

JÉSSICA SATHLER GRIPP

**GERAÇÃO DE UMA BASE CARTOGRÁFICA CADASTRAL  
AMBIENTAL COM O USO DE IMAGEM ORBITAL DE ALTA  
RESOLUÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2017

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da  
Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

G868g  
2017  
Gripp, Jéssica Sathler, 1989-  
Geração de uma base cartográfica cadastral  
ambiental com o uso de imagem orbital de alta  
resolução / Jéssica Sathler Gripp. - Viçosa, MG, 2017.  
viii, 76f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexos.

Orientador : Nilcilene das Graças Medeiros.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Viçosa.

Referências bibliográficas: f.64-68.

1. Cartografia. 2. Mapas. 3. Fotografia - Aspectos  
ambientais. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-  
graduação em Engenharia Civil. II. Título.

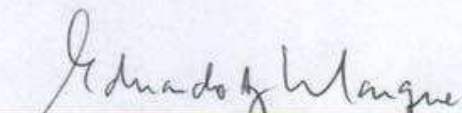
CDD 22 ed. 526.8


JÉSSICA SATHLER GRIPP

**GERAÇÃO DE UMA BASE CARTOGRÁFICA CADASTRAL AMBIENTAL  
COM O USO DE IMAGEM ORBITAL DE ALTA RESOLUÇÃO**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 26 de maio de 2017.

  
\_\_\_\_\_  
Eduardo Antônio Gomes Marques  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Vicente Paulo Soares  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
José Marinaldo Glenfani

  
\_\_\_\_\_  
Nilcilene das Graças Medeiros  
(Orientadora)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, saúde e força para enfrentar as dificuldades.

Aos meus pais Joel e Angélica, por me incentivar todos os dias a evoluir como pessoa e melhorar meus conhecimentos.

Ao meu irmão Alisson, pela presença constante.

Aos meus amigos e primos, principalmente a Juliette e Lorena, que compartilharam comigo este período de estudo e esforço.

A minha orientadora Nilcilene e aos meus co-orientadores, Eduardo e Vicente, pela paciência, atenção e, claro, orientação durante toda a realização desse trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	iv
LISTA DE TABELAS .....	vi
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Objetivo Geral</i> .....	3
2.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
3.1. <i>Sistema sensor WorldView-2</i> .....	4
3.2. <i>Extração de Feições</i> .....	5
3.2.1. Morfologia Matemática .....	7
3.2.2. Operador de Canny .....	8
3.3. <i>Classificação de Imagens</i> .....	12
3.3.1. Método da máxima verossimilhança – MaxVer .....	13
3.3.2. Validação da classificação .....	15
3.4. <i>Mapeamento de Risco Ambiental</i> .....	16
3.5. <i>Análise Multicritério</i> .....	18
3.6. <i>Cadastro Técnico Multifinalitário</i> .....	19
3.6.1. Cartografia Cadastral Ambiental .....	19
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>23</b>
4.1. <i>Área de Estudo</i> .....	23
4.2. <i>Materiais</i> .....	23
4.3. <i>Metodologia</i> .....	26
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>63</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
Anexo I .....	69
Anexo II .....	72
Anexo III .....	74

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - a) borda degrau (ideal <i>step edge</i> ), b) borda rampa ( <i>ramp edge</i> ).....	6
Figura 2 - Elementos estruturantes. ....	7
Figura 3 - a) Exemplo de supressão não máxima para $\theta = 45^\circ$ ; b) Possíveis setores para supressão não máxima. Fonte: Vale e Dal Poz (2002). ....	11
Figura 4 - Bordas detectadas com o Processo de Canny no MATLAB a) imagem original; b) detecção de bordas de Canny.....	12
Figura 5 - As distribuições de probabilidades das classes 1 e 2 representadas por elipses de equiprobabilidade. Fonte: Meneses & Almeida (2012). ....	14
Figura 6 - Pixels com iguais probabilidades de pertencerem às duas classes. ....	15
Figura 7 - Definição de Cartografia Cadastral Ambiental.....	21
Figura 8 - Metodologia proposta por Schuch <i>et al.</i> , (2007) para Elaboração do Mapa Cadastral Ambiental. ....	22
Figura 9 - Área de estudo: Município de Barão de Cocais.....	23
Figura 10 - Mosaico com imagens WorldView-2 da área de estudo.....	24
Figura 11 - Trecho do mosaico WorldView-2 com detalhamento da cena. ....	25
Figura 12 - Fluxograma metodológico. ....	26
Figura 13 – Imagens ilustrando as barragens de rejeito do Município de Barão de Cocais, MG.....	27
Figura 14 – Imagem ilustrando a grade de 3x3km e distribuição dos pontos coletados em campo.....	28
Figura 15 - Recortes da rodovia e das represas em tons de cinza. ....	29
Figura 16 - Recorte da represa clara: a) Represa clara; b) Resultado mmopenrec;.....	30
Figura 17 - a) Imagem resultante do operador Resultado mmbinary b) Imagem resultante do operador Cannyrc. ....	31
Figura 18 - Hidrograma Triangular Simplificado. Fonte: SARAIVA, (2014). ....	32
Figura 19 – Hidrograma de Ruptura.....	34
Figura 20 – MDE da área da barragem.....	34
Figura 21 - Malha 2D a jusante da barragem .....	35
Figura 22 - Rede hidrográfica do IGAM 2010 e corrigida.....	37
Figura 23 - Mapa de Modelo Digital de Elevação do município de Barão de Cocais. ..	38
Figura 24 - Mapa de declividade do município de Barão de Cocais.....	39

Figura 25 – Trecho do mapa de APPs. ....	40
Figura 26 - Mapa de Solos de Barão de Cocais, MG. Legenda detalhada no Anexo III. .....	41
Figura 27 - Fatores de aptidão da classe dos solos, uso e cobertura da terra, declividade, distância das represas, distância das APPs. ....	43
Figura 28 - Extração de bordas de Canny da represa 1 sem a) e com o pré- processamento b). ....	44
Figura 29 - Resultado do extrator de bordas Canny da estrada 2. ....	45
Figura 30 – Resultado do extrator de bordas Canny da represa 2. ....	46
Figura 31 – Resultado do extrator de bordas Canny da estrada 1 e duas ampliações. ...	47
Figura 32 – Mapa de inundacao da represa 1, municipio de Barão de Cocais – MG, sobreposto ao MDE. ....	49
Figura 33 - Mapa de inundação da represa 1, municipio de Barão de Cocais – MG. ....	50
Figura 34 - Mapa de inundação da represa 1, município de Barao de Cocais – MG, considerando a represa reservando apenas água.....	51
Figura 35 - Mapa de uso e cobertura da terra gerado pelo algoritmo MaxVer. ....	53
Figura 36 - Mapa de uso e cobertura da terra do município de Barão de Cocais, MG. .	57
Figura 37 - Mapa de APP do município de Barão de Cocais, MG.....	59
Figura 38 – Trechos do mapa de APP. ....	60
Figura 39 - Mapa de Fragilidade ambiental do município de Barão de Cocais - MG....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alguns dos principais satélites com sensores de alta resolução espacial.....	4
Tabela 2 - Especificação da imagem de satélite WorldView-2.....	5
Tabela 3 - Operadores utilizados para estimar a magnitude do gradiente.....	10
Tabela 4 - Desempenho da classificação de acordo com o Índice do coeficiente Kappa.....	16
Tabela 5 – Características da barragem.....	33
Tabela 6 – Coeficientes de Manning.....	35
Tabela 7 - APPs a serem mapeadas.....	36
Tabela 8 – Aptidões da declividade, classe do solo e uso e cobertura da terra.....	42
Tabela 9 – Pesos.....	43
Tabela 10 – Matriz de confusão.....	55
Tabela 11 – Porcentagem de cada classe de uso na APP.....	61

## RESUMO

GRIPP, Jéssica Sathler, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2017. **Geração de uma Base Cartográfica Cadastral Ambiental com o uso de Imagem Orbital de Alta Resolução.** Orientador: Nilcilene das Graças Medeiros. Coorientadores: Eduardo Antônio Gomes Marques e Vicente Paulo Soares.

O Cadastro Técnico Multifinalitário é composto por uma base cartográfica e uma base descritiva das parcelas, constituindo-se de uma importante ferramenta para a gestão e planejamento de um município. A multifinalidade pressupõe a utilização do cadastro para diversos fins. Uma base cartográfica ambiental de qualidade tem se mostrado cada vez mais necessária para estudos e projetos ambientais, em diversos setores da sociedade. É de extrema importância o conhecimento do uso e cobertura da terra, da localização das áreas de preservação permanentes ou das áreas em risco ambiental na gestão dos recursos naturais. Com a união da cartografia cadastral e cartografia ambiental pode-se gerir o território em seus aspectos legais e ambientais de forma mais satisfatória. Diante disso, esse trabalho teve por objetivo a geração de diversos mapas temáticos compondo uma base cartográfica cadastral ambiental do município em estudo, Barão de Cocais, Minas Gerais. Para isso foi utilizado um mosaico de imagens ortorretificadas do satélite WorldView2, com resolução espacial de 50 cm, na etapa de extração semi-automática de feições espaciais, voltadas ao cadastro ambiental rural. Assim, obtiveram-se vários mapas como os quatro com feições de interesse extraídas, utilizando a morfologia matemática na etapa de pré-processamento com minimização de grande parte do ruído na imagem, e o operador Canny para a extração das feições, os quais apresentaram bons resultados; um mapa das APPs, um mapa de simulação de ruptura de barragem, com o uso da sua malha 2D e uma fórmula que considerou o fato de ser uma barragem de rejeito, já que a maioria dos estudos de simulação nessa área são de barragens de água; um mapa de uso e cobertura da terra, com o método de classificação de Máxima Verossimilhança; e um mapa de fragilidade ambiental, que utilizou todos os outros na sua concepção.

## ABSTRACT

GRIPP, Jéssica Sathler, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2017. **Geração de uma Base Cartográfica Cadastral Ambiental com o uso de Imagem Orbital de Alta Resolução.** Adviser: Nilcilene das Graças Medeiros. Co-advisers: Eduardo Antônio Gomes Marques and Vicente Paulo Soares.

The Multipurpose Technical Cadastre is composed of a cartographic base and a descriptive base of the land plots, constituting an important tool for the management and planning of a municipality. The multipurpose assumes the use of the cadastre for several purposes. A quality environmental mapping base has been shown to be increasingly necessary for environmental studies and projects in various sectors of society. Knowing the land use and land coverage, the location of permanent preservation áreas (PPAs) or areas at environmental risk in the natural resources management is extremely important. With the union of cadastral cartography and environmental cartography one can manage the territory in its legal and environmental aspects in a more satisfactory way. In view of this, this work had the objective of generating several thematic maps composing an environmental cadastral cartographic base of the city in study, Barão de Cocais, Minas Gerais. For this, a orthorectified mosaicing of images from the WorldView2 satellite, with spatial resolution of 50 cm, was used in the semi-automatic extraction of spatial features, aimed at the rural environmental cadastre. Thus, several maps were obtained, such as the four with features of interest extracted, using the mathematical morphology in the preprocessing stage reducing noise in the image, and the Canny operator for the extraction of the features, which presented good results; A map of the PPAs, a dam rupture simulation map, using a 2D mesh and a formula that considered the fact of being a tailings dam, since most of the simulation studies in this area are of water dams ; A land use and coverage map, using the Maximum Likelihood classification method; And environmental fragility map, which utilized all others in its design.

## 1. INTRODUÇÃO

O Cadastro Técnico Multifinalitário (CTM) é um conjunto de informações de um território reunidas em uma base cartográfica única e organizada em conjunto com uma base descritiva. A multifinalidade pressupõe a utilização do cadastro para diversos objetivos de diferentes usuários (BONILLA & CARNEIRO, 2008).

O conhecimento do território do município é de fundamental importância para o planejamento das prefeituras, impedindo ações onerosas sem prévio estudo e o desenvolvimento desordenado das cidades (RÚBIO & BERTOTTI, 2012). O mesmo vale para uma gestão ambiental de forma racional, legal e econômica. Caracterizando, desta forma, o Cadastro Técnico Multifinalitário como apoio para o planejamento ambiental.

Kaufmann & Steudler (1998) destacam a importância do conhecimento do uso e cobertura da terra e a localização das áreas de preservação permanentes (APPs) na gestão dos recursos naturais, sendo necessário, portanto, um sistema cadastral de fiscalização do território.

Schuch *et al.*, (2007) introduz o conceito de cartografia cadastral ambiental através da união da cartografia cadastral e da cartografia ambiental, afirmando que, se por um lado, a cartografia ambiental permite o conhecimento das áreas de interesse ambiental, orientando as políticas de preservação e conservação, por outro, a cartografia cadastral permite uma visualização dos aspectos legais relativos ao espaço geográfico em estudo.

São diversos os usos para uma cartografia cadastral ambiental, por exemplo: no desenvolvimento de projetos de pagamento por serviços ambientais como proposto por Lombardi e Bastos (2015) e Loch *et al.*, (2015); ao órgão ambiental que tenha por objetivo o licenciamento; para delimitação e gestão de parques ambientais; ou determinação de um cenário de risco ambiental, etc.

Com o avanço tecnológico, os sistemas orbitais apresentam cada vez mais, melhores resoluções em relação a suas imagens, proporcionando uma opção para geração de produtos cartográficos com maior rapidez e menor custo relativo (TAVARES JÚNIOR *et al.*, 2006; MESSIAS, 2012; ROSA & BREUNIG, 2015), incluindo a geração de uma base cartográfica de cadastro técnico municipal. Santos *et al.*, (2011) conclui que, embora não tenham a mesma qualidade das fotografias aéreas e suas ortofotos, as

imagens orbitais de alta resolução cumprem seu papel na geração e atualização do cadastro técnico municipal.

Neste sentido, a extração das feições contidas nas imagens, de forma semi-automática, é uma etapa importante para a geração de uma base cartográfica temática, visando a determinação de dados espaciais, especificamente considerando os aspectos ambientais.

Dentre as técnicas de extração de feições, destaca-se o operador de Canny, por ser uma ferramenta de detecção e localização de bordas, caracterizando-se como um detector ótimo na determinação de bordas do tipo degrau, considerando três ou mais pixels, que são as mais comuns em imagens digitais (VALE & DAL POZ, 2002).

Outra técnica de extração de informações das imagens é a classificação digital, que tem como resultado um mapa de pixels classificados, representando polígonos de padrões similares (MENESES & ALMEIDA, 2012). Assim se obtém o mapa temático, como o mapa de uso e cobertura da terra, de grande importância no planejamento urbano por poder demonstrar as áreas de pastagem, agricultura, matas nativas, solo exposto ou outras feições.

Além da definição geométrica dos objetos num espaço geográfico, as determinações dos seus principais aspectos ambientais são de grande importância, tendo em vista que os mesmos podem viabilizar a implantação de medidas de prevenção.

Os desastres ambientais que vem ocorrendo durante os últimos anos, como no caso do rompimento das barragens da Indústria Cataguases de Papel Ltda, MG, em 2003, barragem da Rio Pomba mineração, MG, em 2007 e, mais recente, a barragem de rejeitos de Fundão, em 5 de novembro de 2015, o qual causou uma enxurrada de lama que inundou várias casas no distrito de Bento Rodrigues, em Mariana, na Região Central de Minas Gerais, trazem grande preocupação por resultarem em danos, muitas vezes irreparáveis.

Tais fatos emitem um alerta sobre as medidas que poderiam ser realizadas nestes casos emergenciais para minimizar o impacto do efeito, bem como, medidas de prevenção que poderiam ser aplicadas, a fim de evitar tais danos.

Além disso, com o uso de ferramentas dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) podem ser gerados cenários de risco de uma determinada região, através de simulações e/ou análise multicritério, com o intuito de fornecer informações destinadas a Análises de Riscos e a implementação de Planos Emergenciais.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. *Objetivo Geral***

O objetivo geral desta pesquisa foi gerar uma base cartográfica cadastral ambiental, com o uso de um mosaico de imagens de alta resolução do sistema WorldView-2, referente ao município de Barão de Cocais.

### **2.2. *Objetivos Específicos***

Visando o alcance do objetivo geral, tem-se como objetivos específicos do trabalho:

- Determinação do processo de extração das feições da malha viária e barragens com uso do operador de Canny, no mosaico imagens de alta resolução espacial WorldView-2;
- A avaliação do uso e cobertura da terra da região de estudo, a partir da classificação do mosaico de imagens World View-2 pelo método da Máxima Verossimilhança;
- A determinação das Áreas de Preservação Permanente referentes a cursos d'água, nascentes e encostas;
- Gerar um cenário de simulação para avaliação de rupturas das barragens de rejeitos consideradas neste trabalho;
- Utilizar as informações espaciais e ambientais para geração de um cenário de risco, no intuito de obter um mapa de fragilidade da região em estudo;

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1. Sistema sensor WorldView-2

Os sensores remotos orbitais, voltados para mapeamento, surgiram na década de 70, com resolução espacial baixa, na ordem de 80 metros, como o MSS do Landsat 1, 2, e 3. Na década de 80, as imagens se tornaram mais atrativas com o lançamento da segunda geração de satélites da série Landsat, o Landsat 4 e 5, que operavam com um novo sensor TM (Thematic Mapper), além do MSS, com resolução espacial de 30 metros, e do lançamento do satélite francês SPOT, com imagens multiespectrais de resolução espacial de 20 metros e uma pancromática com 10 metros (MENESES & ALMEIDA, 2012).

No final da década de 90, houve uma tendência de construção e lançamento, por diversos países, de sensores orbitais de alta resolução espacial, como mostrado na Tabela 1 (MENESES & ALMEIDA, 2012).

Tabela 1 - Alguns dos principais satélites com sensores de alta resolução espacial.

<b>SATÉLITES DE SENSORIAMENTO REMOTO COM SENSORES DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL</b>			
<b>Satélite</b>	<b>Pais de origem</b>	<b>Ano de lançamento</b>	<b>Resolução espacial Banda pancromática</b>
<b>IKONOS-2</b>	USA	1999	1 m
<b>QUICKBIRD</b>	USA	2001	60 cm
<b>ORBVIEW-3</b>	USA	2003	1 m
<b>ALOS</b>	JAPÃO	2006	2,4 m
<b>FORMOSAT-2</b>	TAIWAN	2006	2,5 m
<b>KOMPASAT-2</b>	KOREA	2006	1m
<b>CARTOSAT-2</b>	INDIA	2007	2,5 m
<b>GEOEYE-1</b>	USA	2008	41 cm
<b>WORLDVIEW-2</b>	USA	2009	50 cm
<b>WORLDVIEW-3</b>	USA	2015	30 cm

Fonte: Modificado de Meneses & Almeida (2012).

Como pode ser observado na Tabela 1, é ampla a disponibilidade de sensores de alta resolução espacial, trazendo grande benefício às atividades que requerem um alto grau de detalhamento da superfície terrestre. Neste trabalho, as imagens orbitais utilizadas são do sistema WorldView-2 com detalhamento dos objetos em torno de 50cm.

O WorldView-2 foi lançado em outubro de 2009, sendo o primeiro satélite comercial de alta resolução com oito bandas multiespectrais e uma pancromática. Assim como o seu antecessor, o WorldView-2 utiliza a tecnologia *Control Moment*

*Gyroscopes* (CMGs), com melhor agilidade e eficiência de coleta (DIGITAL GLOBE, 2015).

Operando a uma altitude de 770 km, esse satélite apresenta sensores com 50 cm de resolução espacial no modo pancromático e 2 m no modo multiespectral com um tempo de revisita médio de 1,1 dias (DIGITAL GLOBE, 2015). A Tabela 2 apresenta as especificações técnicas básicas do satélite WorldView-2.

Tabela 2 - Especificação da imagem de satélite WorldView-2.

<b>WorldView-2 - Especificações técnicas básicas</b>	
Informações de lançamento	Data: 08/10/2009 Veículo de lançamento: Delta II 7920 Local de lançamento: Base aérea de Vandenberg, Califórnia, EUA
Órbita	Altitude: 770 Km Tipo: Heliossíncrona, 10:30 am passagem descendente Período: 100 minutos
Bandas do sensor	Pancromática
	Azul Costal: 0,40 – 0,45 $\mu\text{m}$
	Azul: 0,45 – 0,52 $\mu\text{m}$
	Verde: 0,52 – 0,60 $\mu\text{m}$
	Amarela: 0,585 – 0,625 $\mu\text{m}$
	Vermelho: 0,625 – 0,695 $\mu\text{m}$
	Red Edge: 0,705 – 0,745 $\mu\text{m}$
	IV Próximo 1: 0,770 – 0,895 $\mu\text{m}$ IV Próximo 2: 0,860 – 1,040 $\mu\text{m}$
Resolução espacial	50 cm (pancromático) 2,00 metros (multiespectral)
Resolução Radiométrica	11 bits (2048 níveis de cinza)
Comprimento da faixa	16,4 Km no nadir
Capacidade de gravador de bordo	2199 Gigabites
Angulo máximo de visada	+/- 45° off-nadir = 1036 Km
Capacidade de coleta	975 mil Km por dia
Resolução temporal	1,1 dias 30° off nadir
(revisita)	3,7 dias 20° off nadir
Acurácia posicional	Acurácia especificada de 5 m CE90% no nadir excluindo efeitos de terreno

Fonte: Modificado de DIGITAL GLOBE, 2015.

### 3.2. *Extração de Feições*

O Processamento Digitais de Imagens (PDI) tem como principal objetivo o tratamento da imagem digital visando sua melhoria para a interpretação visual e o processamento dos dados de uma cena através de um computador. Uma imagem pode ser definida por uma função  $f(x,y)$ , onde  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais e a amplitude  $f$

é chamada de intensidade (brilho) ou nível de cinza. Quando esses valores são quantidades discretas tem-se uma imagem digital (GONZALEZ & WOODS, 2002).

A obtenção de informações de uma imagem pode ser determinada pelo processo de extração de feições, que envolve técnicas de PDI para identificação, realce, e finalmente a extração das feições de interesse (MEDEIROS, 2007). Algumas das feições mais importantes são pontos isolados, linhas e bordas (ARTERO, 1999).

Uma borda é a fronteira entre duas regiões de diferentes níveis de cinza, ou seja, é a fronteira entre o objeto e o fundo, e indica o limite de objetos sobrepostos. Assim, se os contornos em uma imagem são identificados de forma precisa, todos os objetos podem ser localizados, e suas propriedades básicas medidas (PARKER, 2010). Um modelo de borda ideal seria a borda degrau (*ideal step edge*), ilustrado na Figura 1 (a). Nesse exemplo, a borda é uma simples mudança nos níveis de cinza, bem mais fácil de localizar. No entanto, esse tipo de borda não ocorre em uma imagem por uma série de complicações. Primeiro, é improvável que o contorno dos objetos na imagem ocorra a um único pixel, já que a mudança pode estender-se a um certo número de pixels (Figura 1 (b)). Há também o problema do ruído, devido a vários fatores como os efeitos da atmosfera, as distorções das lentes da câmera, entre outros (PARKER, 2010).



Figura 1 - a) borda degrau (*ideal step edge*), b) borda rampa (*ramp edge*).

Fonte: Parker (2010).

Uma das operações mais utilizadas na etapa de realce imagens é a detecção de bordas. Esse processo simplifica a análise de imagens, reduzindo significativamente a quantidade de dados a serem processados, descartando as informações menos relevantes (CANNY, 1986).

Diversos são os operadores de realce de imagens que podem ser empregados, de modo a enfatizar as feições de interesse visando o reconhecimento e extração dos padrões da cena, dentre eles os operadores morfológicos tem apresentado um bom desempenho nesta tarefa.

### 3.2.1. Morfologia Matemática

A Morfologia Matemática (MM) surgiu na década de 60, com os trabalhos de Matheron e Serra, na escola Superior de Minas de Paris, os quais desejavam extrair informações de amostras de rochas ou metais a partir de suas estruturas geométricas em imagens microscópicas, relacionando-as com as propriedades físicas dos materiais. A MM visa a análise da estrutura e forma dos objetos, baseada na teoria de conjunto, integrais geométricas e álgebra booleana (ISHIKAWA, 2008).

Atualmente a MM pode ser considerada uma poderosa ferramenta no processamento digital de imagens, principalmente em aplicações nas quais os aspectos geométricos são relevantes (ISHIKAWA, 2008; FALCON, 2011; SILVA, 2015).

A morfologia age na imagem através de um elemento estruturante, o qual é descrito por um conjunto que possui forma e tamanho definidos, e é comparado a um conjunto desconhecido da imagem, o resultado permite avaliá-lo (LEONARDI *et al.*, 2007).

