

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE
SISTEMAS AMBIENTAIS

Modelagem da cobertura do solo urbano no Vetor Norte da RMBH e projeções de cenários futuros considerando as novas infraestruturas viárias previstas

Daniel Martins Sampaio

UFMG
Belo Horizonte
Maio de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE
SISTEMAS AMBIENTAIS

Modelagem da cobertura do solo urbano no Vetor Norte da RMBH e projeções de cenários futuros considerando as novas infraestruturas viárias previstas.

Daniel Martins Sampaio

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Marcos Antônio Timbó Elmiro

Co-orientador: Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega

UFMG
Belo Horizonte
Maio de 2014

S192m
2014

Sampaio, Daniel Martins.

Modelagem da cobertura do solo urbano no Vetor Norte da RMBH e projeções de cenários futuros considerando as novas infraestruturas viárias previstas [manuscrito] / Daniel Martins Sampaio. – 2014.

103 f., enc. : il. color.

Orientador: Marcos Antônio Timbó Elmiro.

Coorientador: Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2014.

Bibliografia: f. 99-103.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Geoprocessamento – Teses. 3. Geociências – Sensoriamento remoto – Teses. 4. Belo Horizonte, Região Metropolitana – Teses. I. Elmiro, Marcos Antônio Timbó. II. Nóbrega, Rodrigo Affonso de Albuquerque. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 911.2:519.6




FOLHA DE APROVAÇÃO

MODELAGEM DA COBERTURA DO SOLO URBANO NO VETOR NORTE DA RMBH E PROJEÇÕES DE CENÁRIOS FUTUROS CONSIDERANDO AS NOVAS INFRAESTRUTURAS VIÁRIAS PREVISTAS

DANIEL MARTINS SAMPAIO

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS

Aprovada em 27 de maio de 2014, pela banca constituída pelos membros:


Prof(a). Marcos Antonio Timbo Elmiro - Orientador
UFMG


Prof(a). Rodrigo Afonso de Albuquerque Nobrega
UFMG


Prof(a). Sergio Donizete Faria
UFMG


Prof(a). Helder Lages Jardim
UFMG

Belo Horizonte, 23 de setembro de 2014.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por mais uma vez me possibilitar cumprir mais uma etapa importante da minha vida, marcada por muita luta e superação de dificuldades.

Aos meus pais pela ajuda de sempre, que vale mais do que qualquer recurso financeiro. As minhas irmãs, tios e primos pelo carinho recebido sempre.

A minha linda e agora esposa Kesi Poliane, pelo companheirismo desde a graduação, sempre com muita dedicação, paciência e um amor verdadeiro por mim. Isso me incentivou a finalizar esse período e vencer todas as barreiras.

Ao Professor orientador Marcos Antônio Timbó por mais uma oportunidade de aprendizado com sua ampla experiência, pela sua dedicação e atenção que foi bastante aproveitada.

Ao Professor co-orientador Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega pela orientação e as “dicas” precisas, que contribuiu para o desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos da Myr Projetos Sustentáveis, Sérgio, Michel, Thiago, Marina, Raquel, João e demais, pelo incentivo e compreensão nos momentos de ausência destinados a essa pesquisa, e ainda, pela construção do conhecimento adquirido em mais de seis anos nesta “empresa-família”.

Ao amigo e padrinho Carlos Henrique Pires Luiz por não medir esforços em compartilhar seus conhecimentos, essenciais para a finalização deste trabalho e também pela bela amizade construída nesta etapa.

A todos os professores e amigos do mestrado, que de alguma forma me ajudou nesse grande propósito que foi a realização desse curso.

RESUMO

O aquecimento econômico observado nos últimos anos vem interferindo no modelo de ocupação urbana da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Neste contexto econômico, a valorização da terra aliada à atuação do mercado imobiliário tem contribuindo para uma acelerada ocupação urbana no Vetor Norte da RMBH. Daí surge uma preocupação de como preservar os recursos naturais, que são condição fundamental para a qualidade de vida da sociedade, e manter o crescimento urbano na região. Além da ação do mercado imobiliário, a expansão urbana no Vetor Norte, vem sofrendo influências de grandes obras públicas previstas e já implantadas na área, tais como o Aeroporto Internacional Tancredo Neves, o Aeroporto-Indústria, a Linha Verde e o Centro Administrativo de Minas Gerais. Este estudo teve como objetivo elaborar um modelo de dinâmica de cobertura do solo para simular cenários de expansão urbana no Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e verificar as influências espaciais da implantação de infraestruturas de acessibilidade previstas neste espaço, com um horizonte preditivo para o ano 2031. Utilizando técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e modelagem, foi possível identificar que as maiores mudanças do solo urbano, ocorreram nas porções noroeste e leste do Vetor Norte. De 13 (treze) variáveis explicativas testadas no modelo de expansão urbana, duas tiveram destaque em relação ao potencial de explicação baseado no modelo V de Cramer: as Áreas com ocorrência de mudança de cobertura do solo entre 2001 e 2006 apresentando um índice de 0,3741 e a Distância de centros urbanos e comerciais existentes com um índice de 0,3532. As variáveis utilizadas foram testadas e o modelo de predição de mudança de solo urbano alcançou um índice de acurácia de 82,61% proporcionando a elaboração de um cenário projetado para o ano base 2011. Este cenário foi validado com o mapeamento realizado na imagem de satélite da mesma data e apresentou um índice de acerto de 92,60%, com 7,40% atribuídos a erros de comissão. Após esta análise, foram elaborados três cenários preditivos para 2031, onde verificou-se que a maior tendência de mudança de cobertura do solo urbano poderá ocorrer em parte dos municípios de Ribeirão das Neves, São José da Lapa, Vespasiano e Santa Luzia. Conclui-se que a análise desenvolvida contribui para o

estudo e a aplicação de políticas públicas eficientes para ordenar a expansão urbana prevista.

Palavras-chave: Geoprocessamento, Modelagem de Dados, Cobertura do Solo, Infraestrutura Viária, Belo Horizonte.

ABSTRACT

The economic boom in recent years has been interfering in the model of urban settlement in the Metropolitan Region of Belo Horizonte (RMBH). The valuation of the Land led the real state market to push the urban occupation toward the Northern sector of the RMBH. Thus it arises a concern of how to conserve natural resources, which is a critical condition to the society's quality of life, and maintain urban growth in the region. Besides the action of the real state market, the urban expansion in the Northern sector, has taken influences from large public works planned and already implemented in the area such as, the Tancredo Neves International Airport, the Airport-Industry, the Linha Verde and Administrative Center of Minas Gerais. This study aimed to model the dynamics of groundcover in order to predicts scenarios of urban growth within the northern sector Belo Horizonte Metropolitan Region (RMBH), therefore investigate the spatial influence of the planned transportation infrastructure with a foreseen horizon for the year 2031. Using GIS techniques, remote sensing and data modeling enabled to identify the urban areas located in northwest and east of Northern Sector of RMBH were land changes were more intense. The variables employed in the model were tested and prediction model of landuse change reached 82.61% accuracy providing the elaboration of a scenario to 2011. Given a set of thirteen explanatory variables tested in the model of urban expansion, two were strong related to the potential of explanation based on the model of V de Cramer V: Areas with the occurrence of a change in groundcovers between 2001 and 2006 presenting an index of 0,3741 and the Distance from existing urban and commercial centers with an index of 0.3532. The variables employed in the model were tested and prediction model of land changes reached 82.61% accuracy providing the elaboration of a scenario to 2011. This scenario was validated based on 2011 satellite image and presented 92.60% accuracy and 7.40% of commission error. Next, three predictive scenarios were simulated for 2031. Findings pointed to a strong tendency of urban groundcover changes occur in part of the municipalities of Ribeirao das Neves, Sao Jose da Lapa, Santa Luzia and Vespasiano. As conclusion, this investigation can contribute to elaboration and application of public policies necessary for supporting urban growth.

Key-words: Geoprocessing, Dada Modeling, Groundcovers, Transportation Infrastructure, Belo Horizonte.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	15
1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVO.....	18
2.1 Objetivo geral	18
2.2 Objetivos específicos.....	19
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	19
3.1 Geologia e geomorfologia	22
3.2 Vegetação	30
3.2.1 Unidades de Conservação	31
3.3 Socioeconomia.....	33
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	36
4.1 Principais projetos estruturantes do Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte.....	36
4.2 Mudança de cobertura do solo no Vetor Norte.....	39
4.3 Pressupostos de mudança de cobertura do solo no Vetor Norte	40
4.4 Sensoriamento remoto e modelagem da cobertura do solo.....	42
4.5 Modelos de predição de mudança de cobertura do solo	44
4.6 Aplicativos de modelagem urbana	46
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	54
5.1 Base de dados	57
5.1.1 Imagens de satélite	57
5.1.2 Variáveis explicativas	59
5.2 Sub-modelo de potencial de transição	64
5.3 Modelo de previsão de mudança de estágio	65
5.4 Validação.....	67
5.5 Simulação do cenário futuro.....	67
6 RESULTADOS	72
6.1 Cobertura do solo.....	72
6.2 Variáveis explicativas	77
6.3 Modelo de mudança da cobertura de solo urbano	78

6.4	Validação.....	82
6.5	Cenários futuros	87
7	DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES.....	94
8	CONCLUSÃO.....	97
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área do Vetor Norte conforme Decreto nº 44816/2008.....	20
Figura 2: Mapa de localização da área de estudo.....	21
Figura 3: Unidades Geotécnicas.	23
Figura 4: Mapa de declividade.	27
Figura 5: Relevo plano a suavemente ondulado verificado na porção Nordeste da área de estudo.	28
Figura 6: Relevo plano verificado na porção norte da área de estudo.	28
Figura 7: Relevo ondulado verificado na porção central da área de estudo, próximo ao Aeroporto de Confins.....	29
Figura 8: Relevo Montanhoso verificado na região cárstica que corresponde à Caverna da Lapinha, porção central da área de estudo.	29
Figura 9: Grande área de pastagem com poucos elementos arbóreos, fisionomia na porção central da área de estudo.....	30
Figura 10: Área de regeneração de cerrado com porte arbóreo, ocorrente na porção central da área de estudo.....	31
Figura 11: Unidades de conservação da área de estudo.	32
Figura 12: Centralidades urbanas.	35
Figura 13: Mapa dos principais projetos estruturantes para o Vetor Norte da RMBH.	38
Figura 14: Estrutura simplificada da construção do modelo dentro do sistema do LCM.	49
Figura 15: Esquema de Camadas e nós. Onde i representa o nó de entrada, j nó escondido, k nó de saída, w_{ij} peso do nó de entrada para o nó escondido, w_{jk} peso do nó escondido para o nó de saída, Θ_j viés da camada escondida, Θ_k viés da camada de saída.....	51
Figura 16- Fluxograma metodológico da modelagem de simulação de mudanças de cobertura do solo.	55
Figura 17: Pontos de controle na área de estudo.....	58
Figura 18: Áreas com possibilidade de ocorrência de mudança de cobertura do solo calculadas entre 2001 e 2006 e distância da mancha urbana de 2001.	61
Figura 19: Distância da vegetação de porte herbáceo e densidade populacional. ...	62
Figura 20: Número de ligações de energia elétrica registradas em 2000 e Zonas de baixo a alto adensamento urbano.	62
Figura 21: Geologia potencial para ocupação urbana e distância de estradas existentes.	63
Figura 22: Distância de centros urbanos e comerciais já consolidados e uso censitário.....	63
Figura 23: Painel de seleção dos parâmetros e critérios para finalização da rede neural do LCM.....	66
Figura 24: Variáveis restritivas e estimuladoras para expansão urbana.	70
Figura 25: Trechos viários propostos na região de estudo.....	71

Figura 26: Mapa de cobertura do solo do Vetor Norte em 2001.....	72
Figura 27: Mapa de cobertura do solo do Vetor Norte em 2006.....	73
Figura 28: Mapa de cobertura do solo do Vetor Norte em 2011.....	74
Figura 29: Região Central do Município de Pedro Leopoldo, onde foi observado um crescimento urbano acelerado.	76
Figura 30: Áreas que sofreram expansão urbana entre 2001 e 2006.	78
Figura 31: Áreas com tendência a expansão urbana.	79
Figura 32: Painel de execução do sub-modelo (<i>Run Transition Sub-Model</i>) e taxa de acurácia final.	80
Figura 33: Potencial de transição das classes não urbanas para mancha urbana em 2011.	81
Figura 34: Mapa de cobertura do solo simulado para 2011.	82
Figura 35: Comparação dos mapas de cobertura do solo urbano classificado e simulado para 2011, no Vetor Norte da RMBH.	83
Figura 36: Detalhes da cobertura do solo urbano simulado e classificado para 2011, no Vetor Norte da RMBH.	84
Figura 37: Porção Noroeste da área de estudo, onde se verificou erros de comissão.	86
Figura 38: Mapas dos cenários 1 projetados respectivamente para 2011, 2021 e 2031.	88
Figura 39: Mapas dos cenários 2 projetados respectivamente para 2011, 2021 e 2031.	89
Figura 40: Mapas dos cenários 3 projetados respectivamente para 2011, 2021 e 2031.	90
Figura 41: Evolução da Mancha Urbana simulada no Vetor Norte da RMBH.	91
Figura 42: Porção central da área de estudo, onde foi observado o crescimento da mancha urbana (porção central das figuras) no entorno da Via prevista contorno norte leste de Lagoa Santa.....	92
Figura 43: Projeção da mancha urbana para 2031 nos cenários 2 e 3 e APA Carste.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Resumo dos Projetos Estruturantes.	37
Tabela 2: Dados das imagens LANDSAT-5 utilizadas no trabalho.	57
Tabela 3: Descrição das classes de cobertura da terra.	59
Tabela 4: Variáveis restritivas e estimuladoras para expansão urbana.	69
Tabela 5: Áreas das classes de cobertura do solo.	75
Tabela 6: Valores de Cramer (ϕ) testados	77

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

IEF	– Instituto Estadual de Florestas
CAMG	– Cidade Administrativa de Minas Gerais
CEDEPLAR	– Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional
LCM	– Land Change Modeler
LANDSAT	– Satélites de Recurso da Terra
MLP	– Multi-Layer Perceptron
PDDI-RMBH	– Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Belo Horizonte
RMBH	– Região Metropolitana de Belo Horizonte
SEDRO	– Secretaria de Estado e Desenvolvimento Regional e Política Urbana
SIG	– Sistema de Informação Geográfica
VIURBS	– Programa de Estruturação Viária de Belo Horizonte

1 INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) configura a terceira maior aglomeração urbana do Brasil e apresenta uma população de 5,4 milhões de habitantes (IBGE, 2010). Em relação à economia, a RMBH vem merecendo destaque no cenário nacional, apresentando um PIB dos municípios de aproximadamente 98,5 bilhões de reais entre 2004 a 2008. Os setores de comércio e serviços são os maiores na composição do PIB, e estão concentrados de forma predominante no município de Belo Horizonte. O crescimento demográfico desta região tem aumentado nos municípios periféricos devido, entre outros motivos, à alta valorização de terras na capital mineira.

