos na rede semântica.

2.2.3. Mineração de dados

A grande geração de dados por órgãos governamentais e de pesquisa científica têm promovido um constante crescimento na inserção de novos dados provenientes de diferentes fontes e metodologias. A geração desses novos bancos de dados aponta para a necessidade da implantação de novas ferramentas e técnicas de análise automática e inteligente para a seleção de dados visando diferentes temáticas de pesquisa.

A disponibilidade dos bancos de dados pela internet se alia à grande necessidade de transformar tais dados em informação e conhecimento úteis para as tomadas de decisão. Essa situação demanda investimentos consideráveis da comunidade científica em novos softwares. A informação e o conhecimento obtidos podem ser utilizados para diversas aplicações, que vão do gerenciamento de negócios, controle de produção e análise de mercado ao projeto de engenharia e exploração científica (HAN & KAMBER, 2001).

O principal campo de atuação em que são utilizados esses bancos de dados robustos é denominado de Descoberta de Conhecimento em Bancos de Dados – *Knowledge Discovery in Databases (KDD)*. E a Mineração de dados é a etapa em *KDD* responsável pela seleção dos métodos a serem utilizados para localizar padrões existentes nos dados, os quais são analisados para a busca por padrões de interesse que visam a identificação de fenômenos através dos melhores parâmetros que resolvam o objetivo em questão.

2.2.3.1. Descoberta de conhecimento e mineração de dados

Os constantes avanços na área da Tecnologia da Informação têm viabilizado o armazenamento de bases de dados de diferentes fontes e escalas. Diante disso é grande a necessidade da análise de dados através de ferramentas computacionais apropriadas visando melhores resultados. Dessa maneira é primordial que essas ferramentas sejam desenvolvidas de forma automática e inteligente visando a análise, interpretação e o relacionamento entre esses dados para que se possa desenvolver e selecionar estratégias de ação em cada contexto de aplicação (GOLDSCHIMIDT & PASSOS, 2005).

O atendimento a demanda pela análise desses dados de inúmeras fontes através da KDD que foi criada durante o primeiro Workshop sobre essa temática que ocorreu em 1989 para enfatizar que o conhecimento trata-se de produto final de uma descoberta orientada aos dados (CARVALHO, 2011).

A KDD é mais conhecida através da “mineração de dados” que é um processo de descoberta de conhecimento que deve ser adotado quando se dispõe de um grande volume de dados. É a etapa mais importante do processo de aquisição de conhecimento, pois procura definir padrões, associações, mudanças, anomalias e estruturas significativas entre os dados. Essa técnica extrai informações de uma determinada base de dados, criada por meio da

tarefa de classificação e da técnica de árvores de decisão (HAN & KAMBER, 2006).

Com a mineração de dados é possível adotar o método de classificação criado a partir da categorização da base de dados e da utilização de uma árvore de decisão, com a geração de regras importantes em apoio ao processo de mapeamento. Os primeiros *softwares* para mineração de dados surgiram em meados da década de 1990 em ambiente acadêmico. Na atualidade, já existem algumas dezenas de ferramentas comerciais para mineração de dados, identificadas pelo termo inglês *data mining*, desenvolvidas por empresas como SAS (*Enterprise Miner*), IBM (*Intelligent Miner*) e aplicadas a diversas funções (SOUZA, 2012).

De acordo com ANO (2004), a mineração de dados faz parte da pesquisa multidisciplinar, incluindo tecnologia de banco de dados, inteligência artificial, aprendizado de máquina, redes neurais, estatística, reconhecimento de padrões, sistemas baseados em conhecimento, recuperação da informação, computação de alto desempenho e visualização de dados. Vários estudos já utilizam essa ferramenta para indicação de padrões e análise de conjuntos de dados. Dentre alguns exemplos estão o estudo de MARTINS & FONSECA (2009), que utilizou a mineração de dados para o mapeamento por meio de imagens do satélite SPOT. Os autores realizaram a classificação através da utilização de 57 atributos (espectral, forma, posição e textura), extraídos da imagem SPOT. Os atributos foram analisados e selecionados por meio da mineração de dados e, uma árvore de decisão foi construída com os cinco atributos mais importantes do conjunto (dois de textura, dois espectrais e um atributo de forma). Esta técnica reduziu significativamente o tempo de análise e de processamento, bem como a subjetividade no processo. Também SAITO *et al.* (2011) utilizaram a mineração de dados para realizar a análise de padrões de desmatamento e ocupação humana na Amazônia.

Dentre outros exemplos da utilização da técnica de mineração de dados temos CARVALHO (2011) que utilizou GEOBIA e mineração de dados para mapear o uso e cobertura do solo (por quadra) de um setor da Zona Oeste do município de São Paulo através de atributos extraídos de imagens de alta resolução WorldView-2. E SOUZA (2012) realizou em floresta de Mata Atlântica, Estado do Rio de Janeiro, a avaliação da técnica de mineração de

dados, a partir de um sensor orbital hiperespectral, a capacidade de ampliação das classes de mapeamento da cobertura da vegetação, segundo diferentes características de regeneração da floresta, e influência do relevo como determinante da paisagem observada.

Segundo ANO (2004), a mineração de dados pode ser resumida nas seguintes etapas:

1. Limpeza dos dados: Eliminação de ruídos e dados inconsistentes;
2. Integração dos dados: Integração de diferentes fontes de dados produzindo um único repositório de dados;
3. Seleção: Seleção de atributos de interesse do usuário;
4. Transformação dos dados: ajuste dos dados para um formato apropriado à aplicação de algoritmos de mineração;
5. Mineração: ponto chave do processo, consistindo na aplicação de técnicas inteligentes (algoritmos) para se extrair os padrões de interesse;
6. Avaliação ou pós-processamento: etapa onde são identificados os padrões interessantes de acordo com algum critério do usuário;
7. Visualização dos resultados: etapa onde são utilizadas técnicas de representação de conhecimento a fim de apresentar o conhecimento minerado.

A Figura 3 destaca o fluxo de ações para cada etapa conforme indicação de ANO (2004).

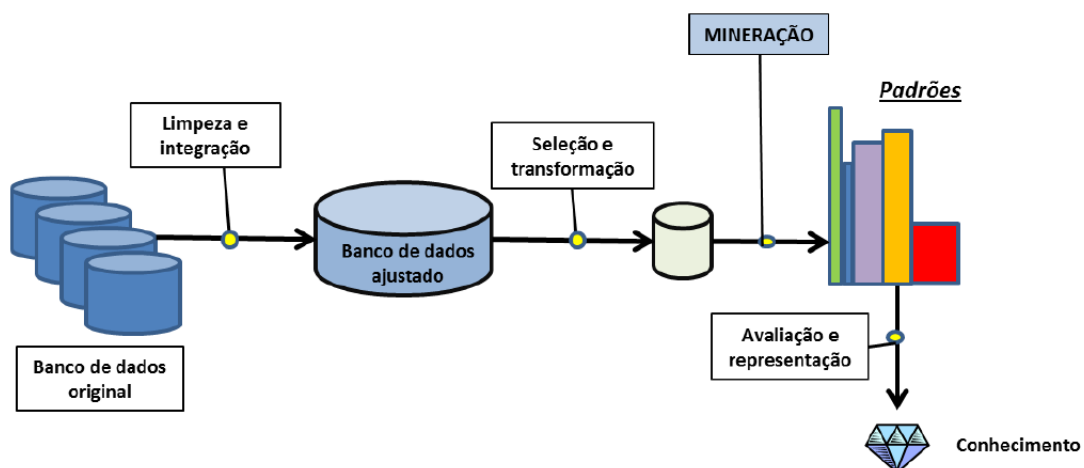


Figura 3. Etapas de mineração de dados (SOUZA, 2012).

Para executar a mineração de dados deve-se considerar dois conceitos importantes: as *tarefas* e as *técnicas* que serão adotadas durante o processo.

A tarefa consiste na especificação do que se quer buscar no conjunto de dados. Como exemplos, pode-se citar: regras de associação, padrões sequenciais, análise de *outliers*, classificação e predição, análise de clusters (ou agrupamentos). A técnica, no âmbito da mineração, consiste na especificação de métodos que garantam como descobrir os padrões de interesse da pesquisa. Dentre as principais técnicas utilizadas em mineração de dados, pode-se citar: técnicas estatísticas, técnicas de aprendizado de máquina e técnicas baseadas em crescimento-poda-validação. A Figura 4 destaca a relação entre tarefas e técnicas.

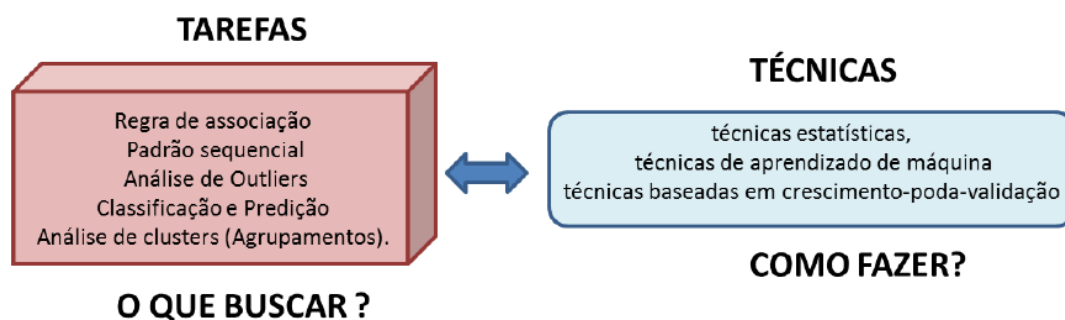


Figura 4. Tarefas e técnicas na mineração de dados (SOUZA, 2012).

O modelo classificatório proveniente da mineração de dados pode ser representado de diferentes formas, entre elas destacam-se, a árvore de decisão que é uma estrutura hierárquica que indica regras de decisão que a representatividade e o desempenho final dependem da segmentação adotada, das amostras inseridas e dos descritores selecionados.

3. O PARQUE NACIONAL DO ITATIAIA E A PROBLEMÁTICA DOS INCÊNDIOS FLORESTAIS

O Parque Nacional do Itatiaia (PNI) foi a primeira Unidade de Conservação (UC) criada no Brasil. A data de instalação remete a junho de 1937 através da criação da Estação Biológica do Itatiaia através do Decreto nº 1.713, assinado pelo ex-presidente Getúlio Vargas com uma área original de 11.943 ha. Em 1982, o decreto nº 87.586 ampliou a área do Parque para aproximadamente 30.000 ha que é a sua extensão atual.

O PNI possui como uma de suas funções a preservação dos ecossistemas de grande relevância ecológica e beleza cênica, possibilitando a realização de pesquisas científicas, realização de atividades educacionais e de interpretação ambiental, recreação e turismo ecológico, por meio do contato com a natureza (ICMBIO, 2012).

A área de estudo localiza-se no mosaico da Serra da Mantiqueira entre os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais (Figura 5) e faz parte da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica. Abrange os municípios de Alagoa (MG), Bocaina de Minas (MG), Itamonte (MG), Itatiaia (RJ) e Resende (RJ). O nome Itatiaia é de origem tupi-guarani, significando “pedra cheia de pontas”, referindo-se à forma das montanhas como o Pico das Agulhas Negras, que possui o ponto mais alto do Parque com 2791,55 metros, e o Maciço das Prateleiras que são localizados na região de planalto do Parque.

O acentuado gradiente altitudinal e a variação climática propiciam a existência de diversos ecossistemas do bioma Mata Atlântica no Itatiaia, abrigando várias espécies endêmicas da flora e da fauna. É marcante a variação da vegetação na medida em que se sobe de 540 m no limite sul do Parque em direção aos 2.000 m do Planalto (TOMZHINSKI, 2012). A vegetação é distribuída em Floresta Ombrófila Densa Montana até a altitude de 1500m; Floresta Ombrófila Densa Alto Montana acima de 1500m; Floresta Ombrófila Mista Montana em altitudes próximas de 1200m e Floresta Estacional Semidecidual Montana na vertente continental (IBGE, 1991). As áreas de campestres são encontradas a partir de 1460m e aparecem de forma mais distribuídas a partir dos 1800m. No entanto, em 2100m essa fisionomia é dominante na paisagem do Itatiaia (BARTH, 1957).

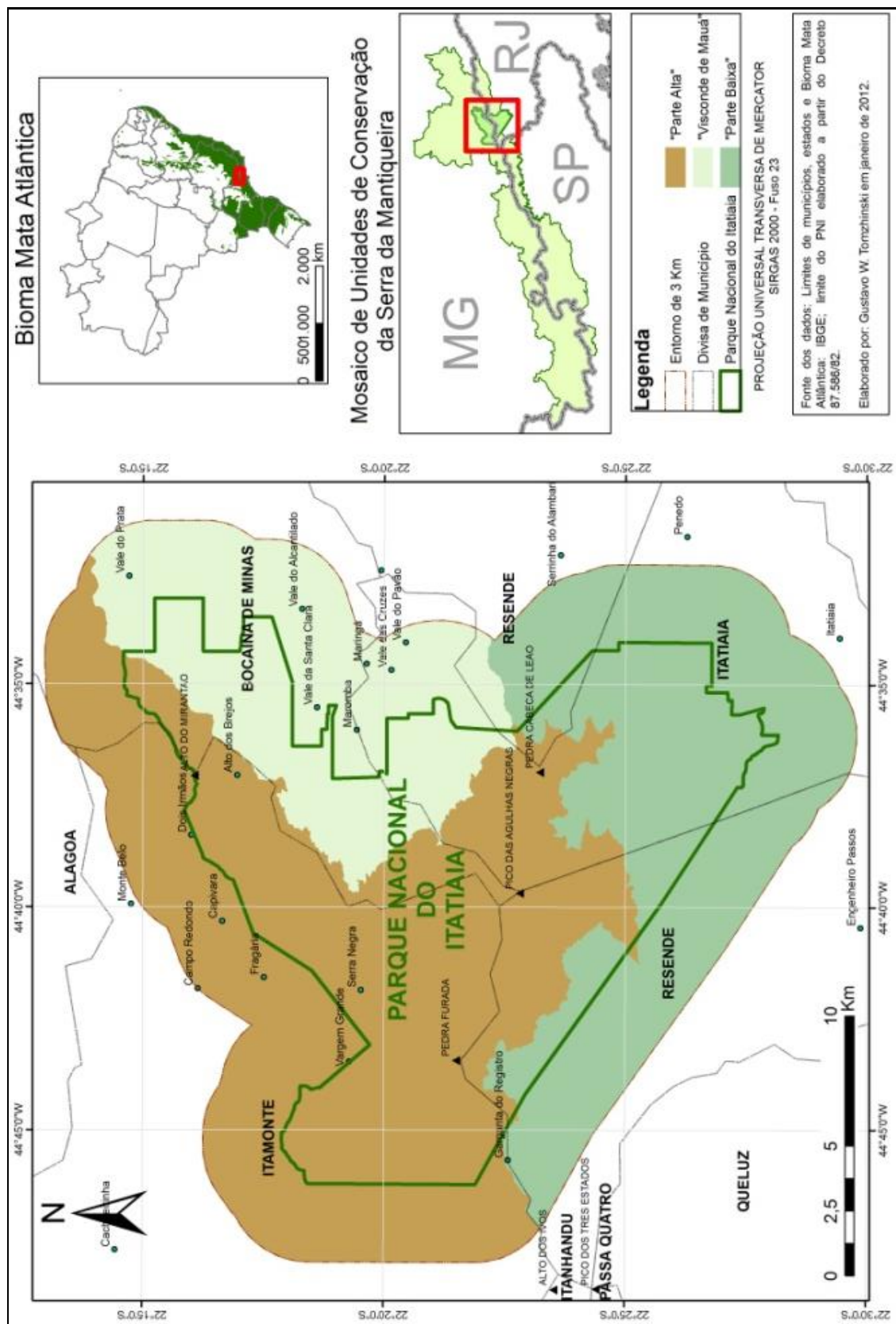


Figura 5. Delimitação da área de estudo (TOMZHINSKI, 2012).

O PNI é um importante divisor de águas em que as bacias mais importantes são rio Grande que deságua no rio Paraná (vertente norte) e rio Paraíba do Sul (vertente sul) que abastece o Estado do Rio de Janeiro (RICHTER, 2004). O clima é dividido, segundo a classificação de Köppen de acordo com a altitude: O tipo Cwb ocorre em áreas acima de 1600 metros e é mesotérmico, com verão brando que constitui a estação chuvosa e; o tipo Cpb que encontra-se nas partes mais baixas o clima é mesotérmico com verão brando e sem estação seca.

O PNI é dividido para fins de melhor administração em três áreas denominadas “Parte Alta”, Visconde de Mauá e “Parte Baixa”. A “Parte Alta” possui dentro dos seus limites o Planalto das Agulhas Negras (cota de 2.000m) e as bacias hidrográficas da vertente norte do Parque. A zona de Visconde de Mauá foi definida tendo por base a bacia hidrográfica do rio Preto, excluída a área do Planalto e a “Parte Baixa” abrangendo as bacias contribuintes para a bacia do rio Paraíba do Sul, excluída a região do Planalto e a bacia do rio Preto, que também é contribuinte deste rio.

Os incêndios florestais são a principal problemática do PNI que demanda grande preocupação em diversas tomadas de decisão administrativas. A área que mais sofre com incêndios de grande magnitude é o Planalto do Itatiaia (BRADE, 1956; RIBEIRO, 2001; TEIXEIRA, 2006), que são provenientes de ações antrópicas no seu interior e entorno que já proporcionaram a eliminação de espécies de fauna e flora modificando os ecossistemas e sua biodiversidade. A Figura 6 apresenta a diferença entre os períodos seco (A) e úmido (B) no Planalto do Itatiaia demonstrando que durante os meses de inverno, a região torna-se bastante propícia com material altamente combustível para o espalhamento do fogo.



Figura 6. Pico das Agulhas Negras (Foto A em Setembro de 2011 e Foto B em Fevereiro de 2013).

De acordo com TOMZHINSKI (2012), grande parte dos registros de incêndios do PNI encontram-se no entorno desta UC, numa área ampliada em 5 km dos seus limites. Os cinco maiores incêndios em área queimada concentram-se dentro dos limites do Parque, na região de Planalto, causando inclusive fenômenos de requeima (mesma área queimada mais de uma vez).

Isso aconteceu na área queimada em 1988, o maior registro de incêndio das últimas quatro décadas registrado por sensoriamento remoto. Nos anos de 2001, 2007 e 2010 houve a requeima em áreas distintas dentro da área queimada de 1988.

3.1. Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI).

O Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade tem, entre suas atribuições, a proteção das Unidades de Conservação Federais. Dentre as atividades de proteção, a Prevenção e o Combate aos incêndios é um dos grandes desafios a ser trabalhado (ICMBio, 2010)

Através da finalidade de promover a uniformidade de linguagem e de procedimentos operacionais, o ICMBio por meio da Coordenação-Geral de Proteção Ambiental – CGPRO, realiza anualmente nas UCs, dentre elas o PNI, o curso para Formação de Brigadista de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais. Esse treinamento é realizado através de uma política que envolve moradores da região que conhecem métodos e técnicas de combate a incêndio de modo uniforme e padronizado (ICMBio, 2010). Todos os anos, os 42 brigadistas contratados são renovados proporcionando novas oportunidades para outros além da divulgação desse conhecimento para a população residente do entorno da UC (Figura 7).

Além do combate ao incêndio florestal, o brigadista preenche um formulário que integra um relatório com as informações sobre cada área queimada. Essas informações são inseridas no Relatório de Ocorrência de Incêndios (ROI) que possuem informações como os horários de início e término das diferentes fases do combate, dos recursos materiais e humanos utilizados e das condições meteorológicas (ICMBio, 2010).

Os ROIs são registrados regularmente pelos brigadistas desde 2001, no entanto apenas a partir de 2008 é que as áreas atingidas passaram a ser sistematicamente perimetradas com a utilização de GNSS. Todos os dados registrados no ROI são repassados para o Sistema Nacional de Informações sobre Fogo (SISFOGO), que é um sistema do PREVFOGO/IBAMA em que é permitido consultar bancos de dados geográficos com informações do ICMBio e do IBAMA. Além disso, essas informações são inseridas no processo de elaboração do Plano Operativo da UC que é atualizado anualmente.



Figura 7. Turma do curso de brigadistas e materiais utilizados durante o treinamento, março de 2012.

A delimitação da área queimada por meio de GNSS (Figura 8) torna possível a sobreposição com outros dados georreferenciados como mapas e imagens de satélite. Através da administração do PNI foi possível a obtenção dos ROIs referentes aos anos de 2008 a 2012, em formato de arquivo *shape* na projeção Universal Transversa de Mercator, Fuso 23 Sul e Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS 2000 (ICMBio, 2010b).



Figura 8. Brigadistas do PNI (com uniforme amarelo) realizando a verificação de área queimada através do auxílio do GPS Navegador, setembro de 2011.

Os dados do ROI foram divididos por períodos anuais para serem inseridos na metodologia da Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios de maneira que sejam observados cenários pretéritos e futuros dos incêndios florestais que aconteceram na área do Parque Nacional do Itatiaia e ampliação dos limites em 5 quilômetros. A Tabela 4 demonstra a diferença entre a quantidade de ROI e a área queimada em hectares durante cada ano registrado. A espacialização dos ROI é observada na Figura 9 que indica a localização e concentração das ocorrências registradas.

Tabela 4. Quantidade de ROIs durante o período de 2008 a 2012.

Ano	Quantidade de ROI	Área queimada (hectares)
2008	43	136,15
2009	23	61,42
2010	33	1325,04
2011	46	471,34
2012	29	85,85

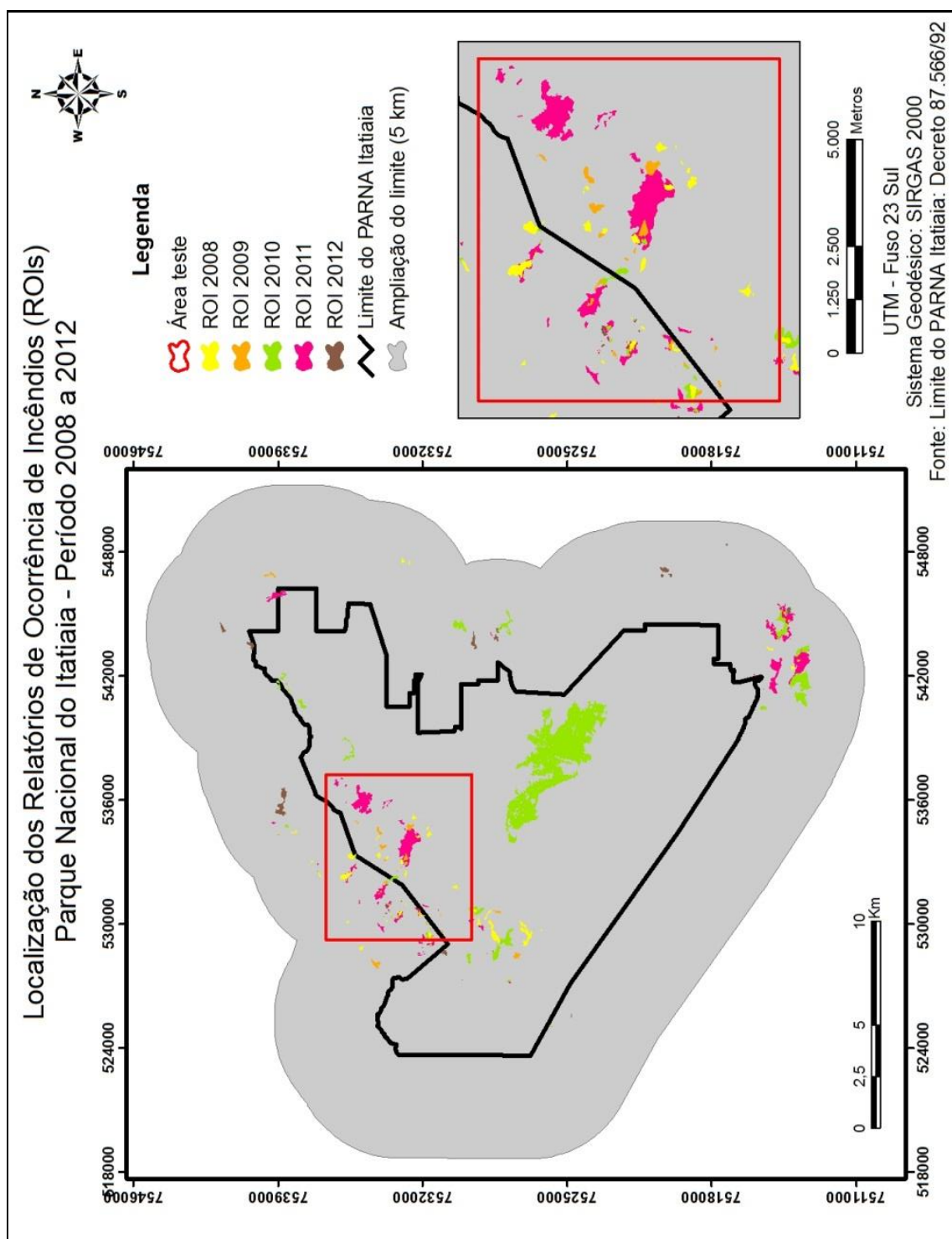


Figura 9. Localização dos ROIs (Período 2008 a 2012)

A Tabela 4 apresenta como principal característica que uma grande quantidade de registros de incêndios não propicia o equivalente em número de áreas queimadas. Esse é um indicativo da importância da delimitação das áreas queimadas através do uso do GNSS pelo brigadistas. Essa metodologia propicia a espacialização do fenômeno de maneira temporal e, mostra uma

grande concentração de pequenos incêndios nos limites do Parque, na região de Serra Negra, Vargem Grande e Fragária e, na região da Parte Baixa do Parque, próxima a Rodovia Presidente Dutra em Itatiaia.

O maior incêndio em extensão registrado pelos ROIs é observado na região do Planalto e aconteceu em 2010. Anteriormente, ocorreram outros dois grandes incêndios que cobriram grandes áreas próximas no Planalto durante os anos de 2001 e 2007. Essas áreas queimadas não foram sobrepostas ao registro de 2010 como foi verificado por TOMZHINSKI (2012) através de imagens de satélite.

Os dados de incêndios registrados pelo PNI são utilizados de duas maneiras neste trabalho. O histórico dos incêndios que possui registros desde 1937 tornou possível a observação das variáveis geoecológicas mais adequadas para elaboração do modelo de conhecimento da susceptibilidade à ocorrência de incêndios. Essa etapa da metodologia foi elaborada por TOMZHINSKI (2012) e é apresentada no Capítulo 4. Em relação ao uso dos ROI, foi necessária a realização de uma divisão em dois períodos e considerando o ano de 2009 como base para a observação de cenários pretéritos para calibração do modelo aplicado com os dados de ROI de 2008 e 2009 e, também para a verificação de cenários futuros para validação baseados nos dados de ROI de 2010 a 2012.

A calibração do modelo de conhecimento é iniciada através da realização da mineração de dados. Essa etapa visa realizar a descoberta de conhecimento através da observação características das variáveis geoecológicas que são conjugadas por GEOBIA aplicada para a Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios. Para isso, os dados de ROI referentes a 2008 a 2009 foram editados de maneira uniforme para serem considerados como indicadores de áreas de alta susceptibilidade à ocorrência de incêndios. Buscando a calibração do modelo, também foram selecionadas áreas com características de baixa susceptibilidade à ocorrência de incêndios que foram editadas a partir do mapa de susceptibilidade à ocorrência de incêndios que foi elaborado por TOMZHINSKI (2012). Essas áreas foram indicadas com base nos resultados do mapa citado e na verificação de algumas características das variáveis geoecológicas extraídas do MDE e do NDVI.

Os dados editados correspondem a 80 amostras de áreas de alta susceptibilidade e 77 áreas de baixa susceptibilidade que são inseridas na mineração de dados conforme é observado no Capítulo 7. Já os dados de ROI referentes ao período de 2010 a 2012 são utilizados como validadores da metodologia de susceptibilidade à ocorrência de incêndios.

4. ANÁLISE COMPARATIVA DAS VARIÁVEIS GEOECOLÓGICAS E OS INCÊNDIOS NO PNI

As variáveis da paisagem são consideradas como os componentes naturais que desempenham papel nas inter-relações da composição substancial, a estrutura, o funcionamento, a evolução e a dinâmica da paisagem. A integração das variáveis geoecológicas é fundamental para obtenção da geoecologia de formação das paisagens que são consideradas em seis tipos: geológicos, climáticos, geomorfológicos, hídricos, edáficos e bióticos (MATEO RODRIGUEZ, 2007).

As variáveis geoecológicas quando observadas em conjunto possibilitam a construção de uma matriz geoecológica que, de acordo com MATEO RODRIGUEZ (2007), serve de apoio para a análise das relações entre as variáveis através da representação dos elementos e componentes que se situam na estrutura horizontal e estrutura vertical.

Diante dessas informações foram verificadas as variáveis que possuem maior ligação com a questão dos incêndios florestais como visto por TOMZHINSKI (2012) que, através do histórico dos incêndios florestais no PNI (1937 a 2011) e os ROIs, observou relevância com a geomorfologia por meio da forma de encosta, declividade e exposição à radiação solar. Essas variáveis geoecológicas foram definidas através do conhecimento de campo e de observações da área de estudo, sendo incorporadas ao mapeamento da susceptibilidade à ocorrência de incêndios.

Visando a extração das variáveis geoecológicas provenientes da geomorfologia foi gerado um Modelo Digital de Elevação (MDE) a partir das cartas topográficas do IBGE: Agulhas Negras (MI-2712/4) Passa Quatro (MI-2712/3), Alagoa (MI-2712/2) e São José Barreiro (MI-2742/2). O MDE foi gerado a partir da edição das curvas de nível, pontos cotados e hidrografia além do limite do PNI que foi ampliado (*buffer*) em 3 km. O método aplicado para a geração do MDE foi o TOPOGRID elaborado no *software* ArcGIS 9.3 devido a característica de consideração da direção dos fluxos da hidrografia, o que propicia a construção de um MDE Hidrologicamente Consistente.

Os dados extraídos do MDE foram verificados conjuntamente com os ROI do PNI para a comparação dessas variáveis relacionadas às áreas queimadas identificadas em campo. Esses procedimentos realizados por

TOMZHINSKI (2012) seguem o refinamento da metodologia desenvolvida nos estudos de SILVA *et al.* (2009), SOUSA *et al.* (2010) e FERNANDES *et al.* (2011).

Os resultados de extração dos dados foram obtidos através do software ArcGIS 9.3 por meio da ferramenta de estatística por zona (*Zonal Statistics*) que forneceu os parâmetros: mínimo, máximo, desvio padrão e o valor majoritário que identificam as características das áreas queimadas delimitadas pelo ROI dos anos de 2008 a 2011. Os tópicos seguintes descrevem as características e resultados alcançados.

4.1. Forma da encosta

O mapa de forma da encosta do Parque Nacional do Itatiaia utiliza como base as formas do relevo em que são consideradas, áreas côncavas, convexas e planas, extraídas do Modelo Digital de Elevação. A relação entre concavidade e convexidade influi na presença de umidade existente no terreno devido à convergência (côncavo) ou divergência de fluxo (convexo) durante o período de chuvas.

A classificação morfológica envolve diversas maneiras de interpretação da curvatura vertical e horizontal. A curvatura vertical é relacionada à identificação das formas côncavas, convexas e planares observando a análise de um perfil topográfico. Já a curvatura horizontal expressa o formato da vertente através da observação em projeção ortogonal que torna possível a variação da orientação das vertentes ao longo de uma determinada distância, caracterizando formas côncavas, convexas e planas.

Neste trabalho, a curvatura horizontal é utilizada e, na Figura 10, percebe-se a situação de divergência (forma convexa) se o lado interno da curva apontar para montante e de convergência (forma côncava), se for o contrário (VALERIANO, 2008). A forma planar é caracterizada quando as curvas assumem uma forma retilínea e paralela às vizinhas que podem ser de maior dispersão de fluxo d'água em alta declividade ou menor dispersão em baixa declividade e relevo plano.

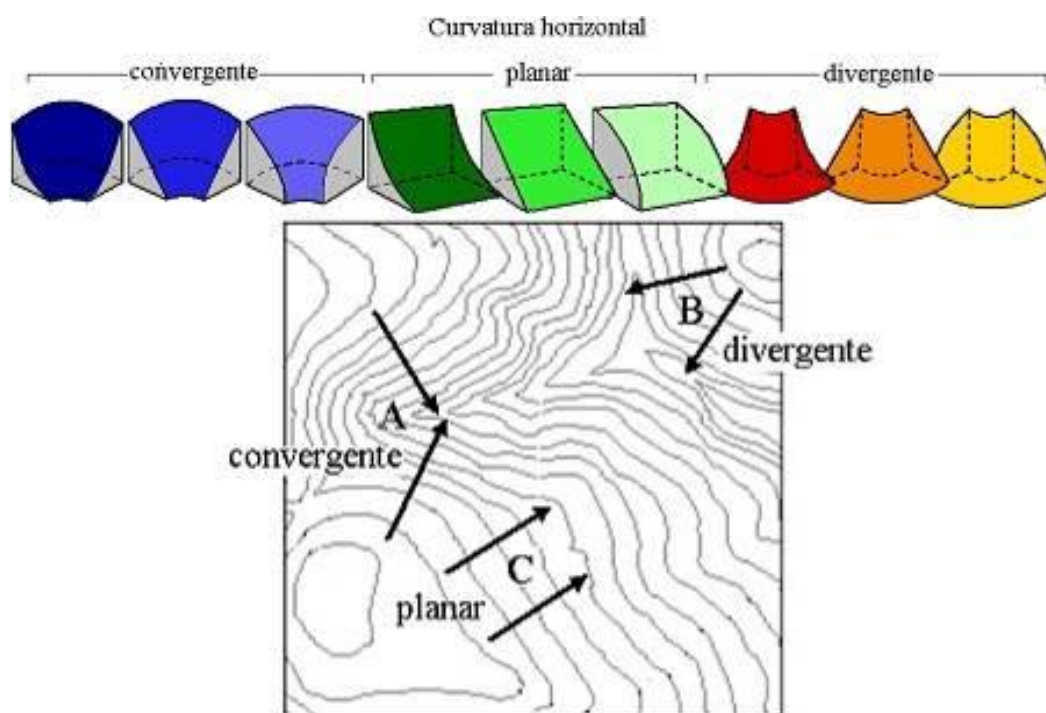


Figura 10. Classificação de áreas através da curvatura horizontal (adaptado de VALERIANO, 2008).

O mapeamento da variável de forma das encostas foi derivado do MDE através da geração dos valores da curvatura horizontal expressos em graus por metro ($^{\circ}/m$), que foi reclassificado por TOMZHINSKI (2012) em três categorias com base no intervalo de $-0,038^{\circ}$ a $+0,051^{\circ}$ para a classe planar, intermediária entre a côncava negativa e a convexa positiva, conforme sugestão de VALERIANO (2008). A classificação foi realizada através de digitalização manual tomando por base as curvas de nível, pontos cotados e hidrografia como visto no detalhe da Figura 11.