O elemento estruturante se desloca na imagem pixel a pixel, realizando transformações na sua vizinhança. Segundo Ishikawa (2008), a escolha do elemento estruturante depende da aplicação a ser realizada. A Figura 2 mostra algumas possíveis formas para um elemento estruturante.

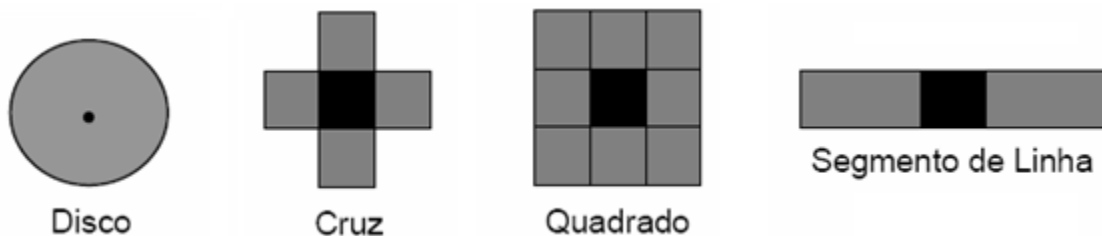


Figura 2 - Elementos estruturantes.

Fonte: SILVA, (2010).

A Morfologia Matemática possui duas operações básicas, nas quais se derivam todas as outras operações morfológicas: a erosão e a dilatação.

Na erosão de uma imagem em tons de cinza  $f$  por um elemento estruturante  $B$  o valor de um dado pixel  $x$ , centrado na origem, é o valor mínimo da imagem na janela definida pelo elemento estruturante, enquanto na dilatação o valor do pixel  $x$ , seria o valor máximo, como mostra as equações abaixo (SOILLE, 1999):

$$[\varepsilon^B(X)](x) = \min_{b \in B} X(x + b) \quad \text{Erosão} \quad (01)$$

$$[\delta^B(X)](x) = \max_{b \in B} X(x + b) \quad \text{Dilatação} \quad (02)$$

Os efeitos da erosão em níveis de cinza são escurecer a imagem, alargar os valores (padrões escuros), conectar vales próximos, reduzir e às vezes eliminar picos (padrões claros) e separar picos próximos. E os efeitos da dilatação são clarear a imagem, alargar os picos (padrões claros), conectar picos próximos, reduzir e às vezes eliminar vales (padrões escuros) e separar vales próximos (SILVA, 2010).

A erosão e a dilatação podem ser usadas de forma composta, construindo funções importantes como a abertura, definida pelo processo de erosão seguido do processo de dilatação, e o fechamento, definido pela aplicação da dilatação seguida da aplicação de uma erosão (ISHIKAWA, 2008).

Segundo Soille (1999), a abertura e o fechamento de uma imagem  $X$  por um elemento estruturante  $B$  pode ser apresentada através das equações (03) e (04):

$$\gamma^B(x) = \delta^{B'}[\varepsilon^B(x)] \quad \text{Abertura} \quad (03)$$

$$\phi^B(x) = \varepsilon^{B'}[\delta^B(x)] \quad \text{Fechamento} \quad (04)$$

Após o processo de realce em uma imagem, os processos subsequentes de detecção de bordas e segmentação da imagem podem ser empregados com melhor desempenho.

### 3.2.2. Operador de Canny

John Canny desenvolveu um processo de detecção de bordas com base em três critérios de desempenho: boa detecção - o detector de bordas deve ter uma baixa probabilidade de falhar na detecção das bordas reais; boa localização - a distância da borda encontrada pelo operador e a borda real deve ser a menor possível; e apresentar somente uma resposta a uma única borda (CANNY, 1986).

O processo de detecção de bordas pelo método de Canny envolve as etapas de suavização, cálculo da magnitude e direção do gradiente, supressão não máxima e histerese.

A suavização de uma imagem tem como objetivo eliminar o ruído e o excesso de detalhes insignificantes (ARTERO, 1999). Assim, a primeira etapa do operador de Canny é a suavização por um filtro gaussiano. Em duas dimensões a função Gaussiana é definida por:

$$G(x, y) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (05)$$

A função bidimensional da gaussiana pode ser separável, ou seja, pode-se criar duas máscaras unidimensionais nas direções  $x$  (linha) e  $y$  (coluna), denominando-as de  $G(x)$  e  $G(y)$  (VALE *et al.*, 2004). Essa propriedade é útil no processo de convolução da imagem, que apesar de ser relativamente simples de implementar, é computacionalmente dispendioso, especialmente em duas dimensões (PARKER, 2010). Assim, com a função da gaussiana utilizando máscaras unidimensionais, convolui-se a imagem com  $G(x)$  ao longo das linhas e  $G(y)$  ao longo das colunas (VALE *et al.*, 2004). Em geral esta etapa pode ser representada pela equação (06).

$$f_s[x, y] = G[x, y, \sigma] * F[x, y] \quad (06)$$

Onde:  $*$  representa o processo de convolução,  $F[x, y]$  é a imagem de entrada,  $G[x, y, \sigma]$  o filtro Gaussiano e  $\sigma$  o desvio-padrão. O grau de suavização depende de  $\sigma$ : quanto maior for este valor, mais borrada ficará a imagem suavizada e a borda mais espessa (SILVA *et al.*, 2004).

Após a suavização da imagem, o próximo passo é o cálculo da magnitude do gradiente de cada pixel. Como a imagem é uma função de valores de brilho, as derivadas de um pixel em  $x$  e  $y$  são as medidas de quão rapidamente os valores de brilho mudam nessas direções (MENESES & ALMEIDA, 2012). A função do gradiente é equivalente a derivada parcial de primeira ordem, e é definida pelo vetor (JAIN *et al.*, 1995):

$$M[f(x, y)] = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{df}{dx} \\ \frac{df}{dy} \end{bmatrix} \quad (07)$$

Esse vetor aponta para direção de variação máxima da função  $f(x, y)$ .

A Tabela 3 mostra os operadores dos filtros de Roberts, Sobel e Prewit, que podem ser utilizados nessa etapa. Sendo que o filtro gradiente 2x2 de Roberts possui um deslocamento de  $1/2$  pixel, enquanto os filtros 3x3 se deslocam pixel a pixel (MENESES & ALMEIDA, 2012).

Tabela 3 - Operadores utilizados para estimar a magnitude do gradiente.

Operador	Vertical	Horizontal
<b>Roberts</b>	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$
<b>Sobel</b>	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$
<b>Prewitt</b>	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$

Como exemplo, será usado o operador de Sobel e uma região de uma imagem com dimensão 3x3, onde  $z_i$  representa os valores do nível de cinza da imagem (Matriz 01). Calcula-se o gradiente no ponto central da máscara pelas equações (08) e (09). Para a determinação do próximo valor, a máscara deve ser deslocada para o próximo pixel e o procedimento é repetido (MATURANA, 2010).

$$\begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ z_4 & z_5 & z_6 \\ z_7 & z_8 & z_9 \end{bmatrix}$$

Matriz 01: Região de uma imagem 3x3.

$$M_x = (z_7 + 2z_8 + z_9) - (z_1 + 2z_2 + z_3) \quad (08)$$

$$M_y = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7) \quad (09)$$

Logo, a magnitude e a orientação do gradiente podem ser calculadas pelas formulas:

$$M(x, y) = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad (10)$$

$$\theta = \arctan \frac{M_y}{M_x} \quad (11)$$

Baseando-se no princípio que a borda representa os pontos máximos no resultado da filtragem  $M(x, y)$ , Canny propôs a técnica da supressão não máxima para afina-la, eliminando os pixels que não são máximos locais na direção perpendicular a borda, ou seja, ao longo da linha do gradiente. Com essa técnica também há uma melhor localização das bordas (SILVA *et al.*, 2004).

A Figura 3 ilustra o processo de supressão não máxima para  $\theta = 45^\circ$ . Nele o pixel (c, 1) é um maximo local, e na análise compara-se a sua magnitude com a de seu vizinho, no sentido positivo e negativo do gradiente. No exemplo, os pixels em cinza

possuem uma magnitude menor que  $(c, 1)$ , sendo assim anulados (VALE & DAL POZ, 2002).

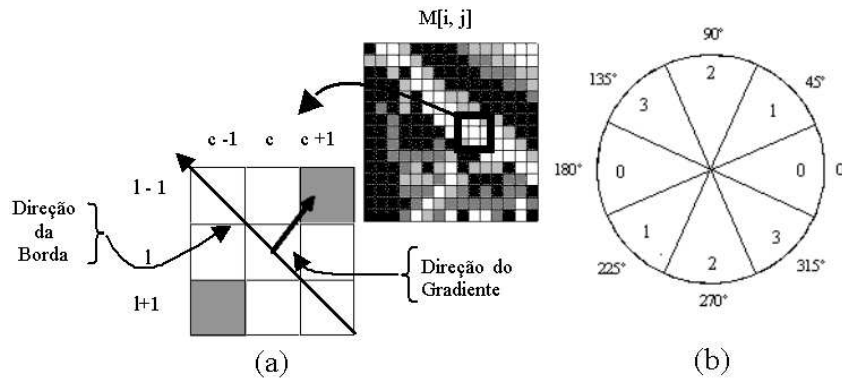


Figura 3 - a) Exemplo de supressão não máxima para  $\theta = 45^\circ$ ; b) Possíveis setores para supressão não máxima. Fonte: Vale e Dal Poz (2002).

Geralmente, o processo usado para preencher as falhas de bordas na imagem resultante da supressão não máxima é um procedimento com dupla limiarização chamado de histerese. Ao se utilizar apenas um limiar, este pode ser muito baixo, apresentando falsos positivos, ou pode ser muito alto, com falsos negativos. Assim, na função de histerese dois limiares  $T_1$  e  $T_2$ , com  $T_1 \cong 2T_2$  ou  $T_1 \cong 3T_2$  são utilizados, obtendo-se duas imagens limiarizadas. O limiar  $T_1(x, y)$ , que terá o maior valor, ou seja, limiar mais restrito, possivelmente conterà poucas bordas falsas, mas poderá ter falhas nos contornos. A partir da imagem gerada por esse limiar o algoritmo procura, com uma vizinhança de 8, na imagem gerada por  $T_2(x, y)$ , com limiar menor, o fim do contorno de cada ponto de borda, complementando as bordas em  $T_1(x, y)$ . Esse procedimento se repete até não haja mais discontinuidades nas bordas em  $T_1(x, y)$ , ou até que não haja mais pontos de borda em  $T_2(x, y)$  que possam ser aproveitados (VALE & DAL POZ, 2002).

Um exemplo da implementação do operador de Canny é através da função *edge* do programa MATLAB. Nessa função, pode-se definir o valor do desvio-padrão para a etapa de suavização e os valores dos limiares para a etapa de histerese, caso contrário, serão utilizados os valores *default* da função. A Figura 4 mostra um exemplo do uso dessa função.



Figura 4 - Bordas detectadas com o Processo de Canny no MATLAB a) imagem original; b) detecção de bordas de Canny.

### 3.3. *Classificação de Imagens*

Um dos principais objetivos do sensoriamento remoto é a extração das informações contidas nas imagens, dispondo-as em forma de tabela, gráfico ou mapa. As técnicas de classificação digital de imagens é um processo que possui essa finalidade, reconhecendo padrões e objetos homogêneos na imagem, de forma automatizada, que elimina a subjetividade da interpretação humana e reduz o esforço do trabalho do analista. O resultado final da classificação é uma imagem ou mapa temático com os pixels classificados, representados por símbolos ou cores, cada um associado a uma classe como, por exemplo, tipos ou usos de solo, área urbana, rios ou florestas, dependendo do interesse do analista (FONSECA, 2000; MENESES & ALMEIDA, 2012).

O princípio básico da classificação de imagens multiespectrais é a diferença no comportamento dos objetos ao longo do espectro eletromagnético (IBGE, 2001) associando os pixels às classes de informação. Um pixel é atribuído à classe que melhor satisfaz os critérios estabelecidos, normalmente determinados por medidas estatísticas. Esse processo é, aparentemente, uma questão simples, mas existe uma série de fatores que podem causar interferência, como por exemplo, alvos que não são espectralmente distintos nas bandas existentes num sensor; a redução dos contrastes espectrais causados pela atmosfera; a topografia, que pode interferir na reflectância e adicionar sombras; ruídos frequentemente presentes na imagem; ou a pouca resolução espacial tornando os valores espectrais dos objetos numa mistura espectral dos mesmos, dentro de um pixel (MENESES & ALMEIDA, 2012). Alguns desses efeitos podem ser minimizados pelos algoritmos, mas nem sempre é possível. Assim, de acordo com Meneses e Almeida

(2012), a classificação deve ser vista como um processo probabilístico e estatístico que depende do desempenho do classificador proposto, o qual deve ser validado.

A classificação automática pode ser dividida em dois grupos: não supervisionada e supervisionada.

A classificação não supervisionada requer pouca ou nenhuma participação do analista, ocorrendo quando não se tem suficientes conhecimentos prévios acerca do número e natureza das classes de alvos da área imageada, ou quando se deseja fazer apenas uma classificação exploratória da imagem. Os principais algoritmos dessa classificação são o ISODATA e *K-médias*, que se baseiam no agrupamento de pixels por suas similaridades, usando técnicas de distância mínima. Por isso, essa técnica também é conhecida como *clustering* (agrupamento) (MENESES & ALMEIDA, 2012).

Já a classificação supervisionada requer conhecimentos prévios sobre as áreas de interesse, que são relacionadas com as classes. Para isso, o analista seleciona na imagem amostras de treinamento, ou seja, um conjunto de pixels mais representativos dos alvos escolhidos pelo analista, que estimam os parâmetros usados pelo algoritmo de treinamento na classificação. Para a obtenção de classes estatisticamente confiáveis, recomenda-se um maior número possível de áreas de treinamento por classe (IBGE, 2001; FONSECA, 2000). Há vários métodos de classificação supervisionada, como o paralelepípedo, a distância mínima, e a máxima verossimilhança (MaxVer).

De acordo com o Fonseca (2000), o MaxVer é um dos métodos de classificação "pixel a pixel" mais utilizado em dados de sensoriamento remoto.

### 3.3.1. Método da máxima verossimilhança – MaxVer

Em um gráfico de dispersão bidimensional a forma geométrica de um conjunto de pixels, de uma determinada classe, pode ser descrita por uma elipse, cuja localização, forma e tamanho, reflete a média, variância e covariância das duas variáveis, podendo-se estender essa ideia para três ou mais dimensões (IBGE, 2001).

A Figura 5 ilustra a distribuição dos pixels de duas classes de treinamento no espaço bidimensional, assumindo as formas dos elipsoides concêntricos de equiprobabilidades. As elipses apresentam distribuições de probabilidades distintas, que representam a probabilidade do pixel A pertencer à classe 1 e do pixel B pertencer à classe 2, ou seja a alocação dos pixels às suas classes depende da posição do pixel em relação às distribuições (MENESES & ALMEIDA, 2012).

De acordo com o IBGE (2001), por levar em conta a covariância na definição das elipses de equiprobabilidades, o método da máxima verossimilhança (MaxVer) é uma técnica mais robusta que o paralelepípedo e a distância mínima, as quais fundamentam o princípio de que os pontos são distribuídos à volta do centro da média, de um modelo esférico. No exemplo da Figura 5, se o algorítmico classificador se basear nesse princípio da medida de distância dos pontos A e B aos centros das duas classes, o pixel A pertenceria à classe 2 já que sua distância do centro da classe 2 é menor comparada a distância ao centro da classe 1, sendo erroneamente classificado. Portanto, na técnica MaxVer cada pixel é destinado à classe que tem a mais alta probabilidade, isto é, a máxima verossimilhança, levando em conta não somente da distância ao centro do agrupamento, mas também das dimensões e direções dos eixos do elipsóide (MENESES & ALMEIDA, 2012).

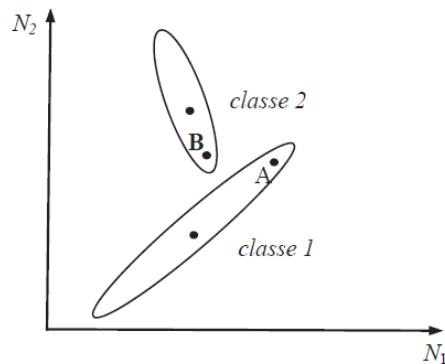


Figura 5 - As distribuições de probabilidades das classes 1 e 2 representadas por elipses de equiprobabilidade. Fonte: Meneses & Almeida (2012).

Segundo Richards e Jia (2006), a classificação de um ponto  $x$  é realizada de acordo com:

$$x \in \omega_i, \text{ se } p(\omega_i | x)p(\omega_i) > p(\omega_j | x)p(\omega_j) \text{ para todo } j \neq i \quad (12)$$

em que a probabilidade  $p(x|\omega_i)$  é a possibilidade de  $x$  pertencer à classe  $\omega_i$  e  $p(\omega_i)$  é a probabilidade de a classe ocorrer na imagem.

Quando surgem situações nas quais as classes espectrais se sobrepõem ou não há suficientes áreas de treinamento para estimar com confiança os parâmetros das distribuições, utiliza-se um limiar para estabelecer um limite para o processo de separação das classes (RICHARDS & JIA, 2006).

Na Figura 6 as duas curvas representam distribuições de probabilidade de duas classes onde há sobreposição, com regiões onde pixels possuem iguais probabilidades de pertencer as duas classes. O limiar indica a porcentagem de pixels da distribuição

que serão classificados como pertencente à uma determinada classe. Por exemplo, um limite de 98%, define que 2% dos pixels, de menor probabilidade, serão ignorados. Assim, o limiar fornece ao usuário a possibilidade de variar o rigor da classificação, que será mais rigorosa, quanto menor for o limiar (FONSECA, 2000; MENESES & ALMEIDA, 2012).

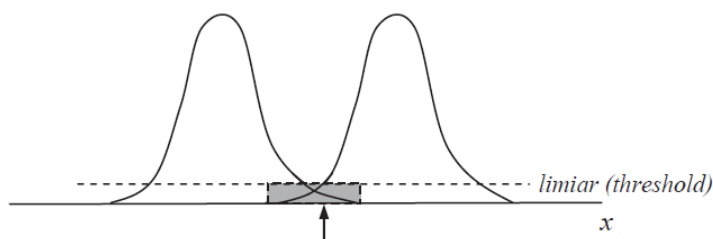


Figura 6 - Pixels com iguais probabilidades de pertencerem às duas classes.

Fonte: Meneses & Almeida (2012).

### 3.3.2. Validação da classificação

Após a classificação da imagem digital é necessário validá-la, ou seja, avaliar o quanto a classificação se aproxima da realidade (NOVO, 2010). Essa acurácia depende de vários de fatores como o algoritmo de classificação escolhido, as resoluções espaciais e espectrais do sistema sensor, o número de categorias utilizadas ou o conjunto de dados que representam a verdade terrestre (MENESES & ALMEIDA, 2012).

A acurácia é expressa através de índices calculados a partir de uma matriz de confusão, também chamada matriz de erros, a qual compara, classe por classe, a relação entre os dados de referência (verdade terrestre) e os resultados da classificação, mostrando a porcentagem de erros de omissão e de inclusão (MENESES & ALMEIDA, 2012).

Podem-se citar três índices calculados a partir da matriz de erros. Um dos mais simples é a exatidão global (equação 13), calculada pela soma do total dos pixels corretamente classificados dividida pelo número total de pixels da matriz (PANTALEÃO & SCOFIELD, 2009).

O índice mais utilizado é o coeficiente Kappa (equação 14), por considerar todos os elementos da matriz de confusão e não somente a diagonal, como ocorre com a exatidão global (BRITES, 1996). De acordo com Landis e Koch (1977), a Tabela 4

apresenta os valores do coeficiente Kappa variando de 0 a 1 e os respectivos desempenhos da classificação.

Tabela 4 - Desempenho da classificação de acordo com o Índice do coeficiente Kappa.

Índice Kappa	Desempenho da classificação
$< 0$	Péssimo
$0 < k < 0,2$	Mau
$0,2 < k < 0,4$	Razoável
$0,4 < k < 0,6$	Bom
$0,6 < k < 0,8$	Muito Bom
$0,8 < k < 1,0$	Excelente

Fonte: Landis & Koch (1977).

Por último, Ma e Redmond (1995) propõem o uso do índice Tau (equação 15) para avaliar a acurácia da classificação, o qual possui as seguintes vantagens em relação à estatística Kappa: conceitualmente é mais simples de entender e de ser calculado e considera o número de categorias ou classes presentes na classificação (MENESES & ALMEIDA, 2012).

$$G = \frac{\sum_{i=1}^M n_{ii}}{N} \quad \text{Índice de exatidão global} \quad (13)$$

$$K = \frac{P_0 - P_c}{1 - P_c} \quad \text{Coeficiente kappa} \quad (14)$$

$$T = \frac{P_0 - 1/M}{1 - 1/M} \quad \text{Índice Tau} \quad (15)$$

onde:

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^M n_{ii}}{N} \quad \text{e} \quad P_c = \frac{\sum_{i=1}^M n_{i+} n_{+i}}{N^2}$$

Em que:

$P_0$  = proporção de unidades corretamente classificadas;

$P_c$  = proporção esperada de acerto ao acaso;

$N$  = número total de pixels contemplados pela matriz de erros;

$M$  = número de categorias informacionais;

$n$  = elemento da matriz de erros;

$i+$  = total de linhas para uma dada categoria; e

$+i$  = total de colunas para esta mesma categoria.

### 3.4. Mapeamento de Risco Ambiental

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (2004), risco ambiental é a possibilidade da perda ou danos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outros bens,

estando sempre associado a factibilidade de ocorrência de um acidente ambiental. As áreas de risco ambiental são:

“Áreas com risco de ocorrência de acidentes ambientais, cujos potenciais danos diretos ou indiretos à saúde humana, ao meio ambiente ou a outro bem a proteger estão relacionados com as atividades potencialmente impactantes e com a vulnerabilidade dos sítios frágeis associados.”

De acordo com Almeida (1997) a gestão do risco compreende do ponto de vista conceitual, duas partes: a avaliação e a mitigação do risco. Sendo que o primeiro inclui a caracterização, com a seleção de cenários de acidentes e identificação das zonas em perigo, e a análise do risco associado.

A mineração constitui em um conjunto de atividades de extração de minerais da crosta terrestre com fins econômicos. Esse processo gera resíduos estéreis e rejeitos, que são partículas sólidas geradas a partir de agentes físicos ou químicos com granulometria de areia até argila, retidos com a ajuda de barragens (ICME, 1998, Apud VALERIUS, 2014). No caso de rompimento de uma barragem de rejeitos, esta pode se liquefazer e percorrer grandes distâncias, deixando depósitos em seu caminho, contaminando-o, destruindo florestas e estruturas e, muitas vezes, causando mortes (ICOLD, 2001, Apud VALERIUS, 2014).

O mapeamento de risco ambiental associado com a ruptura de uma barragem é uma ferramenta útil para o planejamento de ações de emergência e mitigação do impacto ambiental, além da classificação e avaliação do risco (GRAHAM, 1998, Apud LAURIANO *et al.*, 2010).

Segundo Lauriano *et al.*, (2010) existem diversos modelos hidrodinâmicos para a realização da simulação da ruptura de uma barragem e elaboração dos mapas de inundação a jusante desta. Estes envolvem, inicialmente, a determinação do hidrograma e propagação da onda de ruptura, seguido do mapeamento das áreas potencialmente inundáveis.

No entanto, segundo Martin *et al.*, (2015), as diretrizes que são tipicamente seguidas por profissionais em todo o mundo para análises de rupturas de barragens de rejeitos são originalmente desenvolvidas para represas de retenção de água não sendo totalmente aplicáveis as primeiras e, embora existam mais de 200 casos conhecidos de ruptura de barragens de rejeitos em todo o mundo, a documentação desses casos é muitas vezes incompleta.

Rico *et al.*, (2007) realizou um estudo baseado em 28 falhas históricas de barragens de rejeitos com dados completos apresentando relações empíricas para o volume, a distância de saída e a vazão de pico, que podem ser uma referência específica para estudos de ruptura dessas barragens (MARTIN *et al.*, 2015).

### **3.5. Análise Multicritério**

A análise multicritério é uma ferramenta de suporte de decisões, onde o estudo de apenas uma variável não representa a realidade do fenômeno, necessitando, assim, de se avaliar e agregar múltiplos critérios nas análises.