Com uma composição de trinta e quatro municípios, a expansão urbana da RMBH, traz consigo uma dinâmica de processos econômicos, políticos e sociais sobre um território de características diversificadas. A maior produção de lotes na RMBH ocorreu em 1946 quando foi implantada a Cidade Industrial de Contagem. Naquela época, foram aprovados 113 loteamentos em Belo Horizonte, Contagem e Betim, totalizando 80.600 lotes (MINAS GERAIS, 2009). Na década de 80, o mercado de terras da RMBH apresentou duas características: de um lado, a expansão de loteamentos populares, nas áreas mais periféricas, a norte e oeste ; e de outro, a expansão de um novo tipo de loteamento, os chamados “condomínios fechados” e os sítios de recreio – localizados no eixo sul, ao longo da BR-040, na direção do Rio de Janeiro, bem como sítios situados a norte da região metropolitana, principalmente no município de Lagoa Santa (MENDONÇA, 2002).

A área territorial do Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte é composta pelos municípios de Ribeirão das Neves, Santa Luzia, Vespasiano, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo, São José da Lapa, Confins, Capim Branco, Jaboticatubas e os bairros localizados na área de influência das Administrações Regionais de Venda Nova e Norte do Município de Belo Horizonte (MINAS GERAIS, 2008). Atualmente, o Vetor Norte tem sofrido influências de grandes empreendimentos públicos e privados

previstos ou já implantados. Esses empreendimentos vêm valorizando as terras da região e contribuindo para a atuação do mercado imobiliário. Normalmente, as regiões que apresentam tais atuações desse mercado privado tendem a sofrer uma rápida ocupação do território, e a gerar impactos em diferentes magnitudes. De acordo com Costa (2006) muitos desses impactos podem gerar a segregação espacial e a piora da qualidade ambiental em áreas hoje preservadas. Assim, a acelerada ocupação urbana prevista no Vetor Norte tem sido uma preocupação para os órgãos governamentais que trabalham com a temática ambiental e o planejamento urbano.

As obras já implantadas mais relevantes no Vetor Norte são: o Aeroporto Internacional Tancredo Neves, o Aeroporto-Indústria, a Linha Verde e a Cidade Administrativa de Minas Gerais. Além dessas obras, vale destacar que está prevista na região a implantação do Rodoanel. Esta rodovia será implantada a partir do Contorno de Betim até as proximidades do distrito de Ravena, com extensão de 65 km em pista dupla, com acostamentos e faixas de segurança. De acordo com o Programa de Desenvolvimento e Gestão da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MINAS GERAIS, 2011), este anel viário será uma via estruturante na região metropolitana, capaz de ordenar a ocupação de uma área ainda desocupada, que envolve as urbanizações de periferia dos municípios de Contagem, Ribeirão das Neves, Vespasiano, Santa Luzia e Sabará, devendo ainda, proporcionar a instalação de atividades produtivas ao longo de seu percurso, como nos entroncamentos com as estradas BR 040, Justinópolis/Ribeirão das Neves, Linha Verde, MG 020 e BR 262/381.

A implantação deste empreendimento rodoviário, concomitante a outros projetos previstos no Vetor Norte, tende a provocar mudanças de cobertura do solo urbano. No processo de modelagem espacial, Veldkamp e Verburg (2004) destacam a necessidade de compreender a dinâmica da cobertura do solo urbano e sua interação com as variáveis físicas, biológicas, econômicas e sociais da região em estudo. Em complemento, Milne et al (2009) salienta que as análises de

transformações da paisagem exigem um conhecimento integrado das variáveis socioambientais para que o processo de cobertura do solo seja compreendido.

A cobertura do solo pode ser definida como sendo os elementos da natureza, tais como vegetação, água, gelo, afloramentos, solo exposto e superfícies semelhantes, além das construções artificiais criadas pelo homem, que recobrem a superfície da terra (IBGE, 2006).

Atualmente, as ferramentas de modelagem de dados geográficos disponíveis permitem dimensionar as mudanças de cobertura do solo com análises temporais e espaciais, facilitando a compreensão dos fatores que influenciam essas mudanças. Permitem também fazer a projeção delas para o futuro, auxiliando na compreensão do presente e na proposição de estratégias futuras.

As áreas urbanas estão entre as que mais sofrem alterações de padrão de cobertura do solo, e por isso têm recebido atenção quanto a aplicação de modelagem espacial. Dentre os estudos encontrados com essa abordagem de modelagem dinâmica espacial de mudanças de cobertura do solo no Brasil, é possível destacar os trabalhos desenvolvidos por Almeida (2003) para as cidades de Bauru e Piracicaba em São Paulo, e a modelagem da dinâmica espacial urbana de Americana também em São Paulo (TRENTIN, 2008).

Diante do exposto, este trabalho visa contribuir com uma proposta metodológica de modelagem da dinâmica de cobertura do solo urbano no Vetor Norte da RMBH. A aplicação do modelo busca investigar as futuras tendências de expansão na região.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Elaborar um modelo da dinâmica de cobertura do solo para simular cenários de expansão urbana no Vetor Norte da RMBH e verificar as influências espaciais da

implantação de infraestruturas de acessibilidade previstas nesta região, com um horizonte preditivo para o ano 2031.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar as mudanças de uso e cobertura do solo no período de 2001 a 2006 por meio de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto;
- Identificar variáveis socioambientais e verificar o poder de explicação destas para mudança de cobertura do solo ocorrida até o ano de 2006, para inserção no modelo dinâmico de cobertura do solo;
- Validar o modelo dinâmico de cobertura do solo por meio da comparação da imagem preditiva de 2011 e a imagem de sensoriamento remoto classificada para a cobertura do solo no mesmo ano.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

De acordo com o Decreto nº 44816 de 20 de maio de 2008 no parágrafo 2 do Art. 3º a área territorial do Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte é composta pelos municípios de Ribeirão das Neves, Santa Luzia, Vespasiano, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo, São José da Lapa, Confins, Capim Branco, Jaboticatubas e os bairros localizados na área de influência das Administrações Regionais de Venda Nova e Norte do Município de Belo Horizonte (MINAS GERAIS, 2008).

Como apresentado no item 2.1 deste estudo, o objetivo principal deste trabalho leva em consideração a implantação de infraestruturas previstas na região. Neste sentido, a delimitação da área de estudo teve que ser alterada em relação àquela apresentada no Decreto nº 44816 de 20 de maio de 2008. Conforme observado na Figura 1, foram incluídos nessa delimitação os municípios de Matozinhos e partes dos municípios de Betim, Contagem, Sabará e Taquaraçu de Minas. O município de Jaboticatubas teve seu território reduzido, devido aos acessos analisados não abrangerem todo este município.

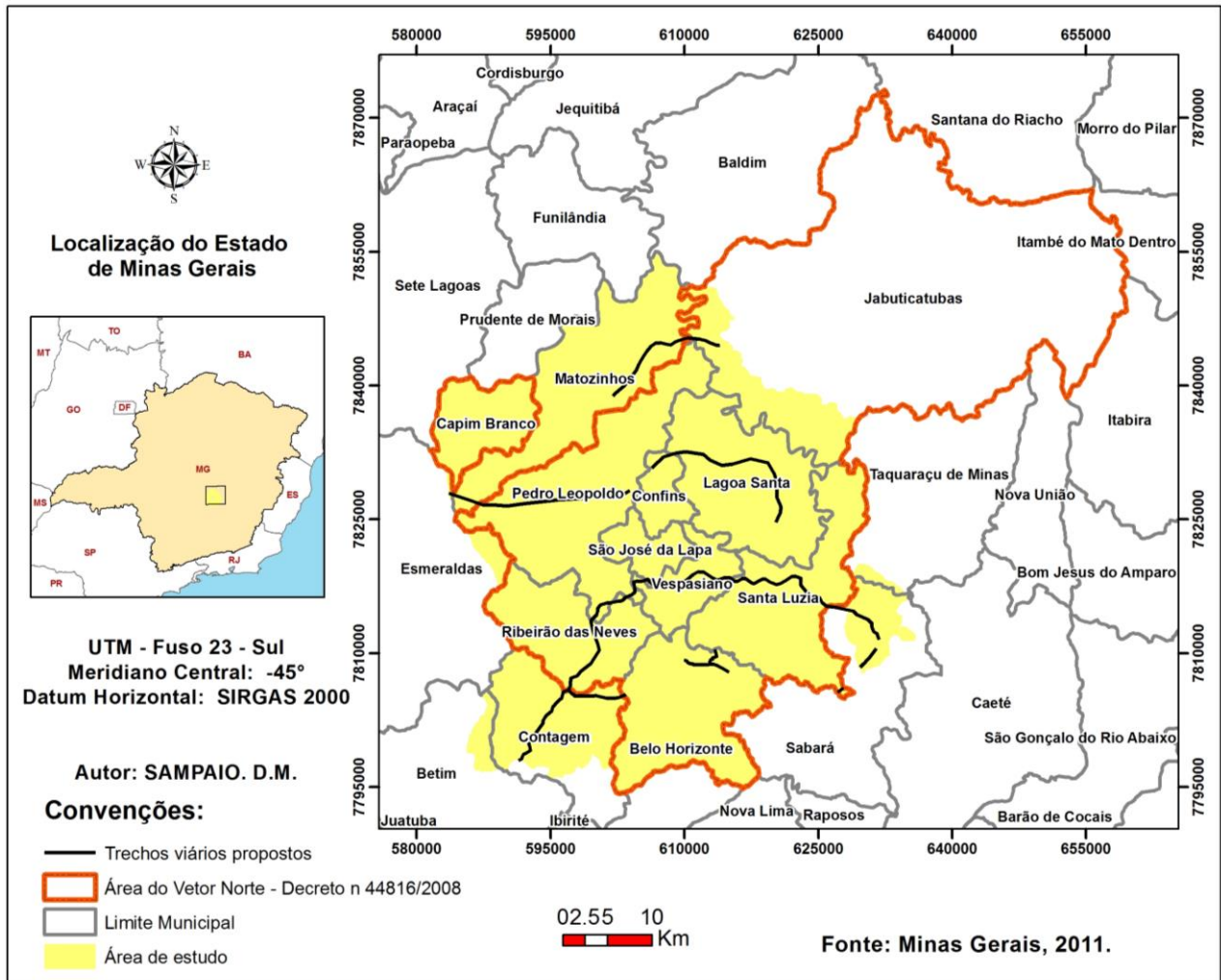


Figura 1: Área do Vetor Norte conforme Decreto nº 44816/2008.

Vale ressaltar que as modificações supracitadas correspondem predominantemente à área definida no Programa de Ações Imediatas para o Desenvolvimento Urbano Sustentável no Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MINAS GERAIS, 2011). Este documento foi desenvolvido pela equipe técnica do Instituto Horizontes, contratada em parceria com o Governo do Estado de Minas Gerais, por meio da Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional e Política Urbana. Um dos objetivos principais deste programa era caracterizar e avaliar os investimentos públicos e privados de relevância, tanto no provimento da infraestrutura (habitação, saneamento, sistema viário e de transporte) quanto no setor produtivo (geração de emprego e renda) e seus impactos no uso do solo e no meio ambiente.