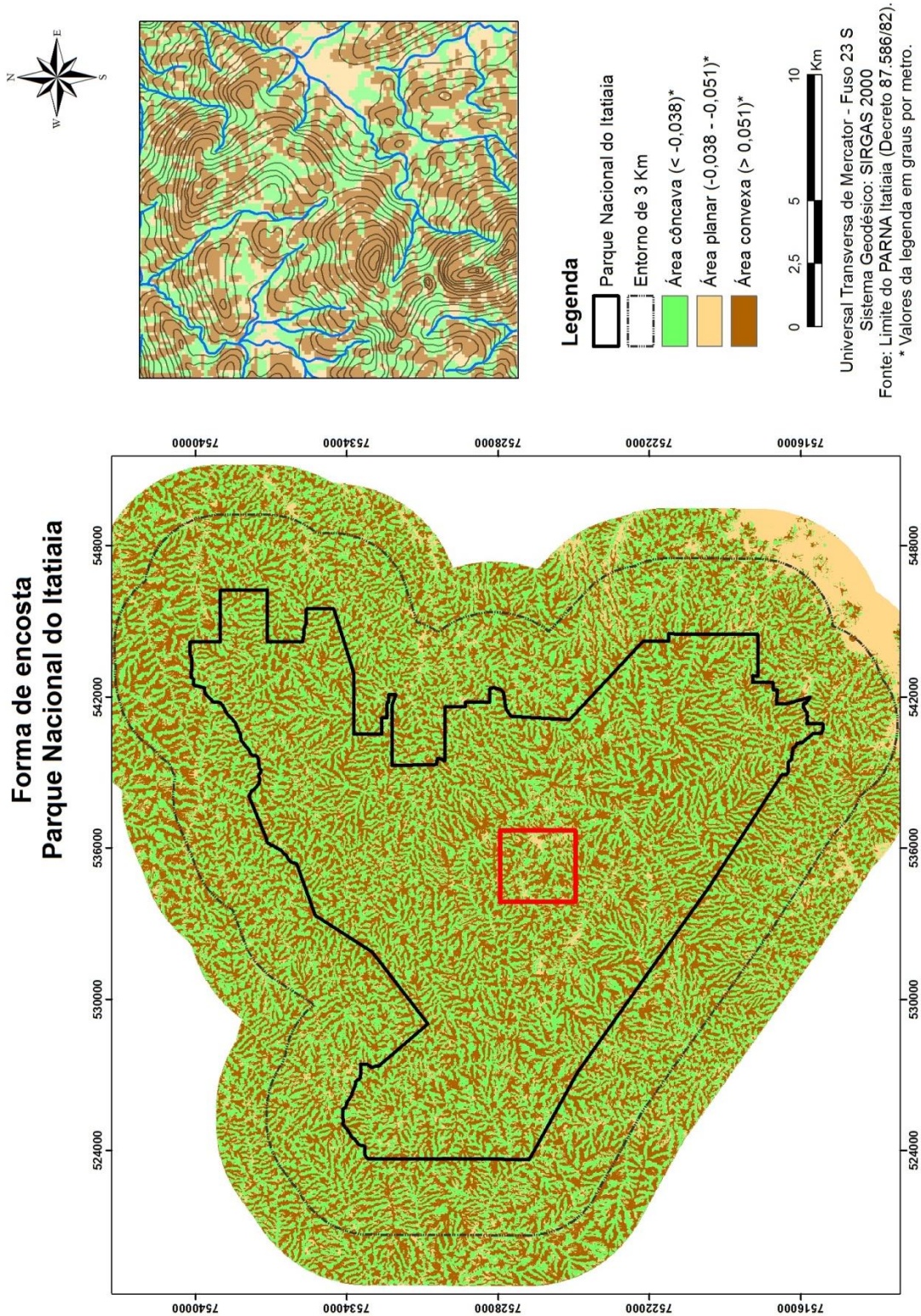


Figura 11. Mapa de forma de encosta.

TOMZHINSKI (2012) dividiu os ROI em três categorias de acordo com o tamanho de área queimada em cada um dos registros. As categorias definidas pelo autor seguiu o histórico dos registros de incêndios observados entre 1937 a 2011 (Tabela 5).

Tabela 5. Classificação dos registros históricos de incêndios segundo a estimativa de área atingida (TOMZHINSKI, 2012)

Categoria	Quant.	
A: Acima de 500 hectares	11	4%
B: 10 a 500 hectares	73	28%
C: Abaixo de 10 hectares	181	68%
TOTAIS	265	

TOMZHINSKI (2012) utilizou os ROI para observação da tendência de áreas com representação convexa, côncava e planar. Os resultados apontam para maior susceptibilidade de incêndios nas áreas convexas podem ser verificados na Tabela 6 que mostra em cada uma das categorias a tendência de que as áreas majoritariamente convexas são realmente as mais propícias aos incêndios conforme abordado também por SILVA *et al.* (2009) e SOUSA *et al.* (2010).

Tabela 6. Distribuição das ocorrências de incêndios analisadas em função da curvatura horizontal (TOMZHINSKI, 2012)

	A		B		C		Geral	
Incêndios em áreas majoritariamente côncavas	0	0%	1	4%	24	20%	25	17%
Incêndios em áreas majoritariamente planares	0	0%	2	8%	1	1%	3	2%
Incêndios em áreas majoritariamente convexas	3	100%	22	88%	94	79%	119	81%
TOTAL	3		25		119		147	

TOMZHINSKI (2012) ainda realizou de maneira comparativa as áreas dos três maiores incêndios, os ROIs analisados e a área de estudo em relação à forma de encosta como podemos verificar na figura 12.

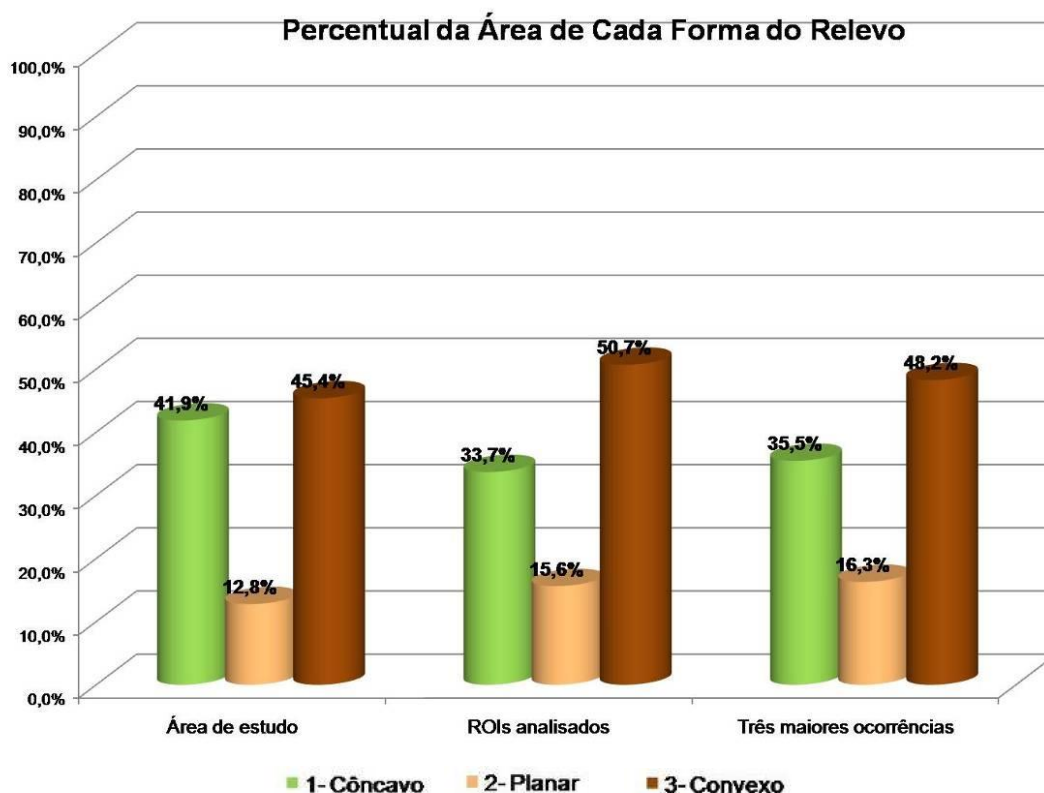


Figura 12. Gráfico comparativo do percentual de área de cada forma de relevo na Área de Estudo, nos polígonos de incêndios analisados e nas três maiores ocorrências (TOMZHINSKI, 2012).

O autor ressalta ainda que a ocorrência de incêndios em áreas convexas não é determinante e que durante os grandes incêndios, o fogo atinge inclusive áreas alagadas, fato ocorrido em 2007. Por isso a intenção de analisar os incêndios pelas três categorias citadas. As áreas planas existentes no Planalto constituem em grande parte as áreas de baixa declividade possuindo características dispersoras de fluxo d'água indicando baixa umidade. Isso mostra também a importância na inter-relação entre cada uma das variáveis analisadas.

4.2. Exposição à radiação solar

A radiação solar é vista como a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação eletromagnética. É a principal responsável pela dinâmica da atmosfera terrestre e pelas características climáticas do planeta.

A radiação eletromagnética é definida por NOVO (2008) como uma forma dinâmica de energia que se manifesta a partir de sua interação com a matéria. A interação entre a energia e a matéria é observada durante a trajetória da radiação eletromagnética na atmosfera, no terreno e ao atingir o sensor remoto (JENSEN, 2009).

Segundo MOTA (1977), a radiação que incide na superfície horizontal é constituída de uma componente direta, que não sofre influência da massa ótica e incide na forma de feixes de raios solares paralelos, e uma componente difusa, resultante da interação da radiação solar com gases e partículas existentes na atmosfera. A soma dessas duas componentes é denominada de radiação solar global (Figura 13).

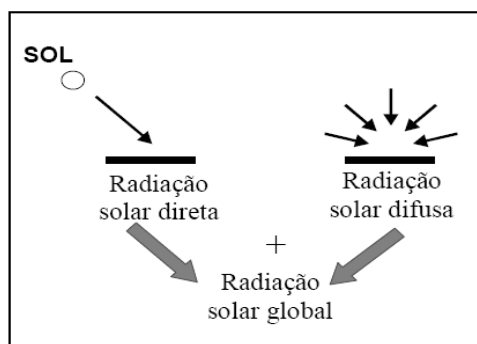


Figura 13. Componentes da radiação solar (MOTA, 1977)

O registro da radiação solar é escasso e traz a necessidade do uso de estimativas para geração de dados locais para suprir a falta de estações meteorológicas com radiômetros (PEREIRA *et al.*, 2006). Em geral, os métodos para estimativas de radiação abrangem o uso direto de dados de uma estação vizinha, a interpolação a partir de dados de várias estações vizinhas, o uso de dados de satélites ou o emprego de modelos de radiação (WEBER & FONTANA, 2012).

O modelo de radiação utilizado neste trabalho foi o *Area Solar Radiation* existente na extensão *Spatial Analyst* do *software* ArcGIS 9.3 que realiza o cálculo da exposição da radiação solar considerando o ângulo de incidência do sol em determinadas épocas do ano, latitude, efeitos atmosféricos e fatores topográficos calculados por meio de um MDE. É importante ressaltar que o resultado de um modelo de radiação solar depende da resolução espacial e da exatidão do MDE, a partir do qual são determinadas a inclinação e a orientação

da superfície e a obstrução do horizonte por elevações vizinhas (WEBER & FONTANA, 2012). Diante disso, a topografia apresenta-se como fator determinante para a quantidade de energia solar incidente que são resultantes de variáveis como elevação, declividade, orientação de encosta (azimute ou aspecto) e sombreamento, possibilitando a observação de gradientes locais da radiação solar que direta e indiretamente afetam os processos biofísicos em um local na superfície da Terra (DUBAYAH & RICH, 1995). O cálculo que foi definido por TOMZHINSKI (2012), em seu estudo, foi o ano de 2011, e o autor verificou que não ocorrem grandes diferenças na aplicação da ferramenta para a observação de anos anteriores de maneira separada. As diferenças ocorrem quando essa observação é feita por períodos como determinados dias e meses que podem seguir inclusive as estações do ano.

A abordagem dessa variável no estudo da Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios foi iniciado por SOUSA *et al.* (2010) que substituiu os dados de orientação de encosta que, de acordo com OLIVEIRA *et al.* (1995), as encostas voltadas para o norte são mais secas que as encostas voltadas para a vertente sul demonstrando grande diferença entre a quantidade de espécies de ambas as áreas. Posteriormente a esta observação, os estudos de COURA *et al.* (2009) realizaram a comparação entre a exposição à radiação solar em relação à variável de orientação de encosta no maciço da Pedra Branca e, neste caso, os autores observaram que a radiação solar propiciou melhor resultado que a orientação das encostas devido ao melhor detalhamento apresentado e por ser uma variável quantitativa que mensura a exposição solar em cada encosta.

Além disso, o detalhamento que a radiação proporciona é muito importante, uma vez que encostas diferentes, com uma mesma orientação, podem receber graus de radiação diferentes, devido a fatores como sombreamentos ocasionados pela morfologia do terreno.

A exposição à radiação solar foi calculada pela ferramenta *Area Solar Radiation* através da inserção de um MDE em que o resultado foi distribuído através do método de quebra natural dos valores distribuídos no histograma de classificação discriminado em três faixas de valores indicados na unidade de WH/m² (Watt Hora por metro quadrado) conforme é observado pela figura 14.

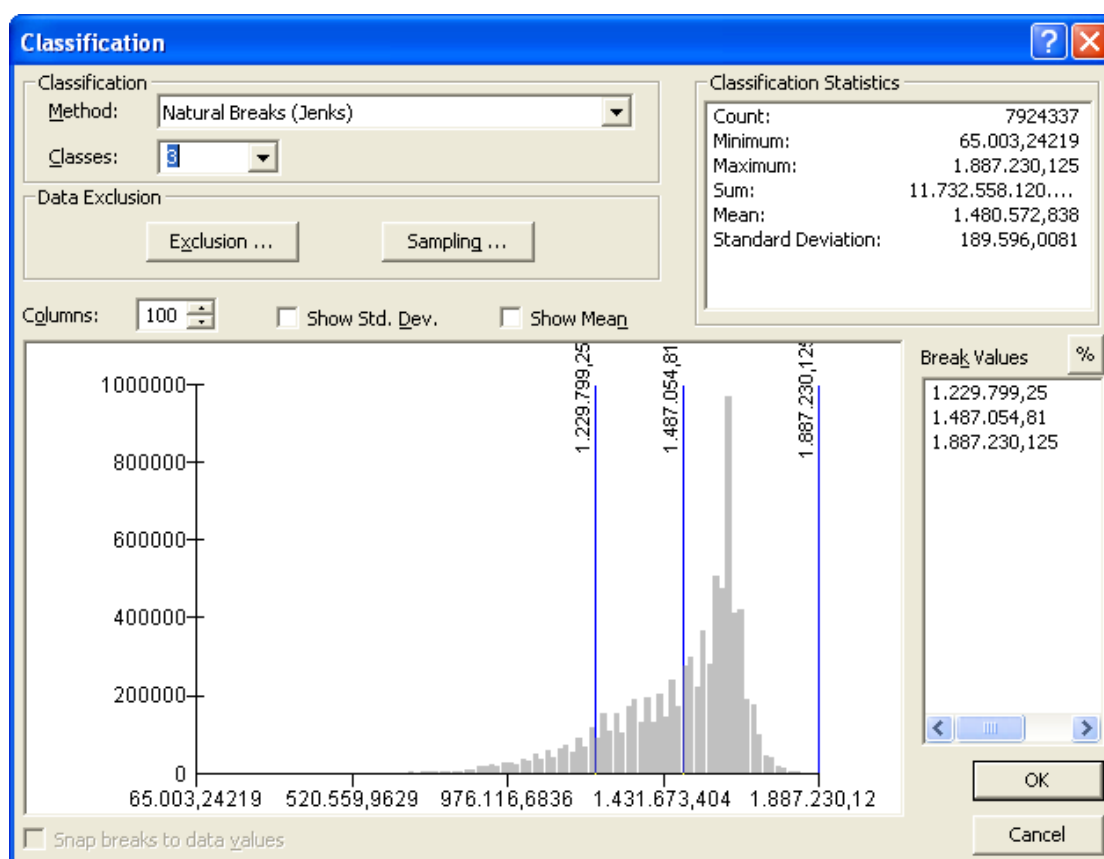


Figura 14. Histograma de classificação por quebra-natural

Os resultados da classificação são apresentados graficamente por TOMZHINSKI (2012) através do limite da área de estudo além da sobreposição aos três maiores incêndios e aos ROIs analisados (Figura 15) e, ainda pelo mapa de exposição à radiação solar (Figura 16) que demonstra a espacialidade dessa variável. Os gráficos mostram que em relação à área de estudo, as classes de alta e média exposição à radiação solar ficaram com valores semelhantes de 38,8% e 40,8%, respectivamente, bastante acima do valor de classe baixa que é de 20,4%.

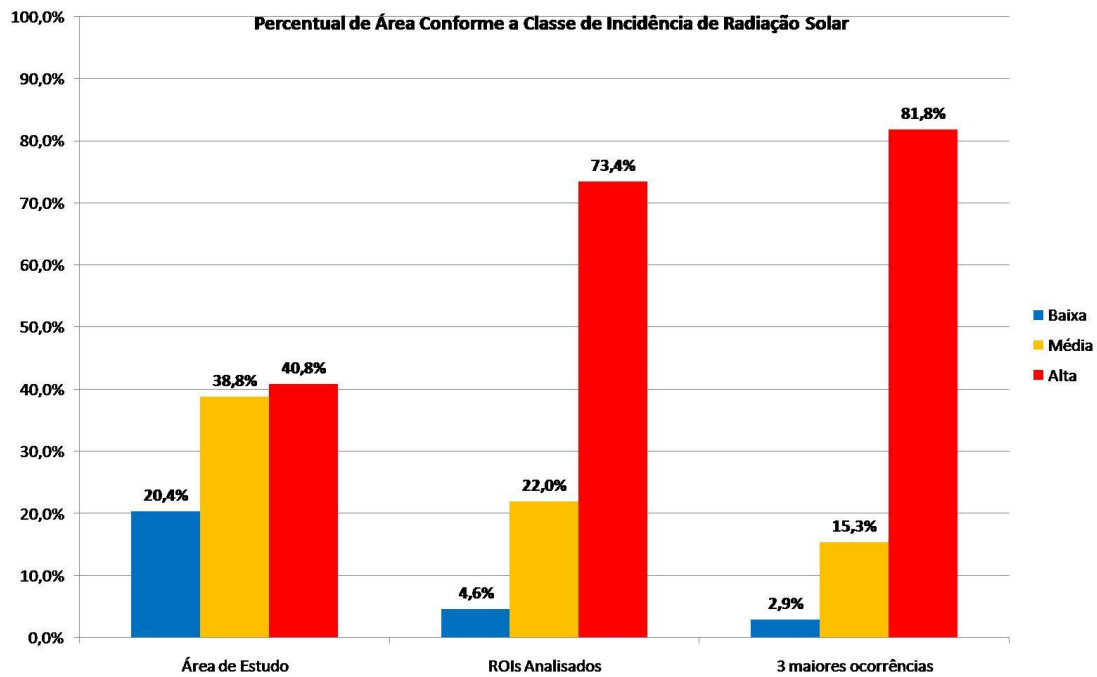


Figura 15. Distribuição da variável de exposição à radiação solar.

Verifica-se também que quando são consideradas as áreas queimadas por meio dos ROIs analisados e as três maiores ocorrências de incêndios registradas que existem grandes mudanças entre as diferenças percentuais entre as áreas de alta, média e baixa exposição à radiação solar. Neste caso, as áreas de baixa ficaram em ambos os casos abaixo de 5% enquanto as áreas de alta exposição à radiação solar atingiram valores acima de 73,4% com diferença de 50% em relação as áreas de baixa.

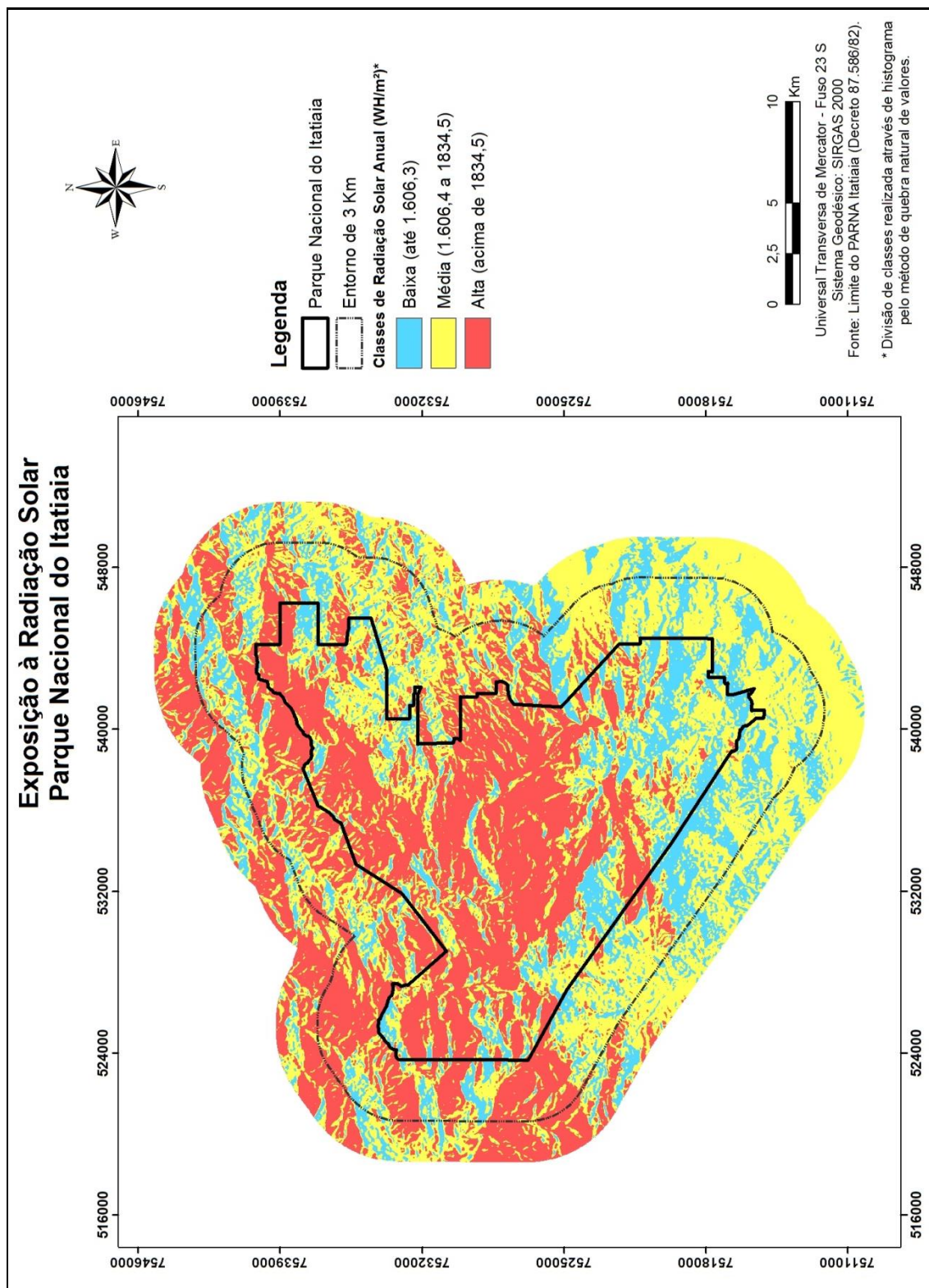


Figura 16. Mapa de Exposição à Radiação Solar anual.

Ao observar o mapa de Exposição à Radiação Solar (Figura 16) é possível verificar a tendência espacial das áreas mais elevadas indicarem a classe de alta exposição devido à posição norte das vertentes e ao pouco sombreamento durante o período de observação que é o ano de 2009.

Em relação às classes de média e baixa, observa-se que encontram-se bem distribuídas e detalhadas conforme indicam os estudos de COURA *et al.* (2009). O detalhamento dessas classes até indicam áreas com baixa e média exposição à radiação solar nas áreas com características de alta declividade e vertente sul que indicam sombreamento durante boa parte do período de estudo.

4.3. Declividade

A declividade corresponde ao ângulo de inclinação da superfície local em relação ao plano horizontal e pode ser expressa em graus ou porcentagem. Essa variável morfométrica torna possível a identificação do equilíbrio entre o escoamento superficial e a infiltração da água no solo (VALERIANO, 2008). Diante disso, a declividade é um dos fatores que influenciam o comportamento do fogo, sendo especialmente importante na compreensão dos grandes incêndios (WHELAN, 1995; BOVIO & CAMIA, 1997; CHUVIECO *et al.*, 1997). Pelas características apontadas essa variável é considerada como componente de diversas metodologias de cenários de avaliação relacionados ao risco de ocorrência de incêndios ou modelos de propagação do fogo.

O PNI possui declividade com variação de 0 a 57°, com uma média de 20,2° (desvio padrão (σ) = 8,7°), que é representada através do mapa de declividade (Figura 17). A divisão utilizada para análise do mapa foi de 6 classes e o resultado mostra que existe uma concentração de áreas com declividade entre 0° a 20° no entorno do limite do PNI, principalmente na Parte Baixa. As áreas com declividade acima de 33° estão localizadas nos limites do município de Itatiaia e na Parte Alta do Parque, próximo ao Pico das Agulhas Negras.

TOMZHINSKI (2012) observa ainda que existem diversos autores que relacionam faixas de declividades com o risco de incêndios e, com isso, propõem limites para esses intervalos (Tabela 7). O autor verificou também que grande parte das faixas propostas na literatura são expressas em valores

percentuais de inclinação, portanto os mesmos foram transformados para graus a fim de serem comparados ao mapeamento.

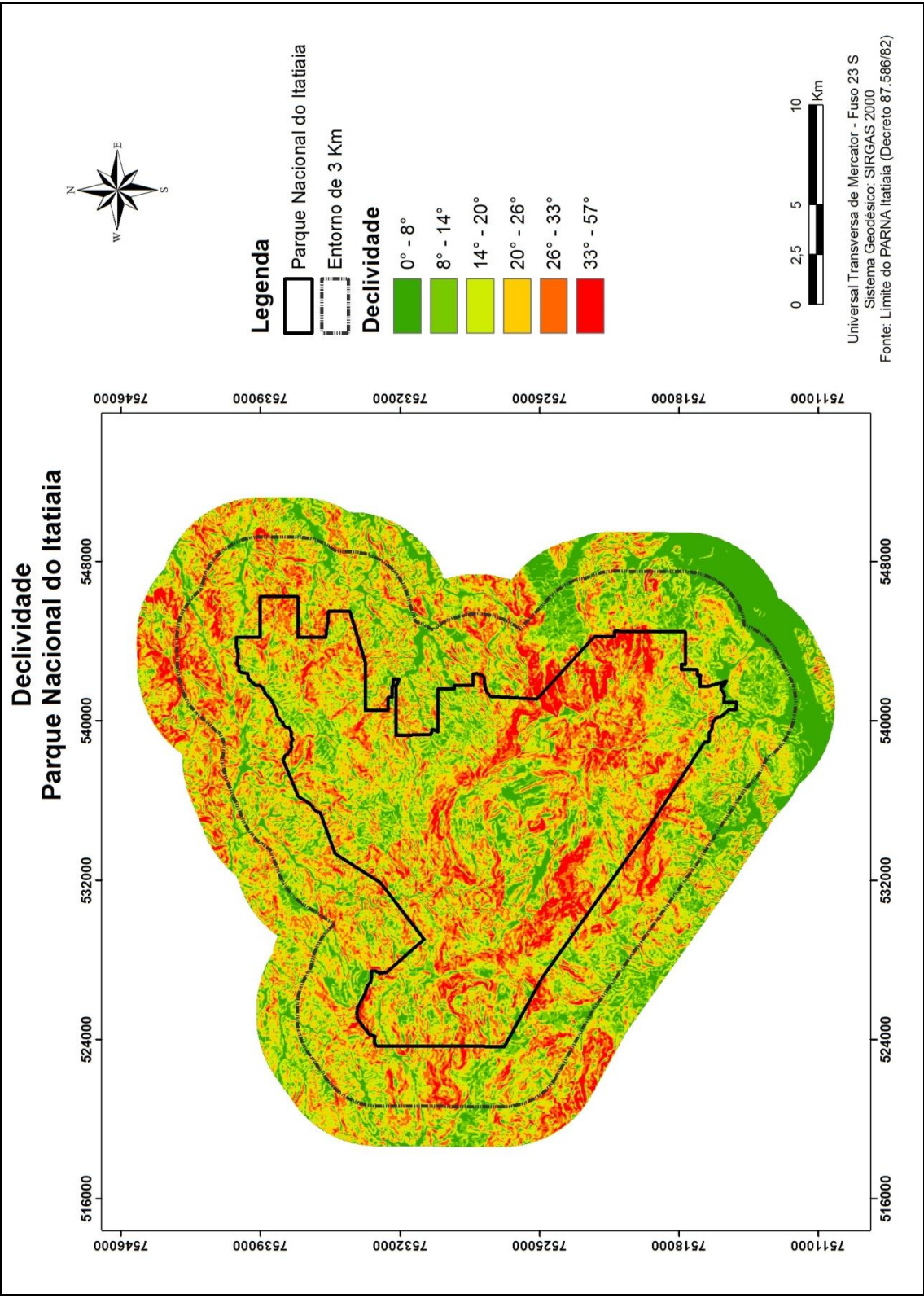


Figura 17. Mapa de declividade do PNI (TOMZHINSKI, 2012)

Tabela 7. Classes de declividade relacionadas ao risco de ocorrência de incêndios (TOMZHINSKI, 2012).

Risco/ Autor	Chuvieco & Congalton (1989)	Pezzopane et al. (2001)	Dalcumune & Santos (2005)	Koproski et al. (2011)
Baixo	0 a 6,83°	0 a 10°	0 a 6,83°	0 a 8,4°
Moderado	6,8 a 21,8°	10 a 20°	6,8 a 21,8°	8,5 a 13,9°
Alto	maior que 21,8°	maior que 20°	maior que 21,8°	14,0 a 19,2°
Muito Alto				19,3 a 24,2°
Extremo				maior que 24,2°

A Tabela 7 mostra que as classes de declividade indicadas pelos autores variam na quantidade de classes e valores estimados que foram convertidos em graus para comparação entre elas. KOPROSKI *et al.* (2011) utilizam 5 classes que variam de Baixo até Extremo Risco de Incêndios. Já os outros autores utilizam 3 faixas, sendo que PEZZOPANE *et al.* (2001) apresentam valores divididos a cada 10 graus, resultando em classe de Alto Risco para maior que 20°. Todos os autores concordam que o aumento da declividade resulta no aumento do risco aos incêndios florestais.

TOMZHINSKI (2012) verificou o comportamento da declividade através da utilização dos ROIs delimitados pelos brigadistas do PNI. Por meio da utilização da literatura existente e o auxílio da quebra natural dos valores encontrados para toda a área do PNI, verificou-se a distribuição dos incêndios dentro de sete faixas de declividade média (Tabela 8).

A tabela 8 possui as características das áreas queimadas representadas pelo limite dos ROI através das categorias expressas com base no tamanho dessas áreas conforme é apresentado na Tabela 5. Os resultados mostram que 48% do total de ROI estão relacionados em declividade média acima de 20°, sendo que observando o tamanho dos ROIs entre 10 a 500 ha (categoria “B”) esse valor atinge 52%. Isso mostra a influência da declividade durante os incêndios. Por outro lado, todas as ocorrências da categoria “A” (maior que 500 ha) estão na faixa de 16 a 20°, o que pode ser explicado pela sua localização

no Planalto da Agulhas Negras, que apresenta alta susceptibilidade aos incêndios em função também de outros fatores, como combustibilidade, forma das encostas e exposição à radiação solar.

Tabela 8. Distribuição do número de ROIs conforme a declividade média, segundo as classes de tamanho estabelecidas (TOMZHINSKI, 2012)

	A	B	C	Geral
Polígonos com declividade média até 8°	0 0%	2 8%	6 5%	8 5%
Polígonos com declividade média entre 8° e 12°	0 0%	6 24%	10 8%	16 11%
Polígonos com declividade média entre 12° e 16°	0 0%	3 12%	18 15%	21 14%
Polígonos com declividade média entre 16° e 18°	1 33%	5 20%	9 8%	15 10%
Polígonos com declividade média entre 18° e 20°	2 67%	1 4%	14 12%	17 12%
Polígonos com declividade média entre 20° e 24°	0 0%	4 16%	31 26%	35 24%
Polígonos com declividade média acima de 24°	0 0%	4 16%	31 26%	35 24%
Total	3	25	119	147

Os dados de declividade foram generalizados em duas categorias: até 16° e acima de 16°, os quais foram considerados respectivamente como classes de baixa e alta para a susceptibilidade à ocorrência de incêndios. Essa classificação foi definida por TOMZHINSKI (2012) através de análise da Tabela 8 que foi construída com base nos ROIs relacionados aos resultados da declividade. Diante disso, foi elaborado o mapa da Figura 18 que mostra a espacialização baseada nas duas classes de declividade.