Segundo Rikalovic *et al.*, (2014) nesta análise a decisão é uma escolha entre alternativas tendo como base o critério, que pode ser de dois tipos: fatores e restrições. Um fator é um critério, medido em uma escala contínua, que aumenta ou diminui a adequação de uma alternativa específica e uma restrição serve para limitar as alternativas sob consideração. Em muitos casos, as restrições são expressas no mapa na forma de um valor *booleano* (0 para áreas excluídas e 1 para as áreas abertas a consideração).

De acordo com Moura (2007), a aplicação da análise multicritério envolve as seguintes etapas: identificação das variáveis envolvidas; construção do banco de dados; definição dos pesos para cada plano de informação; cruzamento dos planos de informação pré-estabelecidos em ambiente SIG para geração do mapa de interesse, e, finalmente, validação do resultado.

Há um grande número de métodos de decisão multicritérios que são utilizados hoje em dia no ambiente SIG, como a análise *Booleana*, combinação linear ponderada (WLC - *Weighted Linear Combination*) e média ponderada ordenada (OWA – *Ordered Weighted Average*). Os sistemas de apoio à decisão são uma das mais importantes funções de um SIG.

Um exemplo de uso da análise multicritério é no desenvolvimento de um mapa de fragilidade ambiental. De acordo com Gimenes & Filho (2013),

*“O mapa de fragilidade ambiental consiste no zoneamento do território em diferentes níveis hierárquicos, que representam os diferentes graus de fragilidade. Permite definir quais áreas são mais frágeis e podem ser mais afetadas por mudanças da dinâmica natural existente. ”*

### ***3.6. Cadastro Técnico Multifinalitário***

O tema cadastro pode ser definido como o registo público em que se descreve a extensão, qualidade e valor sobre bens imobiliários de certo território (Novíssima Delta Larousse 1985, Apud BRITO, 2005). De acordo com Henssen (1990), o cadastro se relaciona ao registo da terra e sua utilização, o qual é composto por uma base cartográfica e de dados descritivos.

A Portaria Ministerial nº 511, de 07 de dezembro de 2009, estabelece diretrizes para a criação, instituição e atualização do Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) nos municípios brasileiros e estabelece a parcela cadastral, em seu Art. 2º, como “a menor unidade do cadastro, definida como uma parte contígua da superfície terrestre com regime jurídico único”, sendo considerada “toda e qualquer porção da superfície no município a ser cadastrada” com um código único e estável.

A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992, promoveu o conceito de desenvolvimento sustentável, que é a capacidade de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer as necessidades das futuras gerações, ou seja, o equilíbrio entre desenvolvimento econômico, social e ambiental, e enfatizou a importância da obtenção de uma informação territorial confiável como apoio para tomada de decisões na preservação e gestão do meio ambiente.

Assim, o cadastro passou a ter uma nova abrangência, além da econômica, física e fiscal, que possuem identificação do proprietário e da propriedade com o objetivo geral da determinação do seu valor e taxaçaõ; ou jurídica, com a identificação legal por meio do registro do imóvel ou da propriedade, incorporando aspectos ambientais e sociais, consolidando a nova visão de um Cadastro Multifinalitário, a qual se refere às múltiplas aplicações do cadastro, que servem de base para tomada de decisões, principalmente no planejamento urbano e regional (ERBA *et al.*, 2005).

#### **3.6.1. Cartografia Cadastral Ambiental**

A Associação Cartográfica Internacional (ACI) define a cartografia como o “conjunto de estudos e operações científicas, técnicas e artísticas que, tendo por base os resultados de observações diretas ou da análise de documentação, se voltam para a elaboração de mapas, cartas e outras formas de expressão ou representação de objetos,

elementos, fenômenos e ambientes físicos e socioeconômicos, bem como a sua utilização” (IBGE, 2017).

De acordo com Duarte (1991), diante dos diversos fins que a cartografia atende, para se organizar, esta se divide através de seus ramos de especialização, como a cartografia cadastral e a cartografia ambiental.

Na cartografia cadastral, cada elemento da realidade rural ou urbana pode ser representado por pontos, linhas ou colunas, relacionados a um par de coordenadas correspondente a um sistema estipulado para o mapeamento. O Sistema Cartográfico Brasileiro (SCB) adota o sistema UTM (LOCH & ERBA, 2007).

A cartografia cadastral é parte integrante da cartografia temática e tem por objetivo obter a informação cartográfica codificada para a gestão e uso de acordo com as necessidades dos cadastros rurais ou urbanos (PARMA, 2003).

A cartografia ambiental também é definida como parte da cartografia temática, surgindo especialmente para tratar de questões ambientais (ROVANI & CASSOL, 2012). De acordo com Sousa (2009):

*“A Cartografia Ambiental, como seguimento específico da Cartografia Temática, busca representar graficamente num plano bidimensional as complexas relações existentes entre os meios abiótico e biótico, onde está incluído o homem, ser social, dando origem às cartas ambientais que, entre outras finalidades, servem de base para verificação e reflexão das questões do ambiente, onde está presente a sociedade. ”*

Os primeiros trabalhos que deram origem a cartografia ambiental foram realizados no Laboratório de Geomorfologia do *Centre Nationale de Recherches Scientifiques* (CNRS) em Caen, França, e coordenados por André Journaux (1915 – 2006). Dando origem a cartas de uso do solo, como base as decisões no planejamento territorial, na escala 1:50.000, que permitiram localizar fenômenos físicos, humanos e econômicos, estabelecendo uma relação entre eles (ARCHELA *et al.*, 2002).

Posteriormente, dada à importância dessa metodologia, a Comissão Nacional de Cartografia do Meio Ambiente e de Sua Dinâmica, do Comitê Nacional Francês de Geografia, adotou seu modelo de legenda como o padrão dos trabalhos voltados ao planejamento territorial da França (ARCHELA *et al.*, 2002).

A metodologia de Journaux se baseia em três níveis de mapas distintos: mapas de análise, com a finalidade de representar simples elementos, como a distribuição da

vegetação, espaços agrícolas ou densidades populacionais; e processos, como o uso da terra ou degradação ambiental; mapas de sistemas representando associações de elementos ou de processos para definição de sistemas e mapas de aptidão ou de potencialidades como mapas de zoneamento e de riscos ambientais de inundações ou deslizamentos; e, por fim, os mapas de síntese, descrevendo os problemas ambientais em vista ao suporte de tomada de decisões na gestão e planejamento territorial (SOUSA, 2009; ROVANI & CASSOL, 2012).

Schuch *et al.*, (2007) propõem a elaboração de um produto cartográfico originado a partir dos dados cadastrais e ambientais representados em conjunto, surgindo, assim, a Cartografia Cadastral Ambiental (Figura 7).



Figura 7 - Definição de Cartografia Cadastral Ambiental.

Fonte: Schuch *et al.*, (2007).

Uma carta cadastral ambiental representa as parcelas e as informações relevantes de seu meio ambiente. O conteúdo dessas informações varia de acordo com as necessidades do usuário, como, por exemplo, no caso de um órgão ambiental com o objetivo de licenciar propriedades rurais, um mapa cadastral ambiental terá, além das informações cadastrais, as quais normalmente já possuem, a representação de áreas de preservação permanente, áreas de reserva legal, recursos hídricos e cobertura da terra; se o objetivo for delimitação e gestão de parques ambientais, o mapa será contido por dados cadastrais do parque e das propriedades limítrofes, e demais dados ambientais que se julgam necessários para a representação de seus recursos naturais (SCHUCH *et al.*, 2007).

Schuch *et al.*, (2007) também sugerem temas pertinentes para a composição da Cartografia Cadastral Ambiental de acordo com os trabalhos de Garcia (2002) e Velloso & Loch (2004).

Garcia (2002) propõe a utilização dos mapas geotécnicos; de risco; de limitações, orientações e prescrições de uso do solo; de planificação, gestão territorial e regional; climático e de erosão; de vulnerabilidade de contaminação de águas de rios, de solos; de ordenação e exploração de florestas; de conservação e proteção ambiental; de ordenação

turística; de crescimento demográfico, econômico e urbano; e de infraestrutura, transportes e comunicações.

Já para Velloso & Loch (2004), para a realização de um levantamento paisagístico ecológico com fins de análise ambiental, há a necessidade dos mapas temáticos de morfologia topográfica, geológica, geomorfológica, pedológica e hidrográfica, e características climáticas, da vegetação, da fauna, humanas, sócio-econômicas e culturais.

Por fim, vale lembrar que o conteúdo representado nos mapas da cartografia cadastral ambiental é especificamente determinado em função do objetivo para o qual o mapa é desenvolvido. A metodologia de Schuch *et al.*, (2007) pode ser resumida no fluxograma da Figura 8.

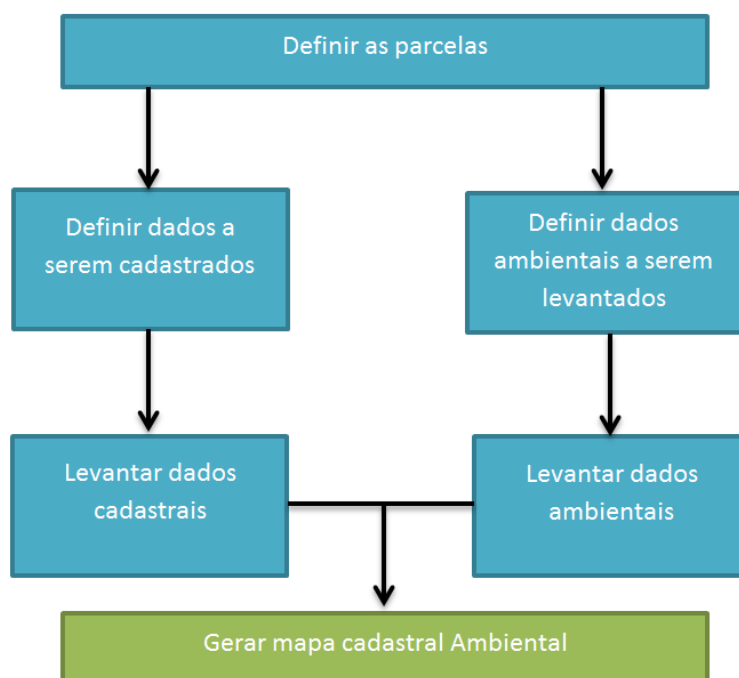


Figura 8 - Metodologia proposta por Schuch *et al.*, (2007) para Elaboração do Mapa Cadastral Ambiental.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho compreende o município de Barão de Cocais localizado na mesorregião de Belo Horizonte, compreendido entre as latitudes 20°01'01,21''S e 19°46'29,81''S e entre as longitudes 43°37'56,95''O e 43°23'23,29''O (Figura 9) e, segundo o IBGE 2016, possui uma população estimada em 2015 de 31.270 habitantes, com área territorial de 370,585 Km<sup>2</sup>. Sua principal atividade econômica é a mineração e a siderurgia, as quais respondem por mais da metade da receita do município (OLIVEIRA, 2014).

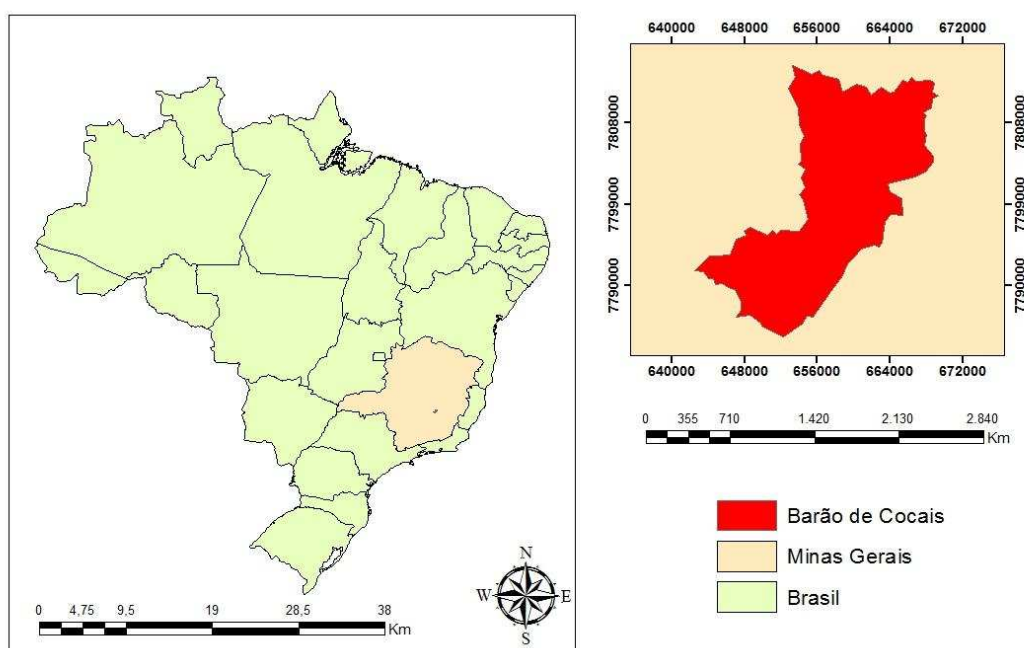


Figura 9 - Área de estudo: Município de Barão de Cocais.

### 4.2. Materiais

Os materiais empregados no desenvolvimento das atividades metodológicas são apresentados em sequência:

- ✓ *Softwares:* ArcGis 10.2, IDRISI Selva, HEC-RAS 5.0.3, Topcon tools e MATLAB r2015b com a toolbox de morfologia matemática - SDC Morphology;
- ✓ Receptores da Leica GPS900CS, GNSS Triumph Javad e GTR A BT Techgeo;
- ✓ Modelo Digital de Elevação ASTER GDEM, correspondente a área de estudo, com resolução espacial de 30m.

- ✓ Mosaico de imagens orbitais ortorretificada do Sistema WorldView-2 obtida em 15 de julho de 2015, com resolução espacial de 50 cm (Figura 10).

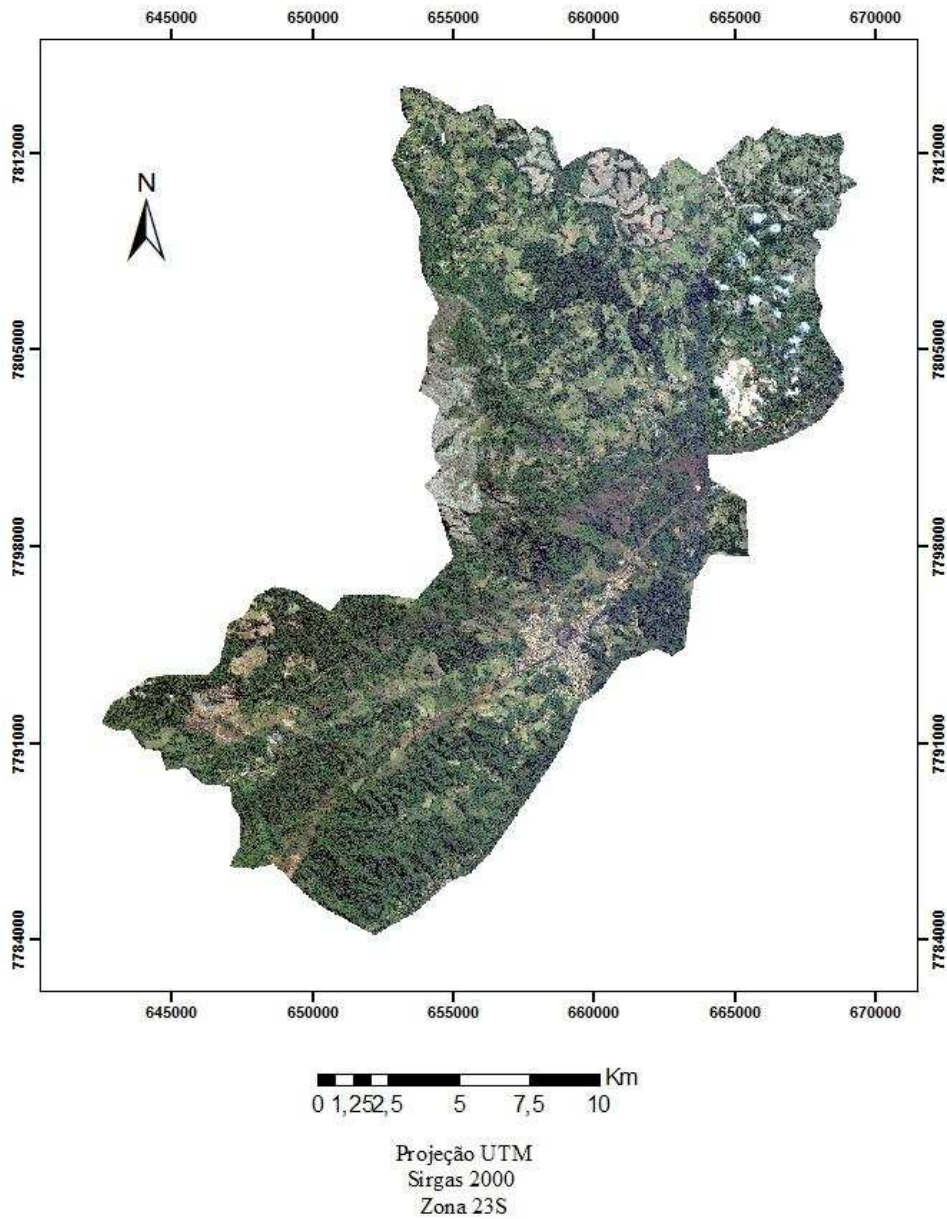


Figura 10 - Mosaico com imagens WorldView-2 da área de estudo.

A Figura 11 apresenta uma ampliação de uma região do mosaico referente a área de estudo, no sentido de ilustrar a definição dos objetos, em função de sua alta resolução.



Figura 11 - Trecho do mosaico WorldView-2 com detalhamento da cena.

### 4.3. Metodologia

A fim de melhor elucidar as etapas a serem realizadas na metodologia proposta a Figura 12 ilustra um fluxograma de atividades.

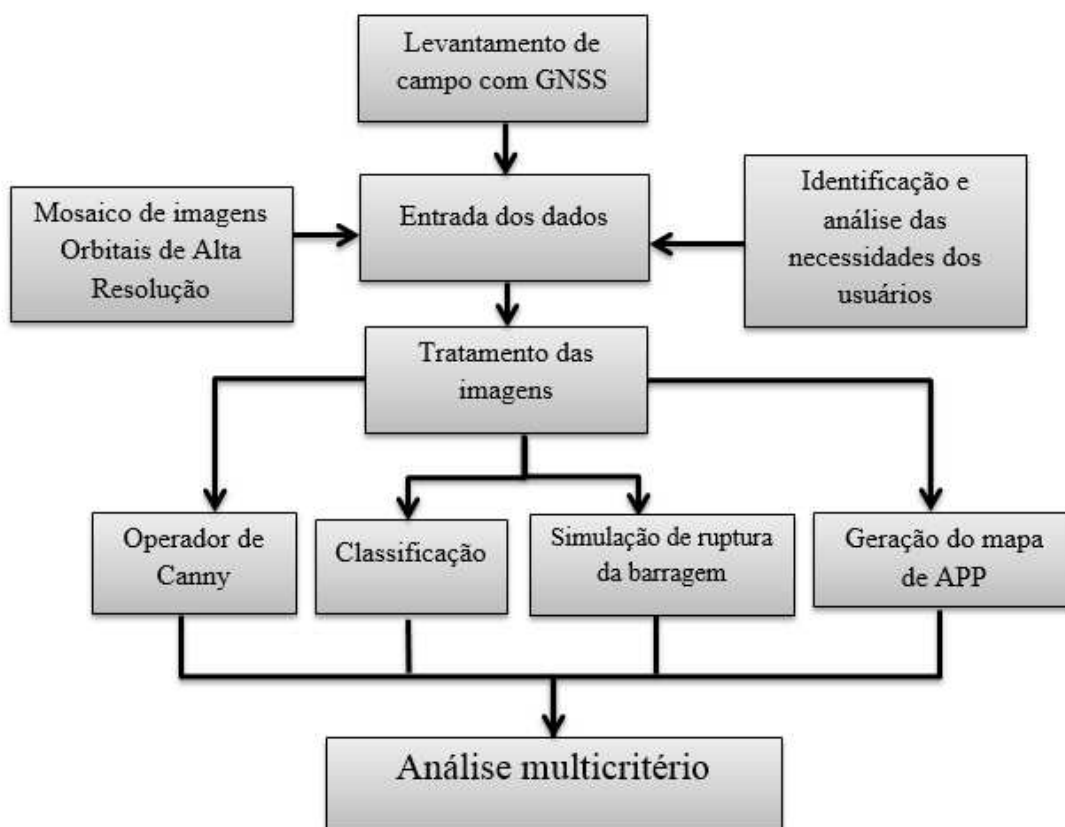


Figura 12 - Fluxograma metodológico.

#### ✓ Identificação e análise das necessidades dos usuários

Na etapa de definição dos principais aspectos ambientais a serem considerados na pesquisa, inicialmente foram identificadas demandas quanto a geração de mapas com características ambientais, através de entrevista com o Secretário Municipal do Meio Ambiente de Barão de Cocais, as quais são descritas abaixo:

- Mapa das Áreas de Preservação Permanentes – APPs;
- Mapa de cobertura e uso da terra;
- Mapa de fragilidade ambiental;

Devido aos recentes acontecimentos, como o rompimento da barragem no Município de Mariana, e considerando o fato de que o Município de Barão de Cocais ser uma cidade que possui a mineração como a maior atividade econômica, foi acrescentado também neste projeto um mapa com a identificação das barragens de rejeitos (Figura 13).



Figura 13 – Imagens ilustrando as barragens de rejeito do Município de Barão de Cocais, MG.

✓ Mosaico de imagens orbitais de alta resolução

A imagem orbital de alta resolução espacial utilizada no trabalho corresponde a um mosaico estabelecido a partir de algumas cenas, tendo em vista a extensão territorial da região de estudo.

As imagens ortorretificadas foram obtidas em 15 de julho de 2015 pelo Satélite WorldView-2. O mosaico da área de estudo foi adquirido para as atividades de um convênio da Prefeitura Municipal de Barão de Cocais e a UFV/FUNARBE, a qual foi cedida para uso nas pesquisas deste projeto.

✓ Levantamento de campo com GNSS e Análise da qualidade posicional

Como o mosaico da área de estudo já é um produto ortorretificado, ou seja, corrigido das distorções das inclinações em relação à plataforma e do deslocamento do relevo, foi realizada uma análise da qualidade posicional deste produto, a partir de pontos de referência coletados em campo.

Neste sentido, foram coletados em campo 25 pontos de controle terrestre, com o auxílio dos receptores GPSs Leica, Javad e GTR e processados no *software* Topcon *tools*. Para que houvesse uma boa distribuição geométrica dos pontos na cena, foi

estabelecida uma grade com 3x3km de espaçamento (Figura 14) na região de estudo, onde foram determinados pontos que possuíam acesso em campo, nos diferentes quadrados.

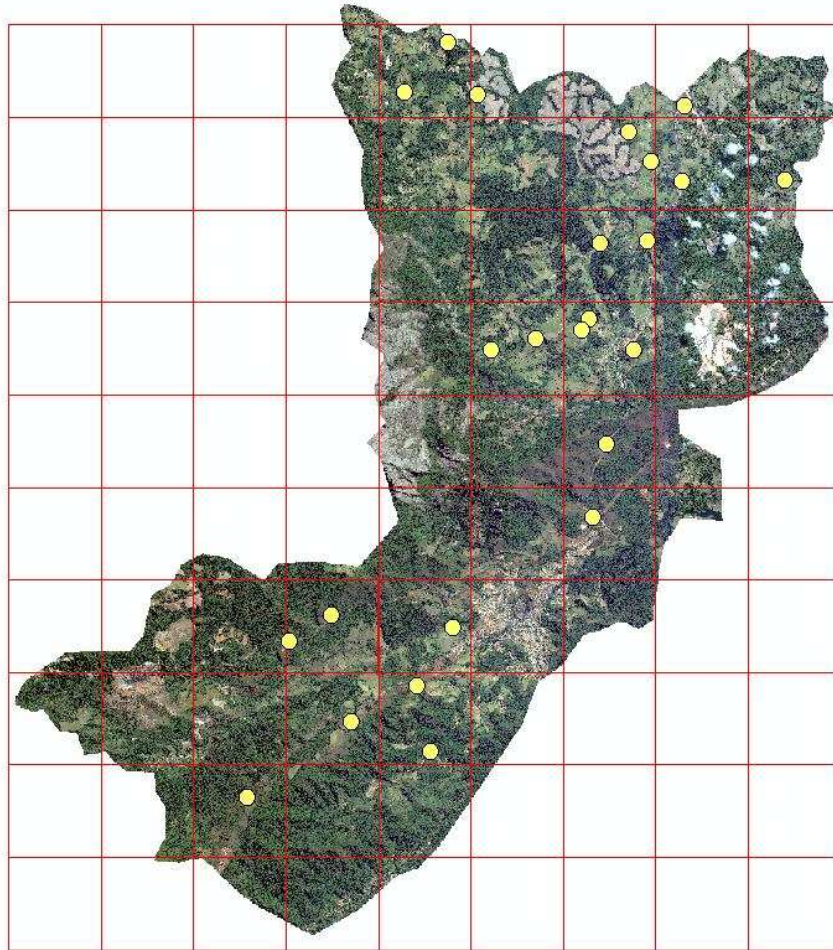


Figura 14 – Imagem ilustrando a grade de 3x3km e distribuição dos pontos coletados em campo.