Neste Programa a composição territorial diferenciada do Decreto nº 44816 de 20 de maio de 2008 também é conhecida como Vetor Norte da RMBH (MINAS GERAIS, 2011), pois considera a influência das infraestruturas de acessibilidade previstas na região. Devido à previsão de implantação do Rodoanel, foi incluída na delimitação da área em estudo, a região da bacia Hidrográfica de Vargem das Flores. A área apresenta cerca de 199.424 hectares e está localizada entre as coordenadas 580.000E e 7.795.000N e 630.000E e 7.850.000N, UTM, zona 23 Sul. Abrange parte dos municípios de Belo Horizonte, Ribeirão das Neves, Santa Luzia, Esmeraldas, Jaboticatubas, Betim, Contagem, Sabará e a área total dos municípios de Vespasiano, São José da Lapa, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Capim Branco, Confins e Lagoa Santa (Figura 2).

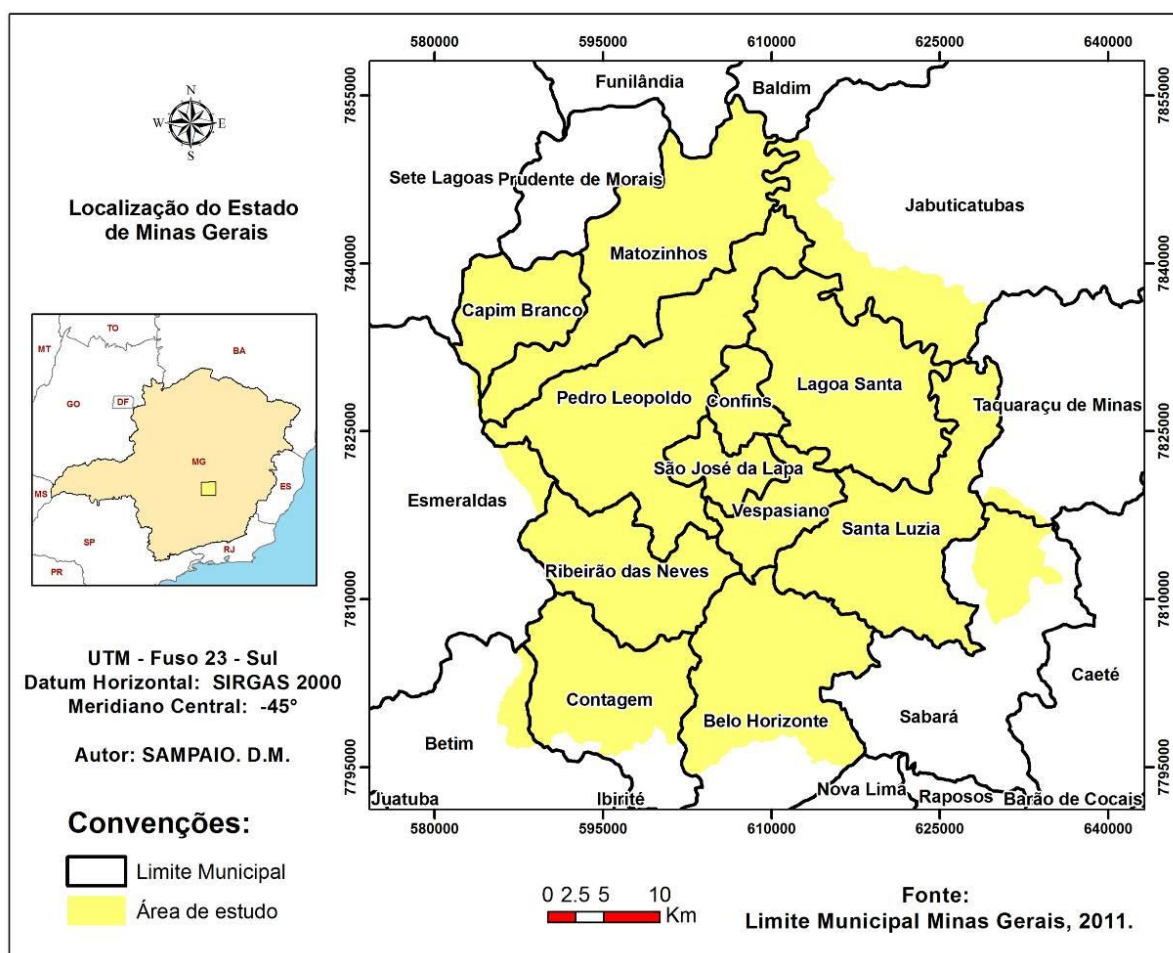


Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo.

3.1 Geologia e Geomorfologia

O conhecimento geológico apresenta potencialidades como também susceptibilidades que podem, respectivamente, favorecer ou dificultar e até impedir a ocupação sobre determinadas áreas. Por esta razão é preciso conhecer os terrenos, suas características geológicas e geotécnicas antes de realizar uma intervenção como forma de remediar os efeitos de uma inadequada a ocupação. Os mapas geológicos são importantes bases para o planejamento e implantação das grandes obras. Com esta finalidade são elaboradas as cartas geotécnicas que servem como orientação de planos de ocupação dos territórios. As informações das cartas geotécnicas podem ser cruzadas com outras bases temáticas e este cruzamento possibilita o zoneamento das áreas favoráveis ou desfavoráveis à ocupação, além de evidenciar as áreas de conflito, possibilitando a análise e tomadas de decisão sobre as adequadas formas de uso dos territórios. A principal finalidade da Carta Geotécnica é traduzir as informações geológicas em termos de adequabilidade de ocupação potencialidades e susceptibilidades dos terrenos.

A área de estudo está inserida na Bacia Sedimentar do São Francisco, que ocupa a região central do estado de Minas Gerais e cujos limites são aproximadamente coincidentes com aqueles que delineiam a bacia hidrográfica homônima.

Trata-se de uma estrutura geológica de idade Neoproterozóica que recobre o cráton do São Francisco, identificado como uma unidade que permaneceu parcialmente estável frente às deformações tectono-magmáticas experimentadas por suas faixas móveis marginais.

A cobertura sedimentar é identificada como Supergrupo São Francisco recobrendo quase todo segmento centro-sul do cráton. As unidades situadas no cráton São Francisco apresentam deformação e metamorfismo incipiente, tornando-se gradualmente mais deformada e metamórfica até atingir a região das faixas de dobramento.

Na região pode-se destacar um trabalho de referência no mapeamento geotécnico que contempla a área de estudo, realizado pelo Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional de Minas Gerais – CEDEPLAR na escala de 1:100.000 (CEDEPLAR, 2010), com a classificação local de 07 unidades geotécnicas.

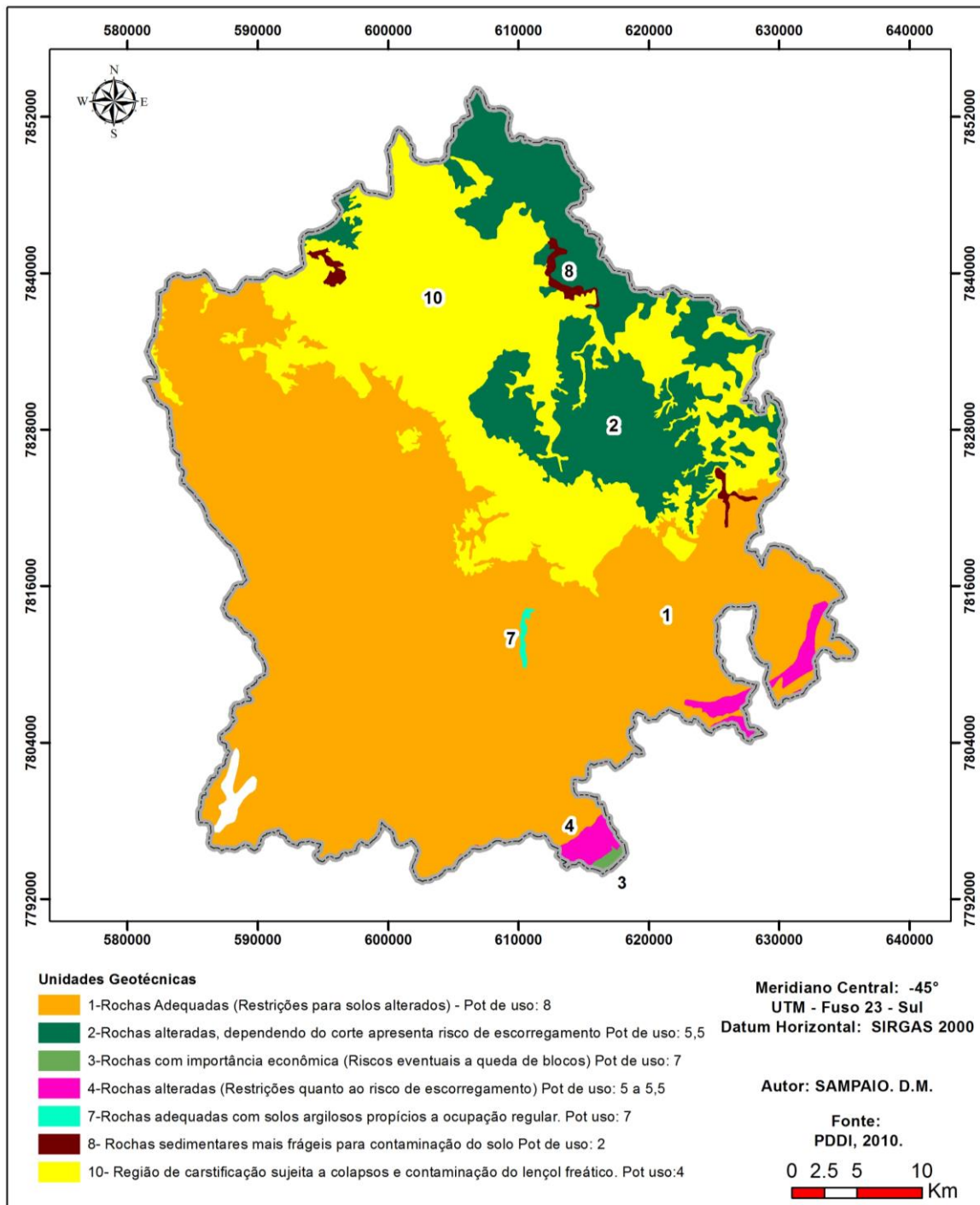


Figura 3: Unidades Geotécnicas.

A Figura 3 apresenta as unidades geotécnicas presentes na área de estudo já classificadas quanto a sua aptidão para ocupação urbana. Essa classificação foi realizada por meio de agrupamentos das litologias da área totalizando em 10 unidades geotécnicas agrupadas de acordo com suas características mecânicas, suas potencialidades e susceptibilidades (CEDEPLAR, 2010). Cada grupo recebeu uma nota, variando de zero a 10, correspondente a sua adequabilidade de ocupação, onde 0 (zero) representa a menor aptidão à ocupação e 10 a maior. Nenhum grupo recebeu nota zero, como também nenhum grupo recebeu nota 10. Isso se deve ao fato que não existe terreno que seja completamente inválido assim como não há terreno, que por melhor que seja não exija medidas criteriosas de ocupação.

A unidade geotécnica 1 representa o agrupamento das rochas de origem ígneas ácidas a intermediárias e metamórficas. As rochas mais representativas do grupo são os granitos e os gnaisses. Na região em estudo, essas rochas quando são, expostas em afloramentos ou abaixo de fino manto de intemperismo são resistentes, sendo excelentes para execução de fundações diretas. Com essas características esse grupo apresenta um potencial 8 para uso e ocupação do solo.

A unidade geotécnica 2 é constituída principalmente por rochas de origem sedimentar folheadas e de granulometria fina como argilitos e siltitos. Estas rochas geralmente são conhecidas como rochas brandas, pois em geral possuem baixas resistências mecânicas, friáveis devido à menor coesão dos minerais constituintes, facilmente intemperizáveis. Estas variedades de rocha apresentam comportamento particular nas escavações exigindo cuidados especiais para ocupação urbana. Com essas características o potencial de uso do solo neste grupo é 5,5.

A unidade geotécnica 3 apresenta de forma predominante às rochas dos Itabiritos. Caracterizam-se por conter alta concentração de hematita (óxido de ferro) o que justifica o alto valor econômico das mesmas, sendo uma das rochas mais mineradas na região metropolitana. Geralmente os Itabiritos ocupam o topo das serras do Quadrilátero Ferrífero devido sua resistência à erosão. Por isso, são de grande importância paisagística. As rochas podem ser maciças ou pulverulentas (friáveis).

Quando maciças apresentam elevada resistência mecânica. O contrário se pode dizer das rochas pulverulentas, que apresentam baixa resistência e elevada susceptibilidade a escorregamentos ao longo dos planos de foliação ou acamamento (planos comuns nas rochas). O potencial de uso do solo nesta unidade é de 7.

A unidade geotécnica 4 é representada por rochas metamórficas foliadas, como ardósias, filitos e xistos. Sua característica principal é a presença de planos de foliação e acamamentos além de serem rochas em elevado estado de alteração. Essas rochas apresentam comportamento variado, baixa resistência da parte foliada estimulando escorregamentos e quedas de blocos. O conhecimento do ângulo de mergulho destes planos e sua direção são fundamentais para o planejamento de cortes nos maciços rochosos a fim de se evitar o desencadeamento de instabilizações e escorregamentos. Nestas condições o potencial de uso e ocupação do solo nesta unidade é de 5 a 5,5.