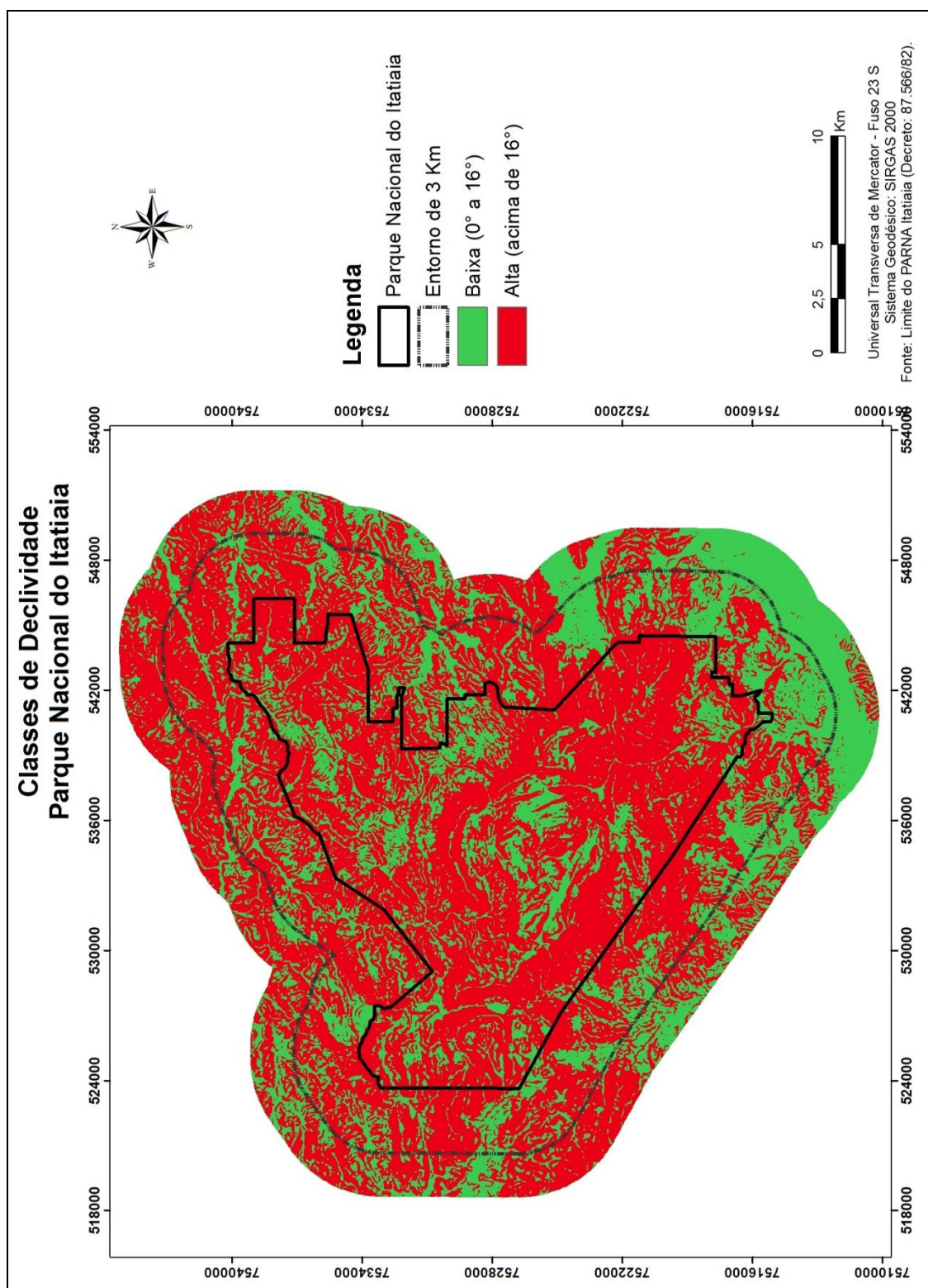


Figura 18. Mapa de declividade do PNI dividido em duas classes.

O limiar indicado no mapa da Figura 18 foi inserido em forma de gráfico (Figura 19) que mostra três resultados distintos baseados no limite de toda a

área de estudo, os ROIs analisados e as três maiores ocorrências de incêndios mais recentes registradas no PNI.

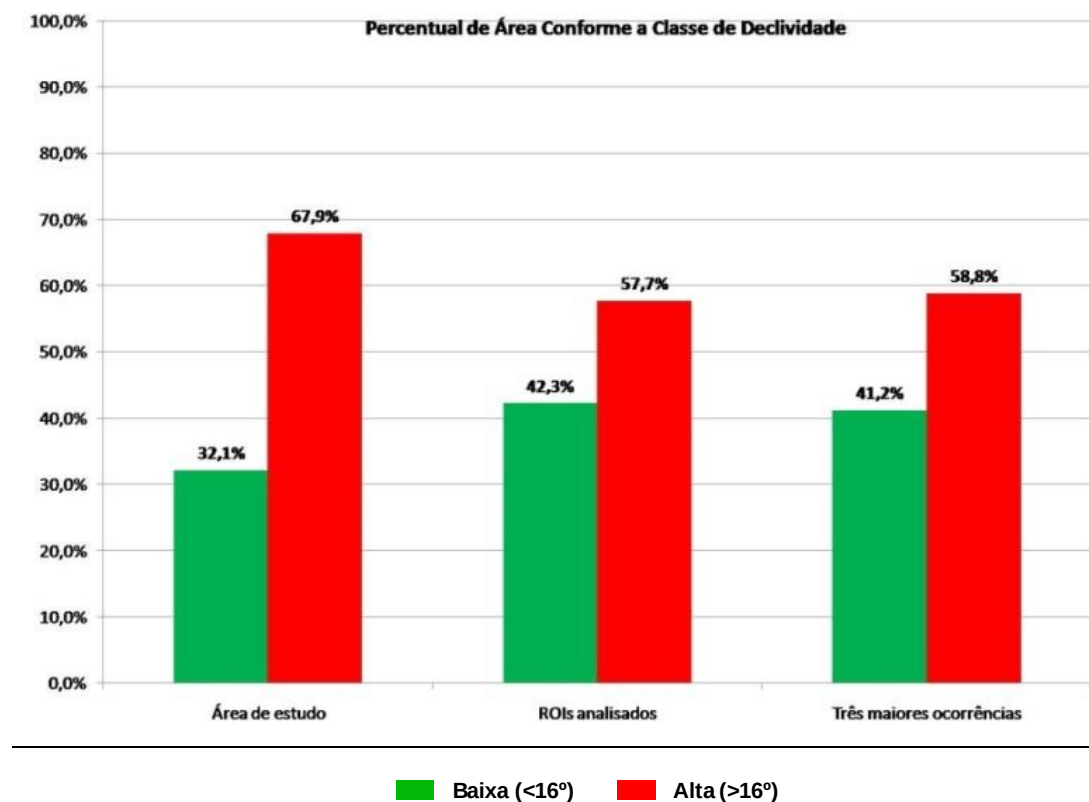


Figura 19. Gráfico comparativo do percentual de área das classes de declividade em relação a área de estudo, áreas queimadas e três maiores ocorrências (TOMZHINSKI, 2012).

O gráfico comparativo da Figura 19 torna possível analisar que apesar das áreas atingidas pelos incêndios serem maiores nos locais de alta declividade, a proporção entre alta e baixa declividade, seguindo o limiar de 16 graus, é menor do que na área de estudo como um todo. A provável explicação para esse fato é o relevo muito acidentado do PNI, que inclui muitas áreas acima de 28° caracterizadas por cobertura de florestas voltadas para a vertente sul ou áreas de rocha que foram pouco atingidas pelos incêndios. Essas áreas possuem condições pouco propícias para o espalhamento do fogo.

4.4. Comparação e avaliação das variáveis

Os resultados foram dispostos em um quadro geral (Tabela 9) que indica as características predominantes dos incêndios no PNI e que podem auxiliar o vento na propagação o fogo com maior ou menor intensidade. As variáveis identificadas nas áreas delimitadas pelo ROI apontam quais características possuem maior representatividade nas classes adotadas. Neste tópico foram adicionados os resultados também da relação das áreas queimadas com a altitude que é bastante presente no PNI.

Tabela 9. Quantidade de ROI por variável condicionada pela geomorfologia.

Variável condicionada pela Geomorfologia	Quantidade de ROI (Valores majoritários)			
Exposição à Radiação Solar	Alta	Média	Baixa	
	78	56	13	
Forma das encostas	Convexas	Planas	Côncavas	
	119	3	25	
Declividade	Acima de 20°	16° a 20°	8° a 16°	0 a 8°
	70	32	37	8
Altitude	Acima 2000 m	1000 m a 2000 m	Até 1000m	
	23	105	19	

A variável exposição à radiação solar foi separada em três faixas: alta (acima de 1834,5 WH/m²), média (1606,4 a 1834,5 WH/m²) e baixa (até 1606,3 WH/m²). Observa-se que a maior parte das ocorrências está localizada na classe alta com um total de 53% das ocorrências.

Nota-se que a variável forma das encostas define áreas predominantemente convexas e presentes majoritariamente em 119 áreas ou em 81% das áreas analisadas indicando a importância dessa variável e sua interferência no regime dos incêndios na área de estudo. Enquanto que as áreas planas possuem pouca representatividade mostrando que a inclinação

no terreno tem grande impacto no espalhamento do fogo como é percebido na variável declividade que aumenta o número de ROI em conjunto com a inclinação do terreno, concentrando 48% das ocorrências.

Em relação à variável declividade do terreno ocorre que ela se torna importante para o combate no momento da ocorrência dos incêndios no PNI, não resultando em variável com grande impacto de predição se comparada com a forma da encosta.

5. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA DE IMAGENS COM O MODELO 6S

As interações da radiação solar e da radiação refletida por alvos da superfície terrestre com constituintes da atmosfera interferem no processo de sensoriamento remoto, já que o espalhamento e a absorção ocasionam mudanças na direção de propagação ou perda de energia para outros constituintes atmosféricos (KAUFMAN, 1989). A interação da radiação com os alvos terrestres é complexa e os efeitos atmosféricos no trajeto da mesma até o sensor dificultam a extração de informações e interpretação dos dados da superfície (ANTUNES *et al.*, 2012).

Os procedimentos de correção atmosférica são realizados através de modelos de transferência radiativa ou através de métodos empíricos (MATHER, 1999). O método mais utilizado é o de subtração do valor do pixel mais escuro (CHAVEZ, 1988). De acordo com ANTUNES *et al.* (2003), neste método a correção atmosférica é realizada sem um embasamento físico que permita a aplicação em condições variadas tanto de superfície como de atmosfera.

A conversão dos números digitais (ND) que constituem as imagens para valores de parâmetros físicos como radiância ou reflectância tem como objetivo permitir a caracterização espectral de objetos, bem como a elaboração de cálculos que incluem dados de diferentes bandas espectrais ou de diferentes sensores. O valor de ND de uma imagem em uma banda específica não está na mesma escala de outro ND de outra imagem na mesma banda espectral. Isso traz como consequência a impossibilidade de comparação entre NDs de bandas diferentes, ainda que se trate de um mesmo sensor, bem como de sensores diferentes. A caracterização espectral de objetos também torna-se inviável (PONZONI *et al.*, 2012).

Por isso, a necessidade da conversão dos NDs para valores físicos, através do conhecimento de algumas características tanto do sensor orbital quanto das condições ambientais no momento em que as imagens foram adquiridas. Essa conversão se dá através da transformação dos NDs para Reflectância Bidirecional (RB) aparente e, isso torna possível a realização de operações aritméticas utilizando dados de imagens de diferentes bandas espectrais, para um mesmo sensor ou entre sensores diferentes em mesma escala dos novos parâmetros físicos expressos nos novos “NDs”.

Os modelos de transferência radiativa só devem ser aplicados sobre os valores de radiância aparente ou RB para que se minimize os efeitos da atmosfera sobre dados orbitais. Dentre estes modelos, destacam-se o *Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance Algorithm* (MODTRAN) e o 6S. Esses modelos oferecem opções variadas de entrada de dados provenientes da caracterização da atmosfera, principalmente em relação às concentrações de vapor d'água, O₃, profundidade óptica e tipo e concentração de aerossóis.

A principal vantagem da aplicação dos modelos de transferência radiativa é que eles consideram também o fenômeno de absorção da radiação eletromagnética, o que implica resultados frequentemente mais confiáveis quando o interesse é correlacionar os valores de RB presentes nas imagens com parâmetros geofísicos ou biofísicos de objetos existentes na superfície terrestre. Porém, a caracterização da atmosfera no momento da obtenção dos dados orbitais é uma tarefa difícil e custosa, que normalmente envolve diferentes profissionais e equipamentos de alto custo de aquisição e de manutenção. Apesar disso, é possível aplicar tais modelos adotando algumas condições de contorno e aproximações que têm garantido bons resultados em estudos que envolvem as correções mencionadas (PONZONI *et al.*, 2012).

Em qualquer dos métodos mencionados, o resultado final é a denominada reflectância de superfície, ou seja, assume-se que os RBs resultantes referem-se a estimadores de reflectância bidirecional dos objetos presentes na superfície terrestre, sendo possível a sua caracterização espectral.

5.1 Modelo 6S

O modelo 6S foi desenvolvido para a simulação do sinal de sensores remotos entre 0,25 μm a 4,00 μm (VERMOTE *et al.*, 1997). ANTUNES *et al.* (2003) realizaram a adaptação do modelo, que utiliza linguagem Fortran, para a correção atmosférica de imagens obtidas por sensores remotos.

O modelo 6S pode permitir a escolha da configuração geométrica de satélites específicos, como Landsat 5 e Landsat 7 e, atualmente foi implementado o AVNIR-2/ALOS (ANTUNES *et al.*, 2012). Os parâmetros de inserção dos dados incluem as condições de iluminação que são obtidas a

partir da data, hora e coordenadas da imagem. Além disso, os modelos de atmosfera e de aerossóis normalmente são escolhidos de um grupo de modelos pré-estabelecidos ou o usuário pode estabelecer as características da atmosfera através de sondagens. A Tabela 10 apresenta quais parâmetros foram inseridos para realização da correção atmosférica no modelo 6S.

Tabela 10. Parâmetros de correção atmosférica aplicados no modelo 6S para a imagem AVNIR-2.

Parâmetros de entrada	Valores utilizados
Condições geométricas do sensor	9 (AVNIR-2)
Mês, dia do mês, hora local, longitude decimal, latitude decimal	07 17 13.2699 -44.6228252 -22.3887063
Tipo de modelo de atmosfera gasosa	1 (tropical)
Tipo de modelo de aerossóis	1 (continental)
Visibilidade em km (concentração de aerossóis)	12
Altitude média do alvo em km (valor em negativo)	-1.53527
Marcador para altitude do sensor (-1000 para satélite)	-1000
Identificador da banda do sensor	68 a 71
Ganho e offset	1.0 0.0
Marcador para tipo de dado	4
Marcador para tipo de saída e marcador para aplicação de contraste linear	1 0
Número total de pixels da imagem	11616990

Os parâmetros de entrada descritos na Tabela 10 foram inseridos de acordo com a imagem AVNIR-2 do PNI que possui: a identificação do sensor orbital utilizado; as condições da data da aquisição, hora local e coordenadas; tipo de modelos de atmosfera gasosa e aerossóis; visibilidade horizontal para a concentração de aerossóis; altitude média do terreno que foi obtida por meio de modelo digital de elevação construído pelas curvas de nível, hidrografia e

pontos cotados de cartas topográficas do IBGE, conforme abordado no Capítulo 4. Além disso, deve-se indicar o tamanho da imagem em bytes que é referente ao número de pixels da imagem.

Os valores de ganho e offset representam os coeficientes de calibração radiométrica que indicam a intersecção e declividade da relação linear entre os valores de ND e a radiância. Devido ao tipo de processamento da imagem AVNIR-2/ALOS ser L1B2G, conforme os metadados e JAXA (2008), a imagem já possui os coeficientes de radiação e estão em radiância. Por isso, foram utilizados os valores de ganho e offset em 1,0 e 0,0 respectivamente.

5.2. Índices espectrais de vegetação

O desenvolvimento de relações funcionais entre as características da vegetação e dados coletados por sensoriamento remoto tem sido objetivo de diversos profissionais da área ambiental. Para minimizar a variabilidade causada por fatores externos, a reflectância espectral tem sido transformada e combinada em vários índices de vegetação; os mais comumente empregados utilizam a informação contida na reflectância dos dosséis referentes às regiões do vermelho e infravermelho próximo as quais são combinadas sob a forma de razões de bandas espectrais (PONZONI, 2001).

Dentre os índices de vegetação existentes destacamos o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) que foi proposto por ROUSE *et al.* (1973) e, tem sido o mais utilizado atualmente até pela sua inserção na construção de dados globais como no sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) disponível nos satélites NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Os valores do NDVI encontram-se no intervalo de -1 e +1 e o cálculo do NDVI encontra-se na equação 1.

$$NDVI = \frac{\rho_{IVP} - \rho_V}{\rho_{IVP} + \rho_V} \quad (1)$$

Onde: ρ_{IVP} = Reflectância na banda do infravermelho próximo; e
 ρ_V = Reflectância vermelho

Para a obtenção do NDVI foram utilizados os valores de reflectância da superfície, uma vez que a atmosfera interfere diferentemente nas duas bandas que compõem o índice, levando a erros quando se utiliza a reflectância aparente (ANTUNES *et al.*, 2012). O NDVI foi aplicado nas imagens AVNIR por meio do InterIMAGE (COSTA *et al.*, 2008), versão 1.32. Este procedimento utilizou o operador *NDVI Segmenter* que realiza o cálculo do NDVI visando auxiliar na realização de classificação por GEOBIA.

5.3. Metodologia

Os procedimentos metodológicos foram realizados em uma imagem do sensor AVNIR-2/ALOS (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer-type 2*) (Tabela 11) e os *softwares* utilizados foram PCI Geomatics, SPRING 4.3.3., ENVI 5.0 e InterIMAGE 1.32 que tornaram possível a obtenção dos resultados conforme verifica-se na Figura 20.

Tabela 11. Características do sensor AVNIR-2/ALOS (JAXA, 2008).

Bandas Espectrais/Comp. de onda (microns)	1: 0.42-0.50 (azul) 2: 0.52-0.60 (verde) 3: 0.61-0.69 (vermelho) 4: 0.76-0.89 (infravermelho próximo)
Resolução Espacial	10 m (nadir)
Largura da Faixa	70 km (nadir)
Sinal/Ruído	> 200
Função de Transferência de Modulação	Bandas 1 ~ 3: >0.25 Banda 4: >0.20
Nº. de Detectores	7000 / banda
Limite de Inclinação Lateral de Visada	+/-44° (direita/esquerda)
Resolução Radiométrica	8 bits

A imagem AVNIR-2/ALOS ortorretificada no *software* PCI Geomatics foi adquirida a partir dos estudos de TOMZHINSKI (2012) que indicou a

necessidade da correção atmosférica para o cálculo de índices espectrais. A correção atmosférica para esse sensor é pouco difundida entre os softwares comerciais o que torna difícil a realização desta tarefa.

A utilização do modelo 6S se deu a partir dessa necessidade e da implementação de módulo que foi avaliado por ANTUNES *et al.* (2012) tornando possível a correção de imagens do sensor AVNIR-2/ALOS. Diante disso, a imagem foi convertida para o formato RAW através do *software* SPRING 4.3.3 para entrada no modelo 6S. As imagens foram inseridas no modelo por bandas separadas seguindo os parâmetros de já descritos anteriormente baseados em dados fornecidos e observados.

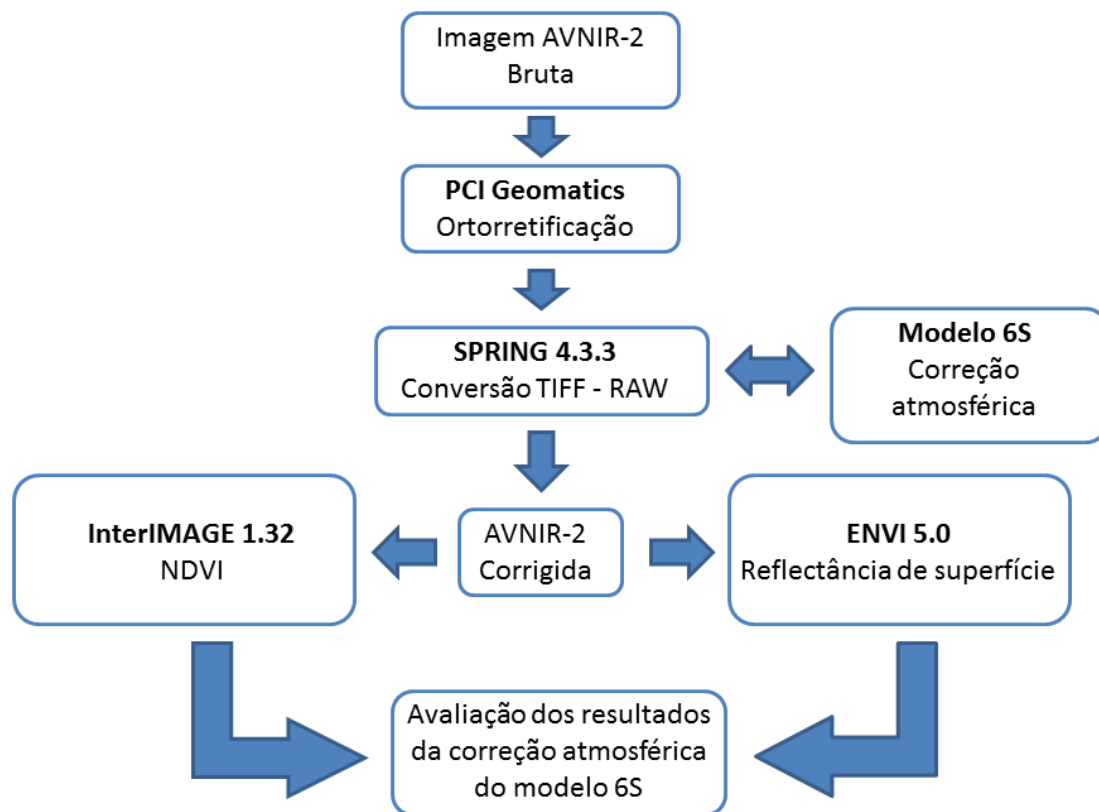


Figura 20. Fluxograma metodológico da correção atmosférica.

Após a correção atmosférica da imagem foram elaborados gráficos de reflectância da superfície de alvos de floresta, rocha e água com auxílio do *software* ENVI 5.0. Além disso, o *software* InterIMAGE 1.32 foi utilizado para verificação da mudança entre os valores do NDVI existentes nas imagens.

Esses procedimentos propiciaram a análise dos resultados que contaram com a comparação entre as imagens corrigida e não corrigida.

5.4. Resultados e discussões

Depois da metodologia aplicada foi realizada a análise dos resultados obtidos que indicam a importância da realização da correção atmosférica em imagens orbitais AVNIR-2 em que foram identificadas amostras de floresta, água e solo exposto. Essas amostras foram selecionadas através da identificação de pixels puros sinalizadores das classes. A Figura 21 apresenta os gráficos de reflectância elaborados através do software ENVI 5.0 para uma amostra de cada classe.

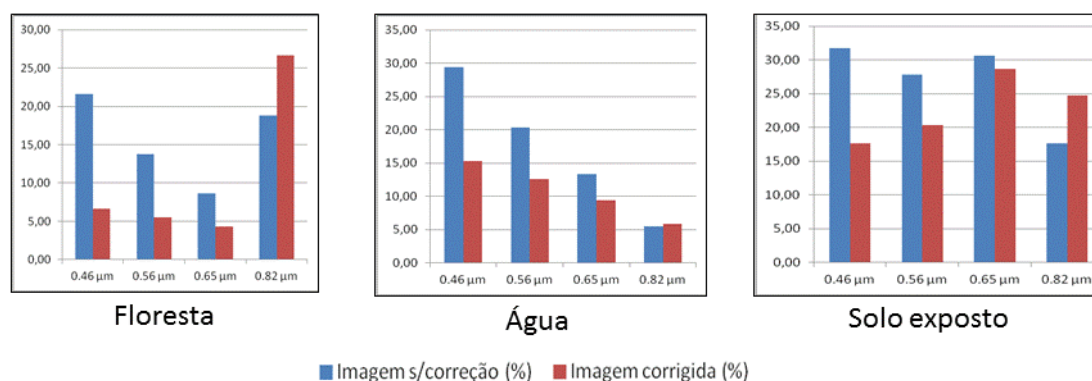


Figura 21. Reflectância bidirecional dos alvos de floresta, água e solo exposto.

As áreas de floresta tiveram comportamento semelhante ao apresentado na literatura em que são verificados os valores de reflectância decrescentes nas bandas do visível (azul, verde e vermelho) e um aumento na reflectância acima de 25% na faixa do infravermelho próximo. Em relação à resposta da água, as bandas do AVNIR-2 tiveram um comportamento semelhante à classe de floresta em relação à redução dos valores nas faixas do visível e um leve aumento no infravermelho próximo. Já em relação ao solo exposto, a característica de maiores valores de reflectância em comparação com as classes anteriores ocorreu.

Em geral, a imagem corrigida apresentou visualmente algumas melhorias em relação à imagem sem correção como pode ser observado no software InterIMAGE 1.32 que utilizou o operador de segmentação baseado

nos valores de NDVI (*NDVI Segmenter*) para identificação de áreas de floresta e, utilizando os mesmos valores baseados na imagem com correção atmosférica que foi comparada com a imagem não corrigida deparou-se com realidades bastante distintas como verifica-se na Figura 22.

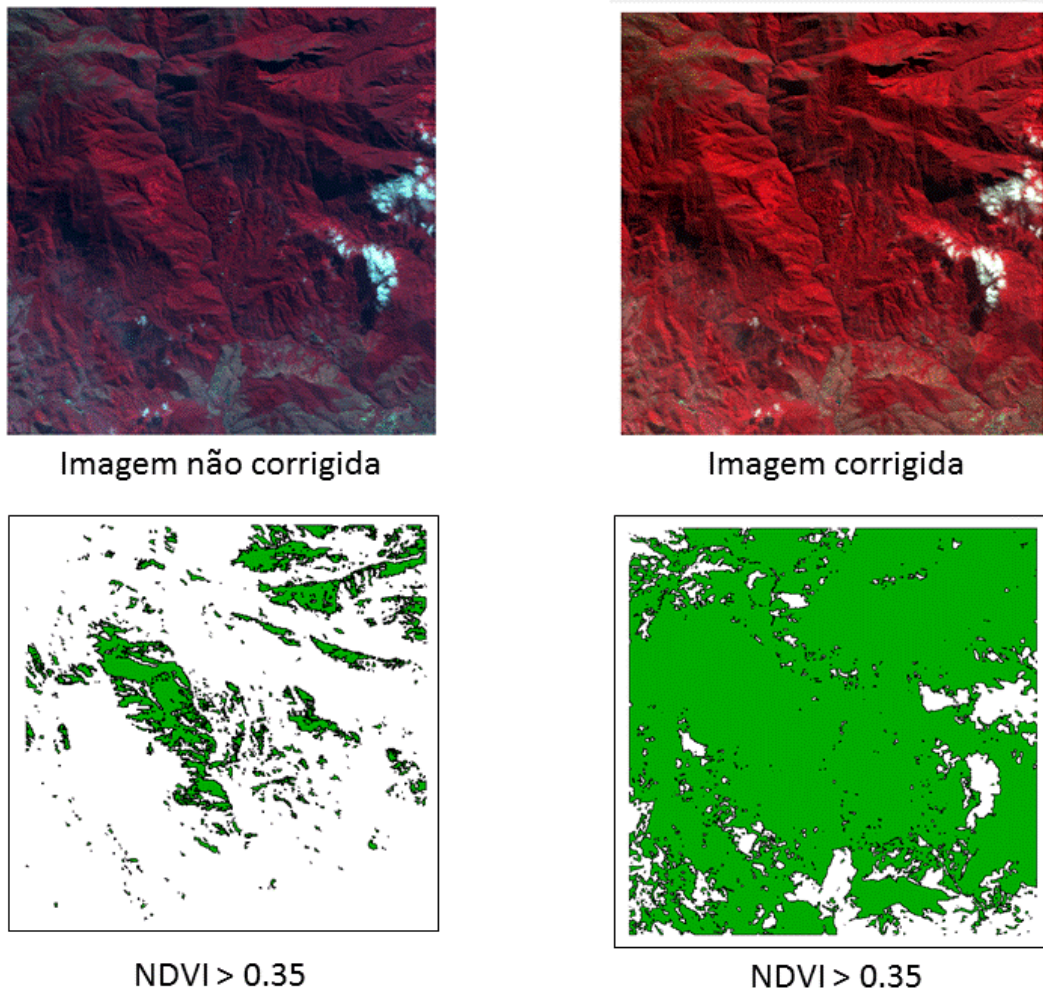


Figura 22. Comparação das imagens corrigida e não corrigida com base no NDVI para identificação de áreas de floresta. Composição colorida das imagens: R (Infravermelho), G (vermelho) e B (verde).

Ambas as imagens foram classificadas utilizando o mesmo valor de NDVI com o limiar acima de 0.35 que identificou áreas de floresta mais densa na vertente sul do PNI, próximo à área urbana do município de Itatiaia. O resultado gerou diferenças entre as duas imagens em que o valor utilizado para extração de classes realiza a identificação de áreas com cobertura vegetal, apesar da imagem corrigida apresentar resposta com menor restrição do que a

imagem não corrigida. Isso leva à conclusão da importância de utilização das imagens com correção atmosférica para que seja possível a utilização de aritmética de bandas, como é o caso da utilização do NDVI em que as bandas do vermelho e infravermelho próximo são utilizadas. Outra aplicação importante e que merece ser ressaltada é a comparação entre imagens com a mesma escala espectral para realização de estudos de dinâmica da paisagem.

6. MAPEAMENTO DA COBERTURA DA TERRA

Pela grande extensão de área e diversidade de fenômenos a serem observados no PNI, o Sensoriamento Remoto e suas aplicações, como o mapeamento da cobertura da terra, são considerados ferramentas importantes para estudos ambientais locais. Neste sentido, a elaboração de um mapeamento da cobertura da terra se torna um elemento de grande relevância no planejamento e gestão das Unidades de Conservação (PINHEIRO e KUX, 2005).

Além do desenvolvimento na aquisição de imagens por Sensoriamento Remoto que apresentam melhores resoluções, abrangência de locais e mais satélites disponíveis, existem softwares para a interpretação dessas imagens, para a produção de mapas temáticos que compreendem melhor a área de estudo, possibilitando o mapeamento de cobertura da terra, controle ambiental, pesquisas sobre vegetação, entre outros estudos (COSTA *et al.*, 2008; SOUSA *et al.*, 2012).

A aquisição gratuita de imagens de satélites democratizou a pesquisa em Sensoriamento Remoto no Brasil. Ressaltam-se como exemplos as iniciativas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) ou, na redução de custos através de acordos internacionais como foi o caso do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com subsídios para aquisição de imagens do satélite japonês ALOS. Além desses incentivos existem os softwares livres para a classificação e interpretação de imagens como o SPRING, desenvolvido pelo INPE além do *software* InterIMAGE que dá a possibilidade do usuário inserir outras ferramentas de acordo com a necessidade e conhecimento de programação.

6.1. Materiais e Métodos

Para o mapeamento da cobertura da terra, foi utilizado uma imagem do sensor AVNIR-2/ALOS em conjunto com um modelo digital de elevação (MDE) gerado a partir de curvas de nível, pontos cotados e hidrografia adquiridos de cartas topográficas em escala 1:50.000.

A imagem selecionada para o estudo é datada de 17 de julho de 2009 (Figura 23), com a extensão de 3258 x 3480 pixels, referente ao limite do PNI e área de ampliação de 5km no entorno. A imagem foi ortorretificada por

TOMZHINSKI (2012) e a correção atmosférica foi realizada através do modelo 6S como relatado no capítulo 5.

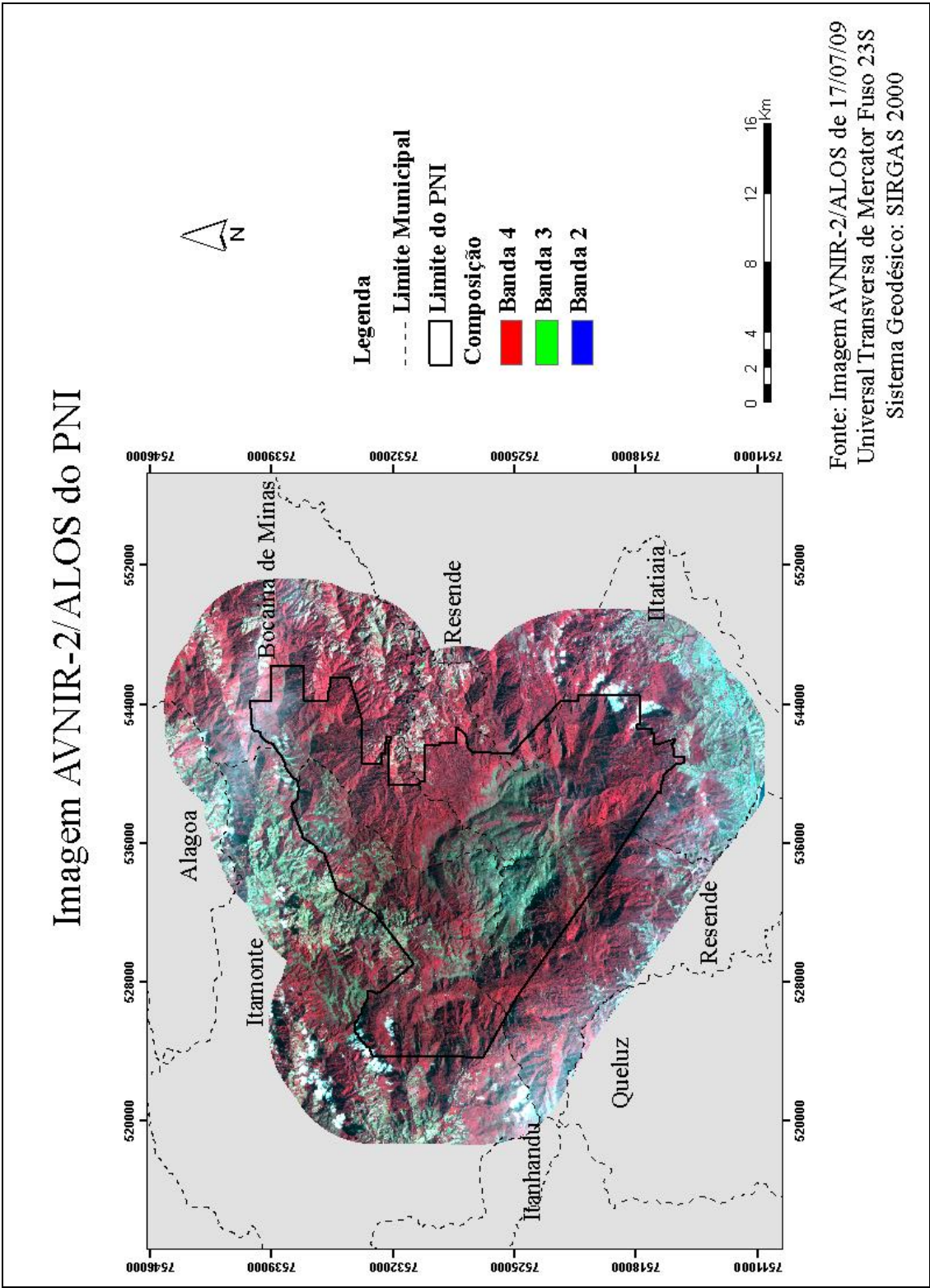


Figura 23. Carta Imagem da área do PNI com 5 km de ampliação dos limites.

A rede semântica elaborada para a classificação foi dividida em dois projetos denominados “Projeto 1” e “Projeto 2” executados no *software* InterIMAGE visando um melhor resultado de processamento nas etapas de seleção das áreas (Figura 24). O Projeto 1 apontou as três classes principais identificadas na imagem que abrangem Vegetação, Não vegetação e Sombra. Já o Projeto 2 realizou a subdivisão das classes de Não vegetação que serão descritas posteriormente.