‘O mosaico foi classificado com PEC-PCD "Classe C", na escala 1/5000, de acordo com o Decreto-lei n. 89.817 de 20 de junho de 1984, que regulamenta as normas cartográficas brasileiras, aliada às tolerâncias da ET-CQDG.

✓ Operador de Canny

Nesta etapa, para uma melhor eficiência, foram recortados quatro trechos da imagem contendo as feições de interesse a serem extraídas, sendo eles dois trechos da rodovia e as duas represas em estudo (Figura 15).

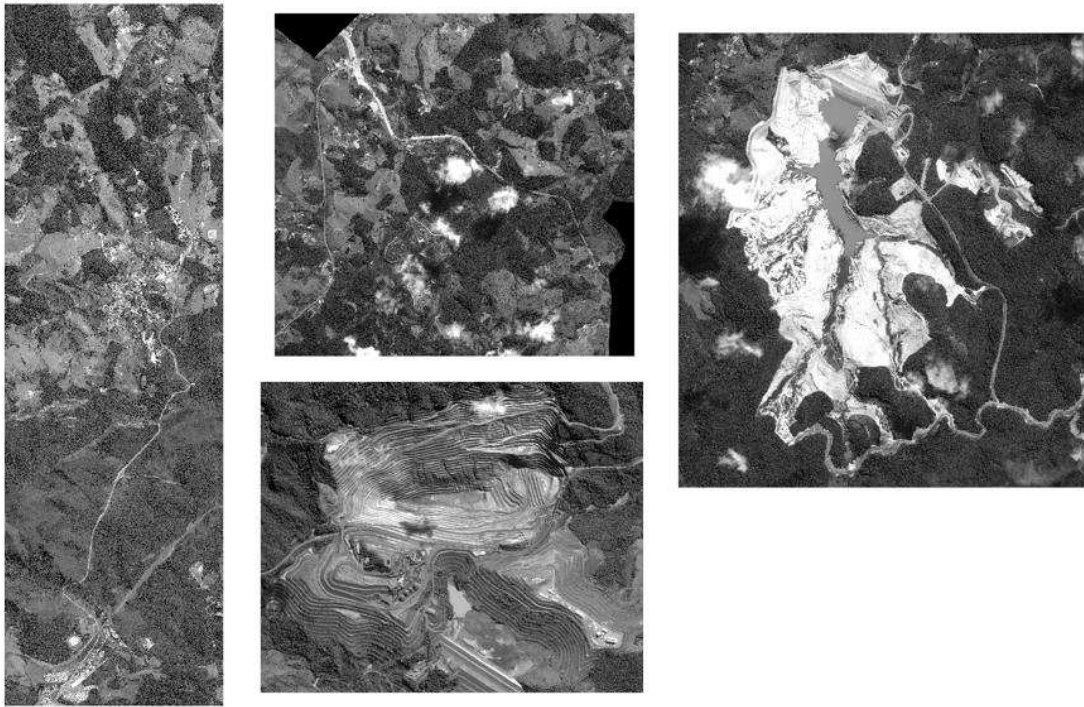


Figura 15 - Recortes da rodovia e das represas em tons de cinza.

Inicialmente foi estabelecida uma rotina com operadores morfológicos implementados na *toolbox* SDC Morphology do Matlab para pré-processamento das imagens, eliminando, assim, grande parte do ruído das cenas.

Os operadores, os elementos estruturantes e os valores das variáveis (Anexo II) foram escolhidos com base na literatura e em vários testes empíricos, priorizando os melhores resultados.

A efeito de comparação, a Figura 16 mostra uma ampliação de um recorte da represa e das imagens resultantes de cada operador utilizado.

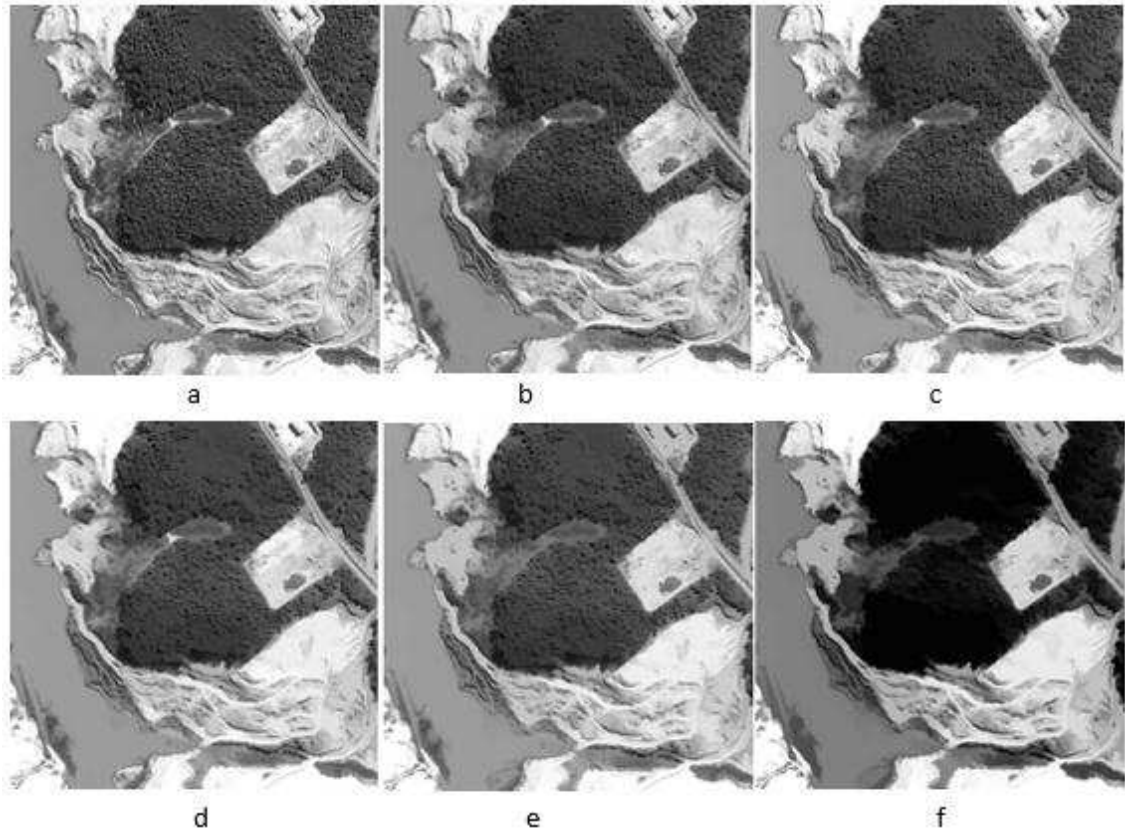


Figura 16 - Recorte da represa clara: a) Represaclara; b) Resutadommopenrec; c) Resutadommhmax; d) Resutadommclose; e) Resutadommareaopen; f) Resutadommhmin;

Rotina de realce da represa com tonalidade mais clara:

```

Resutadommopenrec = mmopenrec(uint8(Represaclara),mmsebox(4));
Resutadommhmax = mmhmax(Resutadommopenrec,20,mmsecross(3));
Resutadommclose = mmclose(Resutadommhmax, mmseline(6));
Resutadommareaopen = mmareaopen(Resutadommclose,20000,mmsebox);
Resutadommhmin = mmhmin(Resutadommareaopen,45);

```

Tais operadores possuem o objetivo de eliminar os ruídos presentes na imagem e realçar a feição de interesse.

O *mmopenrec*, ou abertura por reconstrução, minimiza a presença de ruídos sem modificar a aparência e a forma original da imagem (ISHIKAWA, 2008), como dito na sua descrição (SDC, 2016) ele “*cria a imagem Y pela subtração entre a abertura morfológica de F e a F original, através do elemento estruturante B*”.

O *mmhmax* aumenta o contraste da cena removendo picos com contrastes menores que o estipulado, no caso o valor 20.

O *mmclose* ou fechamento morfológico cria a imagem *y* pelo fechamento morfológico da imagem *f* pelo elemento estruturante escolhido (SDC, 2016).

O *mmareaopen* remove qualquer componente com área menor que a estipulada, no caso o valor 20000.

O último operador de realce é o *mmhmin*, que “*sup-reconstrói a imagem de escala de cinza f do marcador criado pela adição do valor inteiro positivo h a f. Este operador remove as depressões conectadas com contraste menor que h*” (SDC, 2016). No caso o *h* estipulado foi 45.

Com o final da etapa de realce a imagem resultante foi convertida para uma imagem binária:

*Resutadommbinary = mmbinary(Resutadommmhmin,130);*

No *mmbinary* “*um pixel em Y assume o valor 1 se, e somente se, o seu pixel correspondente em F tem um valor maior ou igual a K*” (SDC, 2001). Sendo *F* a imagem resultante, *Resutadommmhmin*, e *K* igual a 130.

Depois dessa rotina morfológica finalmente foi utilizado o operador de bordas Canny:

*Cannyrc = edge(Resutadommbinary, 'canny', 0.2, 2);*

No Matlab o operador de bordas Canny é definido pela função *BW = edge(I, 'canny', THRESH, SIGMA)*, onde *THRESH* é um vetor de dois elementos, no qual o primeiro elemento é o limiar baixo ( $0,4 * THRESH$ ) e o segundo elemento é o limiar alto (*THRESH*), e o valor *SIGMA* é o desvio padrão do filtro gaussiano.

Os valores de *THRESH* e *SIGMA* foram escolhidos através de testes, variando seus valores gradativamente, a fim de obter o melhor resultado. A Figura 17 demonstra a transformação da imagem binária *Resutadommbinary* na imagem final *Cannyrc*.

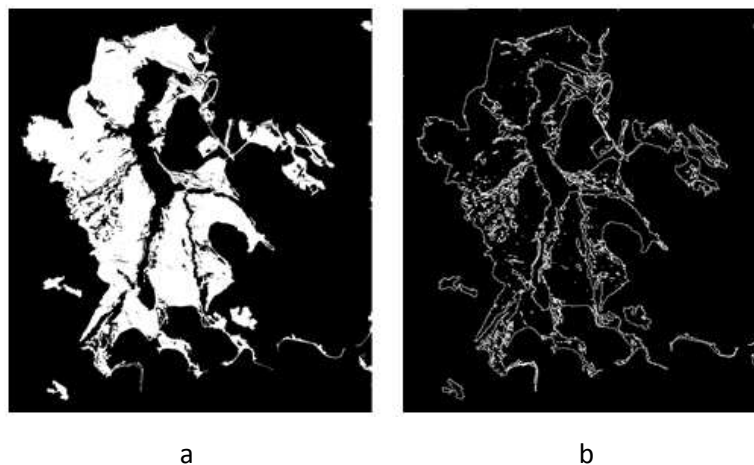


Figura 17 - a) Imagem resultante do operador *Resutadommbinary* b) Imagem resultante do operador *Cannyrc*.

Para as imagens com os trechos das estradas seguiu-se a mesma rotina.

Em relação à segunda represa, a rotina foi a estabelecida abaixo, sendo necessários apenas três operadores de realce:

```
trt = mmopenrec(uint8(rt),mmsecross(3));
mrt1 = mmhmax(trt,30,mmsecross(3));
minrt181 = mmhmin(mrt1,18);
Cannyrt3=edge(minrt181,'canny',0.2,2);
```

✓ Geração do mapa de simulação de ruptura de barragem

As três principais etapas para a simulação da ruptura de uma barragem são a definição do hidrograma de ruptura, a propagação da onda de cheia e o mapeamento da inundação.

O hidrograma de ruptura representa o tempo de esvaziamento do reservatório e pode ser calculado por métodos simplificados como Hidrograma Triangular Simplificado proposto por Mascarenhas (1990), representado na Figura 18.

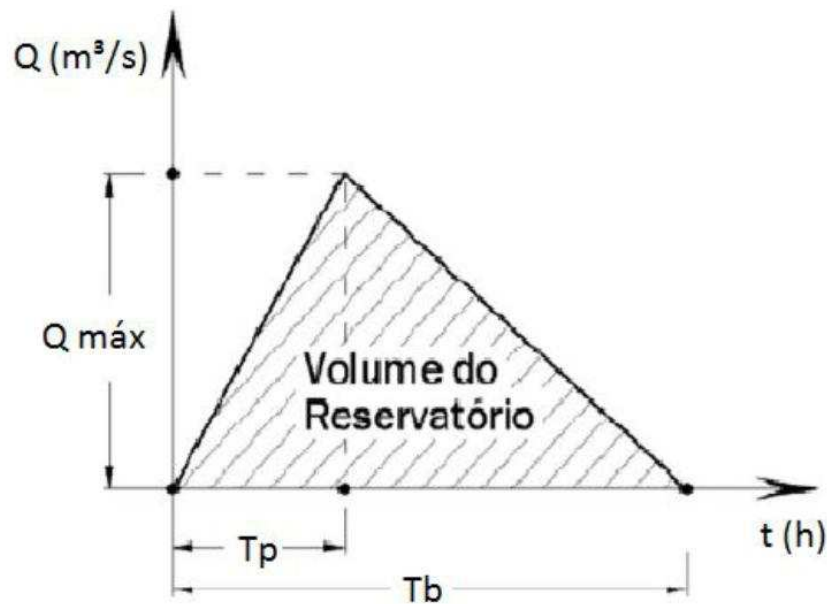


Figura 18 - Hidrograma Triangular Simplificado. Fonte: SARAIVA, (2014).

Sendo  $Q_{máx}$  a vazão máxima defluente da barragem em ruptura [ $m^3/s$ ];  $T_p$  – tempo de pico [s];  $T_b$  – tempo de base [s].

Assim:

$$Q_p = \frac{V_r}{T_b} \quad (16)$$

Em que:

$V_r$  – volume do reservatório da barragem no momento da ruptura [ $m^3$ ];

$$Qp(t) = Qp\left(\frac{t}{Tp}\right) \text{ para } 0 \leq t \leq Tp \quad (17)$$

$$Qp(t) = Qp - Qp\left(\frac{t-Tp}{Tb-Tp}\right) \text{ para } t \geq Tp \quad (18)$$

Por meio de formulações matemáticas em função das características das barragens é possível determinar a vazão de pico defluente da ruptura, no entanto a maioria destas equações se baseiam em análises históricas de ruptura de barragens de água, assim nesse trabalho foi utilizado o estudo de Martin *et al.*, (2015) “*Challenges with conducting tailings dam break studies*” (Desafios com a condução de estudos de ruptura de barragens de rejeitos) como base para determinar a vazão e o tempo de pico, que pode ser considerado o tempo de falha ou da formação da brecha (SARAIVA, 2014).

Rico *et al.*, (2007), citado por Martin *et al.*, (2015), desenvolveu uma relação empírica (equação 19) que prediz que aproximadamente 37% do volume da barragem de rejeito ( $V_t$  em  $10^6 m^3$ ) é libertado no volume de saída ( $V_{out}$  em  $10^6 m^3$ ).

$$V_{out} = 0,354Vt^{1,01} \quad (19)$$

Com o uso dessa análise, escolheu-se uma equação que relaciona a altura e volume da barragem, como a equação de Pierce *et al.*, (2010) a seguir, para determinar a vazão de pico:

$$Q_{max} = 0,0176(V_{out} * H)^{0,606} \quad (20)$$

Logo é necessário calcular o tempo de falha (pico), também determinado por uma das equações estudadas por Martin *et al.*, (2015), no caso foi escolhido uma equação proposta por Froehlich (1995):

$$t_f = 0,00254V_{out}^{0,53} * H^{-0,9} \quad (21)$$

Através dessas equações e das informações da barragem estudada (Tabela 5) foi possível determinar o hidrograma de ruptura representado pela Figura 19.

Tabela 5 – Características da barragem.

Nome	Barragem de Laranjeiras
<b>Tipo de contenção</b>	Rejeitos
<b>Altura máxima de projeto (m)</b>	56
<b>Volume de projeto (<math>m^3</math>)</b>	50.000.000

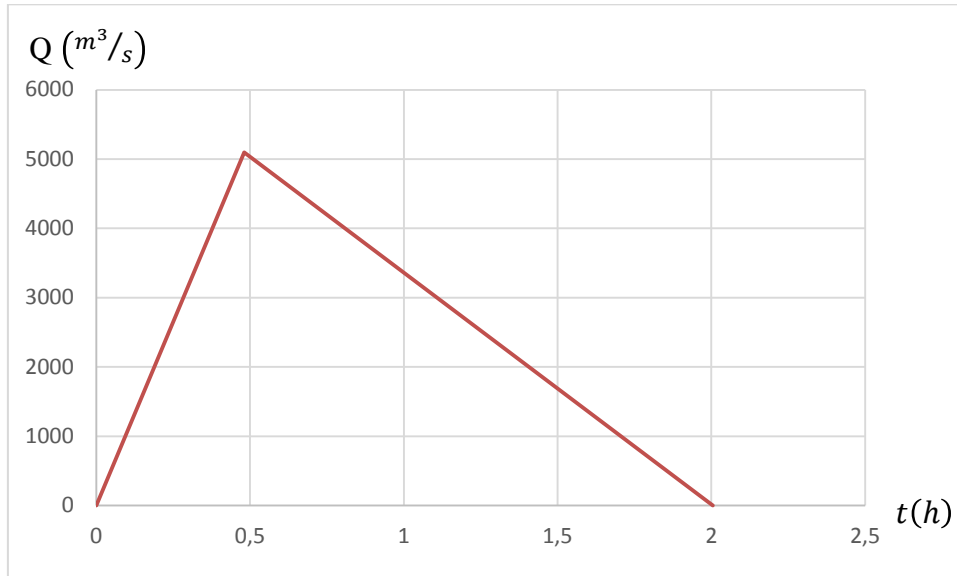


Figura 19 – Hidrograma de Ruptura.

Existem diversos modelos para simular a propagação da onda de cheia, nesse trabalho foi escolhido o modelo computacional HEC-RAS 5.0.3 utilizando sua modelagem de fluxo 2D.

Inicialmente importou-se o Modelo Digital de Elevação da área a jusante da barragem (Figura 20) e com este foi criada uma malha 2D da região (Figura 21).

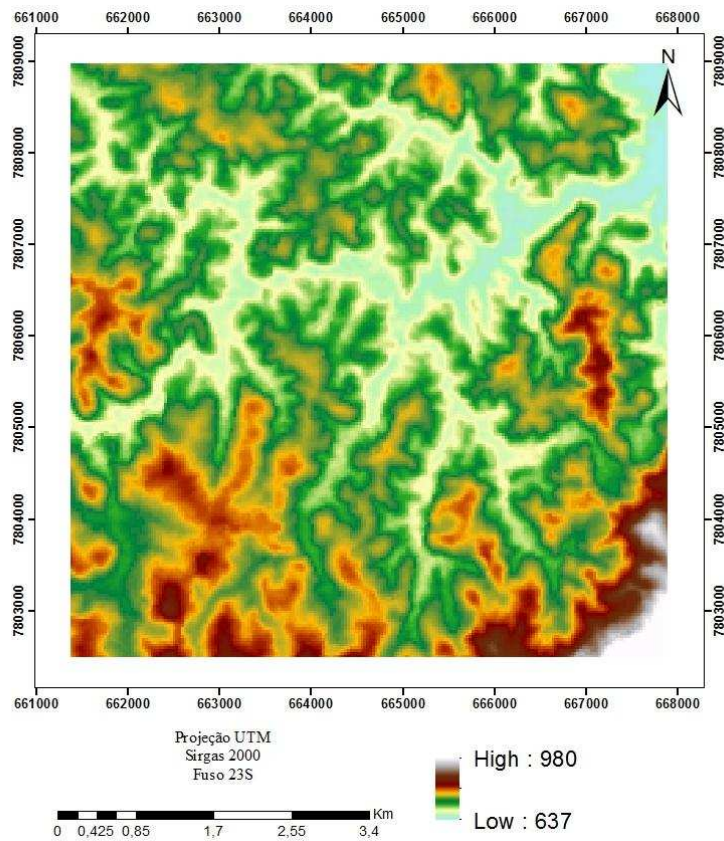


Figura 20 – MDE da área da barragem.

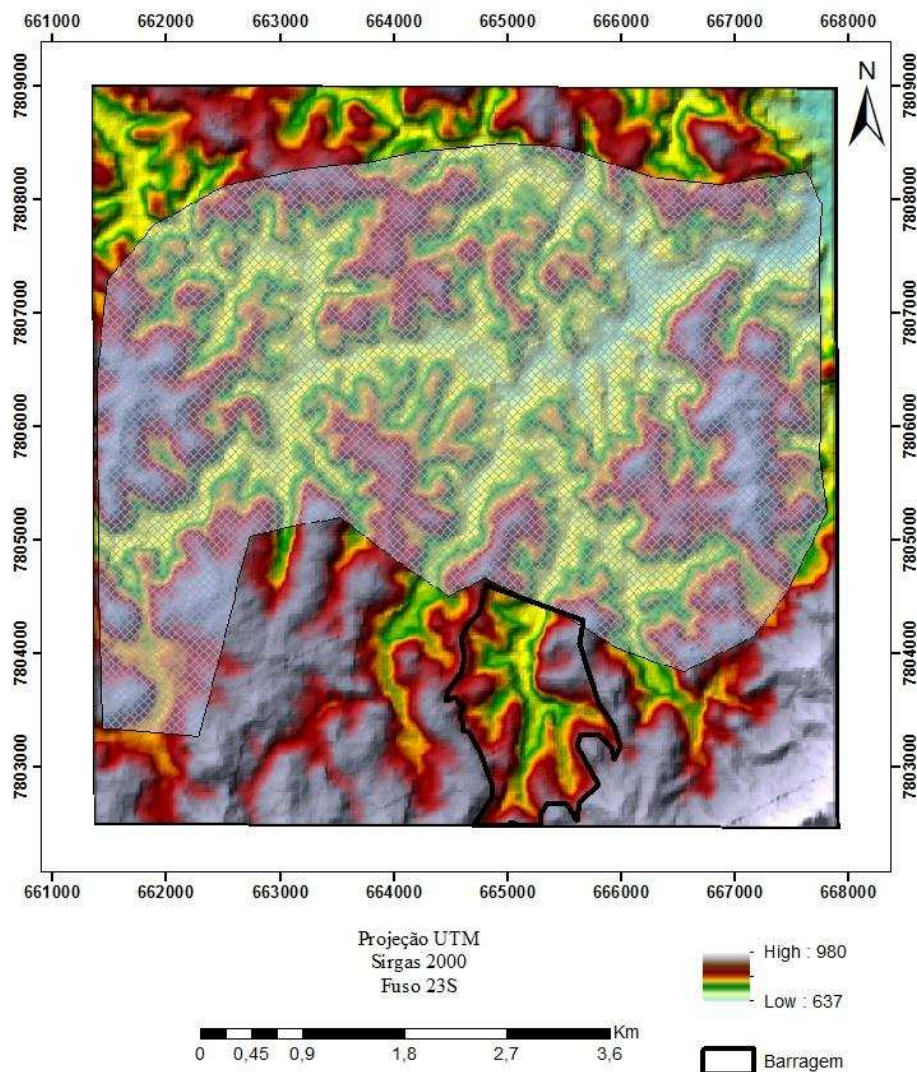


Figura 21 - Malha 2D a jusante da barragem

Desta mesma área também foi gerado um arquivo contendo a cobertura da terra e sua respectiva resistência ao escoamento, ou seja, o coeficiente de Manning (Tabela 6).