A unidade geotécnica 7 representa as rochas que se intemperizam mais facilmente e geralmente são muito fraturadas. Quando sãs, são bons materiais para pedra britada em agregado asfáltico e para concreto e lastro para ferrovia, fundação. Quando alteradas geram solos argilosos mais coesos com maior estabilidade com relação à erosão e escorregamentos. Assim o potencial de uso e ocupação do solo nesta unidade é de 7.

A unidade geotécnica 8 é representada pelos depósitos geológicos transportados por gravidade (quedas e escorregamentos) ou depositados em planícies aluvionares. Nos depósitos coluvionares é comum a ocorrência de rastejamento, movimento lento do terreno encosta abaixo, que podem provocar sérios danos nas estruturas rígidas das construções e até quedas e desabamentos. Uma exceção são as cangas, depósitos coluvionares com alto teor em ferro. Estas são porosas o que indica áreas de recarga de aquíferos e também bem resistentes pela cimentação ferruginosa, não apresentando grandes problemas para obras urbanas. Nas planícies de inundações os depósitos aluvionares são altamente plásticos e recalques por adensamento são processos comuns, exigindo tratamentos especiais de fundação. Geralmente estão em áreas susceptíveis a alagamentos e inundações

frequentes. Em geral possuem baixa resistência mecânica e sua ocupação não é recomendada. Contudo o potencial de uso e ocupação do solo nesta unidade é de 2.

A unidade geotécnica 10 é representada pelas rochas carbonáticas com laminações pelíticas e detriticas. Essas rochas são constituídas por calcários em grande parte, além de níveis com material fino (calssiltitos) e arenoso (calcarenitos). A região de ocorrência das rochas carbonáticas na RMBH é conhecida como área do carste. Entende-se por “carste” como sendo o relevo elaborado sobre rochas solúveis pela água como, por exemplo, o calcário. A origem e evolução do carste dependem de processos específicos, denominados de cársticos, e as formas resultantes desses processos serão as formas cársticas. De acordo com Kohler (1994), os relevos cársticos destacam-se por sua beleza e exuberância, geralmente constituídos por paredões rochosos enrugados e corroídos pelo tempo, semelhantes a ruínas, arcadas suspensas abrindo-se em cavernas subterrâneas, abrigos, grutas, lapias, sumidouros, lagoas e depressões conhecidas como dolinas. Ademais, o relevo cárstico é rico em acervos paleontológicos e arqueológicos e também funciona como um poderoso aquífero, ou seja, as rochas solúveis são capazes de armazenarem e transmitirem águas subterrâneas. As áreas cársticas são regiões sensíveis às atividades de urbanização, altamente susceptíveis a abatimentos, colapsos e contaminação da água subterrânea (NOGUEIRA et al. 2008). Sua ocupação deve ser planejada, após inúmeras investigações geotécnicas e hidrogeológicas. O potencial de uso e ocupação do solo nesta unidade é 4.

Do ponto de vista geomorfológico a área de estudo está inserida na unidade morfológica da Depressão do Alto-Médio Rio São Francisco e baixadas dos Rios Jacaré/Salitre. Caracterizada como um conjunto de relevos mais planos ou ondulados situados abaixo do nível das regiões vizinhas, com cerca de 400 a 500m de altitude. Essa depressão é um vale de afundamento, visível por escarpamentos de falhas no contato entre formações do proterozóico e camadas do siluriano, na borda oriental do Espinhaço. Possui um relevo caracterizado por espigões colinas de topo plano a arqueado e encostas policonvexas de declividades variadas nos flancos dessas feições e nas transições.

A Figura 4 apresenta as declividades classificadas destacando o tipo de relevo da área em estudo. As declividades predominantes na área de estudo variam de 0 a 8% caracterizando um domínio de relevo plano a suavemente ondulado. Na porção noroeste verifica-se a segunda maior predominância de declividades compreendidas entre 8 a 20% representando um relevo ondulado. De forma restrita são observadas na área em estudo declives compreendidos entre 20 a 45% que correspondem ao relevo fortemente ondulado.

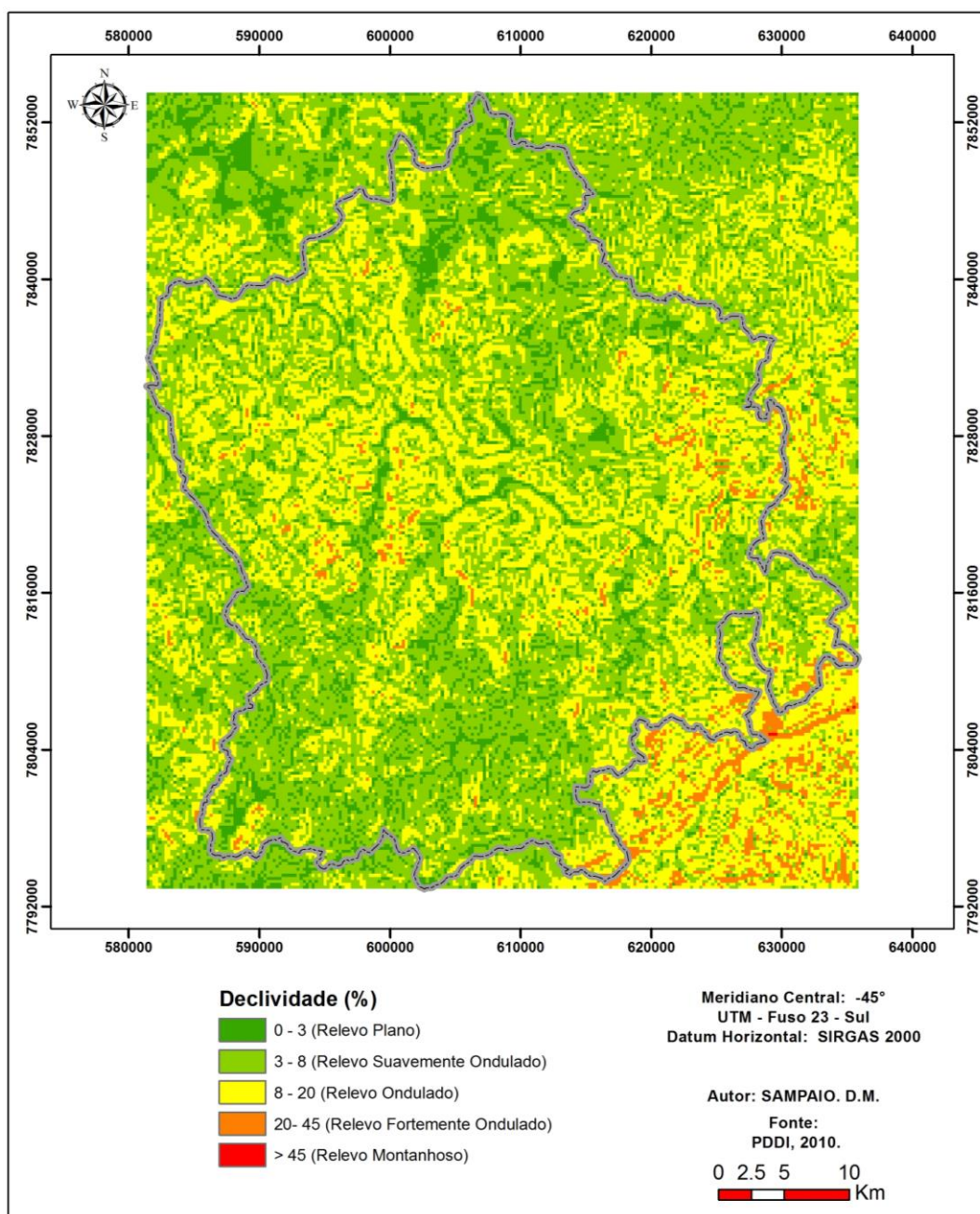


Figura 4: Mapa de declividade.

Nos trabalhos de campo realizados em julho de 2013, foi confirmado na área de estudo a predominância de relevos planos a ondulados. As Figura 5 a Figura 8 apresentam exemplos dessa típica paisagem verificada em diferentes pontos da área.



Figura 5: Relevo plano a suavemente ondulado verificado na porção Nordeste da área de estudo.

Fonte: Foto de Daniel Martins Sampaio, 2013.



Figura 6: Relevo plano verificado na porção norte da área de estudo.

Fonte: Foto de Daniel Martins Sampaio, 2013.



Figura 7: Relevo ondulado verificado na porção central da área de estudo, próximo ao Aeroporto de Confins.

Fonte: Foto de Daniel Martins Sampaio, 2013.



Figura 8: Relevo Montanhoso verificado na região cárstica que corresponde à Caverna da Lapinha, porção central da área de estudo.

Fonte: Foto de Daniel Martins Sampaio, 2013.

3.2 Vegetação

A área em estudo esta situada na região de ecótone entre os biomas do Cerrado e da Mata Atlântica (VELOSO et al. 1991). Nesta região de transição entre os dois biomas, ocorrem florestas estacionais semidecíduas e decíduas e florestas ripárias juntamente com as diferentes fisionomias do Cerrado (cerradão, cerrado, campo cerrado, campo sujo e campo limpo), bem como os campos rupestres, que ocorrem nas maiores altitudes.

A vegetação dos municípios inseridos na área em estudo é composta de Cerrado, com suas diferentes fitofisionomias, e mata estacional semidecídua. É uma região de ecótone, onde as espécies comuns do cerrado costumam ser encontradas nas matas e vice-versa. As Figura 10Figura 9 e Figura 10, apresentam de forma geral a paisagem da área, composta com vegetações rasteiras como as pastagens, áreas agrícolas e áreas com vegetação de cerrado. A vegetação nativa composta predominantemente de indivíduos arbóreos, encontra-se em diferentes estágios sucessionais na área em estudo, com muitos espaços em regeneração, após corte raso para formação de pastagem ou produção agrícola.



Figura 9: Grande área de pastagem com poucos elementos arbóreos, fisionomia na porção central da área de estudo.

Fonte: Daniel Martins Sampaio, 2013.



Figura 10: Área de regeneração de cerrado com porte arbóreo, ocorrente na porção central da área de estudo.

Fonte: Daniel Martins Sampaio, 2013.

3.2.1 Unidades de Conservação

O diagnóstico das unidades de conservação focou na distribuição espacial e a abrangência dessas em relação a seu papel de conservação ambiental na área de estudo. As unidades de conservação possuem duas categorias, as de proteção integral e de uso sustentável. De acordo com a lei nº 9.985/2000 (BRASIL, 2000) essas categorias possuem as seguintes definições:

Art. 2º Para os fins previstos nesta Lei, entende-se por:

I - unidade de conservação: espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção;

VI - proteção integral: manutenção dos ecossistemas livres de alterações causadas por interferência humana, admitido apenas o uso indireto dos seus atributos naturais;

XI - uso sustentável: exploração do ambiente de maneira a garantir a perenidade dos recursos ambientais renováveis e dos processos ecológicos, mantendo a biodiversidade e os demais atributos ecológicos, de forma socialmente justa e economicamente viável;

As Unidades de Conservação de Proteção Integral abrangem cerca de 1% do território da área da em estudo. A Figura 11 apresenta essas unidades que incluem

o Parque Estadual Serra Verde, Parque Estadual do Sumidouro e outros Monumentos Naturais, Reservas Biológicas e da Vida Selvagem. Vale destacar que nessas áreas somente usos e atividades específicas são permitidos, tal como a instalação de equipamentos de manutenção.

As unidades de Conservação de Uso sustentável abrangem cerca de 28% da área em estudo e são compostas predominantemente pela APA Carste e a APA da Bacia de Vargem das Flores. Nestes locais são permitidos certos usos e atividades tais como desenvolvimento residencial de baixo impacto, agricultura, parques organizados e outras áreas verdes.

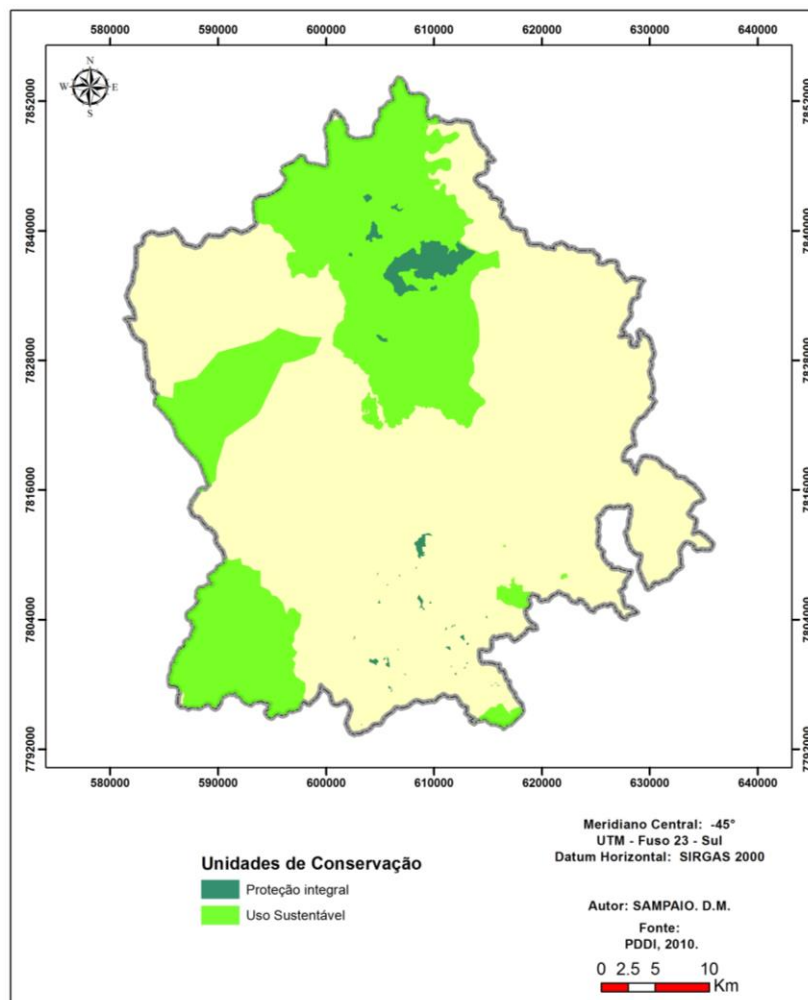


Figura 11: Unidades de conservação da área de estudo.