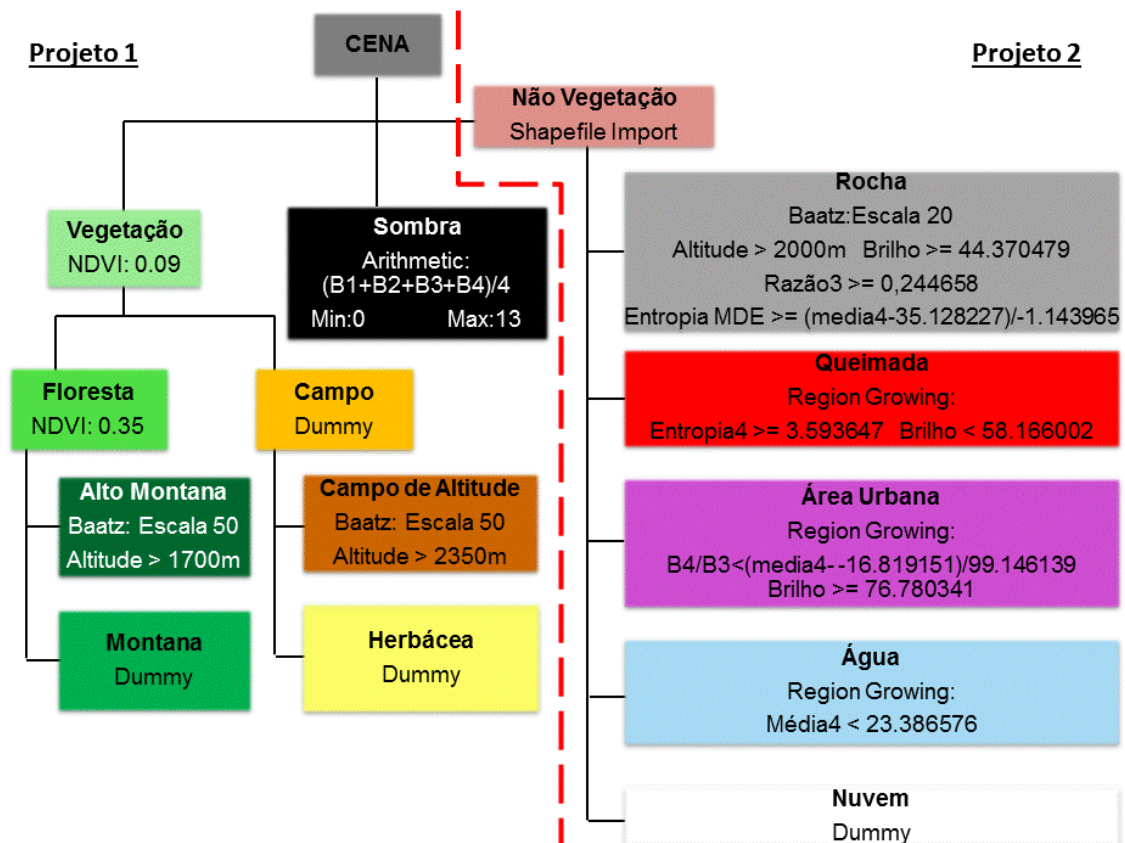
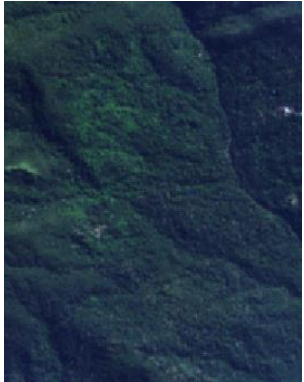
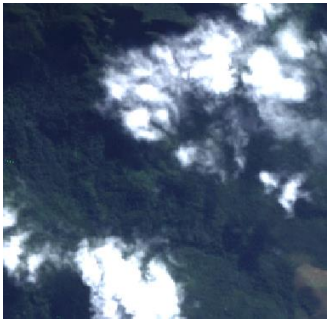
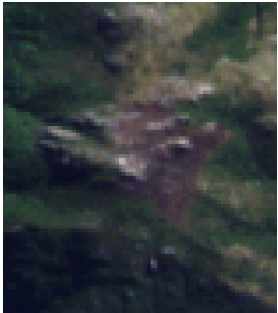


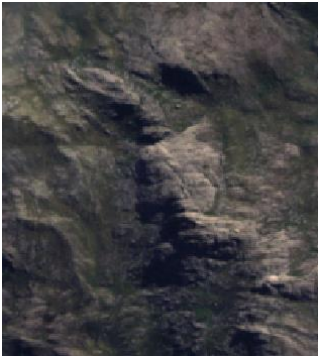
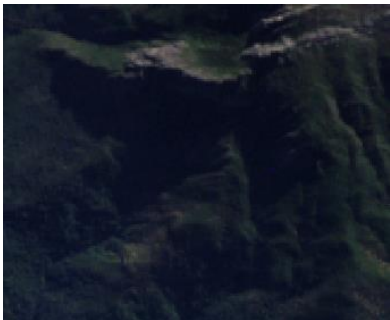
Figura 24. Rede semântica elaborada para o estudo.

Visando melhor identificação das classes foram realizados dois trabalhos de campo realizados em setembro de 2011 e setembro de 2012 para construção da chave de classificação que encontra-se melhor detalhada na tabela 12.

Tabela 12. Chave de classificação utilizada (Imagem AVNIR-2, composição R(3), G(2), B(1)).

Nome da Classe	Definição
Água 	Lagos ou reservatórios.
Alto Montana 	Floresta ombrófila densa acima de 1700m, formação arbórea com aproximadamente 20 m de altura.
Área Urbana 	Áreas de uso intensivo, estruturadas por edificações e sistema viário, onde predominam superfícies artificiais não-agrícolas.
Campo de Altitude 	Apresenta uma ampla variedade de fisionomias, desde áreas abertas cobertas por gramíneas, a habitats com adensamento de arbustos e pequenas árvores, com ou sem a presença de afloramentos rochosos.

Herbácea 	Vegetação rala e rasteira composta de gramíneas em seu estrato inferior.
Montana 	Floresta ombrófila densa, formação arbórea com aproximadamente 20 m de altura, situadas entre 400m a 1700m de altitude.
Nuvem 	Mancha branca com alto poder refletivo na região visível.
Queimada 	Área desmatada por ocorrência de incêndio.

Rocha 	Exposição natural em superfície, de rocha ou mineral, bem como, quaisquer outras exposições acessíveis à observação humana.
Sombra 	Área sombreada por relevo indicando encosta íngreme e/ou abaixo de nuvens.

Fonte: IBGE (2012) e observações de campo.

Foram utilizados padrões de classificação, como média de bandas, entropia, brilho e outras operações para divisão das classes. A classificação contou com o uso da ferramenta *Analysis Explorer* que auxiliou a identificação das classes de áreas não vegetadas.

A rede semântica verificada na Figura 24, foi dividida em dois projetos visando a otimização da classificação. No Projeto 1, utilizou-se o operador de segmentação baseado no NDVI (*TA_NDVI Segmenter*) para separar as áreas de vegetação com valor de NDVI maior que 0.09. As áreas de vegetação delimitadas foram subdivididas nas classes de floresta e campo também por meio do segmentador baseado no NDVI através do limiar maior que 0.35. Posteriormente, nova subdivisão foi realizada através das classes de floresta ombrófila alto montana e montana nas áreas de floresta por meio da construção de árvore de decisão (*decision tree*); e campo foi dividido em campo de altitude e herbácea. Para a classe de Alto Montana foi utilizada a altitude de 1700 metros baseado nos estudos de BRADE (1956) e para campo

de altitude foi utilizado o valor de 2350 metros conforme observado nos trabalhos de campo.

A classe de sombra foi identificada a partir da utilização do operador *Arithmetic* em que foi inserida a média aritmética das quatro bandas do sensor AVNIR-2 e a seleção das áreas ocorreu com o resultado entre 0 a 13 que indicam o limiar mínimo e máximo encontrado que resultou na extração dessas áreas. A classe denominada como Não Vegetação representam as áreas que não foram classificadas como Vegetação e Sombra.

O Projeto 2 inicia-se a partir do operador de importação de arquivos *shape* (*TA_Shapefile_import*) referente ao resultado de não vegetação proveniente do resultado das áreas não classificadas no projeto 1. A subdivisão dos nós da rede semântica indicaram as classes de área urbana, queimada, nuvem, rocha e água conforme pode ser visto na figura 24. Para este projeto foram utilizados os operadores *Baatz* (*TA_Baatz Segmenter*) e de crescimento de regiões (*TA_Region Growing*) que foram responsáveis pela segmentação. A classe rocha utilizou o segmentador *Baatz* e a árvore de decisão com atributos de brilho, média da banda 4 e entropia do modelo digital de elevação. Para a classe água realizou a segmentação através do operador de crescimento de regiões e árvore de decisão com atributos de brilho e média da banda 4, que por meio da análise de histograma gerado no *Scatter Plot*, foi possível associar os dois atributos para uma melhor classificação da água. Os detalhes de cada classe indicada no mapa de cobertura da terra podem ser observados na tabela 13.

Tabela 13. Operadores e atributos utilizados para a classificação.

Classe	Dados	Operadores	Atributos/Parâmetros
Vegetação	AVNIR-2	<i>NDVI Segmenter</i>	Limiar > 0.09
Floresta	AVNIR-2	<i>NDVI Segmenter</i>	Limiar > 0.35
Alto Montana	AVNIR-2; MDE	<i>Baatz Segmenter</i>	Escala: 50; MDE > 1700
Montana	AVNIR-2	<i>Dummy Topdown</i>	Não foi inserida nenhuma regra.
Campo	AVNIR-2	<i>Dummy Topdown</i>	Não foi inserida nenhuma regra.
Campo de Altitude	AVNIR-2; MDE	<i>Baatz Segmenter</i>	Escala: 50; MDE > 2350
Herbácea	AVNIR-2	<i>Dummy Topdown</i>	Não foi inserida nenhuma regra.
Não Vegetação	Shapefile	<i>Shapefile Import</i>	Nome de algum atributo na tabela
Área Urbana	AVNIR-2	<i>Region Growing Segmenter</i>	Brilho ≥ 49.725015
Queimada	AVNIR-2	<i>Region Growing Segmenter</i>	NDVI $\geq$ (media banda 3- 54.000067)/240.671262; Media banda 3 ≥ 39.152284 ; Brilho < 48.859137
Nuvem	AVNIR-2	<i>Baatz Segmenter</i>	Escala: 20; Entropia banda 3 $\geq$ 3.918409; Media banda 4 $\geq$ 69.892918; Brilho ≥ 65.278042
Rocha	AVNIR-2	<i>Baatz Segmenter</i>	Escala: 20; Brilho < 11.609271; Media Banda 4 < 92.657360; Entropia MDE
Água	AVNIR-2	<i>Region Growing Segmenter</i>	Brilho $\geq$ (media banda4- 12.512115)/0.407833; Brilho ≥ 29.126023 ; Media banda 4 ≥ 18.923858
Sombra	AVNIR-2	<i>Arithmetic</i>	Media aritmética das 4 bandas e limiar entre 0 e 13

6.2. Resultados e Discussão

A classificação no InterIMAGE resultou no mapa temático que pode ser observado na Figura 25. A partir de uma avaliação qualitativa podemos avaliar que a metodologia de classificação em duas etapas propiciou uma separação satisfatória das classes de cobertura da terra existentes na imagem AVNIR-2/ALOS.

A divisão entre as áreas de vegetação e não vegetação através do segmentador baseado no NDVI apresentou boa separação destas classes. Na identificação das classes pertencentes às áreas de vegetação, o operador *Baatz* com atributo, extraído do MDE propiciou a divisão entre as classes de floresta montana e alto montana, além das áreas de campo de altitude e vegetação herbácea que foram identificadas com a inserção desses parâmetros na árvore de decisão de cada classe correspondente.

Os índices *Kappa* (CONGALTON & GREEN, 2009) e de exatidão global foram calculados através do auxílio de um fotointérprete que identificou 218 amostras com base na imagem AVNIR-2 e em experiências de campo. A construção das amostras ocorreu mediante a elaboração de arquivo de pontos que foram extraídos aleatoriamente. O resultado da classificação manual dos pontos sobrepostos à imagem AVNIR-2 foram comparados com a classificação realizada no InterIMAGE gerando uma matriz de confusão (Tabela 14) e elaboração dos índices.

O índice *Kappa* teve resultado de 0,77 que é classificado por LANDIS & KOCH (1977) como muito bom, enquanto a exatidão global indicou o valor de 80,3% que traz a possibilidade de entendimento de quais amostras foram coincidentes com os resultados da classificação. Por meio da Tabela 14 observa-se as classes que apresentaram conflito entre si.

As classes que apresentaram os melhores resultados foram água e floresta montana que ficaram acima de 95,2%. A classe de floresta alto montana apresentou o resultado com menor percentual (68,4%) devido a confusão com a floresta montana que ocorreu devido ao critério de separação com altitude. As áreas classificadas como queimada, área urbana e rocha tiveram percentual de exatidão por classe bastante semelhante em 85,7%, 84,4% e 83,9% respectivamente.

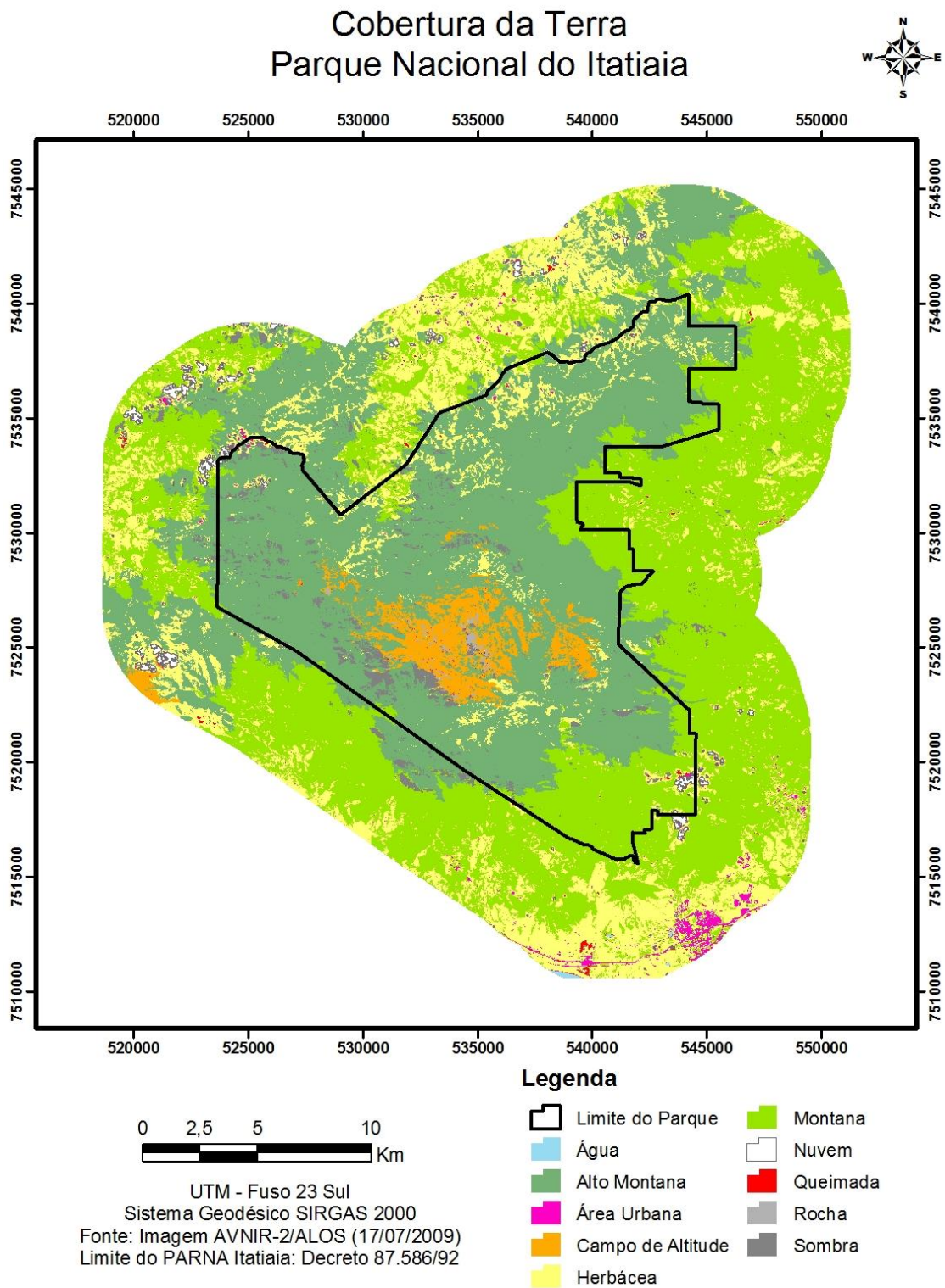


Figura 25. Mapa de cobertura da terra - resultado da classificação.

Tabela 14. Matriz de confusão.

Fotointérprete Classificação								
	Queimada	Área Urbana	Montana	Alto Montana	Herbácea	Campo de Altitude	Rocha	Água
Queimada	6	0	0	0	4	0	0	0
Área Urbana	1	27	0	0	2	0	0	0
Montana	0	0	20	12	3	0	0	0
Alto Montana	0	0	1	26	1	0	0	0
Herbácea	0	4	0	0	36	0	1	0
Campo de Altitude	0	0	0	0	2	27	4	0
Rocha	0	1	0	0	0	7	26	0
Água	0	0	0	0	0	0	0	7
Exatidão por classe (%)	85,7	84,4	95,2	68,4	75,0	79,4	83,9	100

Campo de altitude e herbácea são classes que utilizaram o NDVI para se diferenciarem de floresta montana e alto montana e também contaram com o recurso da altitude com valor de 2350 metros. A classe de campo de altitude teve confusão com as áreas de rocha existentes no Planalto do Itatiaia e atingiu o percentual de exatidão por classe em 79,4%. Já a classe de vegetação herbácea confundiu-se com queimada, floresta montana, floresta alto montana e área urbana devido a proximidade com essas classes chegando ao valor de 75,0% de acerto na comparação entre a classificação e a análise do fotointérprete.

O software InterIMAGE apresentou resultados promissores de classificação. Para a definição de vegetação mostrou-se resultados satisfatórios devido à eficácia demonstrada pelo segmentador baseado no NDVI. As classes conflitantes foram editadas manualmente. A classificação de

modo geral indicou bons resultados, podendo o tipo de estudo ser aplicado para outras UCs, a fim de fornecer subsídios para controle e monitoramento.

O processo de classificação atingiu os objetivos, mostrando que o InterIMAGE é um *software* indicado para a interpretação de imagem e que encontra-se em constante desenvolvimento e aperfeiçoamento, tendo melhorias regularmente.

Houve ainda visita a campo no mês de setembro de 2012 para validação das áreas e melhoria dos modelos adotados, bem como a correção de alguns dados como altimetria relativa das áreas de campo de altitude, e também a inserção de outros dados. Diante disso conclui-se que os resultados gerados foram positivos dentro da escala do mapeamento.

7. MINERAÇÃO DE DADOS PARA OBSERVAÇÃO DE ÁREAS DE ALTO E BAIXO SOI

As técnicas de classificação de imagens em Sensoriamento Remoto encontram-se em constante evolução através de novos sensores lançados e a implementação de novas metodologias de acordo com as necessidades da área ambiental e de seus especialistas. A análise geográfica tem propiciado um suporte cada vez mais relevante em função da rapidez na coleta dos dados e da amplitude de observação em diferentes escalas cartográficas (SOUZA, 2012).

Durante a maior parte de sua história, o campo da Geografia tem operado em um ambiente com escassez de dados, pois no início a informação geográfica era difícil de capturar, armazenar e integrar. A maioria das informações na pesquisa geográfica tem sido alimentada por um avanço tecnológico na obtenção e manipulação de dados geográficos (incluindo os mapas, Sensoriamento Remoto, Sistema Global de Navegação por Satélite – GNSS e Sistema de Informações Geográficas – SIG). A grande disponibilidade de dados digitais geográficos e georreferenciados existentes atualmente é a mudança mais radical ao longo da história da informação geográfica para a pesquisa (LEUNG, 2010).

O tipo de conhecimento que se pretende desvendar a partir de dados espaciais pode ser sobre o uso e cobertura da terra em imagens de Sensoriamento Remoto, os *hot spots* de doenças infecciosas, padrões de distribuição de zonas sísmicas, formas irregulares ou regulares da geometria espacial dos objetos baseado em dados vetoriais, e as estruturas hierárquicas em bancos de dados relacionais (LEUNG, 2010).

Diante disso, é importante a utilização da mineração de dados para obtenção mais adequada de respostas para a definição de variáveis que visam à geração de conhecimento para fenômenos ambientais. O exemplo a ser abordado é a realização da conjugação de determinadas variáveis ambientais que visam à inserção de pesos para um melhor entendimento do fenômeno da susceptibilidade à ocorrência de incêndios.

O resultado da conjugação das variáveis através dos pesos propicia a geração de um índice que determina a susceptibilidade à ocorrência de incêndios que é gerado por meio de dados adquiridos em campo e, que

buscam, atingir a aproximação da realidade do fenômeno dos incêndios através da construção do conhecimento com o auxílio da mineração de dados.

7.1. Materiais e métodos

A metodologia aplicada consiste em três etapas que foram divididas em dados de entrada, métodos e resultados alcançados como é demonstrado no fluxograma metodológico (Figura 26).

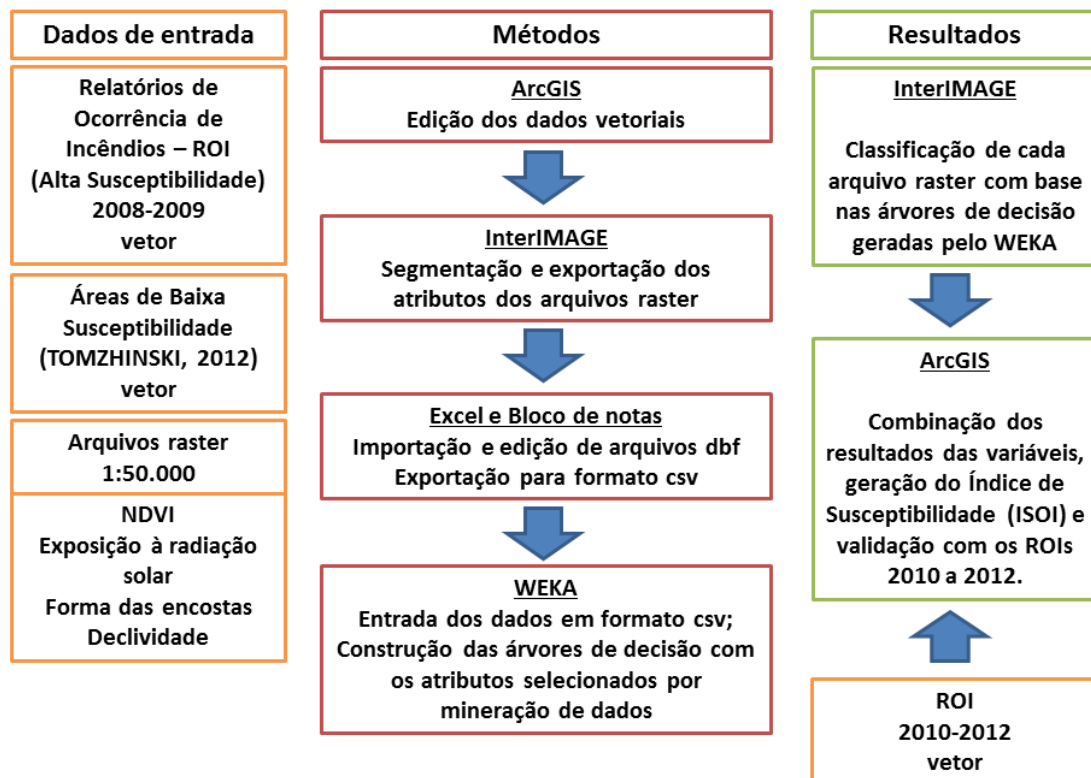


Figura 26. Fluxograma metodológico da mineração de dados

7.1.1. Dados de entrada

Os dados de entrada consistem na construção de amostras de áreas de alta e baixa susceptibilidade à ocorrência de incêndios (SOI). Para a construção dos dados de alto SOI foram considerados os limites das áreas queimadas identificadas em campo por meio dos Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI). As áreas consideradas como baixo SOI foram extraídas a partir do mapeamento da SOI realizado por TOMZHINSKI (2012) que observou variáveis geoecológicas. Além disso, foram utilizados produtos extraídos do MDE e da imagem AVNIR-2/ALOS, adquirida em julho de 2009.

O MDE foi construído através do uso de curvas de nível, pontos cotados e a hidrografia, na escala 1:50.000, conforme descrito no Capítulo 4, que gerou um modelo hidrológicamente consistente e, que possibilitou a extração de dados de forma das encostas, exposição à radiação solar e declividade. Outra variável utilizada foi a combustibilidade que é identificada através do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI, que foi gerado através das bandas do vermelho e infravermelho próximo. As bandas utilizadas foram adquiridas da imagem do sensor AVNIR-2/ALOS com correção atmosférica realizada pelo modelo 6S. Os procedimentos para a geração da imagem NDVI foram aplicados no software ENVI 5.0.

7.1.2. Métodos

Os dados foram editados para a inserção no *software* de mineração de dados WEKA por meio da aplicação *Explorer*. A etapa de seleção foi dividida entre as áreas de alta e baixa susceptibilidade. Os dados de ROI utilizados correspondem aos anos de 2008 e 2009 e visam à calibração de alta susceptibilidade. As áreas selecionadas passaram por edição manual devido ao posicionamento e extensão de alguns dos registros de incêndio que estavam próximos e poderiam gerar alguma inconsistência como a duplicação de dados.

Os procedimentos adotados para a extração dos dados ocorreram através da edição dos polígonos de ROI. Neste caso, optou-se por inseri-las no InterIMAGE para verificação do comportamento durante a segmentação baseada nos limites do arquivo *shape*.

Em alguns casos, observou-se a duplicação de alguns registros verificados durante o processo de exportação dos resultados da segmentação baseada nas áreas de ROI. Além disso, é importante ressaltar as diferenças entre os tamanhos das áreas queimadas que é bastante heterogêneo. Através desse resultado, optou-se pela edição manual dos polígonos por meio da identificação do centroide gerado em formato de ponto e, a geração da área ampliada (*buffer*) em 25 metros visando à uniformização das áreas para a extração de atributos (Figura 27).

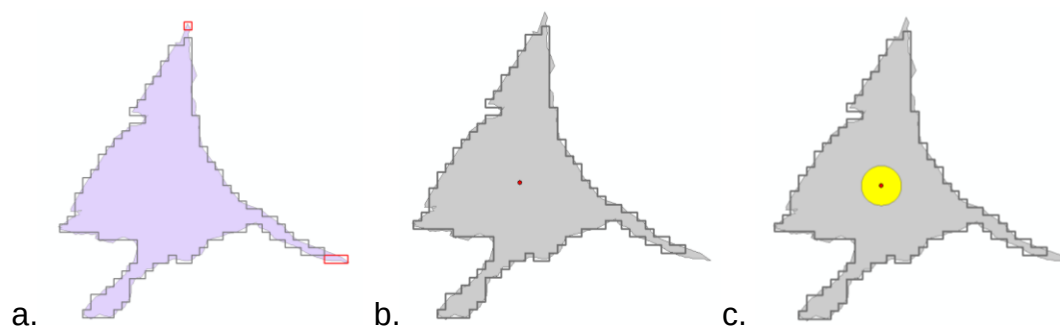


Figura 27. Área de ROI utilizada para extração de dados de alta susceptibilidade. a) Em vermelho, áreas excluídas após a segmentação e duplicação de dados; b) Identificação de centroide do polígono (ponto vermelho); c) Criação de polígono a partir do centroide com ampliação de 25 metros (círculo amarelo).

O procedimento adotado busca uniformizar os dados existentes para cada amostra em relação às variáveis utilizadas para a construção da susceptibilidade. Esse procedimento de edição foi realizado para as áreas de alta susceptibilidade adquiridas por meio dos dados de ROI e, também para as áreas de baixa susceptibilidade. No caso de baixa susceptibilidade houve a necessidade de aproximar o mesmo número de amostras entre as duas classes, evitando alguma tendência nos resultados.

A segmentação por meio da utilização de arquivo *shape* gera resultados com delimitação espacial diferente do arquivo original. O resultado é uma exportação de uma grade de pixels (arquivo *raster*) que propicia limites distintos aos apresentados pelo arquivo *shape* inserido. Diante disso torna-se necessário na aquisição de dados para o WEKA que seja realizado por amostras semelhantes e que representem pequenas áreas (Figura 28) que indicam atributos mais homogêneos.

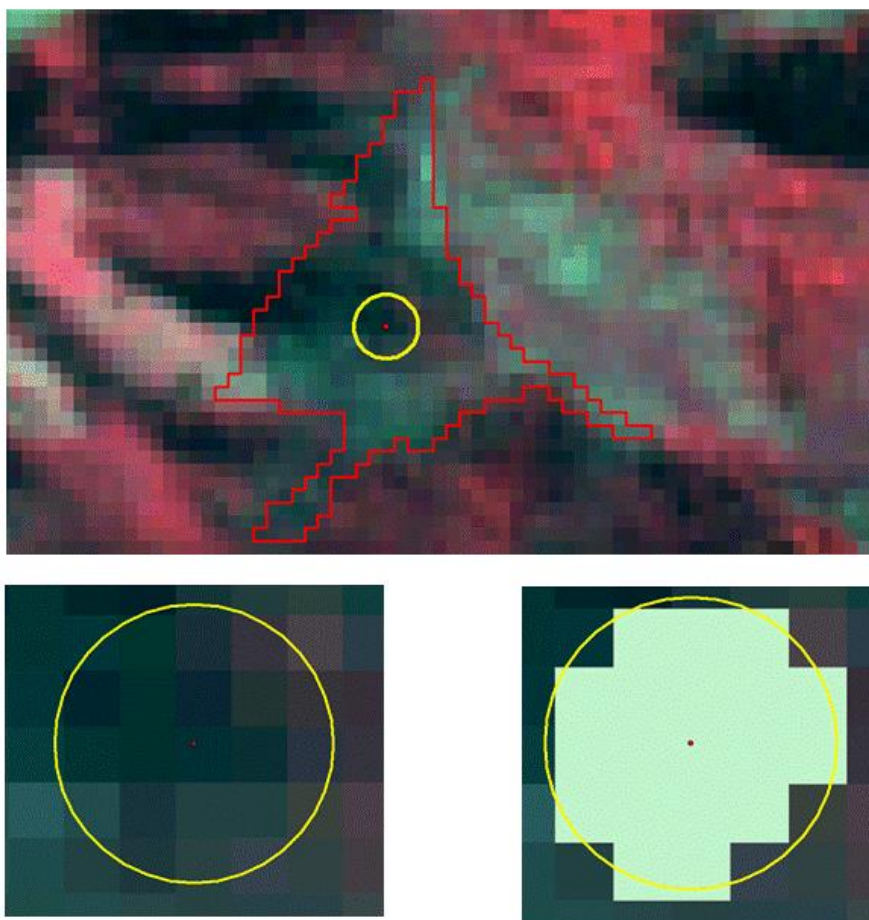


Figura 28. Resultado de amostras construídas pelo InterIMAGE para exportação de atributos para o WEKA.

Os atributos foram extraídos dos arquivos de NDVI, exposição à radiação solar, forma das encostas e declividade em projetos individuais para cada uma dessas variáveis. O procedimento realizado no InterIMAGE utilizou as amostras como segmentos e a exportação dos atributos seguiu a ordem existente na Tabela 15.

Tabela 15. Lista dos atributos extraídos com auxílio do InterIMAGE para cada amostra.

Nome do atributo	Definição
Amplitude (amplitude value)	Representa a diferença entre os valores de pixel máximo e mínimo de um objeto para um segmento.
Entropia (entropy)	Medida estatística aleatória que pode ser usada para descrever algumas características de textura. Maior aleatoriedade dos dados leva a maiores valores de entropia.
Máximo valor do pixel (maxPixelValue)	O valor de pixel máximo encontrado dentro de um segmento.
Média (mean)	A média de valores de pixels dentro de um segmento.
Mínimo valor do pixel (minPixelValue)	O valor de pixel mínimo encontrado dentro de um segmento.
Moda (mode)	Representa o valor mais frequente entre um conjunto de valores.
Razão (ratio)	Representa a quantidade que a imagem contribui para o brilho total de um segmento.
Desvio Padrão (standardDeviation)	Representa o grau de dispersão numérica de dados em torno da média.
Soma dos pixels (sumPixelValue)	Representa a soma de todos os valores dos elementos dentro de uma área de um segmento.
Variância (variance)	Semelhante ao desvio padrão, a variância também representa o grau de dispersão de dados numéricos em torno da média, mas na escala original dos valores.

Fonte: Adaptado de InterIMAGE (2011).

A extração dos atributos de cada uma das variáveis propiciou um total de 40 atributos para posterior exportação desses dados de cada uma das 157 amostras inseridas no WEKA. Após a exportação dos atributos das amostras ocorreu a edição e preparação da tabela em formato dbf adquirida do formato *shape* gerado que foi inserida no Microsoft Excel. No Microsoft Excel, a edição da tabela foi realizada e concluída com a exportação para o formato csv que foi adotado para inclusão desses dados no WEKA.

7.1.2.1. Entrada de dados no software WEKA

A utilização do software WEKA ocorre através de arquivos de entrada com a extensão *.arff ou *.csv. No caso deste trabalho optou-se pelo formato csv para a construção das árvores de decisão (Figura 29) elaboradas a partir de um banco de dados de amostras.

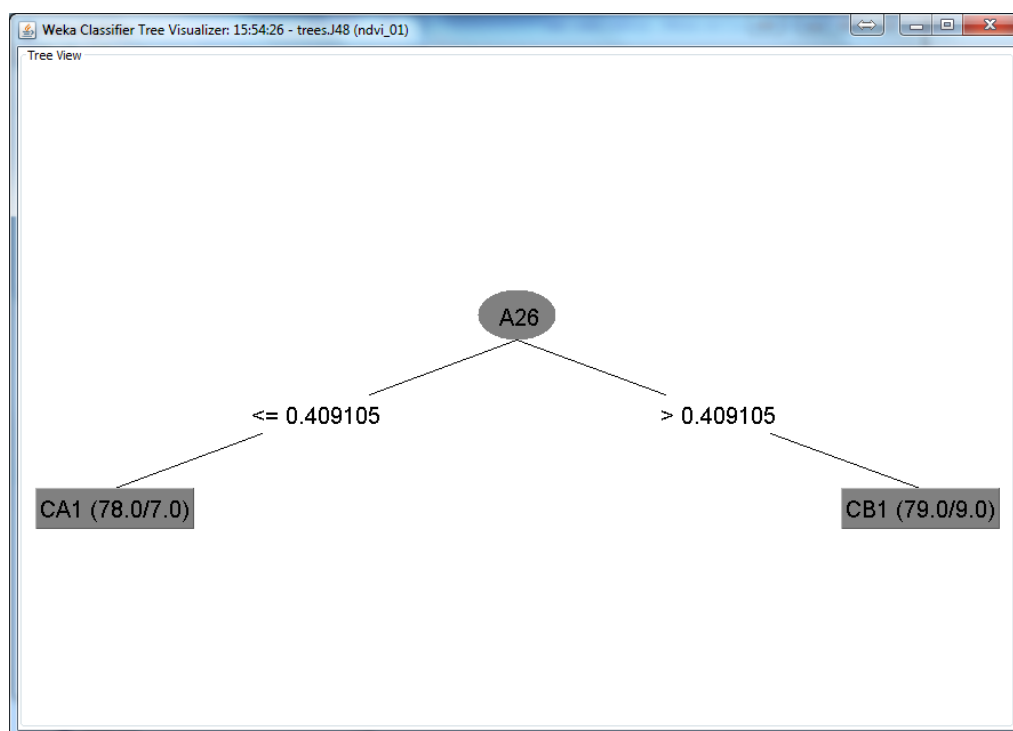


Figura 29. Exemplo de árvore de decisão simples visualizada no WEKA.