Tabela 6 – Coeficientes de Manning

Uso e cobertura do solo	Coeficiente de Manning
Matas	0,3
Culturas	0,17
Pastagens	0,13
Expansão urbana	0,08

Fonte: CASTRO *et al.*, (2015)

Finalmente foi atribuído as condições de contorno a montante, na localização da ruptura hipotética da barragem, e a jusante, seguindo o rio principal, da malha usando o comando *2D Area BC Lines*. Com isso pôde-se rodar o modelo computacional e gerar o mapa de inundação.

### ✓ Classificação

Na classificação do mosaico de imagens orbitais, visou-se gerar um mapa de uso e cobertura da terra. O método de classificação utilizado foi o da máxima verossimilhança (MaxVer) que se encontra implementado no software ArcGis 10.2, e foi aplicado no mosaico da imagem adquirida, o qual contém as bandas 1, 2, 3 (visível) e 4 (infravermelho próximo).

De acordo com as características da imagem e da região foram determinadas 14 classes de informação: corpos d' água, mata densa, pastagem, eucalipto, eucalipto decepado, campo sujo, área urbana, estrada, áreas rochosas, mineração, solo exposto, nuvens, sombra e fundo.

As amostras de treinamento foram escolhidas a partir da interpretação visual do mosaico de imagens de alta resolução, delimitando polígonos representativos para cada classe.

Para o processo de validação temática da classificação foram determinados, a partir de uma visita de campo, pontos de referência com amostragem aleatória, com o intuito de gerar uma matriz de erro. Com esta matriz pôde-se calcular a acurácia de cada classe através da acurácia do produtor (classificador), que indica a probabilidade de pontos serem corretamente classificados, e da acurácia do usuário, que indica a probabilidade de um ponto no mapa de classificação de uma determinada categoria representar o mesmo no solo (PANTALEÃO & SCOFIELD, 2009).

Outras medidas descritivas obtidas com a matriz de confusão são o índice de exatidão global, índice Tau e o coeficiente kappa, de acordo com as equações 13, 14 e 15.

### ✓ Geração do mapa de APP

De acordo com as características geográficas e ambientais da área em estudo e baseado na legislação vigente (Anexo I), as Áreas de Preservação Permanentes (APPs) mapeadas são as descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - APPs a serem mapeadas.

<b>Definições</b>	<b>Limites</b>
Cursos d'água de menos de 10 m de largura	Largura de 30 m
Áreas no entorno das nascentes	Raio mínimo de 50 m
Encostas	Declividade maior que 45°

Para a delimitação das APPs dos cursos d'água e das nascentes importou-se uma rede hidrográfica da área do município de Barão de Cocais no site do IGAM. No entanto, esta não é muito precisa ou atualizada. Logo, com o intuito de melhorar essas características, esta foi utilizada, junto com a imagem de alta resolução, como base para criar uma nova rede hidrográfica. A Figura 22 demonstra a diferença de qualidade da rede hidrográfica do IGAM 2010 e da corrigida.

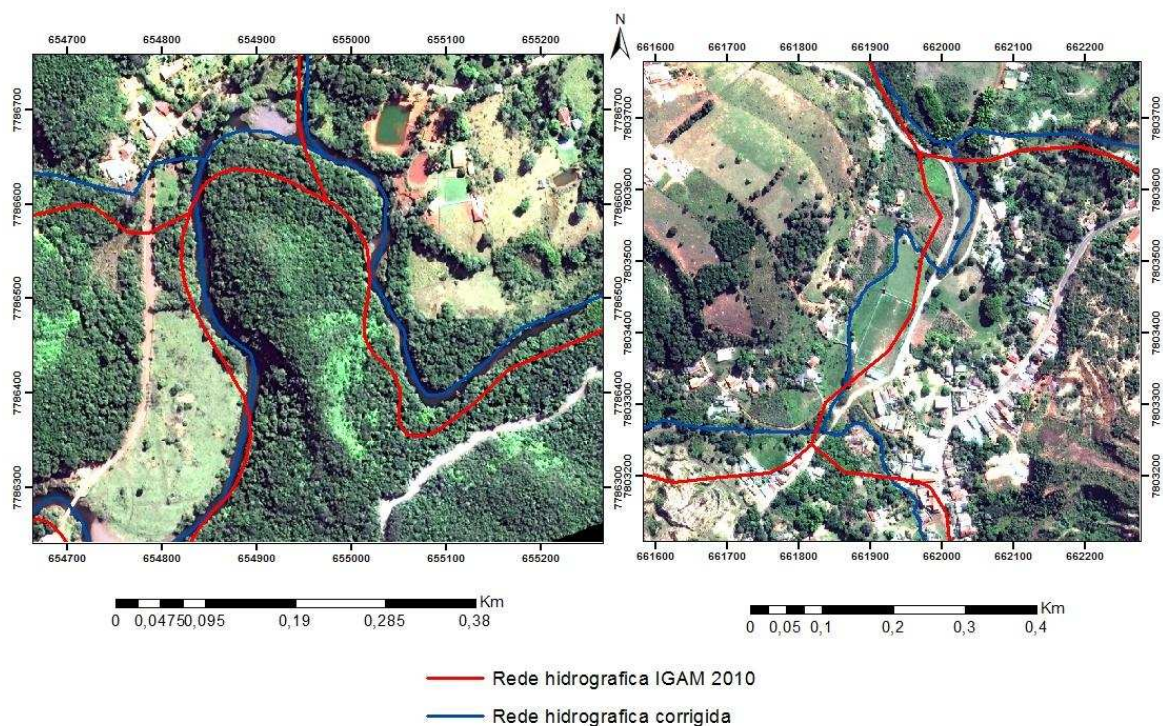


Figura 22 - Rede hidrográfica do IGAM 2010 e corrigida.

Com a rede hidrográfica corrigida criou-se um novo *shapefile* de pontos localizados nas nascentes de cada rio. Nesses *shapes* usou-se a ferramenta *buffer*, que cria polígonos de distância específica em torno da feição selecionada, de 30 e 50 m, respectivamente resultando no mapa de APP dos cursos d'água e no mapa de APP das nascentes.

O mapa da declividade (Figura 24) foi obtido a partir do Modelo Digital de Elevação da região (Figura 23), com o comando *slope* (declividade). Nesse mapa com *reclassify* (reclassificação) isolou-se as áreas com declividade maior que 45° obtendo o mapa de APP das encostas.

## MDE de Barão de Cocais, MG

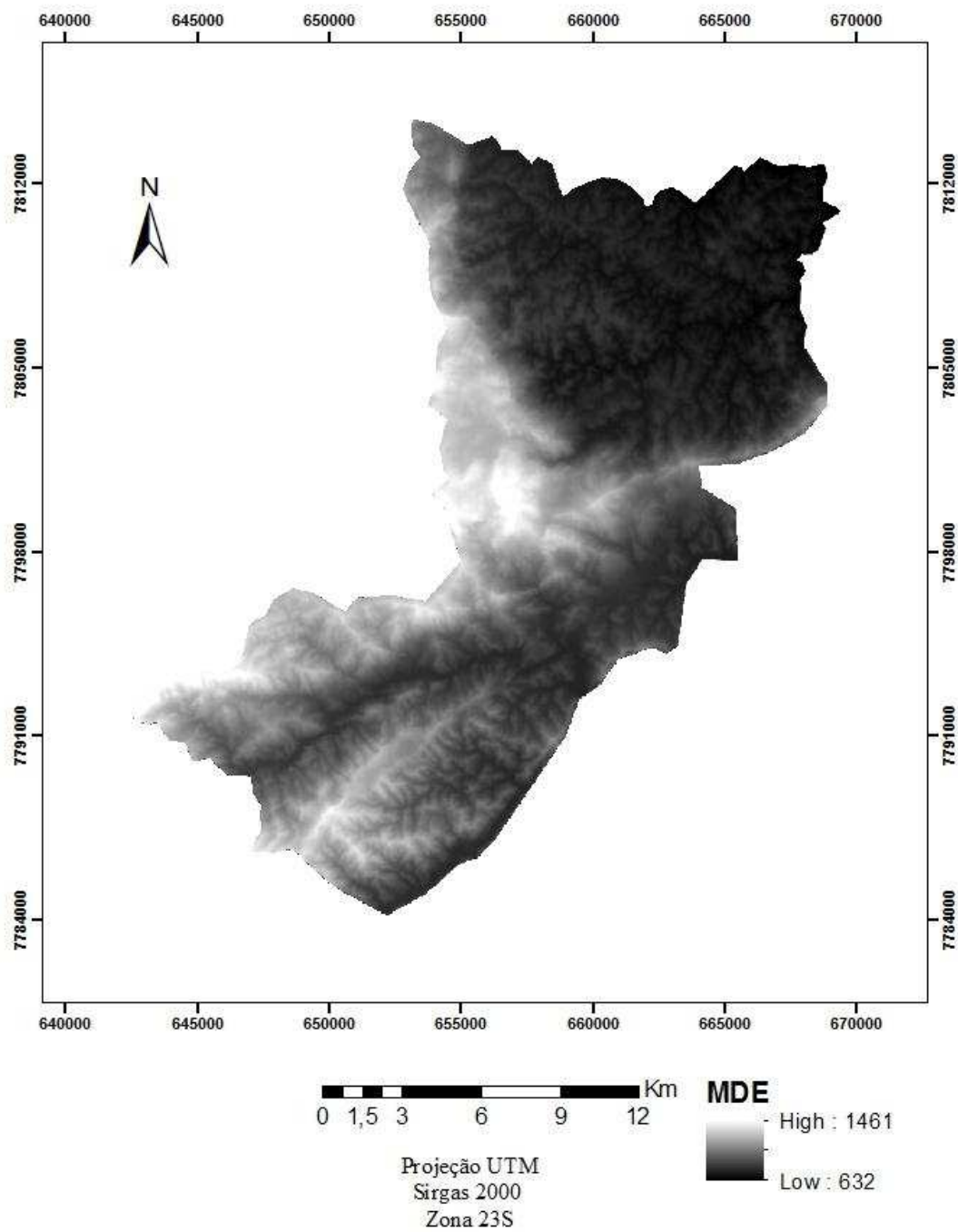


Figura 23 - Mapa de Modelo Digital de Elevação do município de Barão de Cocais.

## Mapa de declividade de Barão de Cocais, MG

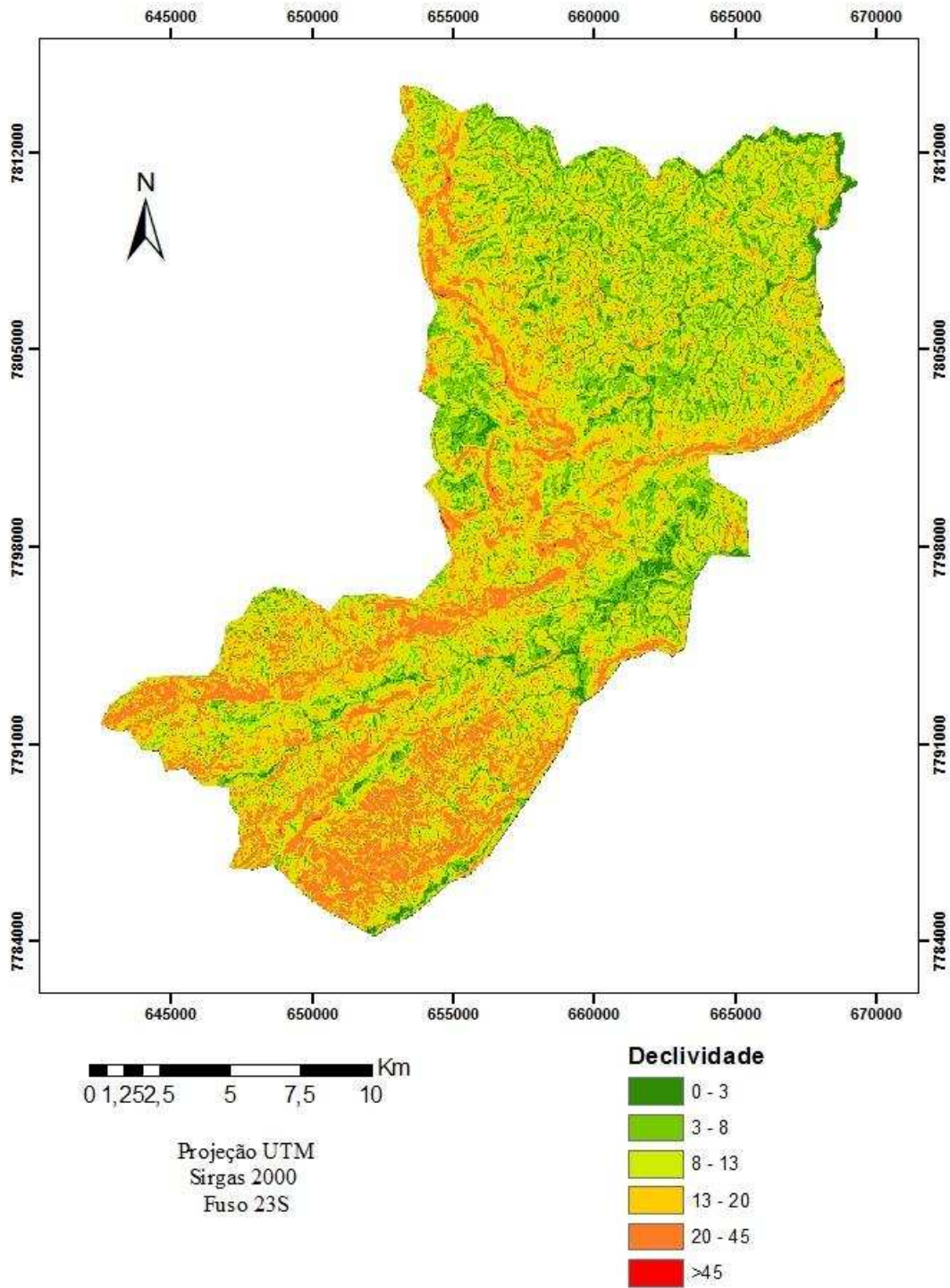


Figura 24 - Mapa de declividade do município de Barão de Cocais.

A Figura 25 mostra um trecho contendo as APPs geradas a partir dos passos mencionados.

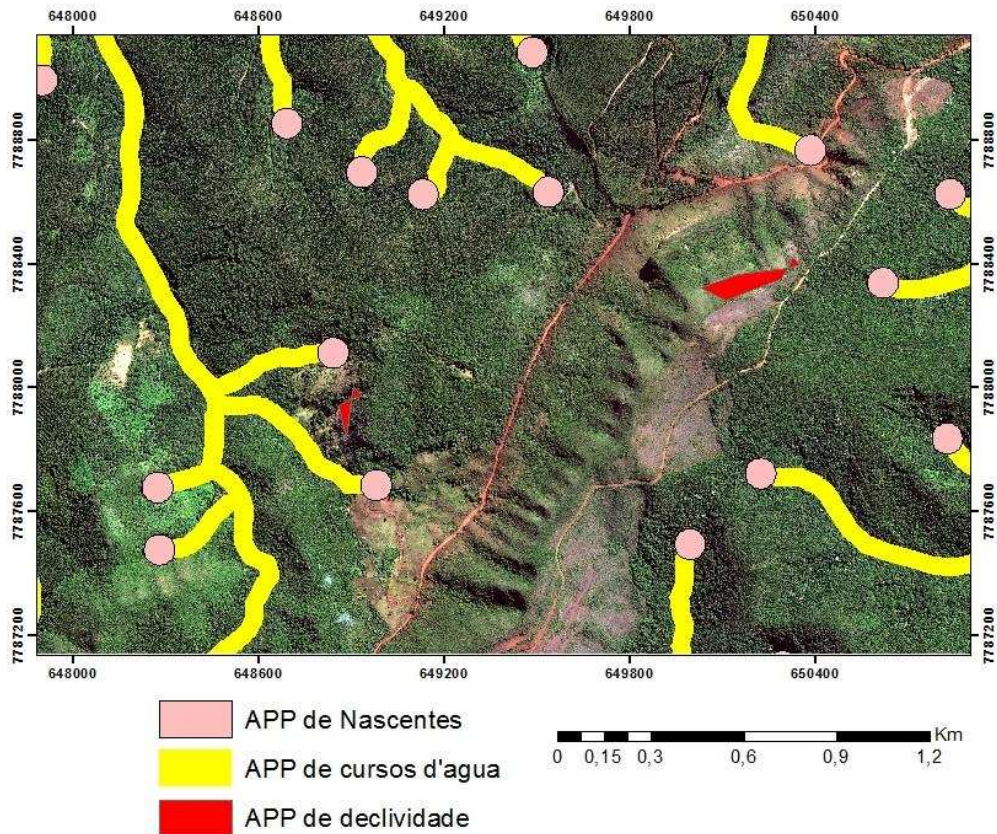


Figura 25 – Trecho do mapa de APPs.

✓ Análise Multicritério

Esta etapa teve como objetivo determinar a fragilidade ambiental da área em estudo utilizando o método de análise multicritério da Combinação Linear Ponderada ou MCE - Multi Criteria Evaluation, existente no módulo de suporte à decisão do software IDRISI Selva.

Os fatores utilizados foram os mapas de uso e cobertura da terra, distâncias das represas, distâncias dos cursos d'água, distâncias das nascentes, declividade e classe de solos, extraído do Mapa de Solos de Minas Gerais elaborado pelo Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa – MG (Figura 26).

## Mapa de classes de solos de Barão de Cocais, MG

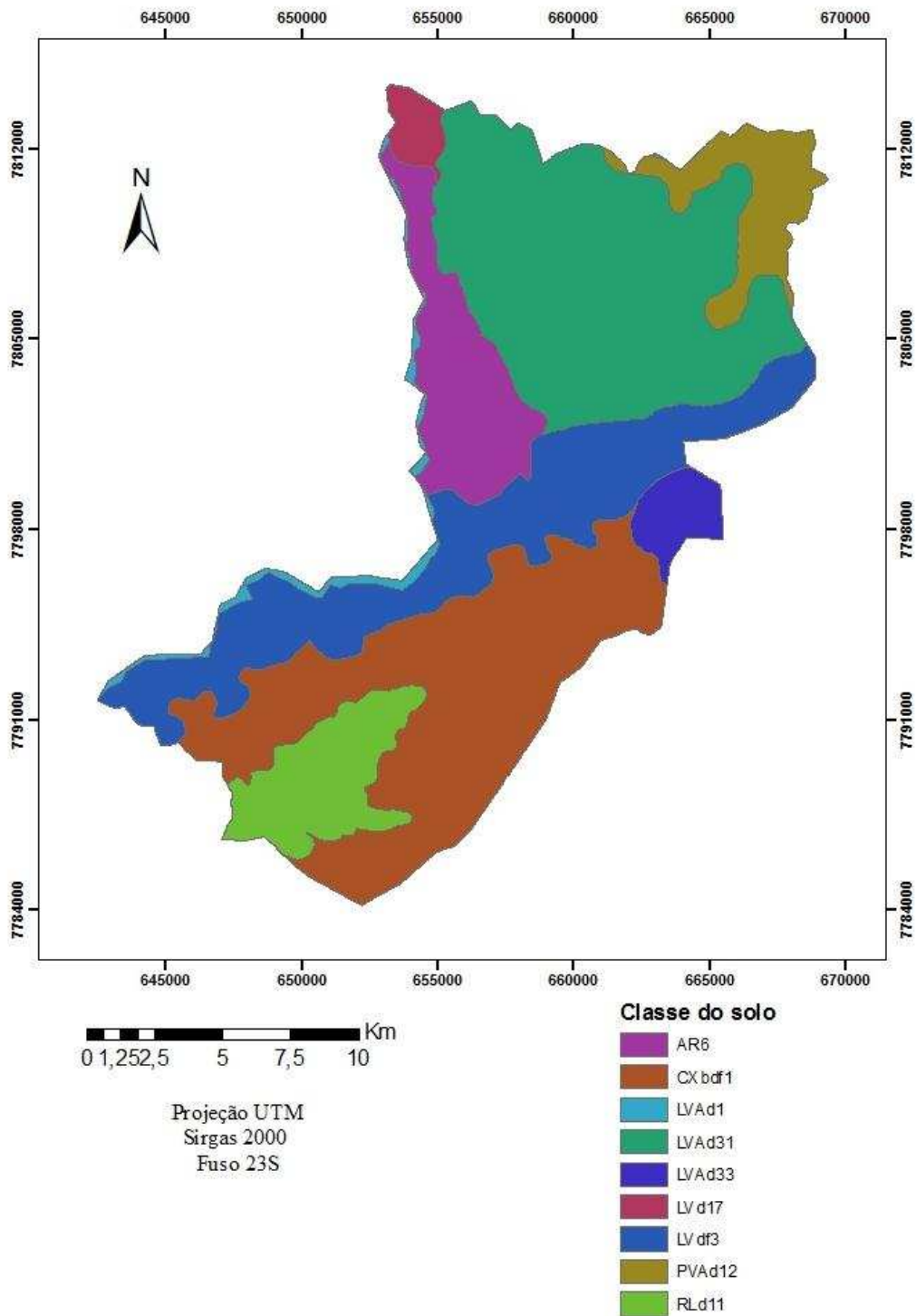


Figura 26 - Mapa de Solos de Barão de Cocais, MG. Legenda detalhada no Anexo III.

O mapa de declividade foi exportado do ArcGis para o IDRISI Selva e usado como padrão na transformação dos outros mapas, exportados para o IDRISI na forma de vetor, para *raster*.

Neste método padroniza-se os fatores em uma escala de aptidão de 0, menos apto ou, nesse caso, menor fragilidade ambiental, a 255, mais apto ou maior fragilidade ambiental, após atribui-se pesos a cada fator considerado. Os níveis de aptidão e os pesos (Tabelas 8 e 9) foram determinados de acordo com o conhecimento empírico e consulta literária sobre o assunto em questão (DONHA *et al.*, 2006; CAIXETA *et al.*, 2012; ROSS, 1994; MASSA & ROSS, 2012).

Com o uso do comando *edit* e *assign* determinam-se as aptidões dos mapas de declividade, uso e cobertura da terra e classe do solo, como indicado na Tabela 8. Logo, usa-se o comando *fuzzy* nos mapas de distância das APPs e das represas, nos quais se considerou uma fragilidade decrescente com um limite respectivamente de 1000 m e 4000 m (maior distância encontrada no mapa de simulação de ruptura de barragem). Esses mapas de aptidão são ilustrados na Figura 27.

Tabela 8 – Aptidões da declividade, classe do solo e uso e cobertura da terra.

<b>Declividade (%)</b>	<b>Relevo</b>	<b>Nota</b>	<b>Classe do Solo*</b>	<b>Nota</b>	<b>Uso e cobertura da terra</b>	<b>Nota</b>
0 - 3	Plano	<b>40</b>	LVAd1	<b>40</b>	Corpos d'água	<b>40</b>
3 - 8	Suave-ondulado	<b>60</b>	LVAd33	<b>50</b>	Mata densa	<b>50</b>
8 - 20	Ondulado	<b>120</b>	LVAd31	<b>60</b>	Nuvens	<b>55</b>
20 - 45	Forte-ondulado	<b>150</b>	LVdf3	<b>70</b>	Sombra	<b>55</b>
45 - 75	Montanhoso	<b>200</b>	LVd17	<b>80</b>	Cultura da banana	<b>65</b>
>75	Forte-Montanhoso	<b>220</b>	PVAd12	<b>100</b>	Eucalipto	<b>80</b>
			CXbd1	<b>140</b>	Pastagem	<b>90</b>
			RLd11	<b>180</b>	Campo Sujo	<b>130</b>
			AR6	<b>210</b>	Áreas Rochosas	<b>140</b>
					Área Urbana	<b>160</b>
					Estrada	<b>160</b>
					Mineração	<b>200</b>
					Eucalipto decepado	<b>180</b>
					Solo exposto	<b>220</b>

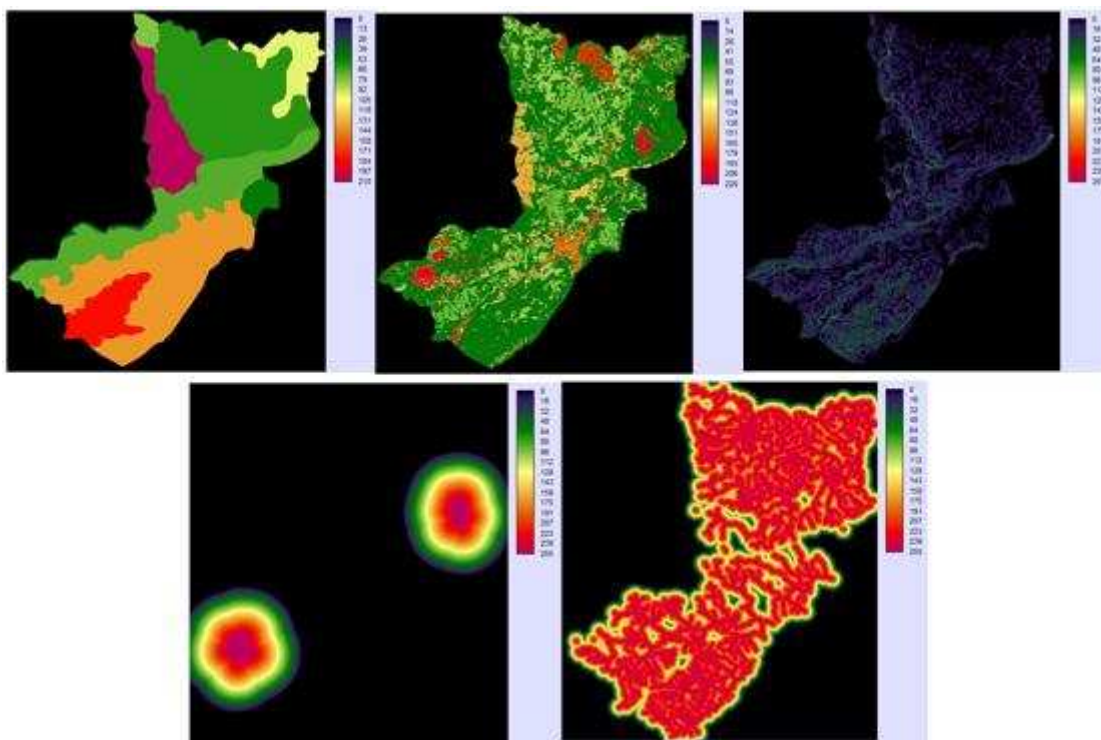


Figura 27 - Fatores de aptidão da classe dos solos, uso e cobertura da terra, declividade, distância das represas, distância das APPs.