3.3 Socioeconomia

O crescimento da RMBH é descrito como “processo de expansão urbana” em diversas teses, dissertações e artigos, a partir de observações e análises de dados estatísticos e de outras pesquisas, principalmente as demográficas (MINAS GERAIS, 2010). De acordo com alguns estudos, tal fenômeno é fortemente marcado pelas migrações internas (intraestaduais), o que contribui para a compreensão do processo de metropolização em Minas Gerais. A partir dos anos 1970, o padrão migratório em Minas Gerais sofre mudanças consideráveis: primeiro a mudança do tipo de migração de rural-urbano para urbano-urbano, seguida do aumento do número de imigrantes e da redução do número de emigrantes interestaduais, considerando-se também o aumento dos movimentos intraestaduais de curta distância. Isso significa que diferentemente das décadas de 1950, 1960 e 1970, quando predominava no estado um alto saldo migratório negativo, nos anos 1980 a população deixa não só de emigrar para outros estados como começa a deslocar-se entre seus próprios municípios. A RMBH destaca-se como área de atração populacional, mesmo nos períodos em que o saldo migratório de Minas era negativo (MINAS GERAIS, 2011).

De forma geral, a RMBH atrai pessoas que desejam aumentar seu nível de escolaridade, sendo que os pobres com baixos níveis de escolaridade são a maioria. Ainda que a primeira tentativa de fixação de residência dessas pessoas seja em Belo Horizonte, a segregação socioeconômica e cultural a que são expostos acaba induzindo uma nova migração para municípios menos seletivos (MINAS GERAIS, 2011). A mesma segregação que acontece internamente no município de Belo Horizonte é reproduzida na RMBH. Ainda que o processo de valorização da terra seja cada vez mais complexo, genericamente pode-se dizer que a expulsão dos pobres acontece internamente numa primeira instância, de bairros mais nobres para os periféricos, e depois da sede da metrópole para os municípios periféricos, por meio dos vetores de expansão.

Em relação à dinâmica populacional, a área em estudo teve destaque nos últimos anos. Em 2007, a população do Vetor Norte era de aproximadamente 1,97 milhões

de habitantes, contra o total de mais de 5 milhões na RMBH. A proporção da população da RMBH em comparação com o Estado de Minas Gerais aumentou aproximadamente de 22% em 1991 para quase 26% (MINAS GERAIS, 2010). Ao todo, entre o período de 1991 a 2007, a RMBH e a área de estudo cresceram mais rapidamente do que Minas Gerais e o Brasil. A razão fundamental foi às taxas relativamente mais altas de migração para estas duas áreas. A taxa de crescimento mais alta da área de estudo também foi atribuída à taxa de fecundidade mais alta nesta região.

O crescimento populacional proporciona o surgimento das centralidades urbanas e também do desenvolvimento econômico entre as localidades. Um centro surge pela capacidade de concentrar bens e serviços diversificados, segundo uma rede hierarquizada que se forma e se desenvolve em função da complementaridade das atividades de produção e prestação de serviços. Extremamente dependentes da disponibilidade de infraestrutura (energia, telecomunicações, sistema viário, etc.) bem como de insumos, mão de obra e serviços em suas proximidades, tais centralidades tendem a se reforçar atraindo para sua área de influência outras atividades complementares tais como comércio atacadista e varejista, organizações de negócios, serviços profissionais, serviços administrativos, além de serviços sociais ligados às demandas coletivas (serviços públicos, saúde, educação, lazer) e serviços pessoais, de demanda individual da população (MINAS GERAIS, 2011).

A maior concentração de serviços produtivos e distributivos corresponde aos centros de maior complexidade, maior alcance e importância econômica, enquanto que, no outro extremo, aqueles restritos à oferta de serviços pessoais, referem-se principalmente à densidade populacional e ao perfil da renda dos consumidores, apresentando abrangência mais local e, conseqüentemente, menor influência na estruturação do território.

A Figura 12 apresenta a rede de centralidades existente na área de estudo elaborado por meio de entrevistas com agentes públicos municipais das 34 prefeituras visitadas durante os trabalhos de campo do PDDI (MINAS GERAIS, 2011). A parte do município de Belo Horizonte inserida na área de estudo

corresponde ao único centro metropolitano de primeiro nível. A norte deste centro observa-se os sub-centros metropolitanos representados pelas regiões de Venda Nova e São Benedito. Adiante, os municípios de Lagoa Santa e Pedro Leopoldo se destacam por apresentar centros micro regionais. Por fim, são observados mais sete centros locais existentes nos municípios de Santa Luzia, Ribeirão das Neves, Vespasiano, São José da Lapa, Confins, Matozinhos e Capim Branco.

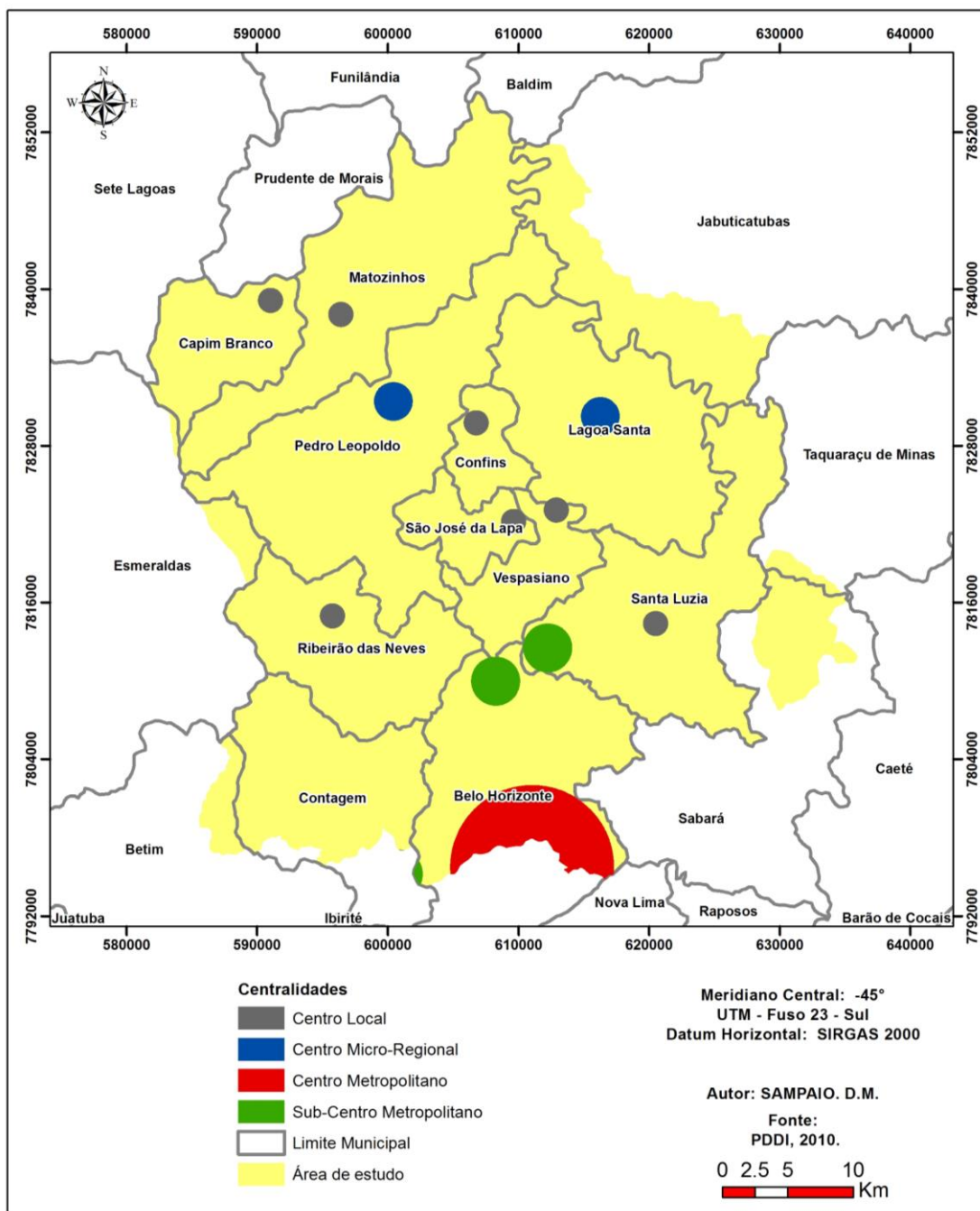


Figura 12: Centralidades urbanas.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O propósito desse capítulo é apresentar uma abordagem integrada sobre os aspectos que influenciam a mudança de cobertura do solo urbano na área em estudo, e demonstrar o embasamento teórico das técnicas de sensoriamento remoto e modelagem utilizada neste trabalho. Inicialmente, é apresentada a caracterização dos principais projetos de infraestrutura já implantados e previstos no Vetor Norte da RMBH. Em seguida, é apresentada uma abordagem sobre a mudança de uso do solo na região em estudo. Posteriormente são abordados os pressupostos de mudança de cobertura do solo, com base em critérios de estudos realizados na região. Na sequência é apresentada a teoria do sensoriamento remoto, as aplicações de modelos de predição de mudanças de cobertura do solo e alguns aplicativos de modelagem, incluindo o Land Change Modeler (LCM) utilizado nesta pesquisa.

4.1 Principais Projetos estruturantes do Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Nesta seção, serão apresentados os principais projetos estruturantes do Vetor Norte da RMBH, recentemente implantados, ou com implantação prevista.

Os principais projetos estruturantes já implantados na área em estudo são: a ampliação e modernização de acessibilidade da Linha Verde; a duplicação e modernização da MG 424 e a implantação da Cidade Administrativa de Minas Gerais (CAMG). As obras previstas na região são: as Linhas Norte-Sul do Metrô, a ampliação do Aeroporto Internacional de Confins, o Parque Tecnológico da UFMG, o Complexo Comercial Preconpark, o Polo de Eletrônica, o Distrito Industrial de Santa Luzia, de Pedro Leopoldo e de Vespasiano, o condomínio residencial de grande porte no município de Jaboticatubas, as vias Rodoanel, o Contorno de Lagoa Santa, a Via 540, a Via Norte Sul, o Anel Viário Norte e os acessos do Viurbs Metropolitano (MINAS GERAIS, 2011). Na Tabela 1 e Figura 13 são apresentados um resumo e o mapa dos principais projetos estruturantes no Vetor Norte.

Tabela 1 – Resumo dos Projetos Estruturantes.