Durante os experimentos na geração das árvores de decisão, decidiu-se pela não utilização de uma única árvore gerada com todo o banco de dados devido ao resultado final não abarcar todas as variáveis utilizadas. Diante disso, o banco de dados foi separado de acordo com cada variável e, como

resultado, forneceu quatro árvores de decisão que correspondem aos atributos extraídos para as variáveis de NDVI, exposição à radiação solar, forma das encostas e declividade.

As árvores de decisão geradas foram compiladas de forma a apresentarem resultados mais simples e com menor número de ramos possível. A redução do número de ramos foi realizada no WEKA através da definição do número mínimo de objetos (minNumObj). Essa função trouxe resultados mais objetivos na identificação das classes de alta e baixa susceptibilidade a incêndios de cada uma das variáveis.

A função do número mínimo de objetos propicia o uso de um número maior de amostras representativas do banco de dados. Isso indica novos resultados para as árvores de decisão que diferencia do padrão do WEKA que é de 2 amostras e que realiza a geração de uma árvore de decisão mais rígida, o que representa um maior número ramos e com classes duplicadas em alguns casos. O aumento do número no número mínimo de objetos faz com que tenhamos a utilização do maior número de amostras representativas e, consequentemente, árvores de decisão menores e menos complexas.

Os melhores resultados dos valores utilizados como teste no número mínimo de objetos foi definido mediante a verificação do índice *Kappa* e o percentual de instâncias classificadas corretamente que estão dispostos nos relatórios de cada processo de mineração de dados. A Tabela 16 apresenta de maneira resumida os resultados existentes nos relatórios apresentados pelo WEKA para todas as variáveis geoecológicas utilizadas.

Os melhores resultados foram observados para as variáveis de NDVI e exposição à radiação solar. Os valores do índice *Kappa* indicaram para as variáveis de NDVI e exposição à radiação solar os valores de 0,74 e 0,65 e, o número de instâncias classificadas corretamente são 87,26% e 82,80% respectivamente. Os números de instâncias classificadas corretamente das variáveis de forma e declividade mostram que quase um terço das amostras não foram considerados.

Tabela 16. Resultados comparativos entre os resultados das variáveis no WEKA.

	Radiação	NDVI	Forma	Declividade
Número mínimo de objetos	25	10	25	10
Instâncias classificadas corretamente	130	137	105	101
Instâncias classificadas incorretamente	27	20	52	56
Índice <i>Kappa</i>	0,6572	0,7451	0,3396	0,2884
Erro médio absoluto	0,2429	0,2033	0,4152	0,4209
Erro médio quadrático	0,3742	0,3369	0,4632	0,4975
Erro relativo absoluto	48,5980%	40,6805%	83,0545%	84,2064%
Erro relativo quadrático	74,8394%	67,3870%	92,6542%	99,5060%
Número total de instâncias	157	157	157	157

Posteriormente aos resultados apresentados foram elaborados projetos referentes às variáveis geoecológicas de NDVI, exposição à radiação solar, declividade e forma das encostas visando observar os resultados de cada árvore de decisão indicada. A Tabela 17 apresenta as árvores de decisão em forma de texto indicadas pelo WEKA.

Os valores entre colchetes indicam os códigos utilizados em relação ao nome da variável e designação dos atributos. A Tabela 17 mostra que as árvores de decisão de NDVI e exposição à radiação solar ofereceram classificação mais simples. As árvores de declividade e forma das encostas apresentaram resultados menos objetivos e que indicaram duplicidade de classes propiciando uma verificação mais aprofundada que será vista na análise dos resultados.

Tabela 17. Árvores de decisão extraídas do WEKA para cada variável geoecológica.

Variável	Árvore de decisão
NDVI	Moda [A26] $\leq$ 0.409105: Alta (78.0/7.0) Moda [A26] $>$ 0.409105: Baixa (79.0/9.0)
Exposição à Radiação solar	Máx. pixel [A13] $\leq$ 1809972.75: Baixa (96.0/20.0) Máx. pixel [A13] $>$ 1809972.75: Alta (61.0/1.0)
Declividade	Soma [A09] $\leq$ 649.684245 Amplitude [A01] $\leq$ 12.146927 Entropia [A02] $\leq$ 4.169925: Alta (28.0/7.0) Entropia [A02] $>$ 4.169925: Baixa (70.0/27.0) Amplitude [A01] $>$ 12.146927: Alta (36.0/6.0) Soma [A09] $>$ 649.684245: Baixa (23.0/2.0)
Forma das encostas	Min. pixel [A35] $\leq$ 0.047607 Entropia [A32] $\leq$ 4.142664: Alta (28.0/11.0) Entropia [A32] $>$ 4.142664: Baixa (92.0/31.0) Min. pixel [A35] $>$ 0.047607: Alta (37.0/5.0)

7.1.2.2. Classificação das variáveis geoecológicas

Diante dos resultados verificados durante a mineração de dados das amostras de alto e baixo SOI com a inserção dos atributos que utilizaram as 4 variáveis geoecológicas juntas, observou-se que esse procedimento não apresentou a utilização de todo esse conjunto de dados conforme desejado.

Por esse fato, realizou-se a mineração de dados de maneira individualizada para o conjunto de amostras de cada variável geoecológica e, consequentemente, os resultados de cada classificação que trouxeram importantes avanços para a metodologia de susceptibilidade à ocorrência de incêndios. Dentre esses avanços temos a possibilidade de inserir valores de pesos nas variáveis de alta e baixa susceptibilidade que antes eram classificadas por meio da quebra natural de histograma presente em *softwares* como o ArcGIS.

Os resultados das árvores de decisão foram espacializados através do *software* InterIMAGE e exportados para o formato *shapefile* que trouxe a possibilidade de avaliação no *software* ArcGIS. Os resultados do NDVI (Figura 30) e Exposição à radiação solar (Figura 31) indicaram os comportamentos espaciais esperados. A inserção do NDVI na metodologia tem a intenção de identificar a Combustibilidade da biomassa que foi o nome adotado para evitar inconsistências de interpretação durante a composição das variáveis de SOI.

O atributo que indicou as áreas de alta e baixa Combustibilidade foi o cálculo da moda realizado nos segmentos gerados através do operador de crescimento de regiões no InterIMAGE. As áreas classificadas com alta combustibilidade foram indicadas com valor abaixo de 0.409105. Já as áreas de baixa combustibilidade (verde) são indicadas acima de 0.409105. O NDVI alto indica presença de clorofila nas folhas verdes e, conseqüentemente, vegetação mais verde e saudável não propicia a incêndios florestais.

O resultado apresentado na Figura 30 aponta que o Planalto do Itatiaia e em áreas de vegetação herbácea na parte norte do PNI são indicadas com alta Combustibilidade em conjunto com outras existentes na vertente sul que ainda possui a área urbana do município de Itatiaia. A área urbana classificada pelo mapa de cobertura da terra é inserida no mapeamento da SOI e recebe a denominação de Área Não Susceptível à Ocorrência de Incêndios florestais (ANSOI).

O mapa de Exposição à Radiação Solar (Figura 31) indica a confirmação de parâmetros importantes como a alta incidência de radiação solar localizada nas partes altas do PNI em que se destaca o Planalto do Itatiaia. Observa-se também a verificação das vertentes voltadas para norte e que se encontram descobertas na maior parte do tempo, fator esse preponderante para a ocorrência de incêndios florestais. Isso é possível devido ao resultado apresentado pela ferramenta *Area Solar Radiation* do *software* ArcGIS que realiza o cálculo da exposição à radiação solar das áreas identificadas através do MDE inserido, em que são considerados o ângulo de incidência solar de acordo com a época do ano (neste caso o ano de 2009), latitude e fatores topográficos além do sombreamento realizado pela posição do relevo.

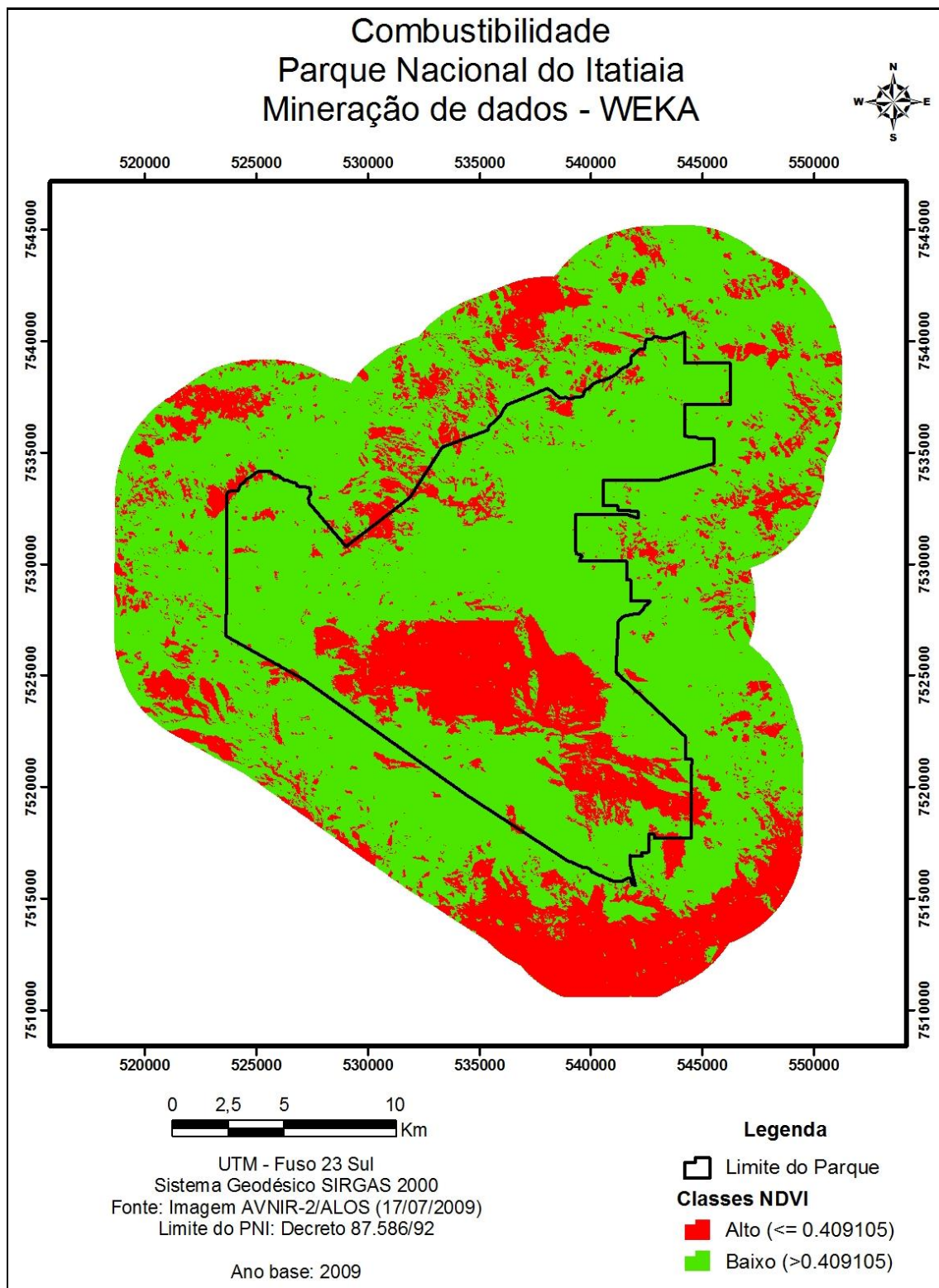


Figura 30. Resultado da classificação da Combustibilidade por meio do NDVI.

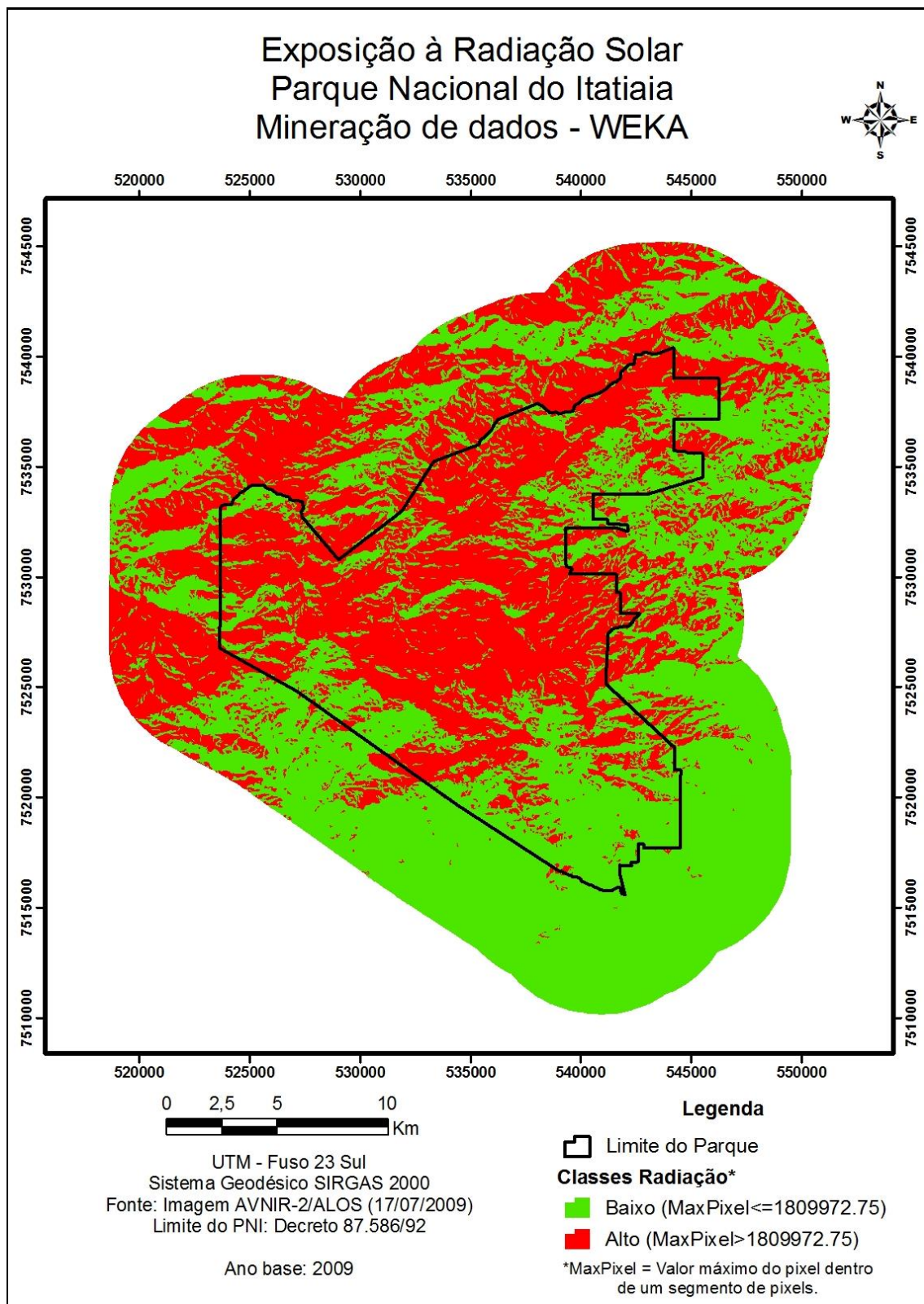


Figura 31. Resultado da classificação da exposição à radiação solar.

O atributo utilizado para separação das classes de Exposição à radiação solar foi o valor máximo do pixel dentro das amostras utilizadas através do limiar de 1809972.75 que indicou as áreas com valor acima como alta Exposição à radiação solar (vermelho) e abaixo como baixa Exposição à radiação solar (verde).

Os mapas de Forma das encostas e Declividade trouxeram variáveis com outras características ambientais. A existência de árvores de decisão com resultados de classes duplicadas ocorreu em ambas as variáveis e indica a necessidade de agrupamento dessas classes para observação das áreas de alta e baixa.

O mapa de Forma das encostas foi dividido em três classes através da mineração de dados e que passaram por segmentação com base no MDE para realização da classificação desta variável. A entropia dividiu no limiar de 4.142664, os valores maiores que o limiar representam áreas da classe de alta e as áreas menores que o limiar indicam áreas com representatividade baixa para a Forma das encostas. O atributo de valor mínimo do pixel dividiu a terceira classe com os valores abaixo de 0.047607 que são indicativas como áreas de alta duplicada pela árvore de decisão elaborada por mineração de dados. O resultado do mapa de Forma das encostas foi obtido por meio de segmentação pelo operador de crescimento de regiões sobre o MDE que é apresentado na Figura 32.

Diferente das outras variáveis geoecológicas, a classificação da Forma das encostas não apresentou bom resultado de segmentação quando realizada com um arquivo raster de Forma das Encostas. Isso traz impossibilidade de sobreposição aos outros mapas obtidos por apresentar um aspecto reticulado. Diante disso, o melhor resultado de segmentação para a variável geoecológica de Forma das encostas ocorreu com a utilização do MDE para a geração dos segmentos.

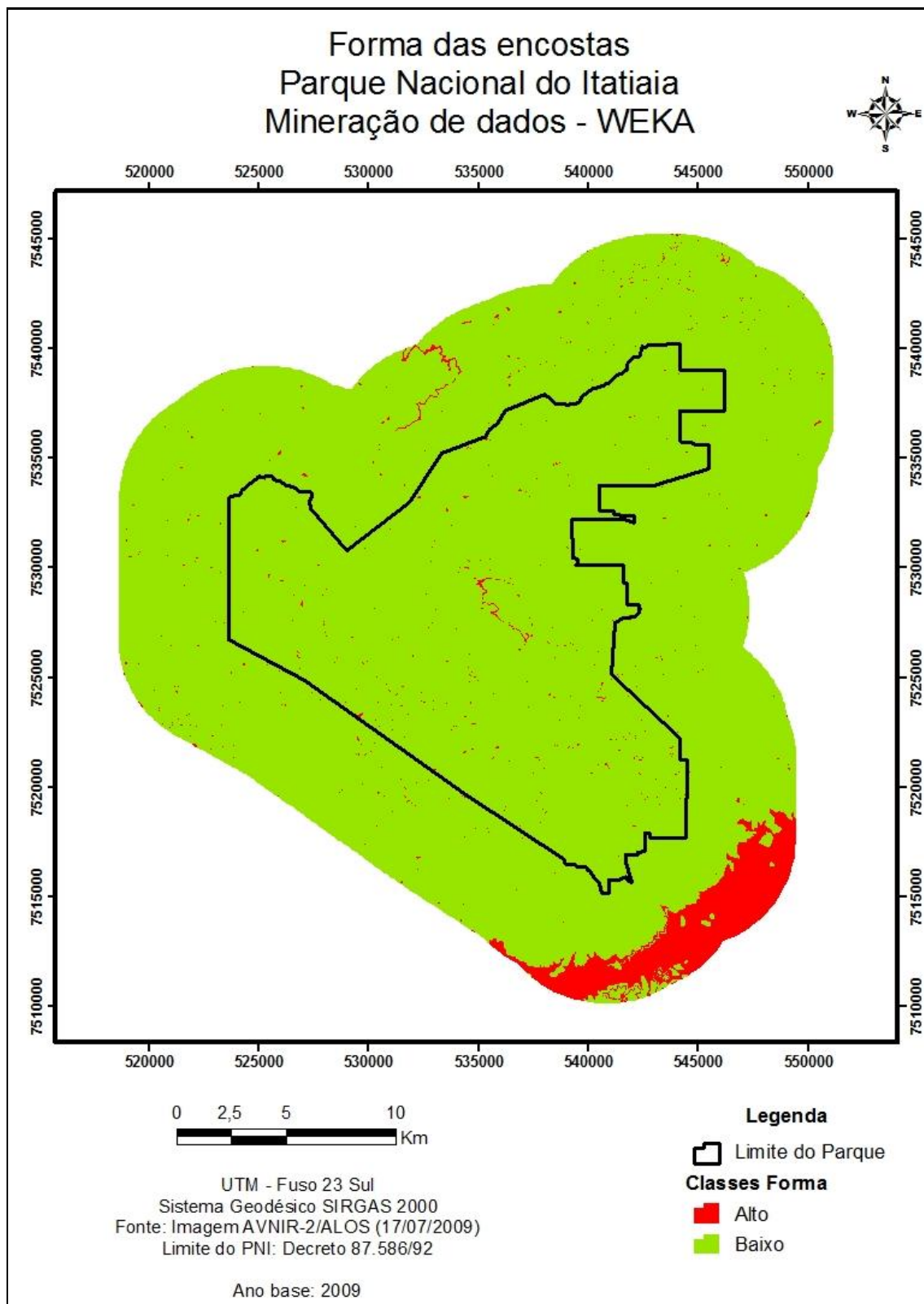


Figura 32. Resultado da classificação da variável geocológica de forma das encostas – segmentação com MDE.

Em relação aos resultados do mapa de Forma das encostas são observadas pequenas áreas na região central da área do PNI que é composta pelo Pico das Agulhas Negras e o maciço das Prateleiras. Essa variável apresenta muitos detalhes para as áreas de classe alta que são concentradas na parte baixa em que fica a região da área urbana de Itatiaia. Provavelmente, tratam-se de áreas planas que foram observadas como áreas convexas.

A Declividade foi a variável que apresentou árvore de decisão com maior número de ramos (Tabela 17). A complexidade dessa árvore é representada pelo maior número de atributos utilizados que são amplitude, entropia e soma dos pixels. O mapa de declividade foi elaborado com o agrupamento dos resultados da árvore de decisão e é expresso na Figura 33.

A amplitude indicou áreas de classe alta com valores acima de 12.146927 que estão indicadas em vermelho. O atributo entropia indicou duas classes que são divididas pelo limiar de 4.169925 em que os valores acima identificam áreas de baixa e os valores abaixo do limiar identificam áreas de alta. O terceiro atributo indicado na árvore de decisão para a declividade é a soma dos pixels que aponta áreas de classe baixa que representam grande parte das áreas classificadas.

A declividade foi segmentada pelo próprio arquivo raster de declividade por meio do operador de crescimento de regiões. As quatro classes indicadas apontam pela utilização das classes de alta e baixa tornando possível a generalização dessas classes e a exposição no mapa de Declividade.

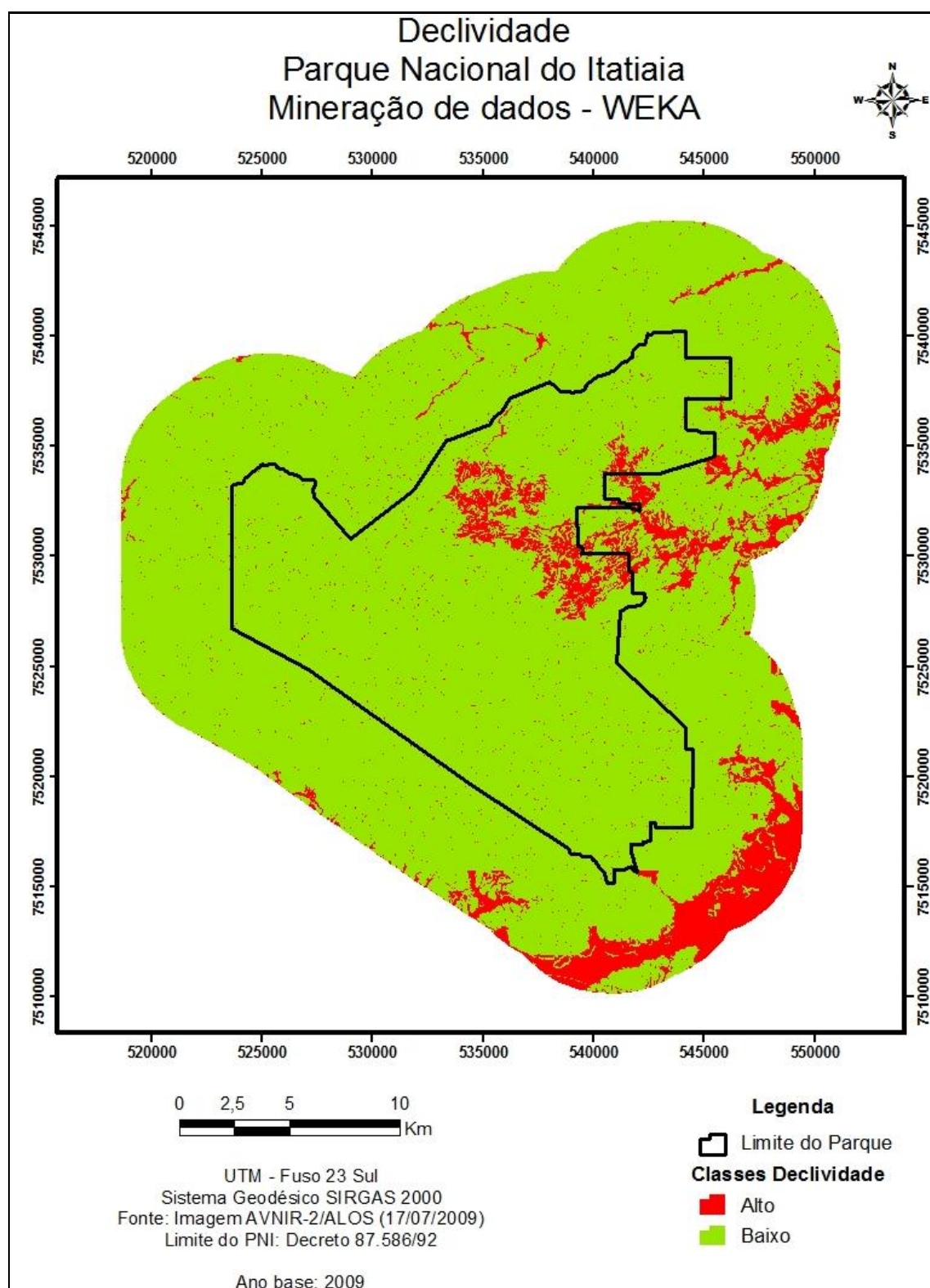


Figura 33. Resultado da classificação da variável geológica de Declividade

Os resultados do mapa de Declividade mostram que a generalização das classes de alta e baixa que a predominância ocorreu para as áreas consideradas como baixa. As áreas consideradas como classe de alta são bem destacadas na parte baixa próxima à Rodovia Presidente Dutra que corta a área urbana de Itatiaia e, nas proximidades da bacia do Rio Preto (Visconde de Mauá) e da Parte Alta do PNI.

7.1.2.3. Elaboração do Índice de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios (ISOI)

A elaboração dos mapas das variáveis Combustibilidade, Exposição à radiação solar, Forma das encostas e Declividade torna possível à sobreposição e observação da Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios (SOI). A sobreposição desses resultados é realizada a partir de uma tabela elaborada com o auxílio da combinação das duas classes (alta e baixa) existentes nos quatro mapas das variáveis construídas com base nos relatórios da mineração de dados.

A combinação das classes torna possível o conhecimento do comportamento da sobreposição entre as variáveis de susceptibilidade. Visando um entendimento das combinações geradas tornou-se necessário a elaboração de um Índice de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios (ISOI) que subdivide em três classes de SOI: alta, média e baixa.

A elaboração do ISOI se deu com a verificação do índice *Kappa* apresentado individualmente para cada variável geoecológica de SOI em respostas obtidas pelos relatórios da etapa de mineração de dados realizada no software WEKA (Tabela 18).

Os valores do índice *Kappa* apresentados nos relatórios da mineração de dados foram somados e, conseqüentemente, extraídos o percentual de cada variável geoecológica. Os valores percentuais das variáveis foram normalizados visando a observação individual de cada classe possibilitando a criação de pesos entre as quatro variáveis que consideraram valores positivos (+) para variáveis de classe alta e valores negativos (-) para as variáveis de classe baixa.

Tabela 18. Construção dos pesos para geração do ISOI

	Combustibilidade	Radiação	Forma	Declividade
Índice Kappa	0,7451	0,6572	0,3396	0,2884
Percentual	36,7%	32,3%	16,8%	14,2%
Valores de pesos	0,367	0,323	0,168	0,142

Diante da elaboração dos pesos para geração do ISOI é possível verificar o resultado da combinação das classes de alta e baixa baseados nesses valores de acordo com as combinações das variáveis geoecológicas conforme pode ser observado na Tabela 19. O somatório dos valores normalizados indicou um intervalo do ISOI entre -1,0 a 1,0 para a cada uma das 16 combinações de susceptibilidade.

A indicação das classes de alta, média e baixa SOI foi realizada através de um processo de análise estatística por zona (*zonal statistics*) realizado a partir das 157 amostras utilizadas na mineração de dados. As amostras dispostas em arquivo *shape* de polígono foram sobrepostas ao arquivo raster de SOI, que é resultante da ferramenta *Combine* que combinou as variáveis de Combustibilidade, Exposição à radiação solar, Forma e Declividade. O resultado da análise estatística por zona apresenta uma tabela composta pela estatística de cada amostra (Figura 34).

As amostras foram observadas através de critérios existentes na tabela estatística em que o desvio padrão e a variação (*range*) mínima dos registros de ISOI serviram para a seleção dos resultados mais uniformes para a determinação das faixas de classes de ISOI. Esses registros foram determinantes para verificar as amostras que são compostas por pixels de mesmo valor de variável geoecológica que indicam melhor representação dos valores de ISOI. A análise das amostras selecionadas foi realizada através *software* Microsoft Excel por meio da utilização de filtros que tornaram possível a verificação dos valores de ISOI resultantes da combinação das variáveis geoecológicas.

Tabela 19. Combinação das variáveis para geração dos valores de ISOI.

Combustibilidade		Exposição à Radiação Solar		Forma		Declividade		Susceptibilidade
Classe	Índice	Classe	Índice	Classe	Índice	Classe	Índice	Índice
ALTO	0,367	ALTO	0,323	ALTO	0,168	ALTO	0,142	1,000
ALTO	0,367	ALTO	0,323	ALTO	0,168	BAIXO	-0,142	0,716
ALTO	0,367	ALTO	0,323	BAIXO	-0,168	ALTO	0,142	0,664
ALTO	0,367	ALTO	0,323	BAIXO	-0,168	BAIXO	-0,142	0,380
ALTO	0,367	BAIXO	-0,323	ALTO	0,168	ALTO	0,142	0,354
BAIXO	-0,367	ALTO	0,323	ALTO	0,168	ALTO	0,142	0,266
ALTO	0,367	BAIXO	-0,323	ALTO	0,168	BAIXO	-0,142	0,070
ALTO	0,367	BAIXO	-0,323	BAIXO	-0,168	ALTO	0,142	0,018
BAIXO	-0,367	ALTO	0,323	ALTO	0,168	BAIXO	-0,142	-0,018
BAIXO	-0,367	ALTO	0,323	BAIXO	-0,168	ALTO	0,142	-0,070
ALTO	0,367	BAIXO	-0,323	BAIXO	-0,168	BAIXO	-0,142	-0,266
BAIXO	-0,367	ALTO	0,323	BAIXO	-0,168	BAIXO	-0,142	-0,354
BAIXO	-0,367	BAIXO	-0,323	ALTO	0,168	ALTO	0,142	-0,380
BAIXO	-0,367	BAIXO	-0,323	ALTO	0,168	BAIXO	-0,142	-0,664
BAIXO	-0,367	BAIXO	-0,323	BAIXO	-0,168	ALTO	0,142	-0,716
BAIXO	-0,367	BAIXO	-0,323	BAIXO	-0,168	BAIXO	-0,142	-1,000

As classes de SOI foram divididas em alta, média e baixa conforme indica a Tabela 20. A divisão da classe de alta diante da comparação entre as amostras de alta utilizadas durante a mineração de dados. A decisão do limiar ocorreu na observação dos valores de ISOI que eram compostos exclusivamente por amostras de alta. Diante disso, o valor mais baixo que foi verificado para a classe de alto SOI é indicado pelo valor de ISOI acima de - 0.070.

Rowid	OBJECT ID *	ZONE-CODE	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	VARIETY	MAJORITY	MINORITY	MEDIAN
1	2	1	20	2000	-100	-100	0	-1000	0	-2000	1	-1000	-1000	-1000
2	4	2	20	2000	-100	-100	0	-1000	0	-2000	1	-1000	-1000	-1000
3	5	3	19	1900	-100	-100	0	-1000	0	-1900	1	-1000	-1000	-1000
4	6	4	19	1900	-266	-266	0	-266	0	-5054	1	-266	-266	-266
5	7	5	19	1900	-354	-354	0	-354	0	-6726	1	-354	-354	-354
6	8	6	21	2100	-266	-266	0	-266	0	-5586	1	-266	-266	-266
7	9	7	21	2100	380	380	0	380	0	7980	1	380	380	380
8	11	8	19	1900	-100	-664	336	-911,57892	147,95673	-1732	2	-1000	-664	-1000
9	12	9	19	1900	-354	380	734	-160,8421	323,21497	-3056	2	-354	380	-354
10	13	10	19	1900	-100	-354	646	-422	198,25237	-8018	2	-354	-1000	-354
11	14	11	21	2100	-100	-266	734	-300,95239	156,3118	-6320	2	-266	-1000	-266
12	15	12	21	2100	-100	-100	0	-1000	0	-2100	1	-1000	-1000	-1000
13	16	13	21	2100	-266	-266	0	-266	0	-5586	1	-266	-266	-266
14	17	14	21	2100	-100	-100	0	-1000	0	-2100	1	-1000	-1000	-1000
15	18	15	19	1900	-100	-100	0	-1000	0	-1900	1	-1000	-1000	-1000
16	19	16	20	2000	-664	-18	646	-373,29999	321,38095	-7466	2	-664	-18	-664
17	20	17	18	1800	-100	-266	734	-796,11108	328,76096	-1433	2	-1000	-266	-1000
18	21	18	21	2100	-100	-664	336	-696	98,630623	-1461	2	-664	-1000	-664
19	22	19	19	1900	-100	-100	0	-1000	0	-1900	1	-1000	-1000	-1000
20	24	20	21	2100	-100	-100	0	-1000	0	-2100	1	-1000	-1000	-1000
21	25	21	18	1800	-100	-100	0	-1000	0	-1800	1	-1000	-1000	-1000
22	26	22	21	2100	380	380	0	380	0	7980	1	380	380	380
23	27	23	18	1800	380	380	0	380	0	6840	1	380	380	380
24	28	24	18	1800	-100	-100	0	-1000	0	-1800	1	-1000	-1000	-1000
25	29	25	20	2000	-354	-354	0	-354	0	-7080	1	-354	-354	-354
26	30	26	16	1600	-100	664	1664	-228,625	706,33905	-3658	4	-1000	-266	-266
27	31	27	19	1900	-354	-70	284	-264,3158	132,01158	-5022	2	-354	-70	-354
28	32	28	21	2100	-100	-100	0	-1000	0	-2100	1	-1000	-1000	-1000
29	33	29	19	1900	-100	-354	646	-796	300,27988	-1512	2	-1000	-354	-1000
30	35	30	20	2000	-100	-100	0	-1000	0	-2000	1	-1000	-1000	-1000
31	36	31	18	1800	-100	-100	0	-1000	0	-1800	1	-1000	-1000	-1000
32	37	32	19	1900	-100	-100	0	-1000	0	-1900	1	-1000	-1000	-1000
33	38	33	19	1900	-354	-354	0	-354	0	-6726	1	-354	-354	-354

Figura 34. Resultado da estatística das 157 amostras utilizadas.