Os pesos de cada fator encontram-se ilustrados na Tabela 9. Estes foram determinados no módulo *weight*, que utiliza uma técnica de comparação pareada, na qual o usuário atribui importância relativa entre dois fatores na determinação de sua aptidão para o objetivo determinado (EASTMAN, 1998).

Tabela 9 – Pesos.

<b>Mapa de aptidão</b>	<b>Pesos</b>
Declividade	0,1614
Distância das represas	0,0654
Distância das APPs	0,1068
Classe dos solos	0,1572
Uso da terra	0,5092

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esse trabalho teve como objetivo a geração de uma base cartográfica cadastral ambiental confiável, para auxílio em projetos ambientais, com o uso de um mosaico orbital confeccionado a partir de imagens de alta resolução, composta do mapeamento de diferentes aspectos de interesse ambiental, e em especial, atendendo aspectos solicitados pela secretaria do meio ambiente do município em estudo, além de sugerir temas pertinentes para pesquisa.

A seguir estão listados os mapas que compõe a base cartográfica juntamente com a discussão dos resultados:

- Mapa com a identificação, dimensões e localizações de barragens de rejeitos para exploração mineral:

Um dos principais problemas na extração de feições é a segmentação excessiva devido a grande quantidade de informações presentes na imagem, possuindo diferentes alvos, além daqueles de interesse. Neste sentido o uso da morfologia matemática como forma de pré-processamento pode auxiliar as etapas subsequentes, como o processo de extração de feições. A Figura 28 mostra os resultados da extração de bordas de Canny sem e com o pré-processamento da imagem.

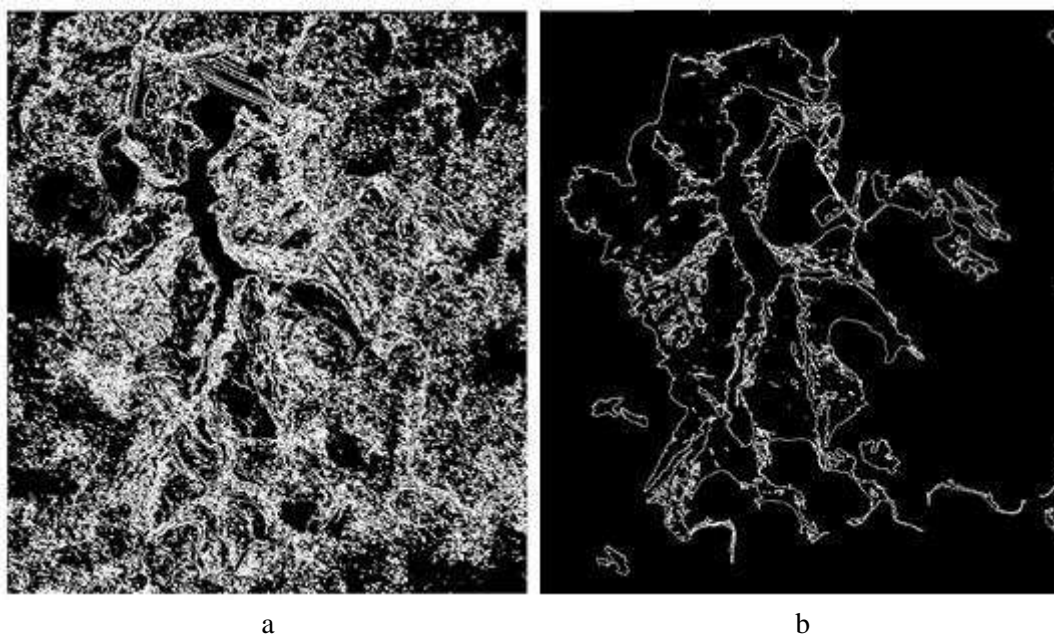


Figura 28 - Extração de bordas de Canny da represa 1 sem a) e com o pré-processamento b).

Pela análise visual da imagem pode-se perceber como o uso dos operadores morfológicos na etapa de pré-processamento foi importante, eliminando quase que totalmente os ruídos da imagem.

As Figuras 29, 30 e 31 mostram os outros resultados do processo de extração das feições com o pré-processamento das imagens seguido do operador Canny. Pode-se perceber que todos foram satisfatórios e que o extrator de bordas Canny se mostrou muito eficiente, permitindo a obtenção dos alvos de interesse, minimizando o excesso de informação. Na Figura 31 duas ampliações das imagens resultantes da extração com as bordas em forma de vetor sobrepondo as imagens em tons de cinza e ilustram a exatidão dos resultados.

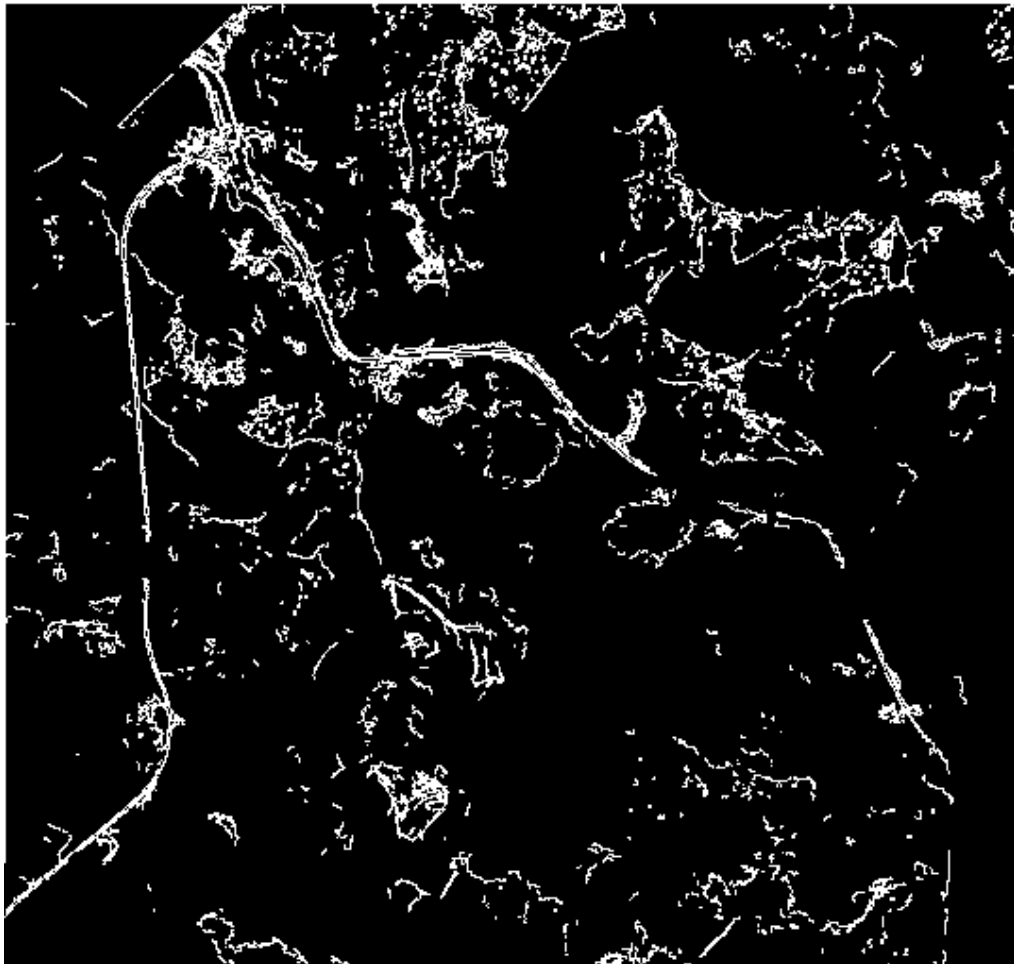


Figura 29 - Resultado do extrator de bordas Canny da estrada 2.



Figura 30 – Resultado do extrator de bordas Canny da represa 2.

No pré-processamento com a MM cada recorte obteve uma melhor resposta a uma determinada rotina, dependendo das características da imagem e de sua feição a ser extraída. As estradas, assim como a represa 1, possuem tonalidades mais claras e um maior contraste com o fundo, o que justificou o uso do operador *mmbinary*, o qual transforma a imagem de entrada em uma imagem binária, caracterizando desta forma as feições claras na imagem binária como objeto e o restante como fundo. No entanto, para a segunda represa, este operador não obteve resultados desejados, eliminando parte da feição a ser extraída, por isso foi retirado da rotina dessa imagem.

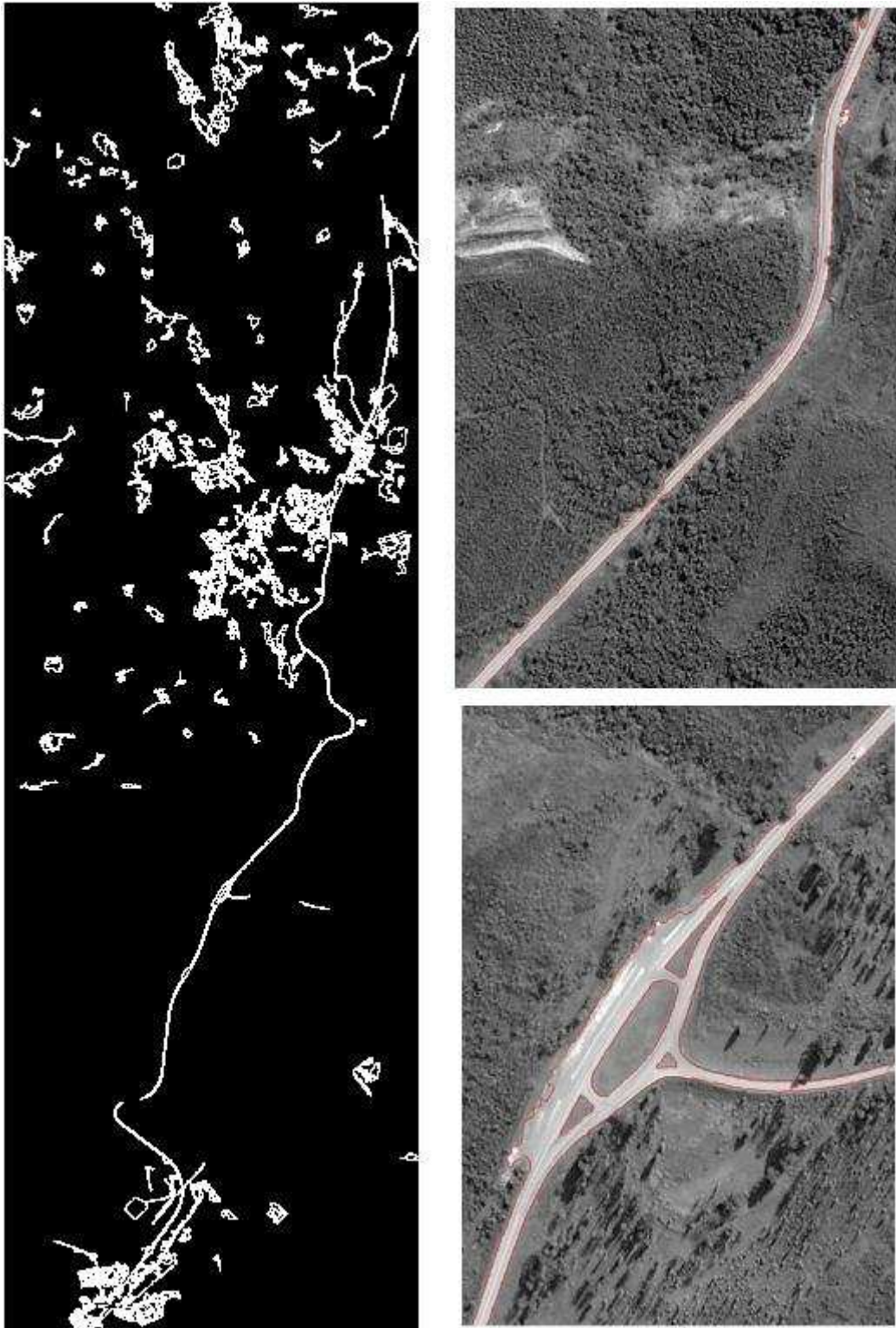


Figura 31 – Resultado do extrator de bordas Canny da estrada 1 e duas ampliações.

- Mapa de simulação de ruptura de barragem;

Foi feito o mapa de simulação de ruptura da barragem de rejeitos de Laranjeiras (represa 1), já que esta apresenta maior dano potencial, pois há população ocupando a área afetada a jusante da barragem, ou seja, vidas humanas poderão ser atingidas.

Nesse mapa, a fim de considerar o pior cenário escolheu-se utilizar o volume e a altura de projeto, considerando assim a barragem em sua maior capacidade.

A Figura 32 mostra o mapa final de inundação sobreposto ao Modelo Digital de Elevação da área estudada. Sobrepondo-a com uma imagem da região na Figura 33 pode-se observar as áreas potencialmente inundáveis.

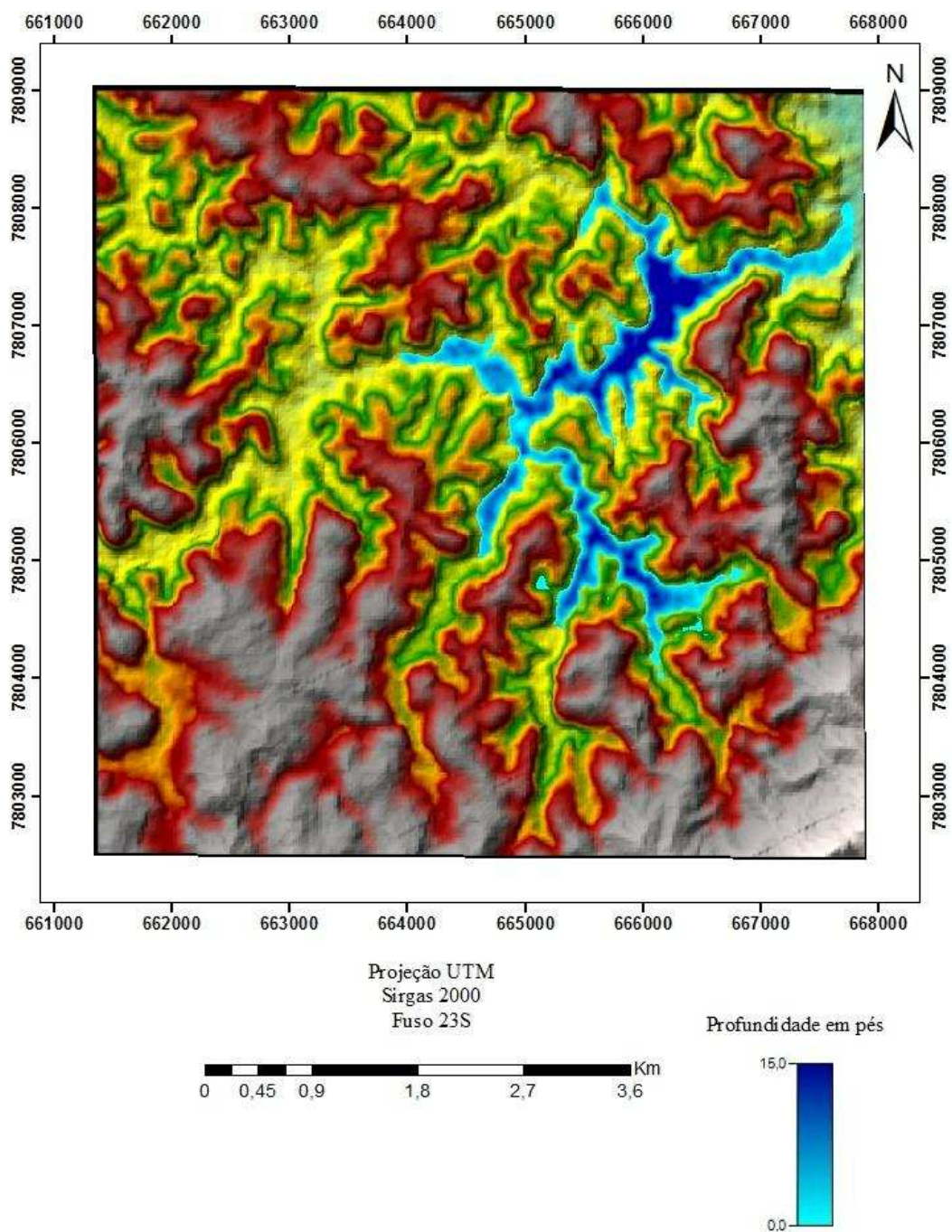


Figura 32 – Mapa de inundação da represa 1, município de Barão de Cocais – MG, sobreposto ao MDE.

## Mapa de simulação de ruptura de barragem

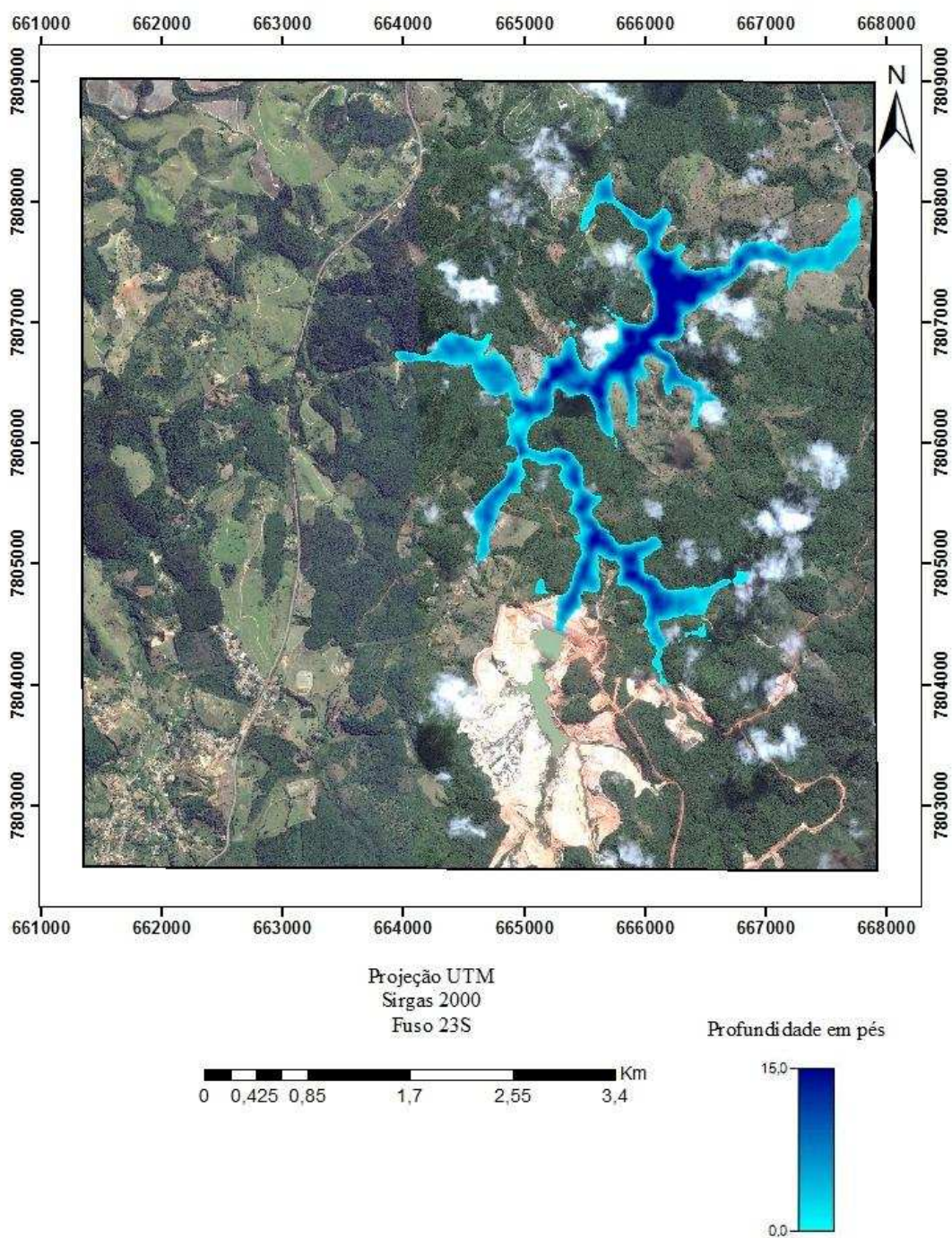


Figura 33 - Mapa de inundação da represa 1, município de Barão de Cocais – MG.

Através de uma análise visual desse mapa percebe-se que parte da área afetada está composta por mata densa e pastagem, as quais incluem as APPs dos cursos d'água, que, nesse caso, podem ser contaminadas pelo rejeito. O distrito de Cocais, nesse caso,

não será diretamente afetado, o que não exclui o risco de vida já que dentro da área de inundação há algumas casas de fazendeiros.

Nesse trabalho foi de grande importância o uso da fórmula de Rico *et al.*, (2007), já que a onda gerada no momento da ruptura e o depósito do rejeito depende de sua porcentagem de sólidos e suas características, abrangendo uma área inundável bem menor que de uma barragem de água. A título de comparação a Figura 34 mostra o mapa de inundação caso essa fosse uma barragem de água.