NÚMERO	NOME
1	Ampliação e modernização de acessibilidade da Linha Verde
2	Duplicação e modernização da MG 424
3	Cidade Administrativa de Minas Gerais
4	Ampliação do Aeroporto Internacional de Confins
5	Polo de Eletrônica
6	Parque Tecnológico da UFMG
7	Complexo Comercial Preconpark
8	Distrito Industrial de Santa Luzia
9	Distrito Industrial de Pedro Leopoldo
10	Distrito Industrial de Vespasiano
11	Condomínio residencial de grande porte no município de Jaboticatubas
12	Rodoanel
13	Via 540
14	Via Norte Sul
15	Acessos do Viurbs Metropolitano
16	Contorno de Lagoa Santa
17	Anel Viário Norte

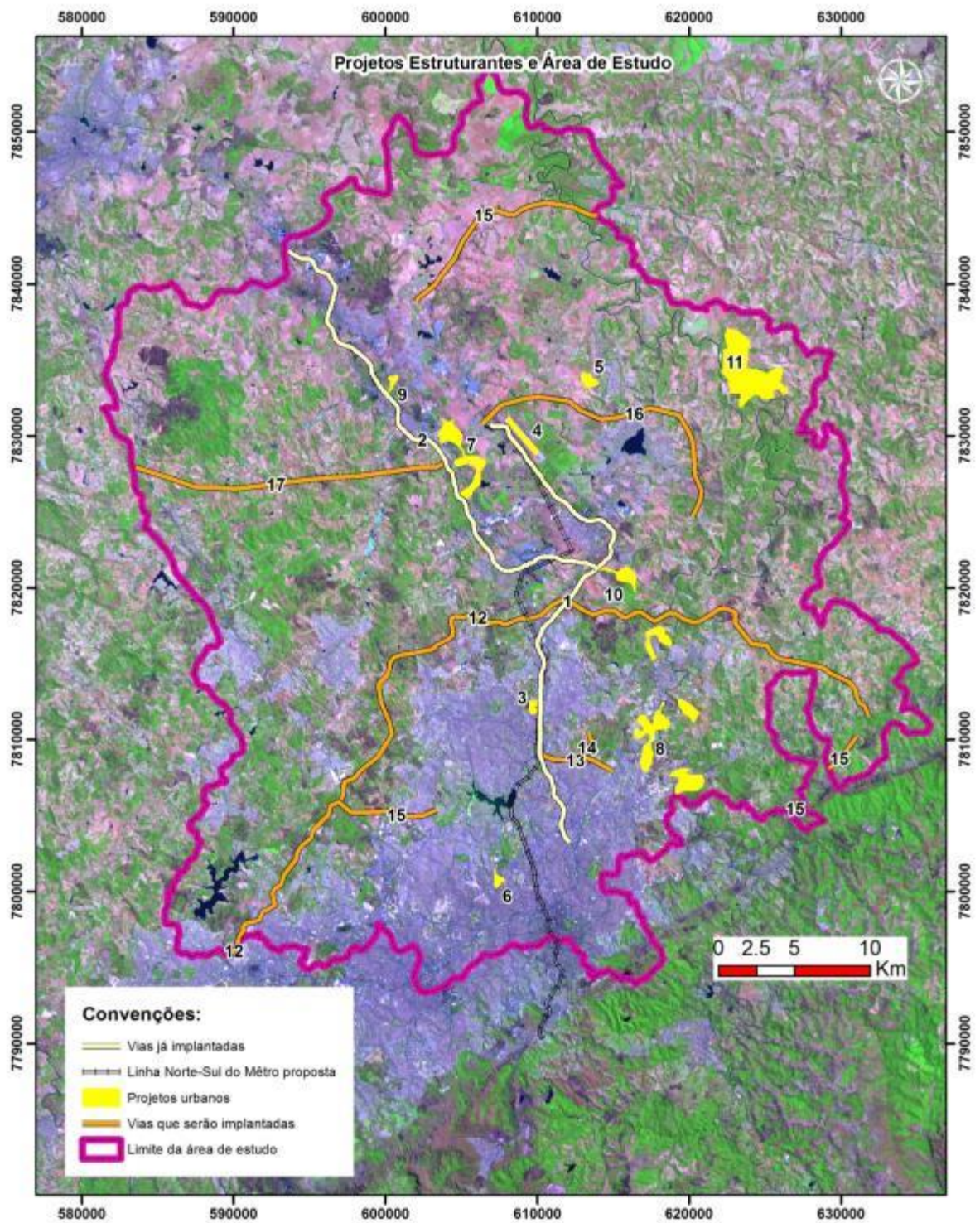


Figura 13 – Mapa dos principais projetos estruturantes para o vetor norte da RMBH.
 Fonte: Minas Gerais, 2011.

Sendo implantados os projetos estruturantes relacionados ao sistema viário (Figura 13), as condições de acessibilidade no Vetor Norte e de toda região serão alteradas. O novo traçado viário irá permitir que as ligações intermunicipais sejam implantadas, não se limitando somente às ligações predominantes entre o centro e a periferia. Desta forma, a cobertura do solo situado no entorno imediato destes traçados viários tendem a sofrer alterações.

4.2 Mudança de cobertura do solo no Vetor Norte.

Atualmente o Vetor Norte da RMBH esta passando por uma transformação espacial em função de vários projetos de infraestrutura e investimentos do setor imobiliário que estão sendo implantados na região. Seguindo uma relação natural de mercado, a instalação desses empreendimentos promove a valorização de terras, e a implantação de novos projetos urbanos na região. Assim, nesta seção são tratadas as influências espaciais da instalação de grandes empreendimentos e os fatores que contribuem para ordenamento e mudança da cobertura do solo.

Mudanças de diversas ordens podem ocorrer em locais submetidos à implantação de projetos de infraestrutura urbana de grande relevância. Essas alterações, além de afetar os fatores sociais, ambientais, culturais e até mesmo políticos, apresentam diversas mudanças territoriais. De acordo com Banerjee et al. 2012 os projetos de grande magnitude, instalados no entorno de áreas urbanas situadas em regiões metropolitanas, tendem a provocar impactos de longo alcance com destaque para três categorias principais:

- 1) alterações de preços da terra em um período de curto a médio prazo;
- 2) aumento dos números de deslocamentos e transportes que demandam novos investimentos; e
- 3) aumento da demanda habitacional.

No Vetor Norte, alguns impactos já são observados e suas origens estão relacionadas com as mudanças urbanas originadas por grandes empreendimentos imobiliários já implantados e projetados (COSTA, 2006). Dentre esses impactos, destacam-se à geração de novos fluxos de pessoas e veículos que interfere na população e contribui para maior mudança de cobertura do solo urbano. Na região está sendo comum, alguns terrenos ocupados ou não ocupados serem valorizados, e apresentarem mudança da cobertura do solo urbano causada implantação de novos empreendimentos privados.

O caso da região norte de Belo Horizonte (porção sul da área de estudo) é um exemplo típico da transformação de uso do solo observado recentemente. Esse território, historicamente associado à implantação de conjuntos habitacionais públicos de interesse social e loteamentos populares privados típicos da produção da periferia metropolitana no período de 1950 a 1970 (COSTA, 2006), hoje se encontra em plena transformação devido à ampliação e modernização da acessibilidade rodoviária, chamada Linha Verde, e a recente construção da Cidade Administrativa de Minas Gerais, para onde foi deslocada a maior parte das instituições públicas do Estado. A implantação desses empreendimentos está proporcionando na região a compra do lote associada à autoconstrução privada, diferentemente da política habitacional praticada na região até a década de 1970 (COSTA, 1994). Como a intervenção da autoconstrução, a maioria das edificações unifamiliares tende a passar para ocupações multifamiliares, aumentando dessa forma a ocupação urbana na região.

4.3 Pressupostos de mudança de cobertura do solo no Vetor Norte

De acordo com os dados de mudança da cobertura do solo no Vetor Norte e o histórico da evolução urbana na área de estudo, pode-se dizer que a expansão urbana na região possui relações com algumas variáveis físicas e econômicas, tais como proximidades de centros urbanos e da mancha urbana existente. Seguindo o cenário atual do Vetor Norte, observa-se que as maiores transformações espaciais na região estão localizadas no entorno de grandes investimentos do setor imobiliário

e de infraestrutura, implantados após certas decisões políticas (MINAS GERAIS, 2011).

Dessa maneira, esta seção, apresenta os pressupostos para expansão urbana no Vetor Norte da RMBH, elaborado por meio da consulta dos estudos realizados pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado - PDDI (MINAS GERAIS, 2011). Assim, o processo de modelagem que envolve este trabalho considera que a região possui os seguintes critérios para a mudança de cobertura do solo urbano:

- O aumento do número de domicílios sofre grande influência da dinâmica do mercado imobiliário, dos planos governamentais de habitação com acesso facilitado ao crédito, do aumento da renda da população, do aumento do déficit habitacional e da elevação de preços de terrenos com infraestrutura já implantada nas proximidades de centros urbanos consolidados com economia influente sobre seus municípios vizinhos. Nessas condições, a dinâmica imobiliária traz preocupações no Vetor Norte, pois uma expansão desordenada poderá impactar a região. Tais impactos refere-se a possíveis ocupações em áreas de risco ambiental e mudanças de cobertura do solo em áreas com relevância ambiental, como é o caso da APA Carste;
- Considerando os altos custos de moradia nos centros urbanos já consolidados, a escassez de novos espaços territoriais e o nítido interesse governamental em estruturar a região em estudo, o crescimento urbano será maior nos municípios do entorno, situados a norte da capital mineira;
- Os espaços que poderão sofrer as maiores mudanças de cobertura do solo para ocupação urbana são: as áreas situadas no entorno de onde estão previstos os projetos de acessibilidade compostos por rodovias, os espaços com altos coeficientes urbanísticos de ocupação, as áreas situadas em zonas de aquecimento econômico e as áreas sem impedimentos físicos ambientais para ocupação urbana;

- As áreas que representam espaços restritivos à ocupação urbana são: as unidades de conservação; as áreas com vocação à preservação dos cursos de água representados por faixas marginais de 30 a 100 metros das drenagens (efêmeras, perenes ou intermitentes) e as massas de água, incluindo lagos e reservatórios naturais ou artificiais;
- Os espaços que representam condições socioambientais estimuladoras para a expansão urbana são as zonas de influência dos centros urbanos e comerciais, as áreas de influência do eixo viário do Rodoanel propostas no Vetor Norte e o entorno de até 300 metros de grandes empreendimentos imobiliários com licença de implantação já aprovada.

4.4 Sensoriamento remoto e modelagem da cobertura do solo.

O Sensoriamento Remoto (SR) pode ser definido como a ciência e a arte de obter informação acerca de objetos, áreas ou fenômenos através da análise dos dados adquiridos por sensores que não entram em contato com os alvos investigados (LILLESAND e KIEFER, 1994; ANTUNES, 2003). Como o SR não necessita de contato direto com os objetos, ele torna-se útil para trabalho em grandes extensões, pois ajuda a eliminar os custos necessários para coletas de informações primárias.

Os sensores remotos realizam medidas em diferentes intervalos do espectro eletromagnético e de maneiras distintas, podendo ser classificados como passivos e ativos. O sensor passivo mede a radiação solar refletida pela superfície terrestre e também a radiação termal emitida pela terra, enquanto o sensor ativo mede a radiação relativa à faixa de microondas, que é emitido pelo sistema sensor instalado na plataforma orbital, medindo-se a intensidade do retorno desta energia, depois de refletida na superfície terrestre (PENIDO, 1998). Neste trabalho são utilizados produtos obtidos por sensores passivos.

A extração de informações das imagens de satélites é auxiliada pela elaboração de curvas de reflectância, nas quais diferentes tipos de uso e cobertura da terra são caracterizados com o objeto. As curvas de reflectância obtidas para um mesmo tipo de alvo variam em função da interação entre radiação eletromagnética e as propriedades do alvo, mas em geral, possuem forma semelhante à assinatura espectral. O comportamento espectral dos alvos diz respeito às propriedades bio-físico-químicas dos objetos da superfície e sua influência na interação com a energia eletromagnética (PENIDO, 1998). Complementando a descrição de Penido (1998), Pereira (1989), destaca que além da observação de reflectância, os alvos são identificados pela observação dos parâmetros de forma, tamanho, tonalidade, cor, textura, localização e relação de aspectos dos alvos.

Conhecidos os alvos e interpretados os objetos, o próximo passo para extração de dados das imagens de satélite é a classificação. A classificação de imagens multiespectrais permite a extração de informação sobre os padrões de ocupação e uso da terra. O processo de classificação pode ser realizado “pixel” a “pixel”, ou para grupos de “pixels” inseridos em segmentos de imagem. Nesse processo, cada segmento é rotulado de acordo com o agrupamento de classes (Água, Solo, Vegetação dentre outros), gerando um mapa temático. Existem duas maneiras de realizar essa etapa: de forma não-supervisionada, onde não existe a participação do usuário; e a forma supervisionada, onde o usuário participa através do treinamento, escolhendo um espaço amostral com segmentos mais representativos de uma classe temática. Na classificação supervisionada, o algoritmo estima parâmetros estatísticos para analisar os dados do treinamento, que são comparados com todos os segmentos da imagem e rotulados conforme a classe com a qual mais se assemelha.

Uma imagem de satélite é coletada pelo sistema sensor e transformada em formato digital. Armazenada em computador ela é pode ser processada e inserida em um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e integrada a outras fontes. Esse processo é fundamental para as análises de mudança de cobertura do solo.

A modelagem da cobertura do solo tem como pré-requisito a extração de dados da superfície da terra em dois períodos distintos. Assim, considerando que o fator temporal é uma base para a análise do modelo dinâmico, o sensoriamento remoto representa uma ferramenta eficaz para extrair informações das superfícies terrestres devido à disponibilidade temporal dos dados.

4.5 Modelos de predição de mudança de cobertura do solo

Os modelos de predição de mudança da cobertura do solo podem ser definidos como representações da realidade que permitem visualizar e compreender fenômenos estudados por meio de uma estruturação objetiva que apresenta, ao mesmo tempo, características e relações entre os elementos de forma generalizada. De acordo com Christofolletti (1999) o uso de modelos na investigação dos sistemas ambientais possibilita identificar hipóteses, realizar diagnósticos, previsões e simulações, além de constituírem ferramentas promissoras para a análise e extração de dados.

Os modelos espaciais de mudança de cobertura do solo têm sido cada vez mais utilizados no cenário científico. Nos dias atuais encontram-se disponíveis vários modelos espacialmente explícitos aplicáveis a diversos fenômenos ambientais, tais como: mudanças de uso e cobertura da terra, mudanças climáticas, dinâmica florestal, propagação de fogo dentre outros.