Tabela 20. Classes de Susceptibilidade.

Classe	Faixa (ordem decrescente)
Alta	1 até -0,070
Média	-0,266 até -0,354
Baixa	-0,380 até -1

O mesmo procedimento de comparação entre as amostras utilizadas na mineração de dados e o resultado da combinação de variáveis que gerou os valores de ISOI ocorreu para a identificação para as áreas consideradas como classe de baixa. O limiar utilizado foram os valores abaixo de -0,380 em que representavam apenas amostras que foram inseridas na mineração de dados como exemplo de classe baixa. Já a classe de médio SOI observou-se através da transição entre as amostras de alta e baixa que foram observadas entre os valores de -0,266 até -0,354.

Essa análise possibilitou a elaboração das faixas de cada classe que estão indicadas na Tabela 20. As faixas não são contínuas e baseiam-se no somatório entre as classes combinadas pelo processo de combinação de variáveis realizado para geração do ISOI.

A Tabela 21 mostra o resultado do agrupamento das 16 combinações de susceptibilidade encontradas e que tornaram possível a verificação das 3 faixas de classes para o ISOI. A determinação das 3 faixas ocorreu pela observação das amostras de alta e baixa que indicaram as suas próprias classes verificadas sem confusão com outras classes, mas em casos de amostras com indicação de sobreposição entre as classes de alta e baixa foi realizado o registro de classe para média susceptibilidade a incêndios.

Tabela 21. Combinação das variáveis para geração das classes de ISOI.

NDVI		Exposição à Radiação Solar		Forma		Declividade		Susceptibilidade	
Classe	Índice	Classe	Índice	Classe	Índice	Classe	Índice	Classe	Índice
ALTO	0,367	ALTO	0,323	ALTO	0,168	ALTO	0,142	ALTO	1,000
ALTO	0,367	ALTO	0,323	ALTO	0,168	BAIXO	-0,142	ALTO	0,716
ALTO	0,367	ALTO	0,323	BAIXO	-0,168	ALTO	0,142	ALTO	0,664
ALTO	0,367	ALTO	0,323	BAIXO	-0,168	BAIXO	-0,142	ALTO	0,380
ALTO	0,367	BAIXO	-0,323	ALTO	0,168	ALTO	0,142	ALTO	0,354
BAIXO	-0,367	ALTO	0,323	ALTO	0,168	ALTO	0,142	ALTO	0,266
ALTO	0,367	BAIXO	-0,323	ALTO	0,168	BAIXO	-0,142	ALTO	0,070
ALTO	0,367	BAIXO	-0,323	BAIXO	-0,168	ALTO	0,142	ALTO	0,018
BAIXO	-0,367	ALTO	0,323	ALTO	0,168	BAIXO	-0,142	ALTO	-0,018
BAIXO	-0,367	ALTO	0,323	BAIXO	-0,168	ALTO	0,142	ALTO	-0,070
ALTO	0,367	BAIXO	-0,323	BAIXO	-0,168	BAIXO	-0,142	MÉDIO	-0,266
BAIXO	-0,367	ALTO	0,323	BAIXO	-0,168	BAIXO	-0,142	MÉDIO	-0,354
BAIXO	-0,367	BAIXO	-0,323	ALTO	0,168	ALTO	0,142	BAIXO	-0,380
BAIXO	-0,367	BAIXO	-0,323	ALTO	0,168	BAIXO	-0,142	BAIXO	-0,664
BAIXO	-0,367	BAIXO	-0,323	BAIXO	-0,168	ALTO	0,142	BAIXO	-0,716
BAIXO	-0,367	BAIXO	-0,323	BAIXO	-0,168	BAIXO	-0,142	BAIXO	-1,000

O número de combinações da classificação das variáveis geoecológicas baseadas no ISOI gerou o total de 10 combinações correspondentes a alta susceptibilidade; 2 para a classe de média susceptibilidade e 4 para baixa susceptibilidade.

7.3. Classificação da susceptibilidade com base no ISOI

A elaboração do ISOI por meio da mineração de dados no software WEKA tornou possível a determinação de limites para as classes de alta, média e baixa Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios. Diante da combinação das variáveis geológicas e a determinação das classes foi elaborado um mapa de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios em que foram incluídas as denominadas Áreas Não Susceptíveis à Ocorrência de Incêndios (ANSOI) como é verificado na Figura 35.

A classe denominada ANSOI corresponde ao resultado de áreas de nuvens, rocha, água e áreas urbanizadas adquiridas através da classificação da cobertura da terra identificada na imagem AVNIR-2/ALOS realizada no *software* InterIMAGE conforme metodologia apresentada no Capítulo 6.

As amostras de classe alta que foram inseridas no processo da mineração de dados são correspondentes aos Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI) cedidos pela administração do PNI referentes aos anos de 2008 a 2012. Os ROIs foram separados em dois períodos que visam a calibração e a validação do modelo de susceptibilidade. Os ROIs referentes aos anos de 2008 e 2009 indicaram os resultados apresentados anteriormente indicando a geração do ISOI e, conseqüentemente a construção do mapa de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios do PNI referente ao ano de 2009.

Os dados dos ROIs do período entre 2010 a 2012 foram sobrepostos ao mapa de susceptibilidade e apresentam os resultados dispostos na Tabela 22 que também apresenta o total das classes identificadas para a área do PNI e os arredores no raio de 5 km.

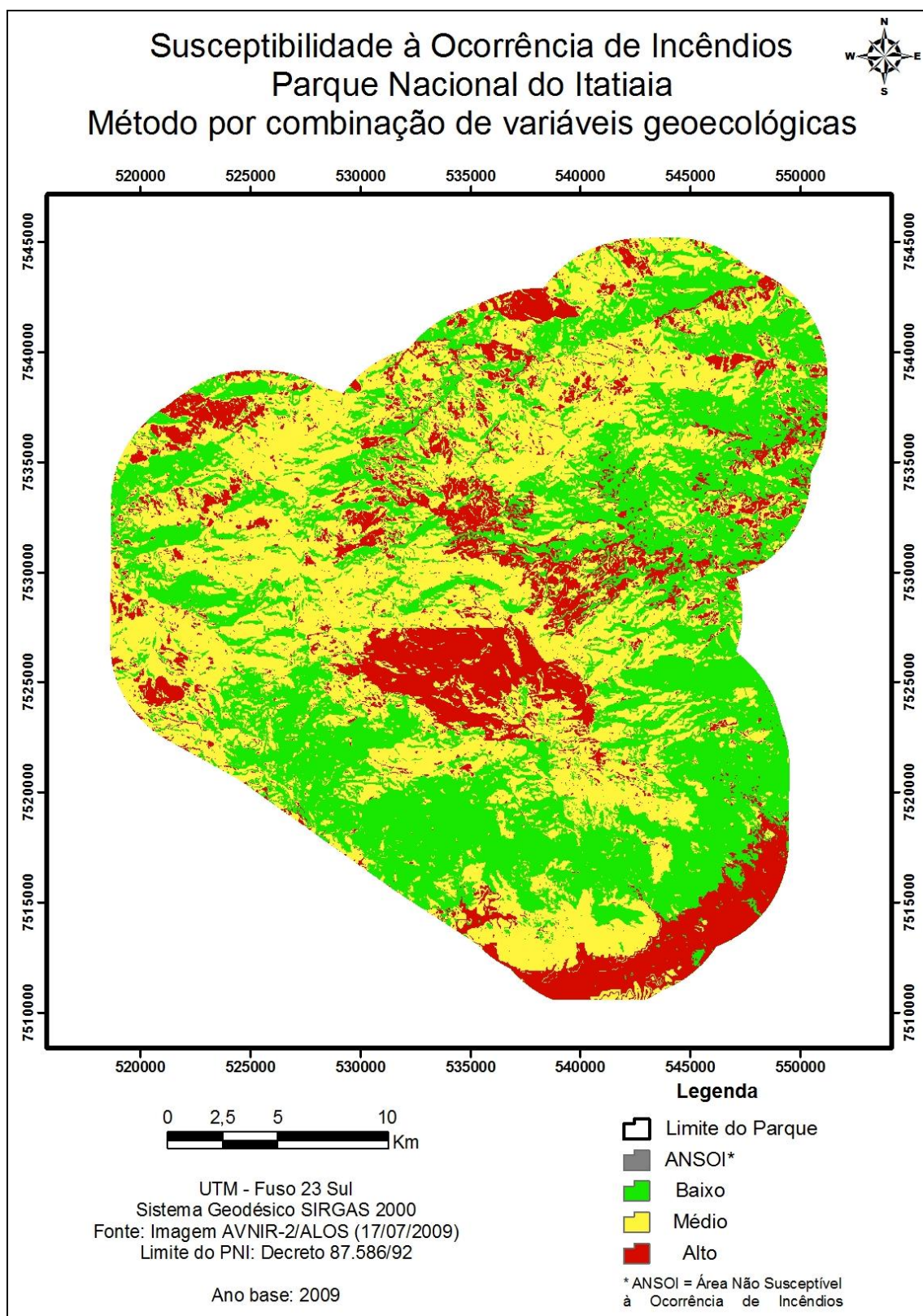


Figura 35. Mapa de susceptibilidade à ocorrência de incêndios pelo método de combinação de variáveis geoecológicas e inserção do ISOI – ano base de 2009.

Tabela 22. Resultados de validação dos registros de ROI (2010 a 2012).

Classe SOI	Validação	Área de estudo
Alta	49,9%	42,5%
Média	43,0%	39,6%
Baixa	6,8%	16,2%
ANSOI	0,3%	1,7%

Os resultados por meio do método de combinação de variáveis geoecológicas segue a metodologia aplicada por SOUSA *et al.* (2010) e TOMZHINSKI (2012) em que a execução da álgebra de mapas é realizada por meio do *software* ArcGIS com base no método analítico-integrativo (COELHO NETTO *et al.*, 1993). O método analítico-integrativo realiza conjugação das variáveis geoecológicas através da seleção de suas classes de acordo com a temática e as características que influenciam o tema dos incêndios (no caso deste estudo), em que é realizada uma aglutinação de classes com comportamento semelhante. A sobreposição dos mapas temáticos é feita através de análises que redefinem fatores, temas e pesos até a validação dos resultados por meio de fontes confiáveis.

A classificação das áreas por meio da combinação de variáveis indicadas pelo ISOI proporcionou a identificação das classes e a comparação dos ROIs utilizados como validadores. A Tabela 22 mostrou que as classes de alta e média susceptibilidade são observadas nas áreas queimadas com valores de 49,9% e 43% respectivamente, e são predominantes em relação às áreas identificadas como baixa susceptibilidade em que o registro atingiu o valor de 6,8%.

A área de estudo que comporta uma área de ampliação de 5 km além dos limites do PNI também é contemplada na Tabela 22 com o registro das classes para toda a área. As áreas classificadas como baixa susceptibilidade são representadas em 16,2% da área de estudo. Possuem como principal característica por estarem localizadas ao sul do limite do PNI constituídas por áreas florestadas posicionadas na vertente sul das encostas.

As áreas com alta susceptibilidade estão representadas em 42,5% da área de estudo e são concentradas no Planalto do Itatiaia e na vertente norte do PNI que possuem áreas com alta combustibilidade por terem presença de

vegetação de campo de altitude além da vegetação herbácea que também se observa ao sul do PNI.

As áreas de média susceptibilidade estão presentes em 39,6% da área de estudo se tratam de áreas de transição entre as áreas de baixa e alta susceptibilidade e, por isso, também merecem atenção constante durante os períodos em que a ocorrência de incêndios é presente na área de estudo.

8. APLICAÇÃO DE GEOBIA PARA A CLASSIFICAÇÃO DA SUSCEPTIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS

A utilização da classificação por Análise de Imagem Baseada em Objetos Geográficos (*GEographic Object-Based Image Analysis* – GEOBIA) é utilizada em diversos ramos do conhecimento da área ambiental. O objetivo deste capítulo é utilizar esta técnica para determinar a identificação da susceptibilidade à ocorrência de incêndios. Para isso, é importante ressaltar a importância da compreensão sobre a construção dos objetos por meio dos processos de segmentação que implicam na melhor forma de representar o fenômeno em questão.

Diante disso, é importante verificar qual o melhor tamanho dos objetos que devem compor a classificação por GEOBIA que se trata de um desafio importante para a identificação das classes mapeadas. Os objetos podem ser identificados de diversas maneiras que variam de acordo com o conhecimento dos analistas de diferentes áreas. A interpretação das variáveis ambientais deve seguir o objetivo proposto para o mapeamento.

O conhecimento utilizado neste estudo aborda à Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios que é identificado pelas variáveis geoecológicas de: combustibilidade observada pelo NDVI; exposição à radiação solar; forma de encosta e; declividade. A decisão de utilização dessas variáveis ocorreu através da construção de conhecimento por meio da técnica de mineração de dados e a geração do Índice de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios – ISOI (Capítulo 7) que definiu as classes para a SOI.

Os questionamentos em relação ao melhor padrão de segmentação levam à observação da melhor forma de identificação dos objetos para que a classificação da SOI seja realizada para toda a área de estudo. Diante disso, duas metodologias são abordadas neste capítulo por meio de uma área teste e de toda a área de estudo do PNI.

A resposta para esses questionamentos são observadas através de uma área teste que foi definida a partir do número de ROIs do período de 2008 a 2009. Essa área teste possibilita verificar se o aumento da escala de observação do objeto realizado em conjunto com a inserção dos descritores da mineração de dados pode facilitar a classificação do fenômeno a ser estudado.

A obtenção do melhor tamanho dos objetos através de segmentação torna possível a aplicação do mesmo processo para toda a área de estudo do PNI.

Através do resultado da segmentação aplicado para a área teste, é realizado um novo procedimento metodológico que utiliza duas vertentes que abordam toda a área de estudo do PNI. O primeiro projeto tem como objetivo utilizar dados resultantes da mineração de dados que são representados pela por arquivos das variáveis geoecológicas denominados de “raster resultado” que contemplam a classificação dos resultados da mineração de dados por variável. Por isso, esse primeiro projeto foi denominado de “Segmentação e combinação das variáveis” e, em contrapartida, o segundo projeto aborda a utilização dos dados de forma bruta em conjunto com as árvores de decisão geradas por mineração de dados, aliando dessa forma, o processo de mineração de dados e GEOBIA que foi denominado “Segmentação e mineração de dados”.

Os dois projetos em questão são comparados ao método aplicado no Capítulo 7 que realizou a combinação das variáveis geoecológicas e, o resultado das três metodologias é validado através das áreas queimadas (ROI) no período de 2010 a 2012, posteriores ao ano de 2009 que foi reconhecido como ano base para o mapeamento da Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios do PNI.

8.1. Metodologia para a área teste

A metodologia busca verificar a susceptibilidade através de diferentes parâmetros de segmentação observados por árvores de decisão geradas por mineração de dados para a área teste do PNI. A metodologia está dividida em dados de entrada, métodos aplicados e resultados (Figura 36).

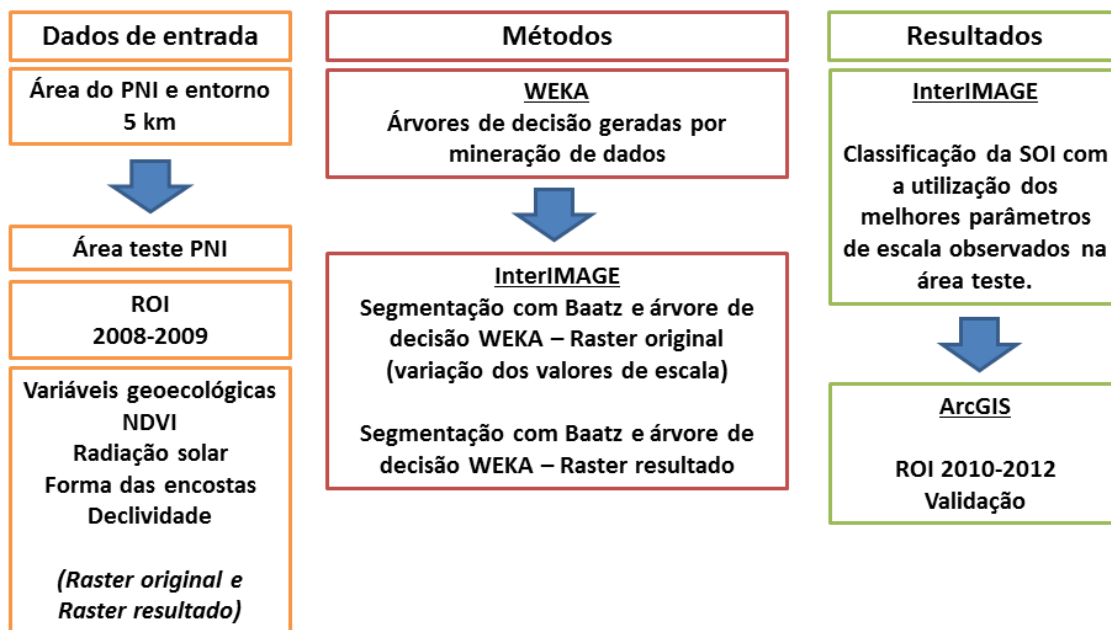


Figura 36. Fluxograma metodológico da SOI para a área teste.

A área teste (Figura 37) foi definida para facilitar o processamento da classificação no InterIMAGE e com isso, agilizar a possibilidade de expansão para toda a área de estudo. A delimitação da área teste ocorreu diante dos 54 Registros de Ocorrência de Incêndios (ROI) referentes ao período de 2008 a 2009 e a extensão da imagem AVNIR-2 (1392 x 1028 pixels) que possibilitou a realização dos testes de segmentação. Os dados de entrada são divididos em raster original e raster resultado que se referem aos formatos de imagem brutos e resultado (sobrepostos em único arquivo e com tabela definida por classes), respectivamente. Ambos os dados de entrada são compostos pelas variáveis geoecológicas de combustibilidade, exposição à radiação solar, forma das encostas e declividade.

A classificação da área teste foi realizada em 4 projetos que buscaram a observação do comportamento dos resultados da classes de alta, média e baixa SOI em diferentes escalas de segmentação por meio do operador *Baatz* (BAATZ & SCHAPE, 2000) do *software* InterIMAGE.

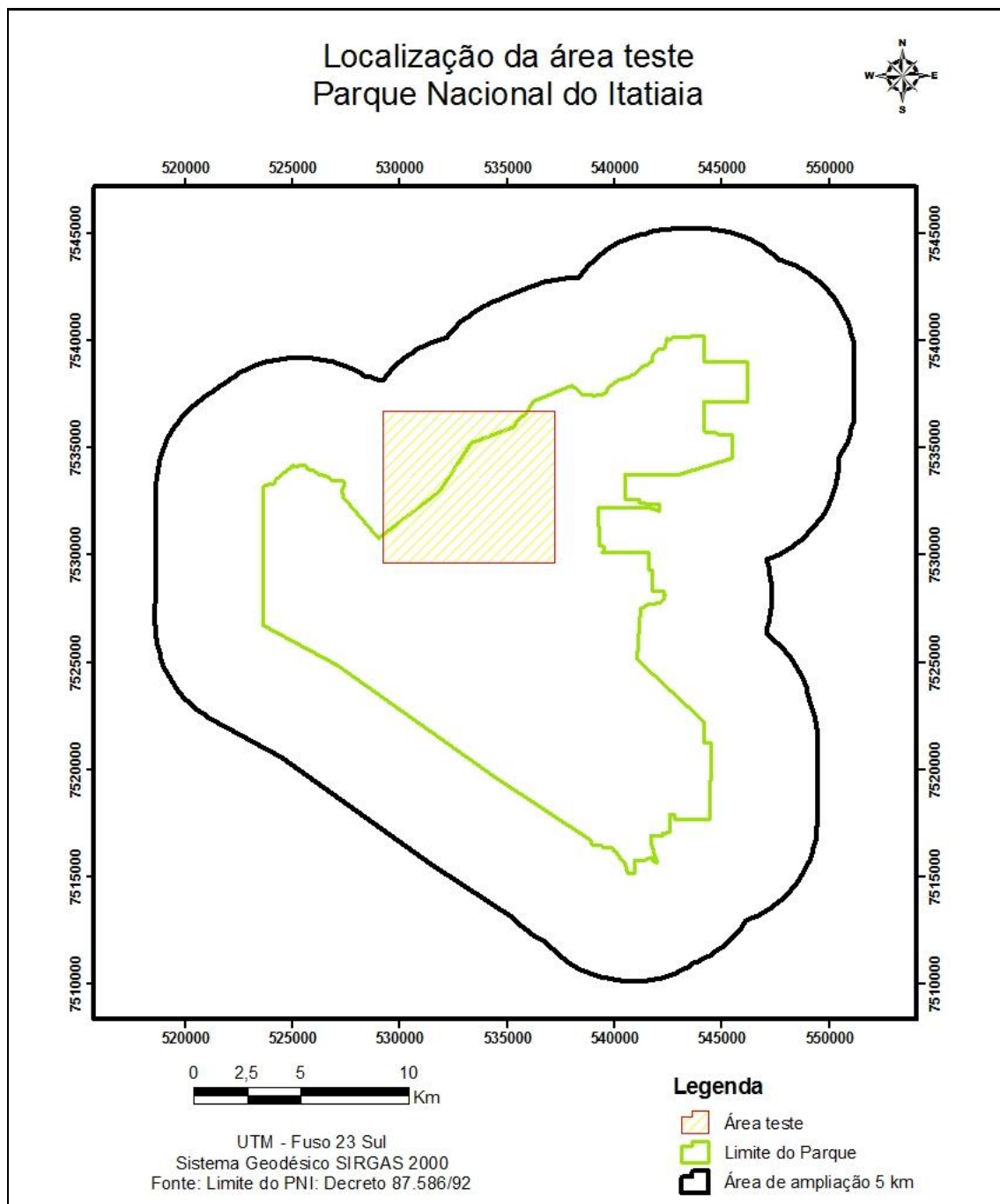


Figura 37. Mapa de localização da área teste.

As árvores de decisão foram geradas com a utilização de amostras de áreas queimadas consideradas de alta susceptibilidade e áreas com características de baixa susceptibilidade que foram identificadas por meio da aplicação de técnicas de mineração de dados realizadas no *software* WEKA.

As árvores de decisão tornaram possível o conhecimento da susceptibilidade para cada variável ge ecológica e essas características foram transferidas para a elaboração de uma rede semântica (Figura 38) que

identifica áreas de alta, média e baixa susceptibilidade à ocorrência de incêndios.

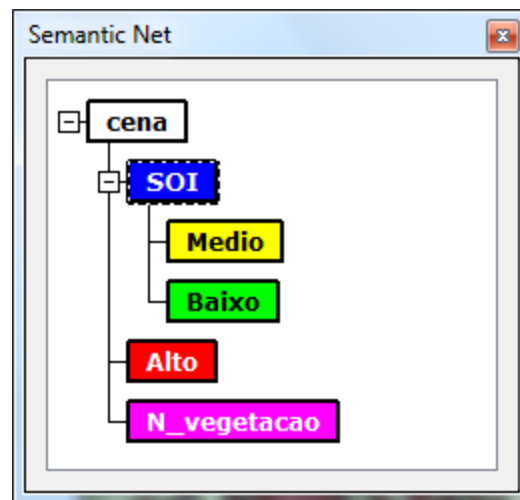


Figura 38. Rede semântica do projeto de classificação da área teste.

O exemplo da Figura 38 apresenta uma estratégia de classificação utilizada que foi de conjugar os resultados da mineração de dados da SOI nas classes de média e baixa. Já a classe de alta é classificada mediante as áreas não classificadas por SOI e “Não vegetação”. Essa estratégia de classificação buscou uma realização de procedimento mais simples devido a grande complexidade de identificação das áreas de SOI alto.

As áreas de “não vegetação” foram adquiridas a partir da classificação da cobertura da terra por meio de imagem AVNIR-2/ALOS e de dados extraídos de Modelo Digital de Elevação em escala 1:50.000. A classe “não vegetação” representa áreas denominadas como Áreas Não Susceptíveis à Ocorrência de Incêndios – ANSOI.

O InterIMAGE, como já descrito anteriormente, utiliza operadores externos denominados *top down* e *bottom up* que realizam o processo de classificação seguindo a metodologia de modelagem do conhecimento. A inserção da combinação de variáveis seguiu as árvores de decisão indicadas pelo minerador de dados WEKA que foram inseridas no processo *bottom up* do projeto criado no InterIMAGE (Tabelas 23 e 24).

A Tabela 23 contém o exemplo da classe de baixo SOI em que se observa na construção das regras booleanas com base nas variáveis de Combustibilidade e Exposição à Radiação Solar. Diante disso, adotam-se

essas características para classificação das áreas de baixo SOI em que a Tabela 24 indica que as áreas de Combustibilidade baixa e Radiação baixa (em destaque) correspondem aos descritores de moda e máximo pixel respectivamente. A regra booleana aplicada para a classe de SOI Baixo é descrita na Figura 39.

Tabela 23. Combinação das variáveis para geração dos valores de baixo e médio SOI.

Combustibilidade	Exposição à Radiação Solar	Forma de Encosta	Declividade	Susceptibilidade
Classe	Classe	Classe	Classe	Classe
ALTO	BAIXO	BAIXO	BAIXO	MÉDIO
BAIXO	ALTO	BAIXO	BAIXO	MÉDIO
BAIXO	BAIXO	ALTO	ALTO	BAIXO
BAIXO	BAIXO	ALTO	BAIXO	BAIXO
BAIXO	BAIXO	BAIXO	ALTO	BAIXO
BAIXO	BAIXO	BAIXO	BAIXO	BAIXO

Tabela 24. Árvores de decisão extraídas do WEKA para as variáveis de Combustibilidade e Exposição à Radiação solar.

Variável	Árvore de decisão
Combustibilidade	Moda [A26] <= 0.409105: Alta (78.0/7.0) <u>Moda [A26] > 0.409105: Baixa (79.0/9.0)</u>
Exposição à Radiação solar	<u>Máx. pixel [A13] <= 1809972.75: Baixa (96.0/20.0)</u> Máx. pixel [A13] > 1809972.75: Alta (61.0/1.0)

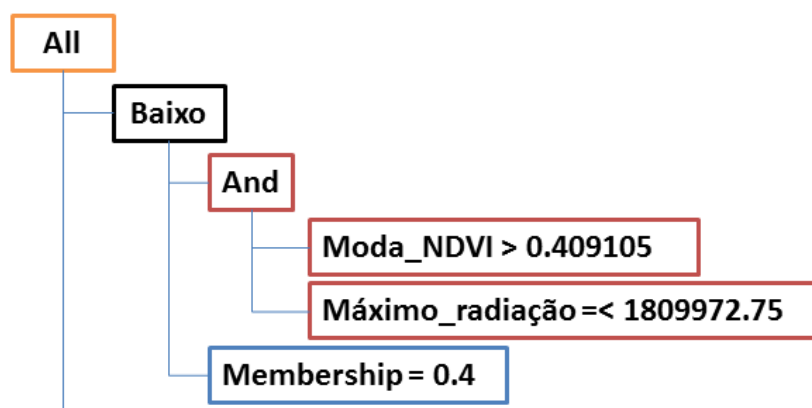


Figura 39. Exemplo de árvore de decisão para classificação de SOI baixo inserida no InterIMAGE.

A classe de médio SOI teve inserção das árvores de decisão de forma completa devido à existência de duas conjugações de variáveis de SOI da Tabela 23. A classe de alto SOI foi inserida apenas para receber áreas não classificadas por médio SOI, baixo SOI e ANSOI.

Na área teste observou-se a realização de teste com três valores de escala utilizando o operador *Baatz* através de segmentação do NDVI no formato de 8 bits. Os valores de escala testados foram 5, 10 e 20 e os resultados são apresentados na Figura 40. Os outros parâmetros testados foram idênticos e corresponderam aos pesos da cor em 0.7; compacidade em 0.9; distância euclidiana em 20 e; o peso da banda correspondente ao NDVI ficou com peso 1.

A redução do valor do parâmetro de escala *Baatz* gera o aumento no número de segmentos trazendo maior detalhamento para a inserção das árvores de decisão explicitadas anteriormente para classificação da SOI. Diante disso, foram elaborados 3 projetos de classificação distinguindo apenas o valor de escala do operador *Baatz*. Os resultados dos projetos de classificação da área teste para a SOI estão dispostos nas figuras 41, 42 e 43.

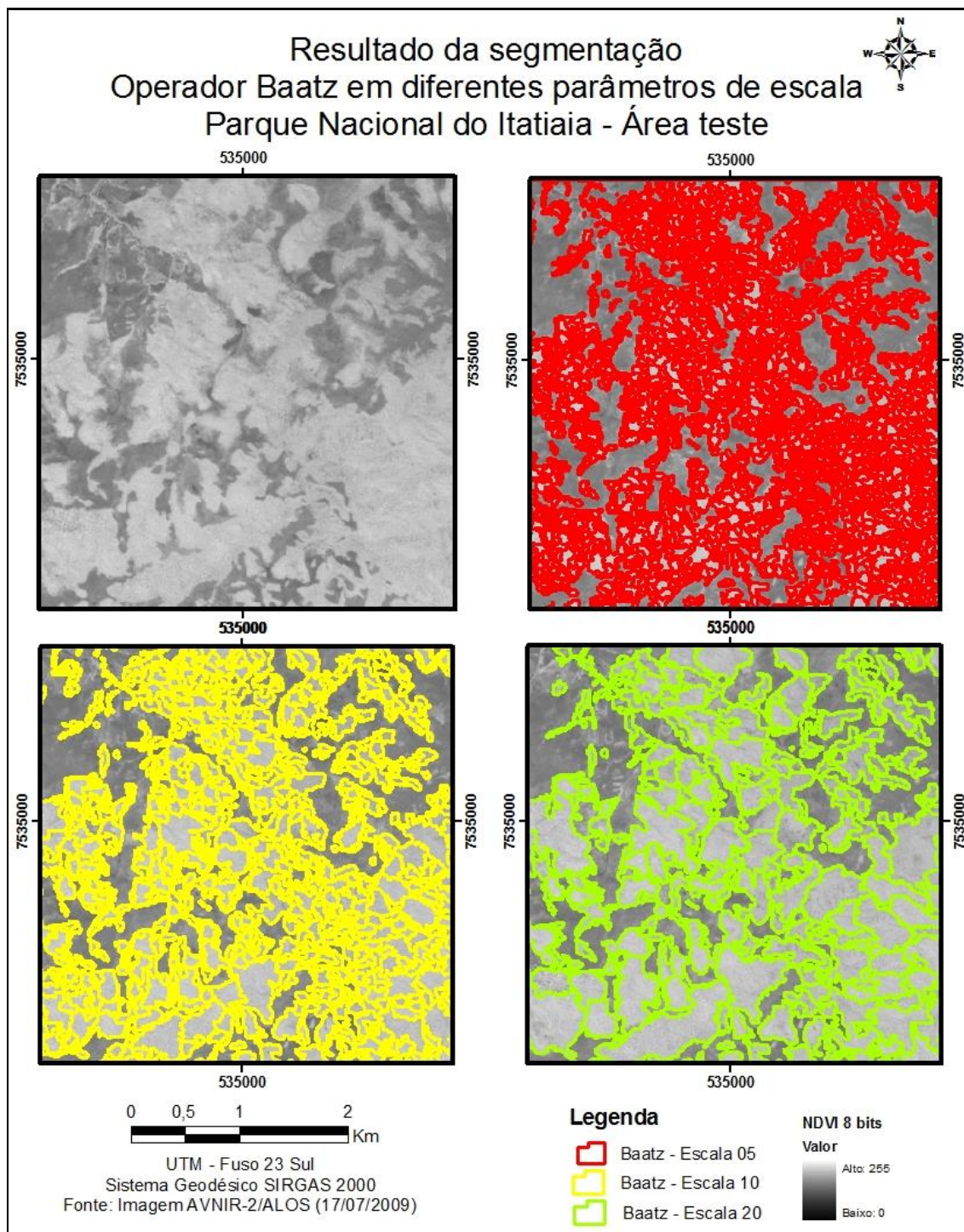


Figura 40. Diferenças entre segmentações pela escala *Baatz*.

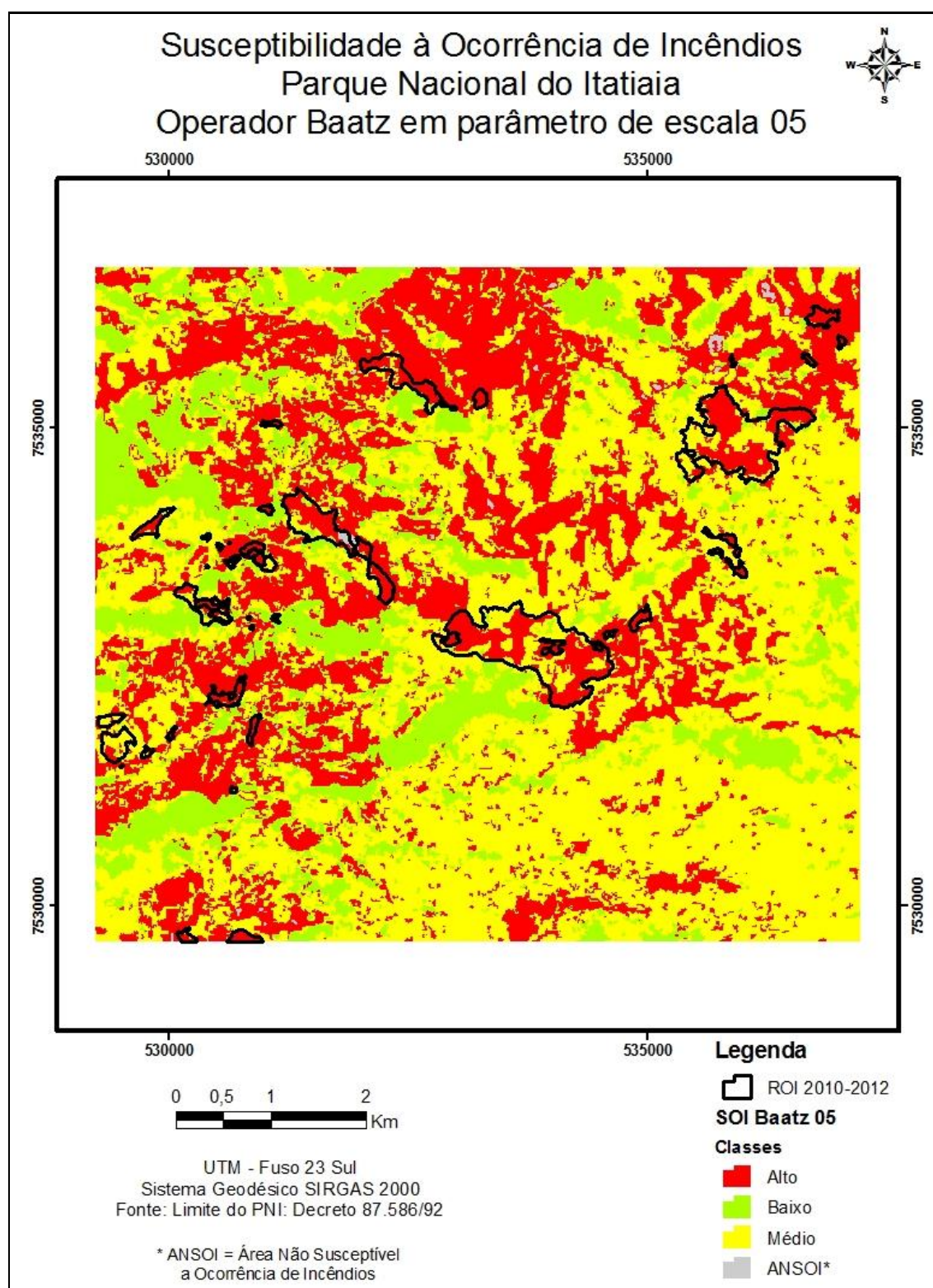


Figura 41. Susceptibilidade à ocorrência de incêndios com escala *Baatz* 5.