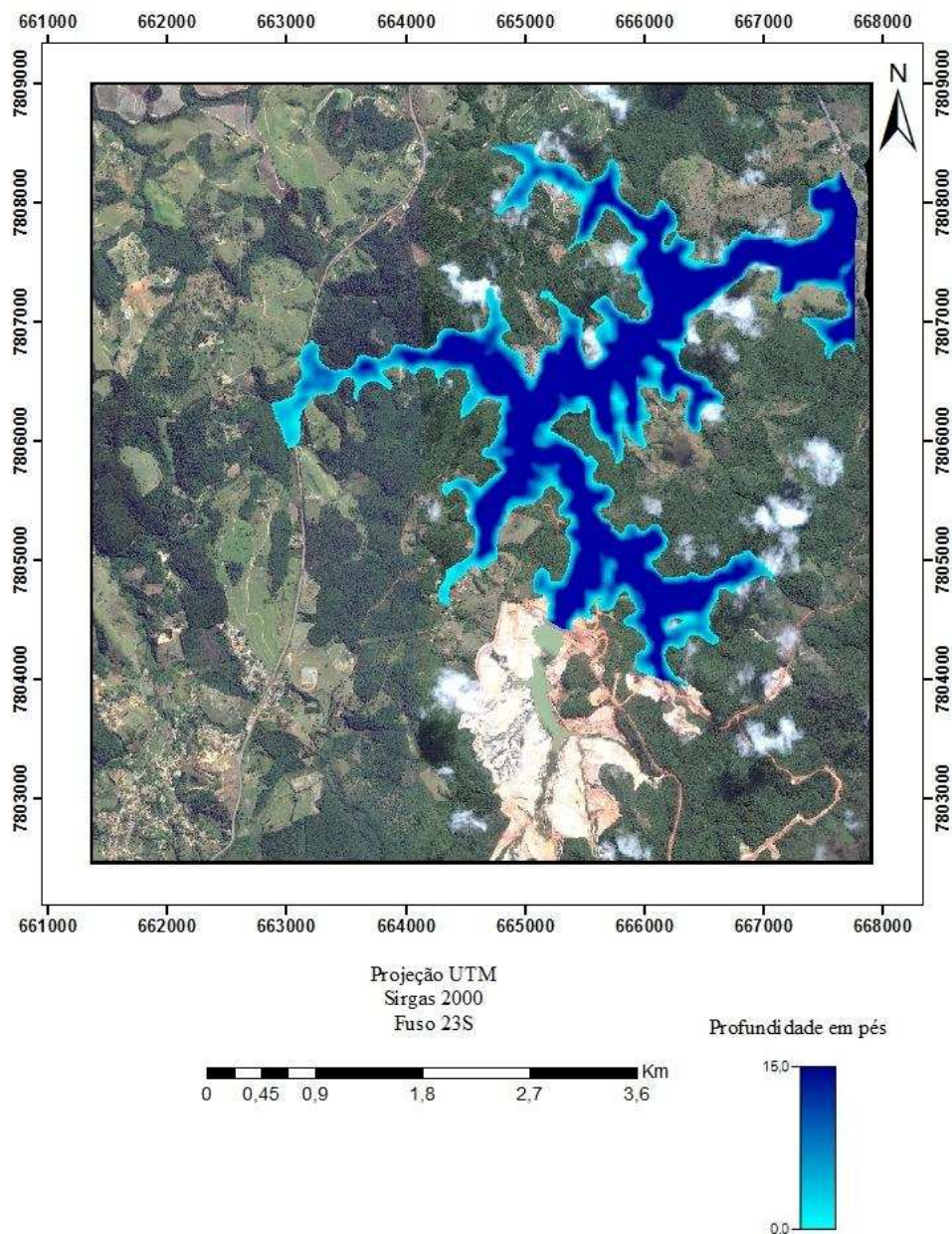


Figura 34 - Mapa de inundação da represa 1, município de Barão de Cocais – MG, considerando a represa reservando apenas água.

Pode-se perceber que, considerando a represa de água, a área inundável seria bem maior.

- Mapa de uso e cobertura da terra;

Como dito anteriormente o mapa de uso e cobertura da terra (Figura 35) foi obtido com o algoritmo de classificação MaxVer e sua acuracia foi determinada com a análise da matriz de erros (Tabela 10). Essa matriz compara a relação entre os pontos de referencia (coluna) e seus resultados da classificação (linha), sua diagonal refere-se aos pontos corretamente classificados e os valores fora desta representam os erros de comissão (EC) ou inclusão e de omissão (EO).

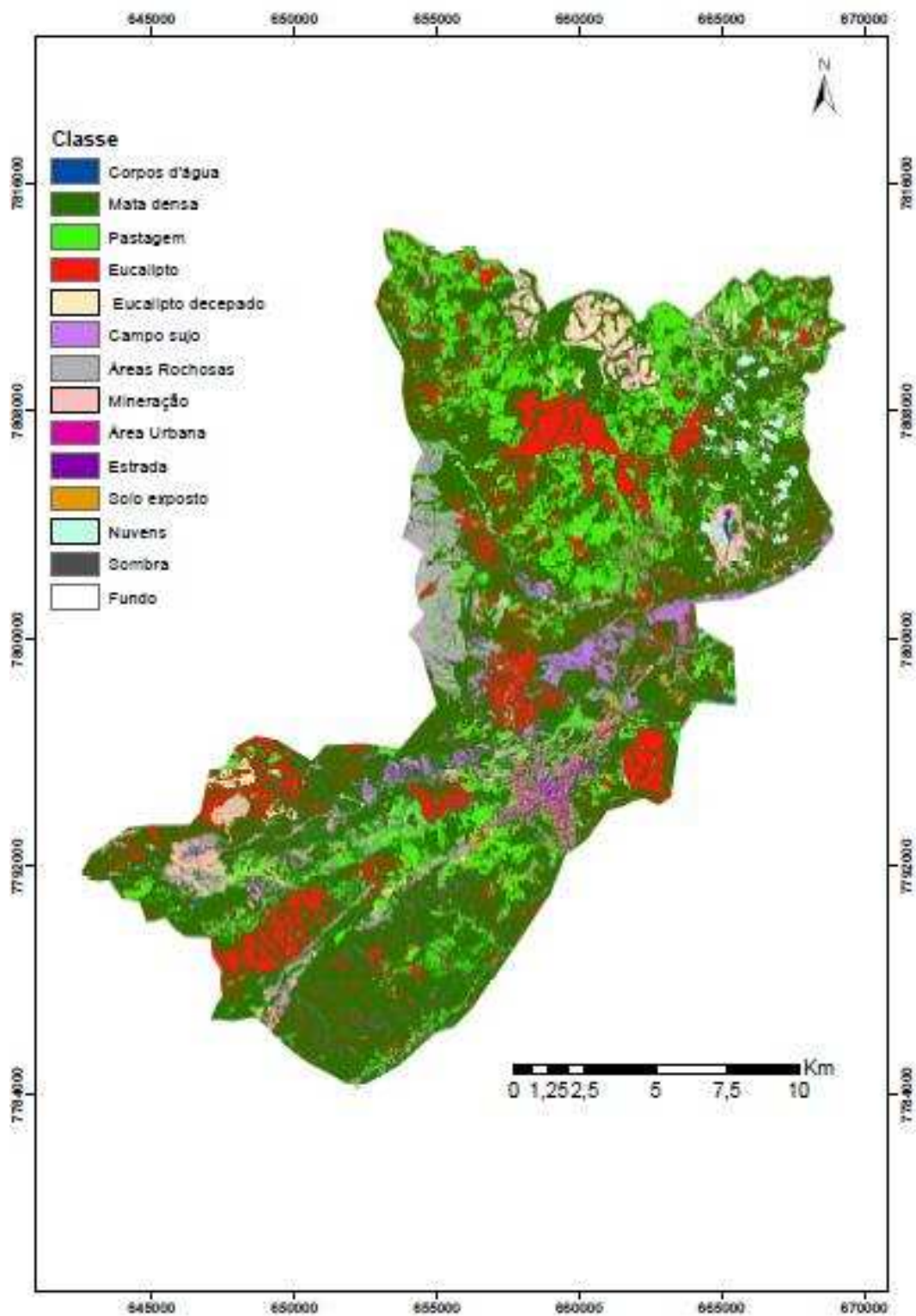


Figura 35 - Mapa de uso e cobertura da terra gerado pelo algoritmo MaxVer.

As classes com menor acurácia do produtor e do usuário foram mineração, área urbana e solo exposto, com, respectivamente 59,14; 26,7 e 61,63% de pontos classificados corretamente (acurácia do produtor), e 68,75; 62,2 e 37,57% de pontos correspondentes à verdade terrestre (acurácia do usuário), enquanto as outras classes apresentam acurácia do produtor com média de 90,88% e acurácia do usuário com média de 87,12%. Essas três classes também possuem as maiores porcentagens de erros de omissão e erros de inclusão. Pode-se especular que isso ocorreu pelos seus valores de tonalidade e textura similares e, no caso da mineração, por conta da alta saturação de brilho em uma das represas, que se confundiu com as nuvens.

Outras medidas descritivas da exatidão temática da classificação foram os índices de Exatidão Global, coeficiente Kappa e índice Tau.

O índice de exatidão global é bem simples, sendo o total de pontos corretamente classificados pelo número total de pontos de validação. O valor encontrado foi de 79,69% em uma escala de 0 a 100%.

O coeficiente Kappa foi de 0,7808, logo o desempenho da classificação foi considerado como muito bom, de acordo com a qualidade associada aos valores de Kappa proposta por Landis e Koch (1977) (Tabela 4).

Por último tem-se o índice Tau, o único que considera o número de classes na análise, no valor de 0,7813.

Esses valores foram bem próximos e demonstram que a classificação obteve um resultado satisfatório.

Tabela 10 – Matriz de erros obtida a partir da classificação MaxVer.

CLASSES	C.A	M.	P.	E.	E.D	C.S	A.R	Min.	A.U	Est.	S.E	N.	S.	F.	Soma	Acurácia Usuário %	EC %
Corpos d' água	<b>119</b>	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	3	0	<b>125</b>	<b>95,20</b>	<b>4,80</b>
Mata densa	0	<b>151</b>	1	11	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0	<b>167</b>	<b>90,42</b>	<b>9,58</b>
Pastagem	0	1	<b>166</b>	0	2	0	4	3	0	0	0	0	0	0	<b>176</b>	<b>94,32</b>	<b>5,68</b>
Eucalipto	0	7	0	<b>135</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>142</b>	<b>95,07</b>	<b>4,93</b>
Eucalipto decepado	0	0	0	0	<b>108</b>	0	17	10	7	0	8	0	0	0	<b>150</b>	<b>72,00</b>	<b>28,00</b>
Campo Sujo	2	0	0	0	1	<b>112</b>	2	0	0	0	0	0	0	0	<b>117</b>	<b>95,73</b>	<b>4,27</b>
Áreas Rochosas	1	0	0	0	16	8	<b>132</b>	5	1	2	0	0	0	0	<b>165</b>	<b>80,00</b>	<b>20,00</b>
Mineração	6	0	0	0	0	1	1	<b>110</b>	19	2	17	4	0	0	<b>160</b>	<b>68,75</b>	<b>31,25</b>
Área Urbana	0	0	0	0	1	0	11	3	<b>51</b>	7	8	1	0	0	<b>82</b>	<b>62,20</b>	<b>37,80</b>
Estrada	3	0	0	0	2	0	2	0	31	<b>125</b>	0	0	0	0	<b>163</b>	<b>76,69</b>	<b>23,31</b>
Solo exposto	0	0	0	0	0	0	2	12	82	0	<b>53</b>	0	0	0	<b>149</b>	<b>35,57</b>	<b>64,43</b>
Nuvens	0	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	<b>115</b>	0	0	<b>153</b>	<b>75,16</b>	<b>24,84</b>
Sombra	9	0	0	0	0	9	1	2	0	0	0	0	<b>108</b>	0	<b>129</b>	<b>83,72</b>	<b>16,28</b>
Fundo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>57</b>	<b>57</b>	<b>100</b>	<b>0,00</b>
Soma	<b>140</b>	<b>159</b>	<b>167</b>	<b>146</b>	<b>130</b>	<b>131</b>	<b>172</b>	<b>186</b>	<b>191</b>	<b>136</b>	<b>86</b>	<b>120</b>	<b>114</b>	<b>57</b>			
Acurácia Produtor %	<b>85</b>	<b>94,97</b>	<b>99,40</b>	<b>92,47</b>	<b>83,08</b>	<b>85,50</b>	<b>76,74</b>	<b>59,14</b>	<b>26,70</b>	<b>91,91</b>	<b>61,63</b>	<b>95,83</b>	<b>94,74</b>	<b>100</b>			
EO %	<b>15,00</b>	<b>5,03</b>	<b>0,60</b>	<b>7,53</b>	<b>16,92</b>	<b>14,50</b>	<b>23,26</b>	<b>40,86</b>	<b>73,30</b>	<b>8,09</b>	<b>38,37</b>	<b>4,17</b>	<b>5,26</b>	<b>0,00</b>			

Como a imagem é de alta resolução, a obtenção de pontos de referência através da fotointerpretação da imagem foi muito mais precisa, no entanto ainda foi realizado uma visita de campo para comprovar as classes de informação em relação as áreas difíceis de identificar na imagem. Em uma delas foi encontrada uma plantação de banana, antes classificada como mata densa por possuir tonalidade e textura similares, por esse mesmo motivo houve muita confusão entre essas classes na implementação do algoritmo MaxVer, assim optou-se por acrescentar essa classe manualmente, com a edição da imagem, na qual também foi retirada a classe fundo. O resultado final encontra-se ilustrado na Figura 36.

# Mapa de uso e cobertura da terra de Barão de Cocais, MG

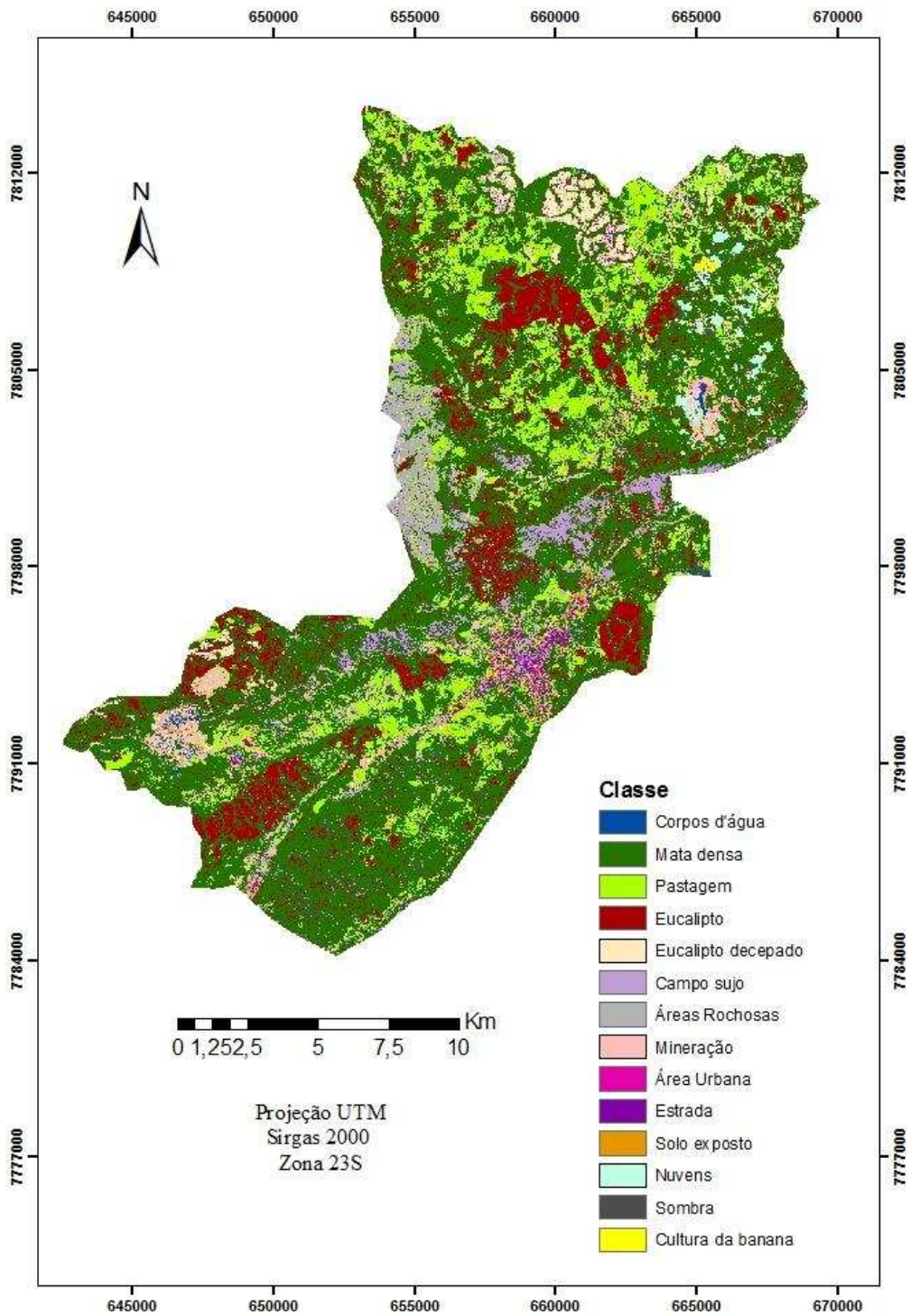


Figura 36 - Mapa de uso e cobertura da terra do município de Barão de Cocais, MG.

- Mapa das Áreas de Preservação Permanentes – APPs

É de extrema importância mapear as Áreas de Preservação Permanentes de uma região, conhecendo assim suas localizações para melhor protegê-las.

Por isso foi gerado o mapa das Áreas de Preservação Permanentes – APPs do município de Barão de Cocais (Figura 37), este abrange as APPs dos cursos d'água e das nascentes, que têm como principais funções prevenir o assoreamento dos cursos d'água e resguardar a segurança contra enchentes, auxiliando na absorção das águas durante as cheias, e as APPs de declividade ou encostas, sendo um dos objetivos prevenirem desmoronamentos de terra, já que a vegetação nativa é a mais adequada para evitar catástrofes ambientais desta natureza (AMADO, 2014).

A Figura 38 ilustra trechos do mapa de APP.

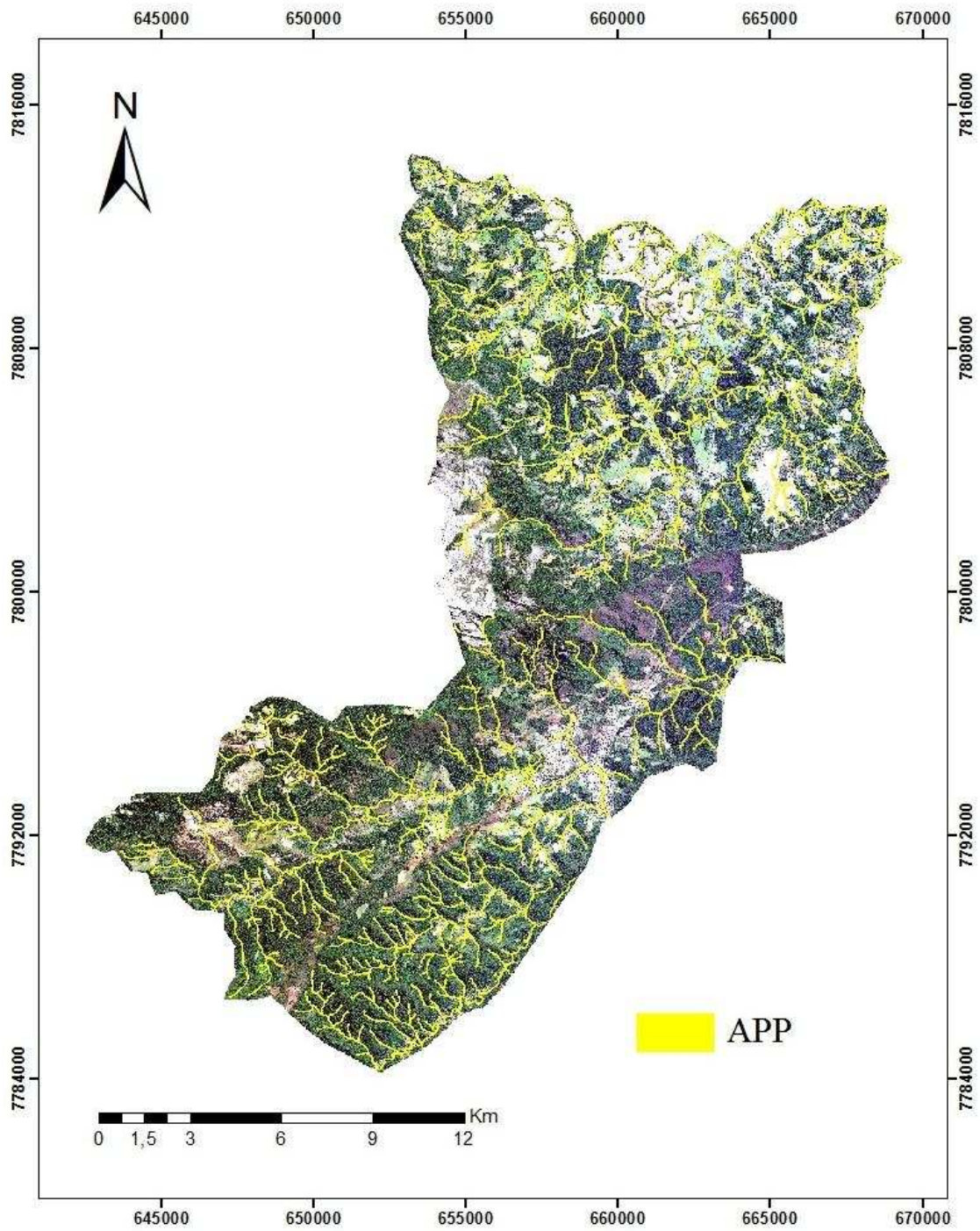


Figura 37 - Mapa de APP do município de Barão de Cocais, MG.

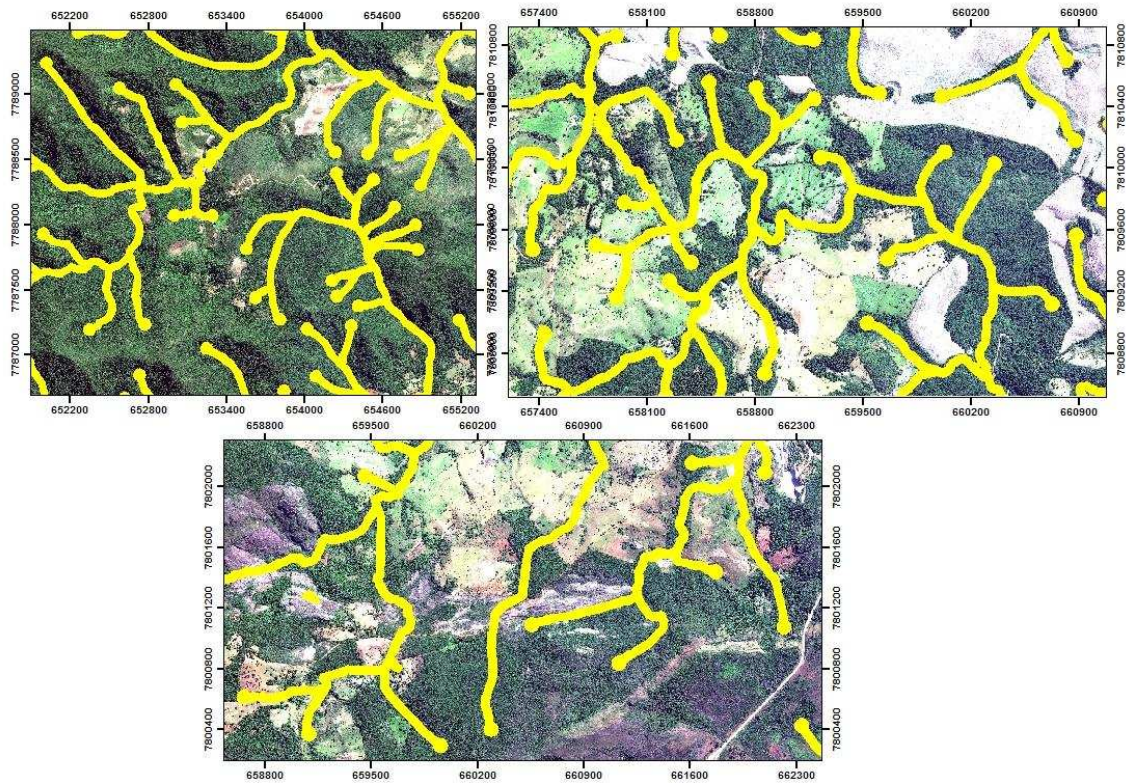


Figura 38 – Trechos do mapa de APP.

Sobrepondo o mapa de APP com o mapa do uso e cobertura da terra pode-se identificar as áreas de preservação permanente de uso adequado e de uso inadequado (conflito). A Tabela 11 mostra as porcentagens de cada classe de uso e cobertura da terra dentro das APPs.

Verifica-se que a maioria da área tem o uso adequado, com mais de 65% das APPs florestadas, o que é de grande importância para conservação do solo e da água, quanto às áreas de uso inadequado foi considerada as de alterações de origem antrópica como as pastagens, eucalipto, eucalipto decepado, mineração, área urbana, estrada e solo exposto, que totalizam 24% da área.

Com esse mapa pode-se prevenir que novos empreendimentos sejam construídos nas áreas de preservação permanentes e mostram as áreas possíveis de políticas de incentivo para recomposição das APPs.

Tabela 11 – Porcentagem de cada classe de uso na APP.