A definição dos elementos ou estados de uma paisagem e suas possíveis transições são os primeiros passos na elaboração de um modelo. De forma geral, a análise espacial de mudanças é feita por meio da comparação de dois ou mais mapas da paisagem com tempos distintos, o qual pode ser extraído de dados históricos de sensoriamento remoto. Um modelo de transição de mudança de cobertura do solo requer somente a especificação do número finito de estados e que sejam conhecidas as taxas de transição de um estado para outro em um intervalo de tempo discreto (SOARES-FILHO, 2007).

Tendo em vista a acelerada dinâmica de mudança de cobertura do solo em algumas regiões metropolitanas do Brasil torna-se imprescindível o planejamento territorial que garanta a preservação dos recursos naturais que refletem na qualidade de vida das populações ali existentes. Em algumas áreas urbanas a preocupação com as tendências de mudança de cobertura do solo levaram alguns pesquisadores a utilizar modelos dinâmicos para predição de mudanças. Como exemplos podem ser citados o caso das cidades de São Francisco e Washington (CLARKE e GAYDOS, 1998), de Pequim, na China (CHUNYANG e NORIO, 2006), Kathmandu, em Nepal (THAPA e MURAYAMA, 2012), em Bauru e Piracicaba, (ALMEIDA, 2003) e Americana no Brasil (TRENTIN, 2008).

A proposta de construção de modelos de mudança de cobertura do solo, especialmente nos ambientes urbanos, é um processo dinâmico não linear e complexo. As variáveis envolvidas, também são complexas e podem provocar efeitos em diferentes escalas. Assim, para realizar qualquer análise no ambiente urbano, que apresenta uma dinâmica constante de mudança, é necessário dispor de um entendimento criterioso e consistente dos dados cartográficos que envolvem as intervenções humanas. Para essa análise, diversos trabalhos defendem que os dados devem apresentar registros de estados anteriores para que, a partir dessas informações, seja possível simular situações futuras (CLARKE, 1994; LAMBIN, 2001; VERBURG, 2002, PEDROSA e CÂMARA, 2003).

O modelo dinâmico que estima a probabilidade de mudança é desenvolvido a partir da análise das mudanças para um intervalo de tempo que leva em consideração um grupo de determinantes espaciais, representado pelas variáveis explicativas. A apreciação do efeito dessas variáveis tem como resultado um mapa de probabilidade de mudança, produzido por meio do cálculo dos efeitos das variáveis explicativas na alocação espacial das mudanças. Para esse propósito, vários métodos têm sido aplicados, em geral conhecidos como regressão logística, peso de evidência e algoritmos baseados em rede neurais. Os modelos que usam métodos

empírico-estatísticos são conhecidos como modelos dirigidos pelos dados, nos quais o processamento das informações pode incluir desde técnicas de álgebra espacial até métodos estatísticos mais avançados que utilizam autômatos celulares, lógica *Fuzzy* e inteligência artificial (PAEGELOW e CAMACHO, 2008).

4.6 Aplicativos de modelagem urbana

Os modelos urbanos dinâmicos contam com vários aplicativos computacionais atualmente disponíveis para sua execução. A seguir são apresentados alguns desses programas, selecionados por apresentarem uma interface que permite a modelagem dinâmica da cobertura do solo urbano.

O *Agent Analyst* é um aplicativo gratuito elaborado pela Universidade Redlands, Estados Unidos. Esse aplicativo trabalha dentro da arquitetura do programa ARCGIS, permitindo a simulação de processos de mudança ao longo do tempo, como mudanças na cobertura do solo, interações predador-presa, ou fluxos de rede. Essa ferramenta possui suporte técnico e um fórum de discussão, que ajudam o usuário a utilizar melhor o aplicativo, que demanda para seu funcionamento, noções básicas de programação nas linguagens computacionais *Python* e *Java*. Outras informações podem ser consultadas em trabalhos realizados por Strout (2006).

O *Dinamica* é um programa computacional brasileiro gratuito baseado em simulação discreta e em autômatos celulares, por meio de algoritmos empíricos de alocação do uso do solo. Esse aplicativo foi desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto (CSR) da Universidade Federal de Minas Gerais, com a finalidade de simular mudanças no uso e ocupação do solo. O programa possui suporte técnico, tutorial e um fórum de discussão. O funcionamento pleno do aplicativo necessita que o usuário possua conhecimentos básicos da linguagem computacional C++. De forma resumida, o programa trabalha com dois algoritmos de transição do uso do solo: as funções *Expander* e *Patcher*. A função *Expander* responde pela expansão de manchas previamente existentes de certa classe de uso do solo, enquanto a função *Patcher* destina-se a gerar novas manchas. A arquitetura adotada para o aplicativo

utiliza como entrada um mapa de paisagem representado por uma matriz. O estado de cada célula desta matriz é deduzido através da classificação de imagens de sensoriamento remoto. Os dados de entrada ainda utilizam variáveis espaciais selecionadas, que se encontram estruturadas em dois conjuntos cartográficos. O programa necessita de uma série de parâmetros, como taxas anuais de transição, tempo mínimo de permanência em cada estado, porcentagens de transição alocadas por cada um dos algoritmos de transição desenvolvidos, entre outros. Ao final da execução das funções de transição, é gerado um arquivo idêntico ao mapa de paisagem de entrada, contendo o resultado final da simulação.

O *Dynamic Urban Evolution Modeling* (DUEM) é um programa gratuito desenvolvido pelo Centro para Análise Espacial Avançada (CASA), elaborado pela Universidade de Londres. Esse aplicativo utiliza variáveis naturais e por meio do uso de autômatos celulares permite a análise da evolução urbana de um local. Esse programa possui tutorial e fórum de discussão, no entanto para aplicar o DUEM, é necessário que o usuário tenha noções de programação na linguagem computacional C++. Sua utilização tem sido testada na região urbana de Londres. O programa possui um modelo estendido, chamado IDUEM, que mesclam em sua análise as variáveis naturais do DUEM com variáveis demográficas, econômicas e de infraestrutura. Os estudos de Batty et al (1999) e Xie e Batty (2003) podem ser utilizados para maiores informações.

O *Land Change Modeler* (LCM) é um aplicativo computacional comercial construído pelo Clark Labs que permite a análise de mudanças de cobertura do solo com projeções de cenários futuros. O aplicativo permite a análise por regressão logística ou rede neural (percepção de multicamadas) conjugado a uma Cadeia de Markov (CLARK LABS, 2006). Os dados utilizados para construção do modelo, neste aplicativo, devem apresentar os mesmos parâmetros de projeção cartográfica e formatos raster compatíveis (pixels com mesmo tamanho e número de linhas e colunas idênticas). Em relação à capacidade de análise, o LCM apresenta as seguintes funções:

- avaliação de mudanças de uso do solo;
- projeção de mudanças de uso do solo;
- avaliação de análises de biodiversidade;
- planejamento de intervenções em áreas de interesse, dentre outras.

De forma simplificada, o aplicativo LCM adota a seguinte lógica para avaliação da mudança de cobertura do solo: dois mapas de uso e cobertura do solo de uma mesma região, de períodos distintos (t^1 e t^2), são analisados quanto à mudança da cobertura do solo para determinar a mudança no período t^1 e t^2 . Depois disso, é inserido no LCM um conjunto de variáveis explicativas para verificar sua relação com a mudança ocorrida. Os resultados das análises alimentam uma rede neural que identifica os padrões de mudança, a partir dos quais se elabora um mapa de probabilidade de mudança. Esse mapa recebe as delimitações sobre a proporção da mudança de acordo com uma cadeia de Markov e com isso projeta um cenário (t^3 modelado) para uma data da qual se tem um mapa de cobertura classificado (SALMONA, 2013). A comparação entre os mapas permite a predição do cenário futuro que corresponde ao t^3 , conforme apresentado no fluxograma da Figura 14.

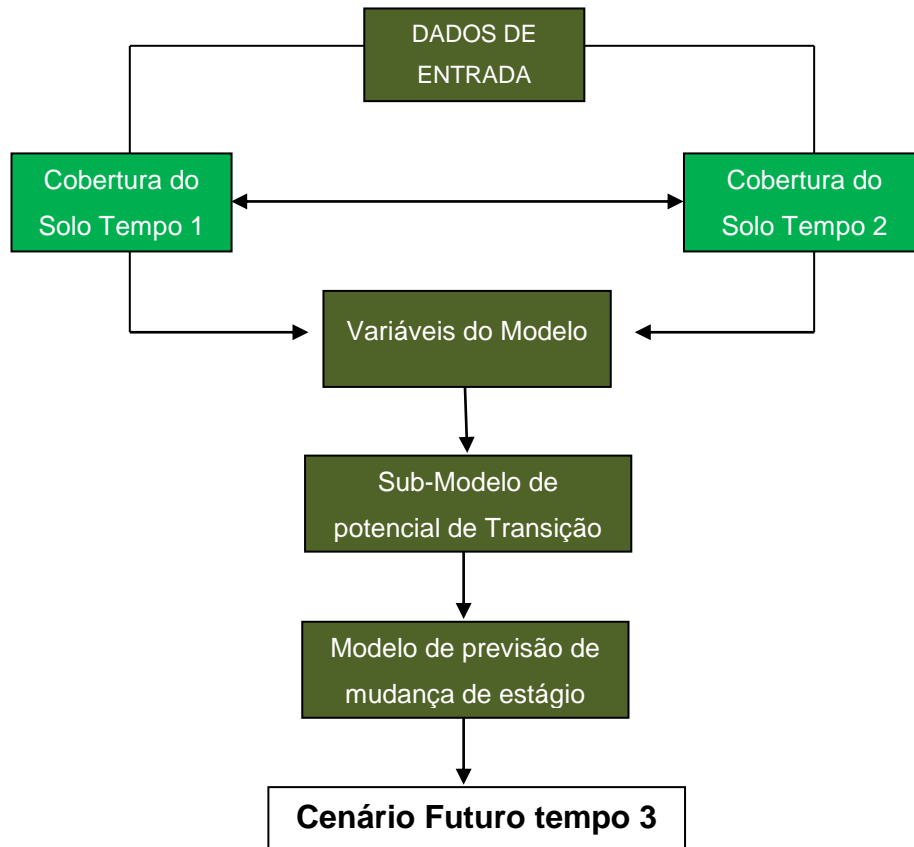


Figura 14 – Estrutura simplificada da construção do modelo dentro do sistema do LCM.

Na etapa que o modelo calcula a proporção da mudança considerando uma cadeia de Markov, o LCM possibilita a descrição do número de estágios de reavaliação, onde as variáveis dinâmicas podem ser atualizadas. Essa abertura é importante para o trabalho proposto, pois nessa etapa são avaliados os parâmetros condicionais das variáveis, que possivelmente altera o desenvolvimento do cenário projetado. Um exemplo disso é a possibilidade de avaliar o impacto na mancha urbana quando um conjunto de obras viárias implantadas em intervalos de tempos distintos é efetivado. O LCM pode também considerar a inclusão de mais dois tipos de variáveis. A primeira refere-se às variáveis restritivas, ou seja, aquelas que por parâmetros legais ou não, impedem a expansão urbana como, unidades de conservação, zonas não ocupáveis e demais restrições. A segunda trata das variáveis estimuladoras, sendo aquelas que podem incentivar a expansão urbana, como a proximidade de

loteamentos já aprovados, proximidade de centros urbanos e comerciais, dentre outras.

Na fase de avaliação das variáveis explicativas, o LCM permite a utilização do teste V Cramer para verificar o “poder” de explicação das variáveis escolhidas em relação à mudança de cobertura do solo. O teste de V Cramer é uma análise estatística não paramétrica, ou seja, é aplicável independente da distribuição das variáveis. De acordo com Liebertrau (1983), essa análise é utilizada para medir a força de associação entre duas variáveis. Por meio desse teste, é possível medir a intensidade dessa associação, uma vez que essa abordagem mede o afastamento em relação à hipótese de independência. O V Cramer é alcançado pela Equação (1):

Equação 1 – Estatística V Cramer

$$v = \sqrt{\frac{\chi^2}{n(q-1)}}$$

Onde o χ^2 é o coeficiente Chi-quadrado, n é o tamanho da amostra; q é o menor valor das linhas e colunas da imagem da cobertura da terra. O teste Cramer-V funciona como o Chi-quadrado re-escalado (CLARK LABS, 2006), para retornar valores entre zero e um, onde um significa associação completa e zero independência.

De acordo com Eastman (2009), um valor de Cramer-V alto indica que o potencial explanatório da variável é bom, porém, isso não garante o bom desempenho do modelo. No entanto, é um bom indicativo de que a variável pode ser utilizada para explicar as transições. Geralmente um valor de Cramer-V maior ou igual a 0,10 é recomendável para que a variável seja adicionada como explanatória no sub-modelo de transição potencial.

Logo depois de avaliadas as variáveis explicativas, o LCM pode utilizar uma rede neural de percepção de multicamadas (MLPNN - *multi-layer perceptron neural network*) para identificar os padrões de mudança de cobertura do solo. Os MLPNN são constituídos de diversas camadas de unidades computacionais interconectadas, de forma que, cada nó de uma camada tem conexão com o nó da próxima camada (Figura 15). Essas camadas são divididas em três: camada de entrada (*input*), camadas escondidas (*hidden*) e camada de saída (*output*) (EASTMAN, 2009).