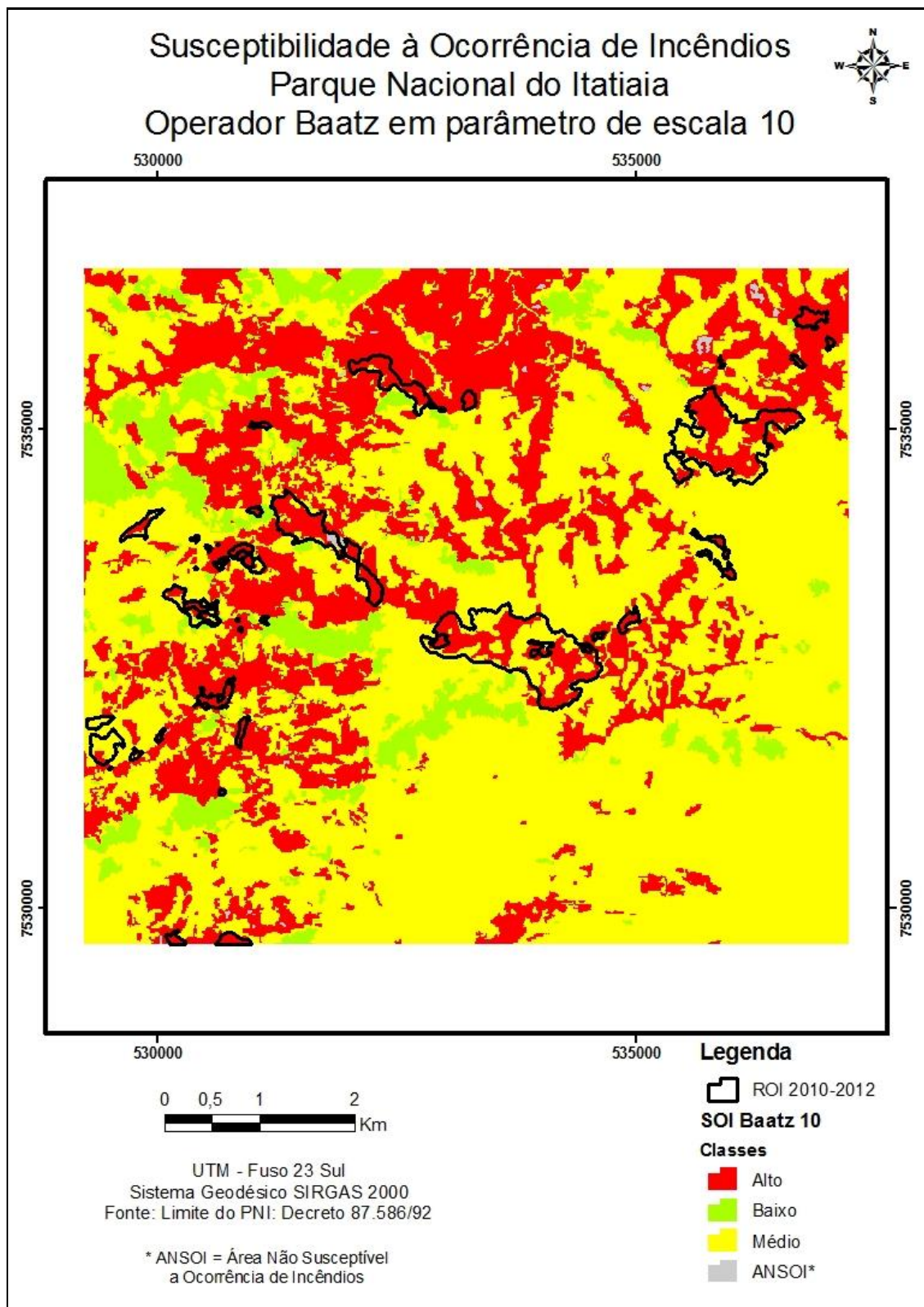


Figura 42. Susceptibilidade à ocorrência de incêndios com escala *Baatz* 10.

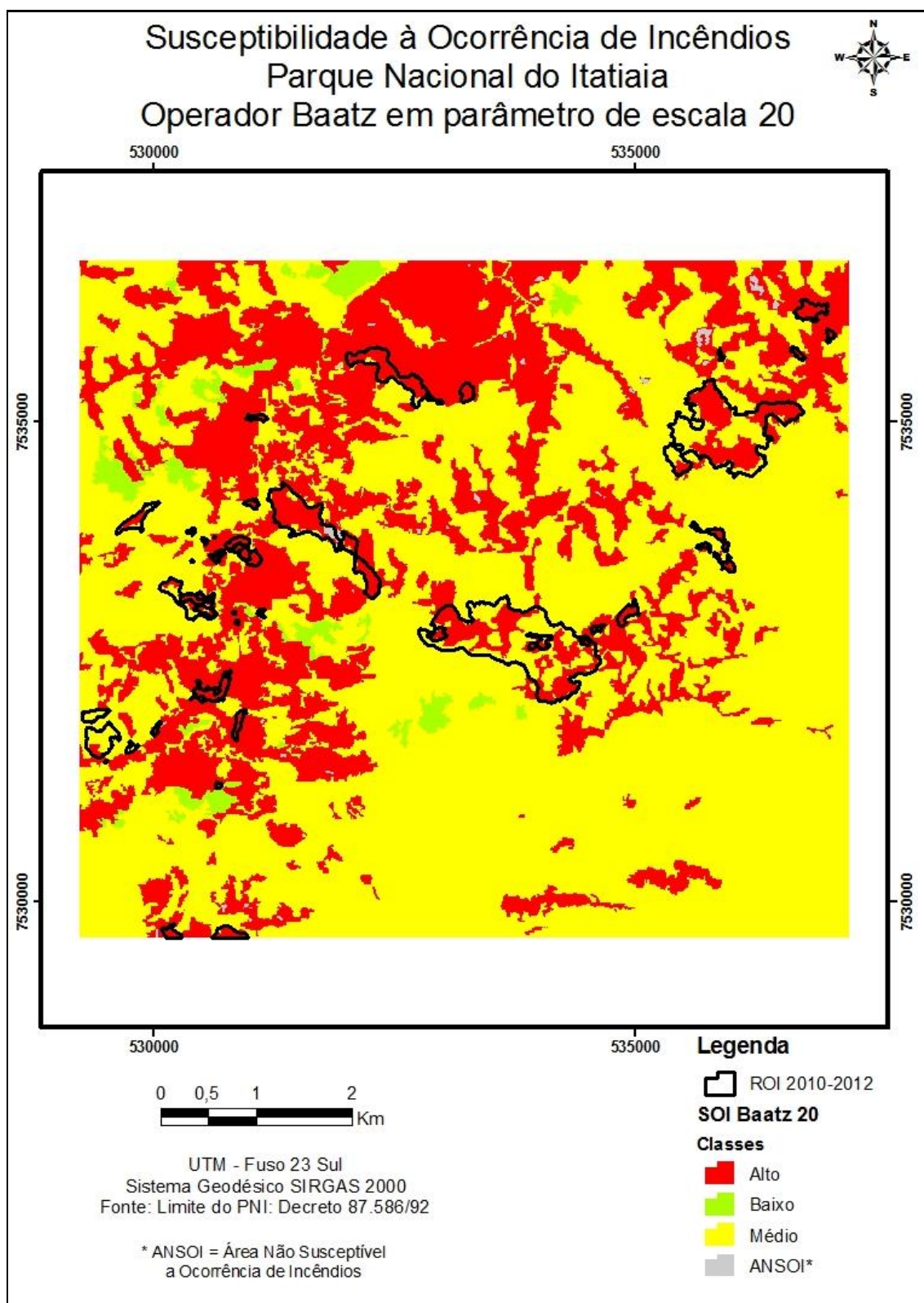


Figura 43. Susceptibilidade à ocorrência de incêndios com escala *Baatz* 20.

Conforme é observado nas Figuras 41, 42 e 43 além da SOI foram sobrepostas às áreas queimadas (ROI) referentes ao período entre 2010 a

2012 que representam áreas posteriores ao levantamento de dados que estão registrados para o ano base de 2009 visando à validação do mapeamento.

O comportamento da SOI varia à medida que os segmentos ficam reduzidos trazendo um “possível” aumento de escala para análise dos dados. Quando os mapas da SOI são sobrepostos com as áreas queimadas observa-se que não é o que ocorre. Visando um melhor entendimento, a Tabela 25 apresenta a sobreposição dos resultados da classificação e áreas queimadas.

Tabela 25. Resultados da sobreposição dos ROIs em diferentes parâmetros de segmentação com o operador *Baatz* e método de combinação de variáveis para classificação da SOI para a área teste do PNI.

Método aplicado	Alto SOI	Médio SOI	Baixo SOI	ANSOI
Baatz 20	60,7%	38,7%	0%	0,6%
Baatz 10	61,9%	36,7%	0,8%	0,6%
Baatz 5	63,5%	31,5%	4,4%	0,6%
Combinação de variáveis	40,1%	50,1%	9,2%	0,6%

Além dos resultados das segmentações aplicadas foi sobreposto também o método de combinação de variáveis que utiliza a classificação “pixel a pixel”. Os resultados visam identificar a classificação que é mais adequada para identificação das áreas queimadas e, analisando a Tabela 25 percebe-se que a classificação por combinação de variáveis não se mostrou a mais eficaz quando comparada com as outras classificações que utilizaram a segmentação e a árvore de decisão.

O método aplicado com a escala 5 para o operador *Baatz* apresentou o melhor resultado para as áreas de alto SOI com 63,5%, médio SOI com 31,5% e baixo SOI com 4,4%. Neste caso poderia ser adotado este método para a classificação da SOI para toda a área de estudo, mas quando se compara com os outros valores de escala *Baatz* são verificados outros resultados. A escala *Baatz* com valor 10 apresenta valores de alto, médio e baixo de 61,9%, 36,7% e 0,8% respectivamente em relação as áreas de validação. Já quando é adotado o valor de escala *Baatz* 20 se observa a identificação apenas das áreas de alto SOI com 60,7% e médio SOI com 38,7%. Não foram classificadas áreas com baixo SOI e, por isso, a utilização do valor de escala 20 foi apontada

como a mais apropriada de acordo com a área teste. Isso se deve ao fato de que as áreas queimadas não são consideradas como áreas de baixo SOI.

Outro fator interessante em relação aos processos de classificação realizados, o segmentador *Baatz* realizado no InterIMAGE utilizou os arquivos brutos de cada variável enquanto o método de combinação de variáveis realizado no ArcGIS utilizou os resultados das classes de alto e baixo das variáveis de Combustibilidade, Exposição à Radiação solar, Forma de encosta e Declividade e seguiu os resultados da metodologia do ISOI que foi apresentada no Capítulo 7. Verifica-se dessa forma que a utilização dos resultados individuais classificados anteriormente não indicaram bons resultados em comparação com o uso dos arquivos originais.

8.2. Metodologia para toda a área de estudo

A classificação da Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios para o PNI foi realizada por meio do InterIMAGE através da elaboração de rede semântica com a utilização dos operadores *Baatz* e de importação de arquivos *shape* (*Shapefile Import*).

Visando realizar a observação de diferentes metodologias de classificação, conforme observado na área teste (item 8.1), foram elaborados dois projetos distintos, denominados projeto 1 e projeto 2, que estão dispostos em duas redes semânticas que possuem o mesmo objetivo: a identificação das áreas de SOI para toda a área do PNI e a ampliação dos limites em 5 km (Figura 44).

A rede semântica elaborada para cada projeto buscou atingir o objetivo da classificação da SOI e, ambas foram definidas a partir dos materiais que foram inseridos nos modelos gerados. O projeto 1 realizou a classificação de maneira mais simples com base exclusivamente nas tabelas de variáveis geoecológicas que resultaram no ISOI através da composição das classes. Já o projeto 2 utilizou a complexidade dos valores das classes de cada variável geoecológica sempre buscando conjugar de forma simples a combinação que resultou na classe de ISOI.

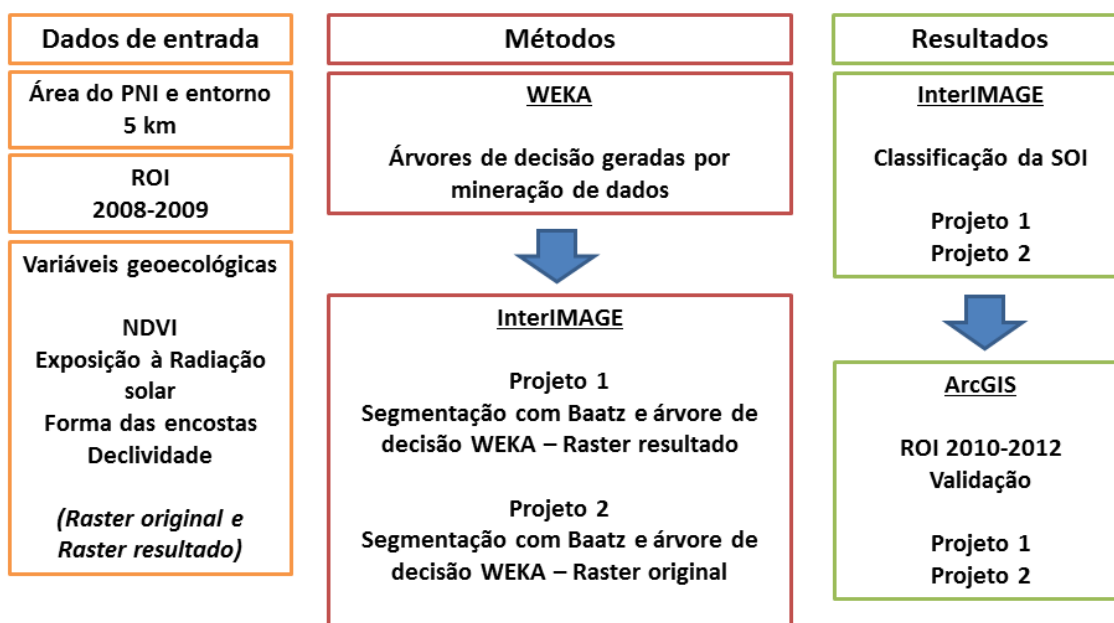


Figura 44. Fluxograma metodológico da SOI aplicado para a área de estudo.

O projeto 1 trata da utilização dos resultados das variáveis classificadas individualmente em classes de alto e baixo, conforme descrito no Capítulo 7, e a inserção destes na árvore de decisão construída com base no ISOI. Neste projeto, a rede semântica inseriu as classes de alta, média e baixa que ficaram abaixo do nó SOI. Em SOI, foi inserida a árvore de decisão no processo *bottom up* que seguiu a combinação das classes de alto e baixo de acordo com a Tabela 23 conforme observamos nas Figuras 45 A e 46 A.

O projeto 2 é pautado na utilização dos dados originais de combustibilidade, radiação solar, forma das encostas e declividade. A rede semântica (Figura 45 B) possui as classes de médio e baixo que estão inseridas abaixo do nó SOI. Apenas as classes de baixo e médio tiveram a inserção da árvore de decisão em *bottom up* com valores adquiridos da mineração de dados (Figura 46 B). A classe de alto SOI corresponde a áreas que não foram classificadas dentro do projeto 2.

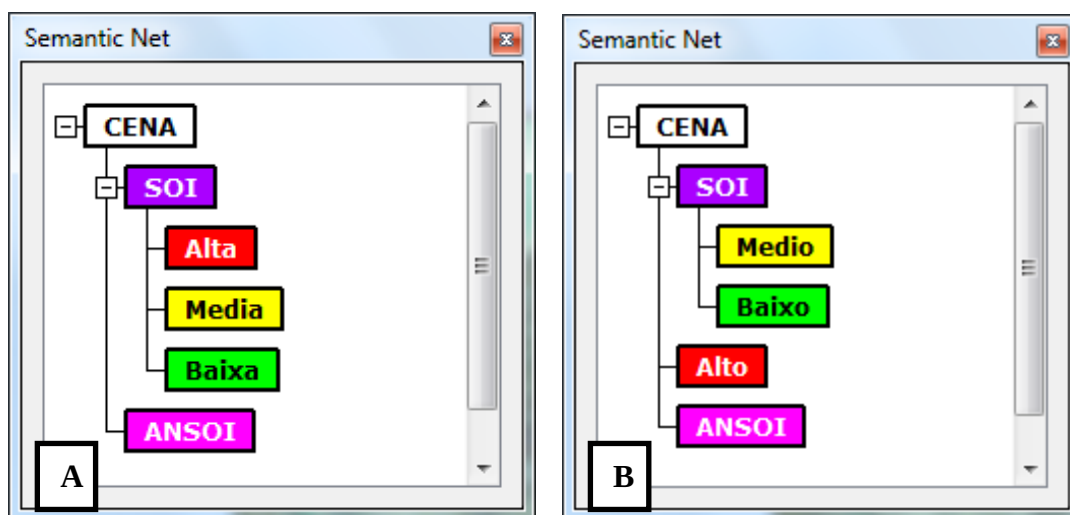


Figura 45. Rede semântica dos projetos 1(A) e 2 (B).

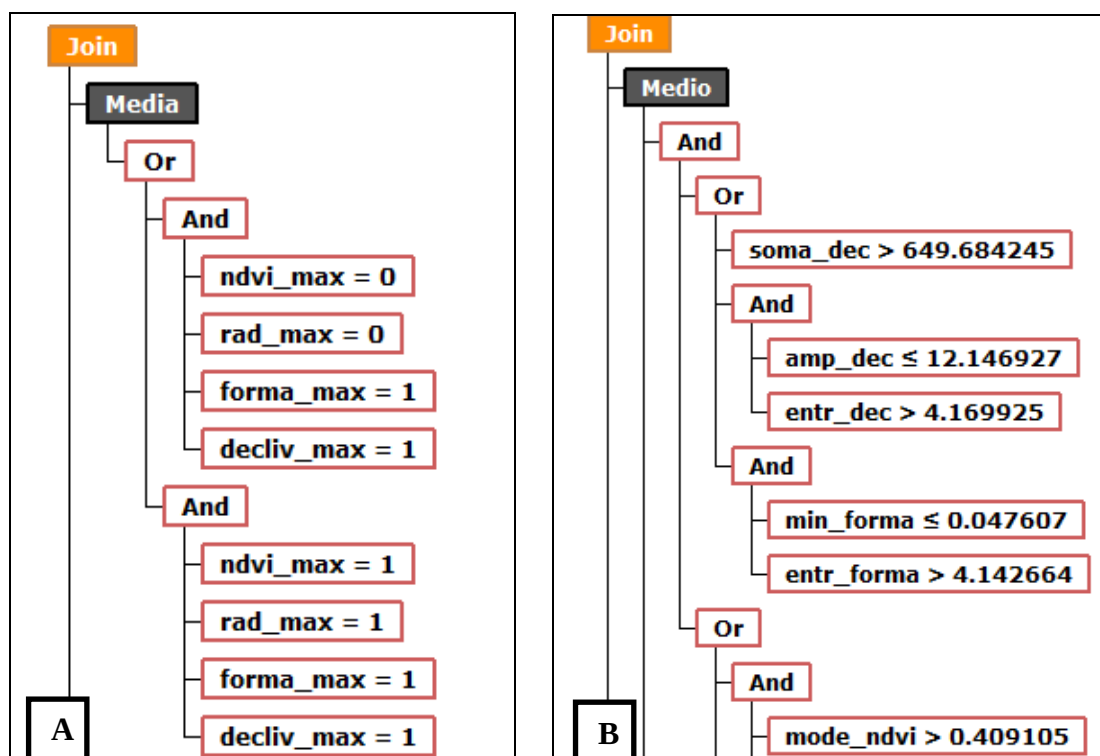


Figura 46. Exemplo da árvore de decisão da combinação das variáveis para a classe de médio SOI. Projeto 1 (A) e Projeto 2 (B).

Em ambos os projetos 1 e 2, as áreas que foram identificadas como ANSOI são resultantes do mapeamento de cobertura da terra através da classe de áreas não vegetadas. A classificação dos mapas de SOI do PNI está disponível nas figuras 47 e 48.

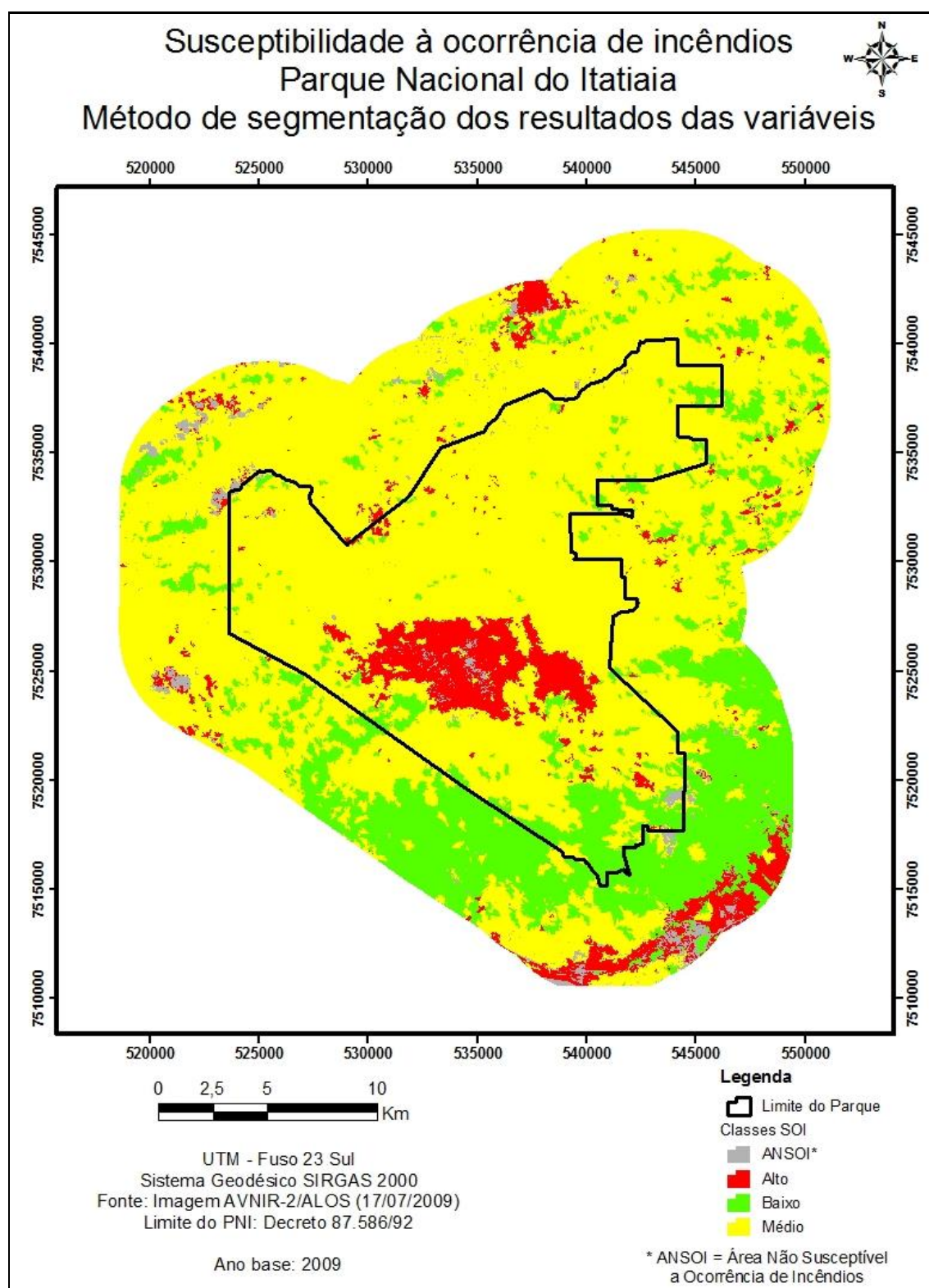


Figura 47. Mapa de susceptibilidade à ocorrência de incêndios do projeto 1.

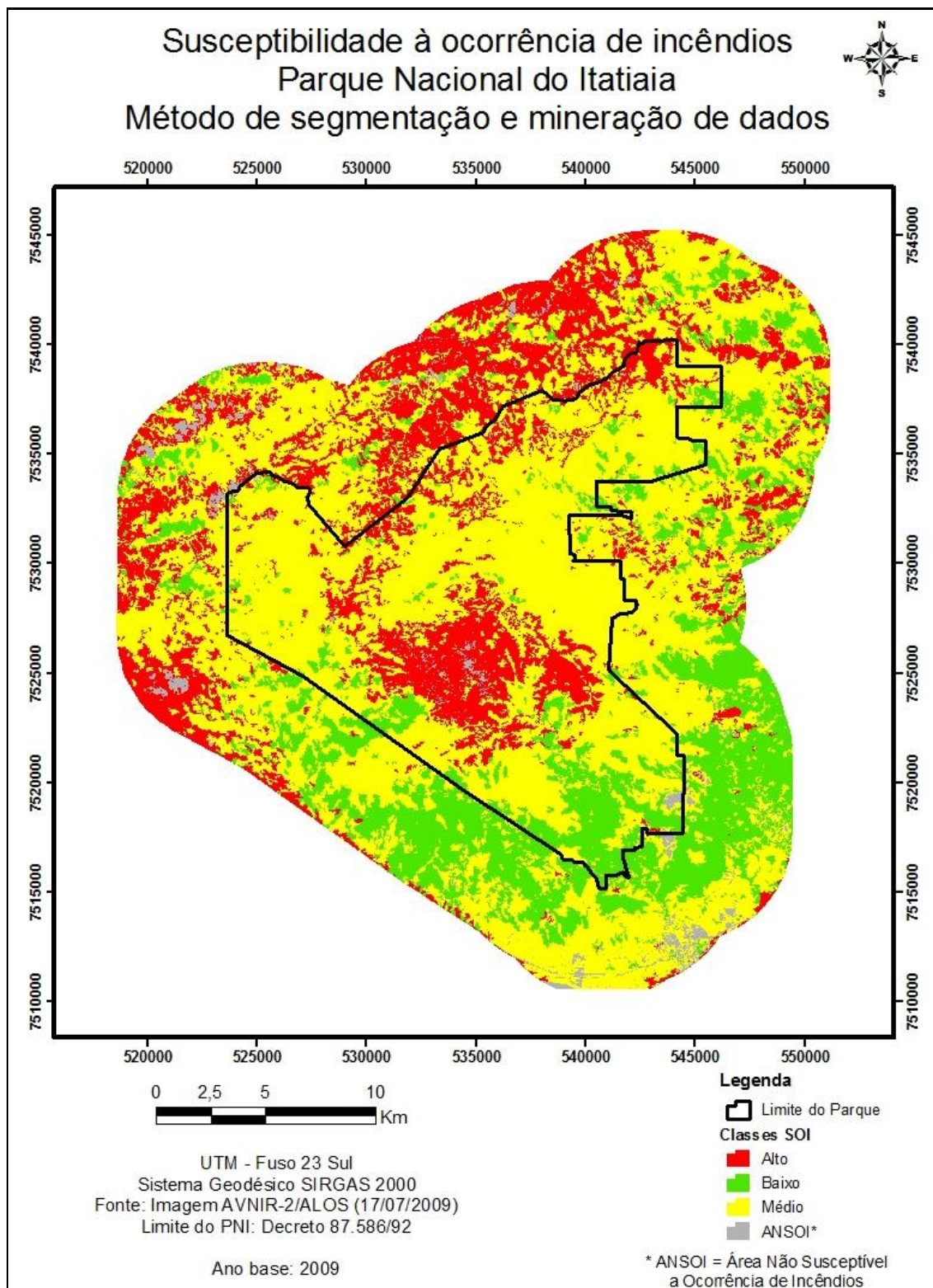


Figura 48. Mapa de susceptibilidade à ocorrência de incêndios do projeto 2.

Os mapas das Figuras 47 e 48 são bastante distintos visualmente apesar de terem utilizados o mesmo valor de escala 20 para o segmentador *Baatz*. Dentre as diferenças, a classe de médio SOI apresenta grande concentração de área no resultado do Projeto 1 (Figura 47) enquanto o resultado do Projeto 2 (Figura 48) mostram que existem áreas de classes de alto e baixo SOI similares espacialmente. Outra característica importante no resultado do Projeto 2 é na parte norte do PNI que apresenta áreas com alto SOI e que indicam a classe de vegetação herbácea que oferece alta combustibilidade. Os parâmetros do operador *Baatz* utilizados em ambos os projetos foram a segmentação foi realizada na imagem NDVI em formato de 8 bits com peso 1; a escala com valor de 20, o peso de compacidade foi 0,9; o peso da cor foi 0,7; e a distância Euclidiana em 20.

8.3. Análise dos resultados

Os resultados dos mapeamentos realizados no software InterIMAGE referem-se ao Projeto 1 (segmentação e combinação das variáveis) e Projeto 2 (segmentação e mineração de dados). Esses resultados foram unidos à classificação apresentada no Capítulo 7, e que foi realizada no software ArcGIS, denominada de “combinação de variáveis” pela utilização dos resultados das variáveis de susceptibilidade (Figura 35). A Tabela 26 consta do total de áreas classificadas pelos métodos aplicados.

Tabela 26. Total de áreas por classe de SOI por método aplicado

Método aplicado	Alto	Médio	Baixo	ANSOI
Combinação de variáveis	42,5%	39,6%	16,2%	1,7%
Segmentação e combinação de variáveis	7,0%	71,4%	19,9%	1,7%
Segmentação e mineração de dados	21,1%	58,0%	19,2%	1,7%

A Tabela 26 mostra que o método de “combinação de variáveis” foi o que identificou o maior percentual de áreas com alto SOI (42,5%) e menor quantidade de áreas com baixo SOI (16,2%). Em comparação com o método de “segmentação e combinação das variáveis” ocorreu o inverso, o menor

percentual de alto SOI (7,0%) e maior quantidade de áreas com baixo SOI (19,9%). Além disso, este método apresentou o maior registro de áreas com médio SOI com 71,4%.

O método de “segmentação e mineração de dados” apresentou o total de 21,1% para alto SOI, 58,0% para médio SOI e 19,2% para baixo SOI. Esse método aplicado registra os valores menos extremos se comparados aos outros métodos utilizados.

A validação dos resultados dos 3 mapeamentos de SOI gerados foram observados através das áreas queimadas identificadas a partir dos ROI fornecidos pela Brigada de Incêndio do PNI. Os ROI utilizados correspondem ao período entre 2010 e 2012 e são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27. Validação da SOI por método aplicado e os ROI 2010-2012.

Método aplicado	Alto	Médio	Baixo	ANSOI
Combinação de variáveis	49,9%	43,0%	6,8%	0,3%
Segmentação e combinação	38,0%	54,6%	7,1%	0,3%
Segmentação e mineração de dados	59,9%	38,1%	1,6%	0,3%

O processo de validação utilizando as áreas queimadas representa a qualidade do mapeamento da SOI. Os três métodos aplicados mostram-se eficazes para identificação da SOI, mas possuem diferenças que devem ser ressaltadas e que são verificadas na Tabela 27.

O mapeamento realizado com a combinação de variáveis realiza essa etapa com a combinação dos mapas de NDVI, radiação solar, forma das encostas e declividade considerando a sobreposição dos resultados das classes baseados no ISOI obtidos por pixel a pixel. A validação indicou para este resultado as áreas de alto, médio e baixo SOI com os valores de 49,9%, 43,0% e 6,8% respectivamente.

Já a inserção da classificação por segmentação e combinação das variáveis insere a GEOBIA como parâmetro principal pela construção dos objetos com base no NDVI e os resultados das variáveis. Essa classificação indicou valores de validação com a área de baixo SOI sendo representada com 7,1% e médio SOI com 54,6%. Neste caso, a classe com alto SOI indica para

as áreas queimadas o percentual de 38,0% que é o menos representativo dos três métodos aplicados.

A inserção dos dados originais de combustibilidade, exposição à radiação solar, forma das encostas e declividade trouxe bons indicadores para o mapeamento da SOI baseado em GEOBIA e mineração de dados. O valor de alto SOI apresentou o maior entre os métodos aplicados com 59,9% enquanto as áreas com baixo SOI foi o menor registro com 1,6%. Esse método aplicado demonstrou que a GEOBIA em conjunto com a mineração de dados é considerado o mais apropriado para a análise da SOI no PNI.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo da Modelagem do conhecimento da Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios trouxe novos avanços à metodologia aplicada na área do Parque Nacional do Itatiaia que teve a inserção de dados de múltiplas fontes além de dados de validação consistentes para a pesquisa que contou ainda com o apoio total e irrestrito daquela UC.

A caracterização das variáveis geoecológicas provenientes da geomorfologia possibilitou o refinamento das técnicas elaboradas em estudos anteriores, a partir da utilização das áreas queimadas adquiridas através do ROI, que tornam possível o conhecimento da paisagem para identificação de fatores que podem indicar futuras áreas que poderão sofrer com o fenômeno dos incêndios florestais tão presentes no PNI.

A imagem AVNIR-2/ALOS trouxe a possibilidade de verificar a área do PNI em melhor resolução espacial, em relação à série Landsat, e propiciou ainda a inserção do NDVI para obtenção dos valores relativos à combustibilidade da biomassa, antes utilizado apenas com dados do mapeamento da cobertura da terra. A imagem referente ao mês de julho de 2009 tornou possível a elaboração da classificação da cobertura da terra do período em que esse fenômeno ocorre constantemente por se tratar da época de inverno (período seco).