<b>Classe de uso</b>	<b>Porcentagem</b>
<b>Corpos d'Água</b>	1,59%
<b>Mata densa</b>	65,24%
<b>Pastagem</b>	9,83%
<b>Eucalipto</b>	10,11%
<b>Eucalipto decepado</b>	1,53%
<b>Campo sujo</b>	2,80%
<b>Áreas Rochosas</b>	0,79%
<b>Mineração</b>	1,40%
<b>Área Urbana</b>	0,35%
<b>Estrada</b>	0,22%
<b>Solo exposto</b>	0,59%
<b>Nuvens</b>	0,92%
<b>Sombra</b>	4,64%

- Mapa de fragilidade ambiental

O mapa de fragilidade ambiental (Figura 39) é um exemplo de um possível uso da base cartográfica ambiental feita neste trabalho, sendo a integração dos mapas dos solos, de declividade, das APPs, das represas e do uso e cobertura da terra. De acordo Donha *et al.*, 2006, esse mapa é de extrema importância para o planejamento territorial do município já que permite um enfoque ambiental, além do socioeconômico.

Calculando a porcentagem de pixels em cada classe, identifica-se que a maior área do município de Barão de Cocais, aproximadamente 72%, possui uma fragilidade baixa e muito baixa, enquanto somente 11,72% são de fragilidade alta ou muito alta.

Pode-se dizer que essa diferença se dá ao fato de que Barão de Cocais possui uma grande área de mata densa, pouca declividade e solo com pouca fragilidade, como o latossolo ou o argissolo. A fragilidade muito alta está concentrada nas áreas de mineração, com uma pequena parte nas áreas de solo exposto e a fragilidade alta nas áreas do município e de eucalipto decepado.

# Mapa de fragilidade ambiental de Barão de Cocais, MG

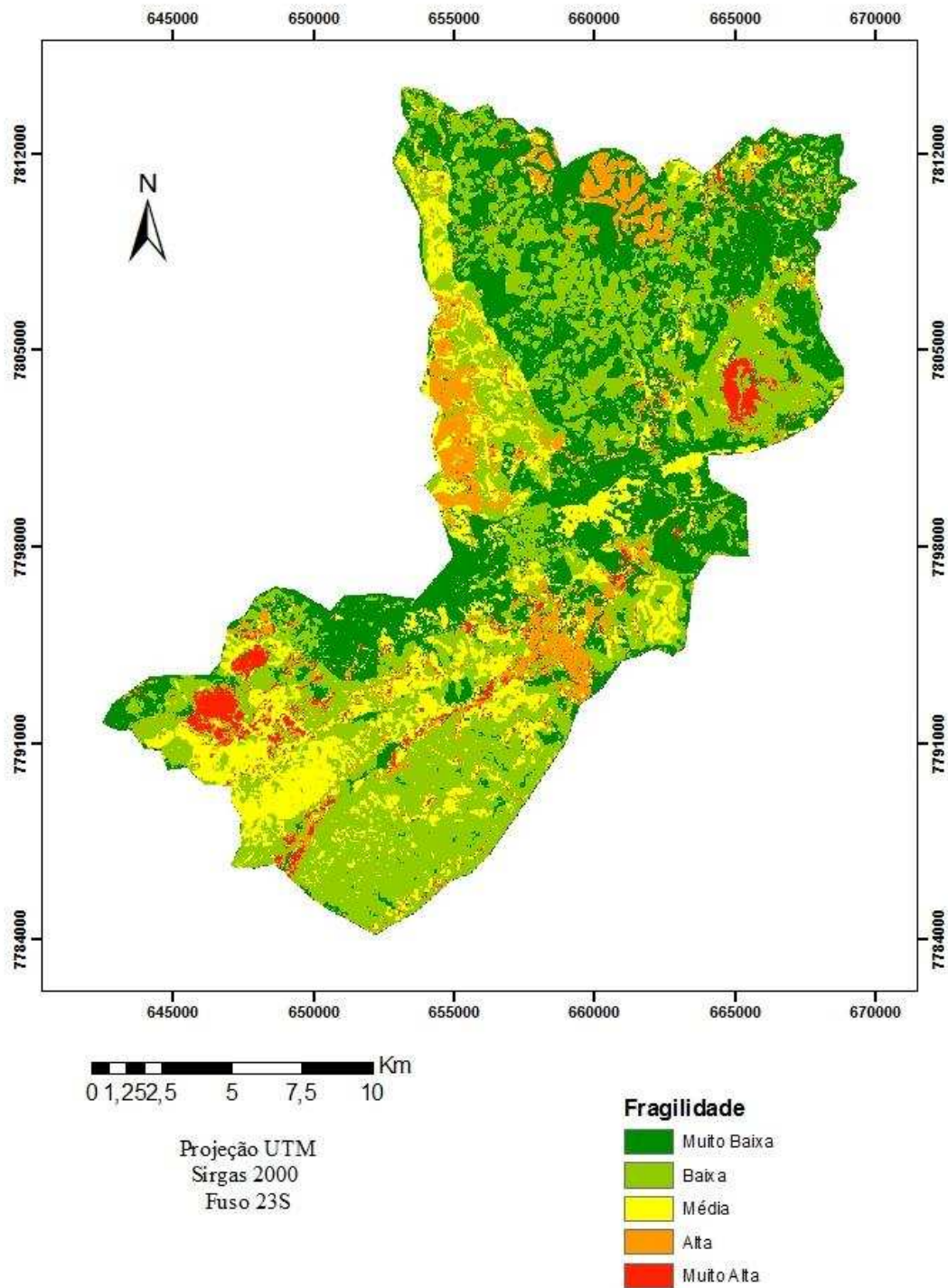


Figura 39 - Mapa de Fragilidade ambiental do município de Barão de Cocais - MG.

## 6. CONCLUSÕES

Na geração da base cadastral ambiental proposta nesse trabalho para o município de Barão de Cocais - MG foram vários mapas, sendo quatro mapas com feições de interesse extraídas, um mapa de classe de solo e um de MDE, extraídos de outros mapas mais abrangentes, um mapa de declividade, um mapa da rede hidrográfica corrigida, um mapa das APPs, um mapa de simulação de ruptura de barragem, um mapa de uso e cobertura da terra e um mapa de fragilidade ambiental. O uso da imagem de satélite de alta resolução, de 50 cm, do sistema WorldView-2 se mostrou uma boa opção e, algumas vezes, fundamental para a geração de alguns desses mapas.

No processo de extração de feições, o operador de bordas Canny apresentou bons resultados, os quais foram alcançados com o pré-processamento da imagem pela morfologia matemática, minimizando grande parte dos ruídos da cena.

A correção da rede hidrológica foi muito importante na exatidão da localização das APPs de curso d'água e das nascentes e a alta resolução da imagem, de 50 cm, facilitou essa correção.

No mapa de uso e cobertura da terra, o classificador MaxVer obteve resultados satisfatórios. A alta resolução da imagem, apesar de se ter uma confusão entres algumas classes, permitiu uma melhor identificação de algumas pequenas áreas urbanas ou estradas.

O mapa de inundação foi feito utilizando a malha 2D do programa HEC-RAS utilizando o MDE de 30 m, no entanto, este é um método relativamente simples. Para realizar um mapa com mais detalhes e mais preciso deve-se realizar o levantamento de seções transversais ao longo do rio a jusante da barragem.

Finalmente, com base em alguns dos mapas foi realizada uma análise multicritério e produzido o mapa de fragilidade ambiental, muito utilizado pelos órgãos públicos para o planejamento territorial ambiental.

Para trabalhos futuros recomenda-se novos estudos sobre cartografia cadastral ambiental e sua implementação; trabalhos analisando outras rotinas para pré-processamento das feições de interesse na etapa de extração; o uso de outros métodos de classificação em imagens de alta resolução, como as redes neurais; e mapas de simulação de ruptura de barragens de rejeitos, os quais não são muitos, já que a maioria das simulações são barragens de água, utilizando seções transversais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. B.; VISEU, T. Dams and Safety Management at Downstream Valleys. Balkema, 1997.

AMADO, F. Direito Ambiental esquematizado. 5ª edição. São Paulo: Método, 2014. 1040p.

ARCHELA, R.; ARCHELA, E.; BARROS, O. F.; BENADUCE, G. M. C. Abordagem Metodológica para a Cartografia Ambiental. Geografia: Revista do Departamento de Geociências, Londrina, 2002. v 11, N°1, p. 57-65.

ARTERO, A. Técnicas para a extração automática de feições retas em imagens digitais. 1999. 117f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 1999.

BONILLA, F.; CARNEIRO, A. O uso do cadastro multifinalitário no planejamento urbano. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife - PE, 2008.

BRITES, R. Verificação de exatidão em classificação de imagens digitais orbitais: efeitos de diferentes estratégias de amostragem e avaliação de índices de exatidão. 1996. 113f. Dissertação (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa - MG, 1996.

BRITO, J. Apreciações e reflexões sobre a norma técnica para georreferenciamento de imóveis rurais. 2005. 122p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

CAIXETA, P; PIMENTA, D; AMARAL, R; SCHAEFER, C. Análise multi-critério (MCE) aplicada ao mapeamento de áreas susceptíveis a movimentos de massas na área urbana de Viçosa-MG. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE, 2012. p. 001 – 009.

CANNY, J. A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Transactionson Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, N° 6, pp. 679-698, 1986.

CUNHA, E; ERBA, D. A. Manual de Apoio – CTM: Diretrizes para a criação, instituição e atualização do cadastro territorial multifinalitário nos municípios brasileiros. Brasília: Ministério das Cidades, 2010. 176 p.

Digital Globe. WorldView-2 Overview. Disponível em: <<http://global.digitalglobe.com/>>. Acesso: 09/11/2015.

DONHA, A; SOUZA, L; SUGAMOSTO, M. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.10, N°1, p.175–181, 2006.

DUARTE, P. Cartografia Temática. Florianópolis: Editora da UFSC. 1991.145p

EASTMAN, J. IDRISI for Windows: Introdução e Exercícios tutoriais. J. Ronald Eastman. Editores da versão em português, Heinrich Hasenack e Eliseu Weber. Porto Alegre, UFRGS Centro de Recursos Idrisi, 1998.

ERBA, D; OLIVEIRA, F; LIMA JUNIOR, P. Cadastro multifinalitário como instrumento da política fiscal e urbana. Rio de Janeiro, 2005.144 p.

FALCON, J. Capítulo 2: A Morfologia Matemática e suas Aplicações em Processamento de Imagens. VII Workshop de Visão Computacional – WVC, 2011.

FONSECA, L. M. G. Processamento digital de imagens. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2000. 105p.

GARCIA, J. Cartografía Ambiental. Desarrollo y Propuestas de Sistematización. Observatorio Medioambiental. Vol 5 (2002), p. 47-78.

GIMENES, F; FILHO, O. Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (SIG). Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE

GONZALEZ, R. C., WOODS, R.E. Digital Image Processing. Second Edition. Upper Saddle River NJ: Prentice Hall, 2002.

IBGE. Noções Básicas de Cartografia. Disponível em: < [https://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual\\_nocoos/introducao.html](https://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/manual_nocoos/introducao.html) >. Acesso em: 17/04/2017.

IBGE. Introdução ao Processamento Digital de Imagens. Manuais técnicos em geociência n. 9. Rio de Janeiro, 2001.

ICOLD - International Commission on Large Dams. Tailings dams: risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121, France, 144 p. 2001.

ICME - International Council on Metals and the Environment. An Introduction to Tailings. Case Studies on Tailings Management. Ottawa, Canada, 58 p. 1998.

ISHIKAWA, A. Detecção de rodovias em imagens digitais de alta resolução com o uso da teoria do Morfologia Matemática. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciência e Tecnologia. Presidente Prudente, 2008.

HENSSEN, J. Cadastre: indispensable for development. ITC Journal. Vol 1990, p32-39. 1990.

KAUFMANN, J; STEUDLER, D. CADASTRE 2014 – A Vision for a Future Cadastral System. In: Congress The Internatinal Federation of Surveyors, Brighton: [s.n.], 1998.

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

LAURIANO, A; PALMIER, L; BRASIL, L; MONTE-MOR, R; FELIPE FIGUEIREDO ROCHA, F; NASCIMENTO, N; SOUZA, N; CANELLAS, A. Modelagem da onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem: comparação entre os modelos HEC-RAS e FLDWAV. XXIV Congresso Latinoamericano de hidráulica, Punta Del Este, Uruguai, 2010.

LEONARDI, F; RODRIGUES, T; DA SILVA, E. Aplicação de rotina morfológica para detecção de pistas de aeroportos em imagens de alta resolução. II Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente - SP, 24-27 de julho de 2007.

LOCH, C; ERBA, D. A. Cadastro técnico Multifinalitário: rural e urbano. Cambridge, MA: Lincoln Institute of Land Policy, 2007. 142 p.

LOCH, C; REBOLLAR, P; ROSENFELDT, Y. Cadastro técnico multifinalitário e o pagamento por serviços ambientais. Revista Brasileira de Cartografia, 2015, N° 67/2, p. 275-285.

LOMBARDI, D; BASTOS, I. Cadastro rural temático de valoração ambiental para programas de pagamento por serviços ambientais em áreas de preservação permanente. Revista Brasileira de Cartografia, 2015, N° 67/2, p.391 - 409.

MARTIN, V.; FONTAINE, D.; CATHCART, J. Challenges with conducting tailings dam breach studies. Proceedings of Tailings and Mine Waste 2015 Conference, Vancouver, Canada. 2015.

MASSA, E; ROSS, J. Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP. Revista do Departamento de Geografia – USP, 2012. Vol.24, p. 57-79.

MATURANA, P. Algoritmos de detecção de bordas implementados em FPGA. 2010. 163f. Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, São Paulo. 2010.

MEDEIROS, N. Orientação exterior de imagens orbitais usando modelos rigorosos com feições retas. 2007. Dissertação (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2007.

MENESES, P; ALMEIDA, T. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. 1 ed. Brasília: UnB/CNPq, v.1, 2012.

MESSIAS, C. Análise de uso do solo utilizando diferentes técnicas e imagens de média e alta resolução espacial. Revista de Geografia - PPGeo - v. 2, N° 1, p 1-9, 2012.

Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Prevenção, Preparação e Resposta Rápida em Emergências Ambientais - P2R2: Proposta de Termo de Referência para Identificação, Caracterização e Mapeamento de Áreas de Risco Ambiental. 2014.

MOURA, A. Reflexões Metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em análise de multicritério. In Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, 2007, INPE. p.2899 a 2906.

NOVO, E. Sensoriamento Remoto Princípios e Aplicações. 4. ed. São Paulo –SP: Blucher, 2010.

JAIN, R.; KASTURI, R; SCHUNCK, B. G. Machine Vision. MIT Press and McGraw-Hill, Inc New York – 1995.

OLIVEIRA, J. 2014. Minério põe Barão de Cocais em 4º no ranking de desenvolvimento. Hoje em Dia. Disponível em: <

<http://www.hojeemdia.com.br/noticias/economia-e-negocios/minerio-p-e-bar-o-de-cocais-em-4-no-ranking-de-desenvolvimento-1.260350>>. Acesso: 24/10/15.

PANTALEÃO, E; SCOFIELD, G. Comparação entre medidas de acurácia de classificação para imagens do satélite ALOS. Anais XIII - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 2009, INPE, p. 7039-7046.

PARKER, J. R. Algorithms for Image Processing and Computer Vision. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, 506p, 2010.

PARMA, G. Metadados nas Camadas na Cartografia Cadastral: uma Alternativa para a Organização de Dados e Informações Geográfica. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Área de concentração: Cadastro Técnico Multifinalitário.- Florianópolis, Brasil, 2003.160 p.

RIBEIRO, R. BAPTISTA, G. BIAS, E. Comparação dos métodos de classificação supervisionada de imagem Máxima Verossimilhança e Redes Neurais em ambiente urbano. Anais XIII - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 2007, INPE, p. 5471-5478.

RICHARDS, J. A.; JIA X. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. 4a ed., Springer 2006.

RICO, M.; BENITO, G.; DÍEZ-HERRERO, Floods from tailings dam failures. Journal of Hazardous Materials, v. 154, p. 79-87, October, 2007.

RASA, P; BREUNIG, F. Influência da resolução espacial de imagens orbitais no mapeamento de fragmentos florestais. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 2015, INPE

ROSS, J.L.S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados.Revista do Departamento de Geografia. Nº 8, 1994, p. 63-73.

ROVANI, F; CASSOL, R. Cartografia ambiental: contribuições nos estudos geográficos. Revista Brasileira de Cartografia. Nº 64/3, p 389-403, 2012.

RÚBIO, M; BERTOTTI, L. O cadastro territorial multifinalitário e gestão do território. Ambiência. Guarapuava, PR. v.8 Ed. Especial – 1. 2012. p.741 – 756

SANTOS, C; CASTRO, C; RIBEIRO, T. Aplicações de imagens de satélite de alta resolução no planejamento urbano: o caso do cadastro técnico multifinalitário de Mata de São João, Bahia. Anais XV, Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 2011, INPE p.3843-2850.

SARAIVA, L. Comparação entre critérios para determinação de hidrogramas de ruptura de barragens. 2014. 79p. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

SCHUCH, F; PARO, L; OLIVEIRA, F. Proposições para cartografia cadastral ambiental. Anais - II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Presidente Prudente, SP, 2007. ISSN 1981-6251, p. 150-155.

SILVA, B. Detecção automática de células via técnicas de morfologia matemática e processamento digital de imagens. 2015. 95p Dissertação (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Computação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SILVA, J; BARBOSA, R; GALLIS, R; PEREIRA, L. Avaliação da qualidade da detecção de bordas em uma sequência de imagens de ruas e rodovias. Revista Brasileira de Cartografia, N° 56/2, p.96- 103, 2004.

SOILLE, P. Morphological Image Analysis. Berlin. Springer-Verlag, 1999.SOUZA, T; HISSA, L; MICHEL, R; DE MORAIS, A. Análise de Multicritério aplicada ao diagnóstico do risco ambiental do transporte rodoviário de produtos perigosos: um estudo de caso sobre a BR-381. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 2009, INPE, p. 4465-4472.

TAVARES JÚNIOR, J; OUVENEY, M; UBERTI, M; ANTUNES, M. Avaliação de Imagens Ikonos II e Quickbird para Obtenção de Bases Cartográficas para o Cadastro Técnico Municipal. In: COBRAC - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis: UFSC, 2006.

VALE, G. M; GALVANIN, E. A; DAL POZ, A. P. O detector de Canny-EDP: uma combinação entre as teorias de Canny e de difusão anisotrópica não linear. Revista Brasileira de Cartografia N°56/02, p.156-168, 2004.

VALE, G. M; DAL POZ, A. P; O processo de detecção de bordas de Canny: fundamentos, algoritmos e avaliação experimental. In: Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente, 2002. Anais, p.292-303, 2002.

VALERIUS, M. Cadastro e análise do potencial de risco das barragens de rejeitos de mineração do estado de Goiás. 2014. 121p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2014.

VELLOSO, V; LOCH, C. A utilização do CTM e suas ferramentas na elaboração de EIA's. COBRAC 2004 - Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. UFSC Florianópolis. 2004.

ZANIN, R. Metodologia automática para extração de cruzamentos de rodovias em imagens de alta resolução. 2004. 121f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2004.

# Anexo I

*LEI Nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012.*

## *CAPÍTULO I*

### *DISPOSIÇÕES GERAIS*

*Art. 3º Para os efeitos desta Lei, entende-se por:*

*II - Área de Preservação Permanente - APP: área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas;*

## *CAPÍTULO II*

### *DAS ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE*

#### *Seção I*

#### *Da Delimitação das Áreas de Preservação Permanente*

*Art. 4º Considera-se Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, para os efeitos desta Lei:*

*I - as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de:*

*a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura;*

*b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;*

*c) 100 (cem) metros, para os cursos d'água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;*

*d) 200 (duzentos) metros, para os cursos d'água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;*

*e) 500 (quinhentos) metros, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros;*

*II - as áreas no entorno dos lagos e lagoas naturais, em faixa com largura mínima de:*

*a) 100 (cem) metros, em zonas rurais, exceto para o corpo d'água com até 20 (vinte) hectares de superfície, cuja faixa marginal será de 50 (cinquenta) metros;*

*b) 30 (trinta) metros, em zonas urbanas;*

*III - as áreas no entorno dos reservatórios d'água artificiais, decorrentes de barramento ou represamento de cursos d'água naturais, na faixa definida na licença ambiental do empreendimento;*

*IV - as áreas no entorno das nascentes e dos olhos d'água perenes, qualquer que seja sua situação topográfica, no raio mínimo de 50 (cinquenta) metros;*

*V - as encostas ou partes destas com declividade superior a 45°, equivalente a 100% (cem por cento) na linha de maior declive;*

*VI - as restingas, como fixadoras de dunas ou estabilizadoras de mangues;*

*VII - os manguezais, em toda a sua extensão;*

*VIII - as bordas dos tabuleiros ou chapadas, até a linha de ruptura do relevo, em faixa nunca inferior a 100 (cem) metros em projeções horizontais;*

*IX - no topo de morros, montes, montanhas e serras, com altura mínima de 100 (cem) metros e inclinação média maior que 25°, as áreas delimitadas a partir da curva de nível correspondente a 2/3 (dois terços) da altura mínima da elevação sempre em relação à base, sendo esta definida pelo plano horizontal determinado por planície ou espelho d'água adjacente ou, nos relevos ondulados, pela cota do ponto de sela mais próximo da elevação;*

*X - as áreas em altitude superior a 1.800 (mil e oitocentos) metros, qualquer que seja a vegetação;*

*XI - em veredas, a faixa marginal, em projeção horizontal, com largura mínima de 50 (cinquenta) metros, a partir do espaço permanentemente brejoso e encharcado.*

## Anexo II

Estradas:

```
te1 = mmopenrec(uint8(e),mmseline(6));  
m301 = mmhmax(te1,30,mmsecross(3));  
close1 = mmclose(m301, mmsebox(2));  
ke1=mmareaopen(close1,6000,mmsebox);  
mine152 = mmhmin(ke1,15);  
b4=mmbinary(mine152,97);  
Cannyest4=edge(b4,'canny',0.2,2);
```

Represa clara:

```
trc = mmopenrec(uint8(rep),mmsebox(4));  
mrc = mmhmax(trc,20,mmsecross(3));  
crc2 = mmclose(mrc, mmseline(6));  
krc=mmareaopen(crc2,20000,mmsebox);  
minrc = mmhmin(krc,45);  
brc=mmbinary(minrc,130);  
Cannyrc=edge(brc,'canny',0.2,2);
```

Represa 2:

```
trt = mmopenrec(uint8(rt),mmsecross(3));  
mrt1 = mmhmax(trt,30,mmsecross(3));  
minrt181 = mmhmin(mrt1,18);  
Cannyrt3=edge(minrt181,'canny',0.2,2);
```

## Anexo III

Legenda detalhada do mapa dos solos:

**AR6** - AFLORAMENTO DE ROCHA (50 %) + NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, A moderado, textura arenosa, fase campo rupestre de quartizito, relevo montanhoso/escarpado (50 %).

**CXbd1** - CAMBISSOLO HÁPLICO distrófico típicos A fraco/moderado textura argilosa; fase caatinga hipoxerófila, relevo forte ondulado.

**LVAd1** – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico típico A moderado textura argilosa; fase cerrado, relevo plano e suave ondulado.

**LVAd31** - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A proeminente, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (60 %) + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo ondulado (30 %) + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (10 %).

**LVAd33** - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (50 %) + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (30 %) + ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo ondulado (20 %).

**LVd17** - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, A moderado, textura muito argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (60 %) + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico, A moderado, textura muito argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (15 %) + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, A moderado, textura arenosa, fase muito pedregosa, relevo forte ondulado (15 %) + NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, A moderado, textura arenosa, fase campo graminoso, relevo montanhoso (10 %).

**LVdf3** - LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico, A moderado, textura muito argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo montanhoso (55 %) + NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário, A moderado, textura arenosa, fase floresta tropical subcaducifólia, relevo montanhoso (30 %) + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distroférico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo montanhoso (15 %).

**PVAd12** - ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo ondulado (50 %) + LATOSSOLO

VERMELHO-AMARELO Distrófico típico, A proeminente, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo ondulado (30 %) + CAMBISSOLO HÁPLICO  
Tb Distrófico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo ondulado (20 %).

**RLd11** - NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico, A moderado, textura média, fase campo rupestre ferruginoso, relevo montanhoso (40 %) + CAMBISSOLO HÁPLICO  
Tb Distroférico típico, A moderado, textura média, fase floresta tropical subperenifólia, relevo montanhoso (35 %) + LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subperenifólia, relevo forte ondulado (25 %).