Outro fator importante que a imagem AVNIR-2/ALOS trouxe para o estudo foi referente à utilização da técnica de correção atmosférica que foi realizada no modelo 6S. A comparação entre as imagens com e sem correção atmosférica indicou que a presença da atmosfera deve ser observada como um fator importante no processamento digital de imagens em Sensoriamento Remoto. Fato esse que foi ilustrado através dos gráficos de reflectância bidirecional comparando alguns alvos existentes na imagem. As áreas do espectro visível e infravermelho próximo mudam consideravelmente a resposta em relação à imagem sem correção atmosférica. Como resultado as imagens se tornaram mais aptas para a utilização do NDVI que foi gerado para identificação das áreas vegetadas e não vegetadas. A correção atmosférica pode ser utilizada em imagens deste mesmo sensor que se encontram disponíveis no acervo de imagens do PNI (2010 e 2011).

A classificação da cobertura da terra do PNI trouxe a identificação das áreas não vegetadas que apontam a classe denominada de Áreas Não Susceptíveis à Ocorrência de Incêndios (ANSOI). A validação deste mapeamento ocorreu em campo e também por meio dos índices *Kappa* e de exatidão global que mostram resultados promissores para a técnica GEOBIA que foi executada.

A aplicação da mineração de dados realizada no *software* WEKA trouxe parâmetros importantes para a modelagem do conhecimento dos incêndios no PNI. A aquisição das amostras utilizadas depende da localização, quantidade e, principalmente, qualidade das amostras que devem ser de pequena extensão para que haja maior concentração durante o processo de extração dos atributos. A maior dificuldade desta etapa ocorreu durante a conversão dos atributos que exigiu alguns cuidados na conversão do formato dbf para o csv.

Os dados estatísticos apresentados pelos relatórios da construção das árvores de decisão gerados pelo WEKA possibilitaram a introdução dos pesos com fundamentos apresentados pela comparação entre as variáveis através do índice *Kappa*. Esse resultado mostrou a diversidade que existe em cada variável geoecológica e, conseqüentemente, trouxe fundamentação mais consistente ao ISOI pela inserção de pesos para a etapa de combinação de variáveis e classificação da susceptibilidade. Devido à introdução do ISOI optou por não utilizar o método analítico-integrativo que indicava as classes de maneira subjetiva e sem a utilização de pesos.

O *interIMAGE* teve importância na consideração das amostras que foram utilizadas no processo de extração de atributos e construção das árvores de decisão elaboradas nas redes semânticas construídas no projeto de cada variável geoecológica. O operador que indicou melhor funcionamento nos projetos foi baseado no segmentador de crescimento de regiões (*TerraAida_Region_Growing_Segmenter*) e a utilização desse operador ocorreu em todos os quatro projetos.

Ocorreram variações nos projetos de forma das encostas e NDVI com a utilização dos segmentos gerados a partir do MDE e imagem AVNIR-2 respectivamente. Os projetos de exposição à radiação solar e declividade utilizaram os próprios arquivos para criação dos segmentos e seleção dos resultados para árvore de decisão.

O estudo da Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios mostrou-se pertinente e indicou a possibilidade de realização do mapeamento com diversas técnicas. A técnica que se mostrou mais eficaz ocorreu através da utilização dos *softwares* InterIMAGE e WEKA que aliaram as técnicas GEOBIA e mineração de dados e obtiveram os melhores resultados para a realização da modelagem do conhecimento da susceptibilidade à ocorrência de incêndios no PNI.

A utilização da área teste e dos incêndios verificados em campo pelos ROI trouxe o entendimento de que a utilização de segmentos menores não significa que o mapeamento da SOI está dentro do melhor padrão de identificação para tal. Isso foi comprovado também pela realização da SOI por álgebra de mapas que foi realizada pela combinação dos resultados das variáveis no *software* ArcGIS.

O *software* InterIMAGE mostrou-se eficaz para a geração do mapeamento da SOI e, em conjunto com o minerador de dados WEKA, tornou-se ferramenta importante para atingir os objetivos deste estudo. Apesar de algumas limitações relacionadas ao tamanho da imagem e tempo de processamento, não houve a necessidade de fazer algum recorte dos arquivos utilizados. O InterIMAGE mostrou diferentes possibilidades de classificação tornando possível a comparação com as áreas queimadas e identificação de qual o melhor método para a aplicação do estudo da SOI.

A identificação das áreas queimadas através dos GNSS utilizados pelos Brigadistas do PNI foi de suma importância para a realização deste trabalho que utilizou os Relatórios de Ocorrência de Incêndios (ROI). Esses dados referentes aos anos de 2009 a 2012 trouxeram a possibilidade de usos múltiplos que foram desde a calibração do modelo de conhecimento da SOI que utilizou o ano de 2009 como período base até a validação do mapeamento da SOI entre os anos de 2010 e 2012.

Como proposta para trabalhos futuros é importante a inserção de novos sensores que encontram-se disponíveis gratuitamente com o OLI-TIRS/Landsat 8 que poderão trazer também outros resultados com as novas bandas implementadas além das imagens recentes que já vem sendo disponibilizadas pelo site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS).

Além dos novos sensores da plataforma Landsat 8, existe também a possibilidade de realizar a dinâmica da área do PNI através das outras imagens disponíveis nos sítios do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) que podem trazer também outras respostas para o conhecimento dos incêndios no PNI.

Outra sugestão é em relação à ferramenta *Area Solar Radiation*, do *software* ArcGIS, utilizada para o cálculo da Exposição à Radiação Solar anual que pode propiciar a inserção de períodos que trazem a possibilidade de estudos relativos à sazonalidade dos incêndios, principalmente quando é observada a época de queimadas durante os meses de julho a setembro. O emprego dessa variável vai trazer novos cenários da SOI e a indicação de resultados diferenciados.

A metodologia ainda pode gerar outros resultados em relação à classificação por GEOBIA na utilização de lógica *fuzzy* que também pode ser aplicada no *software* InterIMAGE por meio do ISOI. O InterIMAGE apresentou diversos avanços durante a execução desse trabalho e ainda possui outras ferramentas de operadores e técnicas que vêm sendo exploradas através da parceria entre os Laboratórios Geocart e Espaço (UFRJ) e o Laboratório de Visão Computacional – LVC/PUC Rio.

Outro fator importante para a realização deste trabalho foi o interesse do Parque Nacional do Itatiaia na pesquisa que em todos os momentos se mostrou prontamente para recepção dos pesquisadores, cessão de dados e troca de ideias visando sempre as melhores aplicações e, principalmente, resultados para aquela UC.

BIBLIOGRAFIA

- ALONSO BENITO, A.; ARROYO, L.A.; ARBELO, M.; HERNÁNDEZ-LEAL, P.; NUÑEZ-CASILLAS, L.; ARVELO-VALENCIA, L. (2012) Object-based image analysis for mapping fuel types in Tenerife Island using Worldview-2 data. *Proceedings of the 4th GEOBIA*, Rio de Janeiro, Brazil. p.p. 391-395.
- ANO, S. (2004) *Técnicas de Mineração de Dados*. XXIV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação. Jornada de Atualização em Informatica, 31 de Julho a 6 de Agosto 2004, Salvador Brazil.
- ANTUNES, M.A.H., DEBIASI, P., COSTA, A.R. da.; GLERIANI, J.M. (2012) Correção atmosférica de imagens ALOS/AVNIR-2 utilizando o modelo 6S. *Revista Brasileira de Cartografia – RBC*, nº 64/Edição especial Sensoriamento Remoto: p. 531-539.
- ANTUNES, M.A.H.; FREIRE, R.M.B.; BOTELHO, A.S.; TONIOLLI, L.H. (2003) Correções atmosféricas de imagens de satélites utilizando o modelo 6S. In.: Congresso Brasileiro de Cartografia (CBC), 21. Belo Horizonte. *Anais...* Rio de Janeiro: SBC.
- ASPINALL, R.J. (1999) GIS and landscape conservation. In: *Geographical Information Systems*, org. by GOODCHILD, M.F.; MAGUIRE, D.J. & RHIND, D.W.; Ed. John Wiley & Sons, New York, 2º ed., pp. 967 - 980.
- BAATZ, M.; SCHAPE, A. (2000) Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII*. Beitrage zum AGITSymposium Salzburg. Karlsruhe. Herbert Wichmann Verlag, 2000. p. 12 – 23.
- BARTH, R. (1957) *A Fauna do Parque Nacional do Itatiaia*. *Boletim do Parque Nacional do Itatiaia*, Nº 6. Itatiaia/RJ, 149p.
- BINS, L. S., FONSECA, L. M. G., ERTHAL, G. J., LI, F. M. (1996) Satellite imagery segmentation: a region growing approach. In: *VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Salvador, BA. pp. 677-680.
- BITTENCOURT, G. (2006) *Inteligência artificial: ferramentas e teorias*. Florianópolis/SC: Editora da UFSC. 371 p.
- BLASCHKE, T.; KUX, H.J.H. (2007) *Sensoriamento Remoto e SIG avançados – novos sistemas sensores: métodos inovadores*. São Paulo: Oficina de Textos. 2ª Ed. 303 p.

- BOCK, M.; LESSING, R. (2000) Remote Sensing, Formation of Objects and Determination of Quality, In: Internationales Symposium "Informatik für den Umweltschutz" der Gesellschaft für Informatik (GI), 14, 2000, Bonn. *Proceedings...* Marburg: Metropolis Verlag. p. 581-594. Disponível em: <<http://enviroinfo.isep.at/UI%20200/BockM300700.el.hsp.pdf>>.
- BONHAM CARTER, G. F. (1994) *Geographic Information Systems for Geoscientists - Modelling with GIS*. Kindlington: Pergamon Press.
- BONHAM-CARTER, G. F. (1996) - *Geographic Information Systems for Geoscientists - Modelling with GIS*. Kindlington: Pergamon Press, 2º ed., 400 p.
- BOVIO, G. & CAMIA, A. (1997) Meteorological indices for large fires danger rating. In: CHUVIECO, E. (Editor). *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires* (Megafires project ENV-CT96-0256). Alcalá de Henares, Espanha, pp. 73-89.
- BRADE, A. C. (1956) A flora do Parque Nacional do Itatiaia. *Boletim do Parque Nacional do Itatiaia*, Nº 5. Itatiaia/RJ, 114p.
- BRIDGEWATER, P.B. (1993) Landscape ecology, geographic information systems and nature conservation. In: HAINES-YOUNG, R.; GREEN, D.R. & COUSINS, S.H. (editors) *Landscape Ecology and GIS*, cap. 3, pp. 23 - 36.
- BÜCKNER, J.; STAHLHUT, O.; PAHL, M.; LIEDTKE., C.E. (2001) GEOAIDA - A knowledge based automatic image data analyser for remote sensing data. In: International ICSC Congress on Computational Intelligence: Methods & Applications, 2., 2001, Bangor, Wales, United Kingdom. *Proceedings...* Millet, Alberta: ICSC, 2001. p.19-22.
- BURROUGH, P.A. & MCDONNELL, R.A. (1998) *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, New York, 2º ed., 333 pp.
- CÂMARA, G. & MEDEIROS, J. S. (1998) Princípios Básicos em Geoprocessamento. In: *Sistema de Informações Geográficas. Aplicações na Agricultura*. Brasília, Embrapa – SPI/Embrapa – CPAC, p. 3 – 12.
- CAMARGO, F.F. (2008) *Análise orientada a objeto aplicada ao mapeamento de unidades geomorfológicas a partir de dados ASTER/Terra*. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos/SP.

- CARVALHO, M.V.A. de. (2011) *Classificação da cobertura e uso do solo com imagens Worldview-2 utilizando mineração de dados e análise baseada em objetos*. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) São José dos Campos: INPE, 179 p.
- CASTRO, A.L.C. de. (1998) *Glossário de Defesa Civil – Estudos de riscos e medicina de desastres*. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, Departamento de Defesa Civil. 2ª ed. 96 p.
- CASTRO, C.M.; PEIXOTO, M.N.O.; RIO, G.A.P. (2005) *Riscos Ambientais e Geografia: Conceituações, Abordagens e Escalas*. Environmental Risks and Geography: Conceptualizations, Approaches and Scales. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. Vol. 28-2 p. 11-30.
- CHAVEZ, P. S. (1988) An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multi-spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24, p. 459- 479.
- CHUVIECO, E.; CONGALTON, R. G. (1989). Application os Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping. In: *Remote Sensing of Environment*, 29, pp.147-159.
- CHUVIECO, E.; SALAS F. J.; VEGA, C. (1997) Remote Sensing and GIS for Long-Term Fire Risk Mapping. In: CHUVIECO, E. (Editor). *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires* (Megafires project ENV-CT96-0256). Alcalá de Henares, Espanha, pp. 73-89.
- CINTRA, D. P. ; NOVACK, T. ; REGO, L. F. G. ; COSTA, G. A. O. P.; FEITOSA, R. Q. (2010) PIMAR Project - Monitoring the atlantic rainforest remnants and the urban growth of the Rio de Janeiro city (Brazil) through remote sensing. In: GEOBIA 2010, Ghent, Belgium. *Proceedings of the GEOBIA 2010*.
- CLEMENT, V.; GIRAUDON, G.; HOUZELLE, S.; SANDAKLY, F. (1993) Interpretation of remotely sensed images in a context of multisensor fusion using a multispecialist architecture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 31, n. 4, p. 779-791, Jul. 1993.
- COELHO NETTO , A. L., AVELAR, A. S., FERNANDES, M. C., LACERDA, W. A. (2007) Landslide Susceptibility in a Mountainous Geoecosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The Role of Morphometric Subdivision of the Terrain. In: *Geomorphology* (Amsterdam). , v.87, p.120 – 131.

- COELHO NETTO, A. L. (2000) *Sistemas ambientais e estruturas funcionais da paisagem tropical úmida: um método de análise geográfica sob a ótica geo-hidroecológica*. Pesquisa desenvolvida sob os auspícios do Cons. Nac.de Desenv. Científico e Tecnológico/CNPq, Fund. de Amp. Pesq. do Rio de Janeiro/FAPERJ, Fund. Univ. José Bonifácio/FUJB, PRONEX/FINEP-CNPq e FUJB-PROBIO-Banco Mundial.
- COELHO NETTO, A.L.; DANTAS, M.E. & ROSAS, R.O. (1993) - *Grandes domínios geoecológicos da Amazônia Legal (1:2.500.000): bases para o estudo dos efeitos de borda das linhas de transmissão de energia a serem implantadas na Amazônia florestal*. Relatório solicitado pela ELETROBRÁS, 26 p.
- CONGALTON, R.G.; GREEN, K. (2009) *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. New York: Lewis Publishers.
- COSTA, G. A. O. P.; FEITOSA, R. Q.; FONSECA, L. M. G.; OLIVEIRA, D. A. B.; FERREIRA, R. S.; CASTEJON, E. F. (2010) Knowledge-based interpretation of remote sensing data with the InterIMAGE system: Major characteristics and recent developments. In.: *Proceedings of Geographic Object-Based Image Analysis – GEOBIA 2010*, Ghent, Belgium.
- COSTA, G.A.O.P.; PINHO, C.M.D.; FEITOSA, R.Q.; ALMEIDA, C.M.; KUX, H.J.H.; FONSECA, L.M.G.; OLIVEIRA, D. (2008) InterIMAGE: Uma plataforma cognitiva open source para a interpretação automática de imagens digitais. *Revista Brasileira de Cartografia – RBC*, nº 60/4, p.331-337, dez 2008.
- COURA P. H. F., SOUSA G. M., FERNANDES M. C. (2009). Mapeamento geoecológico da susceptibilidade à ocorrência de incêndios no maciço da Pedra Branca, município do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências UFRJ*; 32 (2):14-25.
- CRUZ, C. B. M. (2000) *As bases operacionais para a modelagem e implementação de um banco de dados geográficos em apoio à gestão ambiental - um exemplo aplicado à bacia de Campos, RJ*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Depto. de Geografia, IGEO/UFRJ, 394 p.
- CRUZ, C. B. M.; VICENS, R. S.; SEABRA, V. S.; REIS, R. B.; FABER, O. A.; RICHTER, M.; ARNAUT, P. K. E.; ARAÚJO, M. (2007) Classificação

- orientada a objetos no mapeamento dos remanescentes da cobertura vegetal do bioma Mata Atlântica, na escala 1:250.000. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. *Anais...* São José dos Campos: INPE. p. 5691-5698.
- DALCUMUNE, M.A.B.; SANTOS, A.R. dos. (2005) Mapeamento de índice de risco de incêndio para a Região da Grande Vitória/ES, utilizando imagens do satélite Landsat para o ano de 2002. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2005, p. 1485-1492. CD-ROM. ISBN 85-17-00018-8.
- DUBAYAH, R.; RICH, P.M. (1995) Topographic solar-radiation models for GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, v.9, p.405-419, 1995.
- EGLER, C.A.G. (1996). Risco ambiental como critério de gestão do território. *Território*, 1:31-41.
- ESRI (1998) *Shapefile Technical Description - ESRI White Paper*, July 1998.
- FEITOSA, R.Q.; MATTOS, C.; SANTOS, R.V.; REGO, L.F.G.; PEREIRA, A.A.C. (2005) Impacto de técnicas baseadas em conhecimento na análise de imagens de média resolução para mapeamento do desflorestamento na Amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12 (SBSR), 2005, Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, p. 4065-4072.
- FERNANDES, M. C. (2009). Discussões Conceituais e Metodológicas do Uso de Geoprocessamento em Análises Geoecológicas. In: *Questões Metodológicas e Novas Temáticas na Pesquisa Geográfica - PPGG/UFRJ*.
- FERNANDES, M.C.; COURA, P.H.F.; SOUSA, G.M.; AVELAR, A.S. (2011) Avaliação Geoecológica de Susceptibilidade à Ocorrência de Incêndios no Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Floresta e Ambiente*. 2011 jul./set.; 18(3):299-309. doi 10.4322/loram.2011.050
- FERNÁNDEZ-MANSO, Ó.; QUINTANO, C.; FERNÁNDEZ-MANSO, A. (2009) Combining spectral mixture analysis and object-based classification for fire severity mapping. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 18(3), p.p. 296-313.

- FORMAN, R. T. T. & GODRON, M. (1986) Overall structure. In: *Landscape ecology*. New York, J. Wiley, cap 6, pp. 191-221.
- FORMAN, R.T.T. (1995) *Land mosaics: the ecology of landscapes and regions*. Cambridge University press, 631p.
- FREIRE, P. F. B. (2006) *Refletindo Sobre o Conceito do Risco Natural e de sua Dimensão: Breve Análise dos Incêndios Florestais no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães. Uma contribuição do Cadastro Técnico Multifinalitário para a Defesa Civil*. Monografia, Especialização em Planejamento e Gestão em Defesa Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. 100 fls.
- GOLDSCHMIDT, R.; PASSOS, E. (2005) *Data mining - um guia prático*. Rio de Janeiro: Elsevier, 257 p. ISBN (85-352-1877-7).
- GONDIM, M. M. (2007) Do conceito de risco ao da precaução: entre determinismos e incertezas. In: Fonseca, A.F. (org). *O território e o processo saúde-doença*. Rio de Janeiro: EPSJV/FIOCRUZ. p. 87-120.
- HAN, J., KAMBER, M., (2006) *Data Mining: Concepts and techniques*, 2ª ed., USA, Morgan Kaufmann Publishers.
- HUGGETT, R. J (1995). *Geoecology an Revolutionary Approach*. Routledge. London.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1991) Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. Centro de Documentação e Disseminação de Informações/ IBGE, Rio de Janeiro, 92 p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012) Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*. Centro de Documentação e Disseminação de Informações/ IBGE, Rio de Janeiro, 276p. 2ª ed.
- ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade Disponível em <<http://www.icmbio.gov.br>> - acesso em 09-11-2012.
- ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, (2010). *Apostila para Formação de Brigadista de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais*. Diretoria de Unidades de Conservação de Proteção Integral, Coordenação Geral de Proteção Ambiental. Brasília, 87 p.

- ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, (2010b). *Registros de Ocorrência de Incêndios e Dados Digitais de Ocorrências de Incêndios*. Núcleo de Prevenção e Combate a Incêndios do Parque Nacional do Itatiaia. Não publicado. Ministério do Meio Ambiente, Brasil.
- Imagens do Satélite ALOS. (2009) Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/alos/sensores.php>>. Acesso em: 11 nov.2010.
- InterIMAGE – Interpreting Images Freely, Disponível em <<http://www.lvc.ele.puc-rio.br/projects/interimage/>>. Acesso em: 11 de nov. 2011.
- JAXA. (2008) *ALOS Data Users Handbook: Revision C*. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_RevC_EN.pdf> Acesso em 1º ago. 2012. 158 p.
- JENSEN, J. R. (2009) Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. Tradução da 2a. edição. EPIPHANIO, J. C. N. (org.). São José dos Campos: Parêntese Editora. 672 p.
- KAUFMAN, Y. (1989) The atmospheric effect on remote sensing and its correction. In.: ASRAR, G. *Theory and applications of optical remote sensing*. New York: John Wiley & Sons. Cap. 9. p. 336-428.
- KOPROSKI, L.; FERREIRA, M. P.; GOLDAMMER, J. G.; BATISTA, A. C. (2011). Modelo de Zoneamento de Risco de Incêndios para Unidades de Conservação rasileiras: o Caso do Parque Estadual do Cerrado. In: *Floresta*, Curitiba, PR v. 41, n.3, PP. 551-562.
- KRUIJF, H. A. M.; SCHOUTEN, A. J. (1987) *On Problem of Measuring Vulnerability os Soil Ecosystems*. W. van Duijvenbooden, H. G. v. W., ed., *Vulnerability of Soil and Groundwater Polluttants*. The Hague, p 97-109.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. (1977) The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, n. 1, p. 159-174.
- LANG, S.; BLASCHKE, T. (2009) Análise da paisagem com SIG. Tradução: KUX, H.J.H. São Paulo: Oficina de Textos. 424 p.
- LEUNG, Y. (2010) *Knowledge discovery in spatial data*. London: Springer, 391 p.
- LIEDTKE, C.E. (1997) AIDA: a system for the knowledge based interpretation of remote sensing data. In: International Airborne Remote Sensing Conference & Exhibit, 3., 1997, Copenhagen, Denmark. *Proccedings...* Copenhagen, Denmark, 1997. p. 313-320.

- MARTINS, V.A., FONSECA, L. M. G. (2009). Classificação de uso de solo baseada na análise orientada a objeto e mineração de dados utilizando imagens SPOT/HRG-5. *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal.
- MATEO RODRIGUEZ, J. M.; SILVA, E. V.; CAVALCANTI, A. P. B. (2007). *Geoecologia das Paisagens: uma visão sistêmica da análise ambiental*. Edições UFC, Fortaleza, CE, 2ª Ed., 222p.
- MATEO, J.; MAURO, A. (1994) *Análise da Paisagem como Base para uma Estratégia de Organização Ambiental*. UNESP, Rio Claro. 29 p.
- MATHER, P.M. (1999) *Computer processing of remotely-sensed images – an introduction*. Midsomer Norton, Wiley, 292p.
- MATSUYAMA, T.; HWANG, V. *SIGMA, a knowledge-based aerial image understanding system*. New York: Plenum, 1990. 296p.
- McGARIGAL, K. & MARKS, B. J. (1994) *Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*. Corvallis; Oregon State University, 67p.
- McKEOWN, D. M., HARVEY, W. A., McDERMOTT, J. (1985) Rule Based interpretation of aerial imagery. In: *IEEE Transactions in Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 7(5), pp. 570- 585.
- MEIRELLES, M.S.P. (1997) *Análise Integrada do Ambiente através de Geoprocessamento – Uma Proposta Metodológica para Elaboração de Zoneamentos*. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, IGEO, Pós-Graduação em Geografia, Rio de Janeiro, 280p.
- MENEZES, P. M. L. e FERNANDES, M.C. (2013) – Roteiro de Cartografia. São Paulo: Oficina de Textos, 1ª Ed.
- MENEZES, P.M.L. (2000) *A interface Cartografia-Geoecologia nos estudos diagnósticos e prognósticos da paisagem: um modelo de avaliação de procedimentos analítico-integrativos*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Depto. de Geografia, IGEO/UFRJ, 208 f.
- METZGER, J.P. (2001) Relationships Between Landscapes Structure And Tree Species Diversity. In: *Tropical Forests of South-East Brazil. Landscape and Urban Planning*. n. 37, p. 29-35.

- MOORE, T. (2000) Geospatial expert systems. In: OPENSHAW, S.; ABRAHART, R. J. (Ed.). *Geocomputation*. London: Taylor & Francis, 2000. cap. 6, p. 132 – 159.
- MOTA, F.S. (1977) *Meteorologia agrícola*. São Paulo: Nobel, 375 p.
- NAVEH, Z. & LIEBERMAN, A. (1993) *Landscape Ecology: Theory and Application*, 2nd Ed. New York. Springer Verlag, 265 p.
- NEUBERT, M.; KROPP, S. WAGENKNECHT, S.; STOW, D.; COULTER, L. (2008) Vegetation fire fuels mapping in the San Diego City Canyons – A method comparison. In.: *Proceedings of Geographic Object-Based Image Analysis – GEOBIA 2008*, Calgary, Canadá.
- NIEMANN, H; SAGERER, G.; SCHRODER, S.; KUMMET, T.F. (1990) ERNEST – A semantic network system for pattern understanding. *IEEE Transactions PAMI*, v. 12, n. 9, p. 883-905, Sep. 1990.
- NOVACK, T. (2009) Classificação da cobertura da terra e do uso do solo urbano utilizando o sistema InterIMAGE e imagens do sensor Quickbird. 214 p. (INPE-14183-TDI/1095). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- NOVO, E. M. L. M. (2008) Sensoriamento remoto: princípios e aplicações. 3ª ed. revista e ampliada. São Paulo: Edgard Blucher, 388 p.
- O'RIORDAN, T. (2002) Precautionary Principle. In: TOLBA, M.K. (ed): *Encyclodia of Global Environmental Change*, vol. 4. Chichester, UK: John Wiley.
- OLIVEIRA, R. R.; ZAÚ, A. S.; LIMA, D. F.; SILVA, M. B. R.; VIANNA, M .C.; SODRÉ, D. O.; SAMPAIO, P. D. (1995) Significado Ecológico da Orientação de Encostas no Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro. In: *Oecologia Brasiliensis*, vol I, p. 523-541. Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Instituto de Biologia, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- PAGE, Talbot. (1978) *A Generic View of Toxic Chemicals and Similar Risk*. Ecology Law Quaterly 7.
- PAHL, M. (2008) *Arquitetura de um sistema baseado em conhecimento para a interpretação de dados de sensoriamento remoto de múltiplos sensores*. 95 p. (INPE-15211-TAE/71). PhD Thesis - Universidade de Hannover, São José dos Campos.

- PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S.L. de; RÜTHER, R. (2006) *Atlas brasileiro de energia solar*. São José dos Campos: INPE, 60p.
- PEZZOPANE, J. E. M.; OLIVEIRA NETO, S. N.; VILELA, M. F. (2001). Risco de Incêndios em Função da Característica do Clima, Relevo e Cobertura do Solo. In: *Floresta e Ambiente*, V.8, n.1, PP. 161-166.
- PINHEIRO, E. S., KUX, H. J. H. (2005) Imagens Quickbird aplicadas ao mapeamento do uso e cobertura da terra do Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza Pró-Mata. In: BLASCHKE, T.; KUX, H. (Org.). *Sensoriamento remoto e SIG avançados – Novos sistemas sensores métodos inovadores*. São Paulo. Oficina de Textos. cap. 27. p.263-281.
- PINHO, C. M. D. (2005) *Análise orientada a objetos de imagens de satélites de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos*. 2005. 180 p. (INPE-14183-TDI/1095). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- PLATT, R.V.; SCHOENNAGEL, T. (2008) Have forests really become denser? An object-oriented case study of a key premise in wildfire policy. In.: *Proceedings of Geographic Object-Based Image Analysis – GEOBIA 2008*, Calgary, Canadá.
- PONZONI, F. J. (2001) Comportamento Espectral da Vegetação. In: Meneses, P. R. & Madeira Netto (Org.). *Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais*. Brasília: UnB, EMBRAPA Cerrados, pp. 157-177.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T.M. (2012). *Sensoriamento Remoto da Vegetação*. São José dos Campos, SP: Oficina de Textos, 176 p.
- QUINLAN, J. R. (1993) *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann Publishers.
- QUINTELLA, J. (1994) *Determinacion de las Potencialidades Naturales en un Sector del Municipio San Antonio de Cabeza*. Universidad de Habana. Cuba.
- REIS, R.B. (2008). *Mapeamento das áreas de preservação permanentes (APP) como subsídio à elaboração de estratégias de conservação e recuperação – Estudo de caso na APA do rio São João/Mico-Leão-Dourado*.

- Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Depto. de Geografia, IGEO/UFRJ, 108 f.
- RIBEIRO, B. M. G. (2010) *Avaliação das imagens WorldView-II para o mapeamento da cobertura do solo urbano utilizando o sistema InterIMAGE*. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 177 p.
- RIBEIRO, K. T. (2001). *Incêndio no Planalto do Itatiaia – Parecer Técnico sobre Uso Público do Planalto do Itatiaia imediatamente após o incêndio*. Itatiaia, 11p.
- RICHTER, M. (2004). *Geotecnologias no Suporte ao Planejamento e Gestão de Unidades de Conservação Estudo de caso: Parque Nacional do Itatiaia*. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, IGEO, Programa de Pós Graduação em Geografia. Rio de Janeiro, 162p.
- RIVERA-LOMBARDI, R. J. (2001) Identificação de áreas vulneráveis à ocorrência de incêndios florestais provocados por atividades antrópicas, utilizando diferentes métodos de inferência espacial. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 10., Foz do Iguaçu. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2001, p. 963-965. CD-ROM. ISBN 85-17-00016-1.
- ROSÁRIO, L. S.; CRUZ, C. B. M.; OLIVEIRA, L. M. T.; SANTOS, P. R. A. (2009) Análise Orientada a Objeto no Mapeamento dos Estágios Sucessionais da Vegetação na Escala 1:25.000 – um Estudo de Caso da REBIO União, RJ. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE. p. 7119-7126.
- ROUSE, J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J.C. (1974) *Monitoring the vernal advancement of retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation*, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD. 371 p.
- RUMBAUGH, J.; BLAHA, M.; EDDY, F.; LORENSSEN, W. (1991) *Object-oriented and design*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 500p.
- SAITO, É. A. (2011) *Caracterização de trajetórias de padrões de ocupação humana na Amazônia Legal por meio de mineração de dados*.

- Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 158 p.
- SELLERS, P. J. (1985) Canopy Reflectance, Photosynthesis and Transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6, pp.1335-1372.
- SILVA, L.C.V.; FERNANDES, M.C.; ARGENTO, M.S.F. (2009) Mapa geoecológico de potencialidade a ocorrência de incêndios no Parque Nacional do Itatiaia/RJ. In.: Revista Brasileira de Cartografia – RBC, nº 61/3, Outubro, pp. 285-292.
- SISMANOGLU, R.A.; SETZER, A. (2005) Risco de fogo da vegetação na América do Sul: comparação de três versões na estiagem de 2004. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2005, p. 3349-3355. CD-ROM. ISBN 85-17-00018-8.
- SMITH, P. G. R.; THEBERGE, J. B. (1986) *A Review of Criteria for Evaluating Natural Areas. Environmental Management*. Vol 10. p 715-734.
- SOUSA, G.M.; COURA, P.H.F.; FERNANDES, M.C. (2010) Cartografia geoecológica da potencialidade à ocorrência de incêndios: Uma proposta metodológica. In.: Revista Brasileira de Cartografia – RBC, nº 62 Edição Especial 1 – Geotecnologias, Julho, pp. 277-289.
- SOUSA, G.M.; SANTOS, F.V.; FERNANDES, M.C. (2012) Mapeamento da Cobertura da Terra da APA Petrópolis/RJ utilizando análise baseada em objeto no sistema InterIMAGE. RBC. Revista Brasileira de Cartografia (Online), v. 64, p. 517-530.
- SOUZA, C.M.M. (2003) *Avaliação ambiental estratégica como subsídio para o planejamento urbano*. Tese (Doutorado Interdisciplinar em Ciências Humanas) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, UFSC, Florianópolis.
- SOUZA, E.M.F.R. (2012) Diferenças nas respostas espectrais de floresta em encosta por meio de imagem hiperespectral. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia/IGEO/UFF, Niterói.
- STOW, D.A. (1993) The role of geographic information systems for landscape ecological studies. In: HAINES-YOUNG, R; GREEN, D.R. & COUSINS, S.H. (editors) *Landscape and GIS*, cap. 2, pp. 11-21.

- TEIXEIRA, L. N. (2006). *Perfil dos Incêndios do Parque Nacional do Itatiaia e Entorno*. Monografia do Curso de Especialização em Gestão do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Associação Educacional Dom Bosco, Resende, RJ. 52p.
- TOMZHINSKI, G.W. (2012) *Análise Geoecológica dos Incêndios Florestais no Parque Nacional do Itatiaia*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Geografia – PPGG/UFRJ. 137 f.
- TROLL, C. (1939) *Luftboldplan und ökologische bodenforschung*. Zeistschrift der Gesellschaft für Erdkunde der Berlin, p.p. 241-298.
- TURNER, M. G. e GARDNER, R. H. (1991) *Landscape Ecology*. New York: Springer Verlag, 320p.
- TURNER, M.G. (1989) Landscape Ecology: Effect of Pattern on Process. In: *Annual Review of Ecological Systems*, vol. 10, nº 3, pp. 171-197.
- VALERIANO, M. M. (2008). *TOPODATA: GUIA PARA UTILIZAÇÃO DE DADOS GEOMORFOMÉTRICOS LOCAIS*. São José dos Campos: INPE. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>
- VERMOTE, E.F.; TANRÉ, D.; DEUZÉ, J.L.; HERMAN, M.; MORCHETE, J.J. (1997) Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 35. n 3, p. 675-686.
- VEYRET, Y. (2007) *Os riscos: o homem como agressor e vítima do meio ambiente*. São Paulo: Contexto. 320 p.
- VICENS, R. S.; CRONEMBERGER, F. M.; CRUZ, C. B. M. (2009) Análise multi-resolução e modelagem do conhecimento na diferenciação de fisionomias de florestas em remanescentes de Mata Atlântica no Estado do Rio de Janeiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 4519-4526.
- VINK, A. P. A. (1983) *Landscape Ecology and Land Use*, Editado por D.A. Davidson. London. New York. Longman.
- WEBER, E.J.; FONTANA, D.C. (2012) Obstrução do horizonte calculada a partir de modelo digital de elevação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, v.47, n.9, p.1327-1336.

- WHELAN, R. J. (1995) *The Ecology of Fire*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 346p.
- WITTEN, I. H.; FRANK, E. (2005) *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2nd. Ed., 525 p.
- XAVIER DA SILVA, J. (2000) Geomorfologia, análise ambiental e geoprocessamento. In: *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Rio de Janeiro, R.J., ano 1(1): 48 - 58.