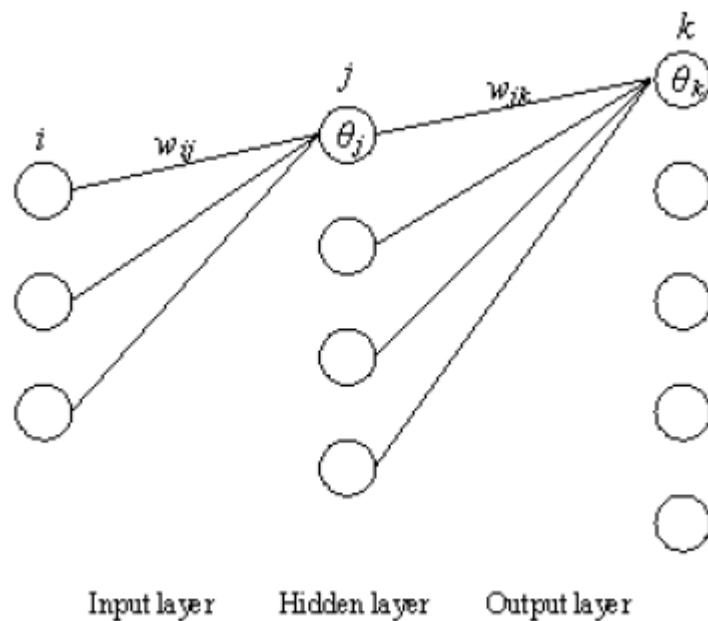


Figura 15: Esquema de Camadas e nós. Onde i representa o nó de entrada, j nó escondido, k nó de saída, w_{ij} peso do nó de entrada para o nó escondido, w_{jk} peso do nó escondido para o nó de saída, Θ_j viés da camada escondida, Θ_k viés da camada de saída.
Fonte: Eastman, 2009.

De acordo com a Figura 15 os dados de entrada alimentam os nós com informações advindas de um sinal. Essas informações avançam pela rede, acumulando e propagando informações advindas de outros nós, percorrendo as camadas, até que alcançam um determinado nível de ativação de mudança de estado da camada de nós de saída (SALOMA, 2013). Para concluir o processo, a rede passa por quatro fases: treinamento, incorporação do aprendizado, correção dos erros e pesos e o cálculo do erro médio quadrático.

O processamento da rede neural junto ao aplicativo LCM leva em conta as amostras dos pixels que sofreram mudança de cobertura do solo no período de t^1 e t^2 , identificada na primeira etapa do modelo. Esse procedimento ajuda identificar a relação entre as variáveis e os níveis de ativação dos nós de saída da rede. No final do processo, os pixels com maior nível de ativação são classificados como aqueles onde deve acontecer a expansão urbana.

Na fase de treinamento, para que ocorra o acúmulo de aprendizagem, a rede utiliza a técnica de retro propagação (*back-propagation*). A *back-propagation* apresenta dois passos, um para frente (*forward*) e um para trás (*backward*), em que são realizadas as modificações no estado dos nós em conformidade com os pesos atribuídos pelo sistema. Cada amostra é alimentada pela camada de entrada e o nó receptor soma os sinais ponderados de todos os nós a que está ligado na camada anterior. Esse processo é realizado de acordo com a equação 2 (EASTMAN, 2009):

Equação 2 – *Back-Propagation* Formula de propagação da aprendizagem durante o treinamento

$$net_j = \sum_{i=1}^m w_{ij} o_i$$

Sendo “ w_{ij} ” o peso entre o nó “ i ” e o nó “ j ” e “ O_i ” a saída do nó “ i ”. O dado de saída tem um nó “ J ” que é computado a partir da equação 3:

Equação 3 - Dado de saída em função dos nós da rede

$$O_j = f(net_j)$$

A movimentação desta fase, para frente e para trás, continua até que a rede tenha entendido as características relacionadas à solução correta de todas as classes de cobertura da terra. Desta forma, depois de realizado o treinamento, a rede consegue os pesos adequados para as conexões entre os nós das múltiplas camadas, tendo maior acurácia no dado de saída. Assim, são gerados dados de saída representando a mudança de estado de acordo com os nós com maior nível de ativação. Na

maioria dos casos, não é esperado que o dado de saída da rede (projetado) seja idêntico ao dado real, pois é bem provável que existam erros na rede, o que torna distintos os dados de saída e os dados reais (EASTMAN, 2009).

A acurácia dos dados de saída do modelo representa uma estimativa de correlação entre o valor estimado e os valores das variáveis explicativas, ou seja, mede o quanto a estimativa obtida com os parâmetros escolhidos tem relação com mudança de cobertura do solo detectada nos períodos t^1 e t^2 .

Na sequência, para modelar as potencialidades de transição identificadas na rede neural, pode ser utilizado no LCM a Cadeia de Markov, que determina quantos dos pixels com maior chance de conversão serão de fato considerados para a mudança de cobertura do solo estudada. A Cadeia de Markov pode ser definida como um modelo matemático utilizado para descrever processos que se “movem” em uma sequência de passos e por meio de um número finito de estados discretos. A probabilidade de se obter um determinado estado num instante $t+1$ depende apenas do estado verificado no instante t (PAEGELOW, 2008).

O modelo de Markov é expresso pela matriz de Markov dada pela equação (4):

Equação 4 – Matriz de Markov

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}$$

Conforme apresentado, na matriz da cadeia Markov “A” é a matriz de transição para o período de simulação, “ A_{ij} ” é a soma das áreas do estado “ in ” para o estado “ j ”, e “ n ” é o número de tipos de cobertura do solo. Assim, através da cadeia de Markov são calculados quantos dos pixels associados aos nós com maior nível de ativação

irão mudar de estado. Convém ressaltar que, a cadeia de Markov pode identificar a quantidade da mudança de cobertura do solo, mas não pode apresentar o processo espacial da dinâmica de mudança associada (YANG, et al. 2012).

Depois de realizados os testes das variáveis e aplicada à rede neural, o LCM gera cenários de transição e aloca na estrutura do aplicativo as mudanças de cobertura do solo previstas. Esta alocação pode ser elaborada pelos métodos *hard prediction* (rígido) ou *soft prediction* (predição suave). De acordo com Eastman (1995), o primeiro utiliza um algoritmo de alocação multi-critério, enquanto que o segundo baseia-se na caracterização de cada pixel onde é aplicada a seguinte regra: quanto mais transições estão associadas a um pixel mais chances eles tem de sofrer mudanças (EASTMAN, 2009).

Em comparação com outros *softwares* utilizados para modelagem urbana apresentados neste capítulo, o LCM apresenta certa vantagem para os usuários comuns de SIG por incorporar uma interface de fácil utilização (UMBELINO, 2012). Considerando essa interface e também a necessidade de testar o LCM devido a questões profissionais, esse aplicativo foi o escolhido para as análises desenvolvidas neste trabalho.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A modelagem espacial aplicada nesta pesquisa apresenta as cinco etapas ilustradas na Figura 16, a seguir. 1) avaliação das variáveis explicativas, 2) criação do sub-modelo de potencial de transição, 3) modelagem espacial das mudanças, 4) validação do modelo, e 5) simulação de mudanças futuras considerando variáveis que restringem ou estimulam a expansão urbana.

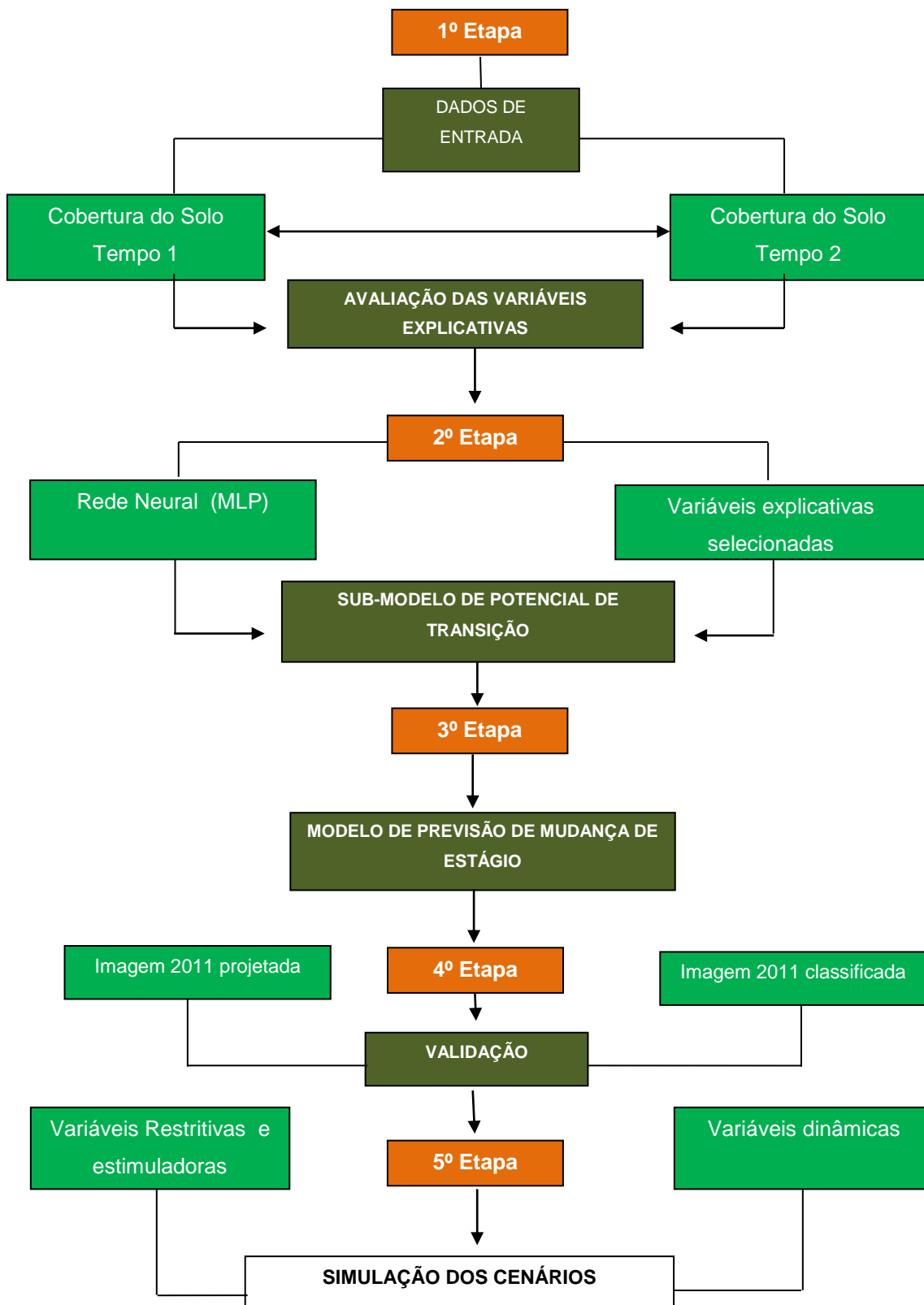


Figura 16- Fluxograma metodológico da modelagem de simulação de mudanças de cobertura do solo.

A primeira etapa consiste na análise de mudanças de uso da terra a partir de dois mapas de cobertura do solo de datas distintas. Nesta fase é gerado para visualização um balanço de perdas e ganhos entre as classes mapeadas. Depois disso, são selecionadas as variáveis que possuem algum poder de explicação para posterior inserção no processo de modelagem.

A segunda etapa refere-se à elaboração de um sub-modelo de potencial de transição. Nessa etapa é utilizado o mapa das variáveis explicativas selecionadas para gerar os potenciais de mudanças de cobertura do solo com base em uma rede neural (MLP- Multi-Layer Perceptron).

Na terceira etapa foi realizada a alocação espacial da probabilidade de mudanças previstas. Nesta pesquisa, para alocação dos dados é utilizada a Cadeia de Markov, que determinou quantos *pixels* com maior chance de conversão foram considerados para projeção da mancha urbana. Com base na previsão de mudanças foi executada a modelagem de potencial de transição.

A quarta etapa envolve a avaliação do desempenho do modelo por meio da comparação do mapeamento empírico obtido na simulação, com um mapeamento classificado da imagem de satélite da área de estudo, ambos datados no ano de 2011. Nesta etapa é possível observar se a imagem projetada tem similaridade com a imagem classificada, passo este necessário para indicar se o modelo deve ou não ser ajustado.

Na quinta etapa é realizada a simulação de mudanças de cobertura do solo. Nesta fase, a simulação foi elaborada a partir da integração das taxas de transição e dos mapas potenciais de transição gerados, que informam a quantidade e a alocação espacial das mudanças a serem simuladas. Nesta etapa são incluídas no modelo as variáveis estimuladoras e restritivas. De acordo com Eastman (2009), a inserção dessas variáveis é um processo importante para a análise de mudanças de classes em relação ao cenário de expansão futura, pois proporciona ao modelo um ajuste de variáveis que pode condicionar ou estimular a expansão urbana em novas áreas.

O sistema de modelagem de predição de mudança de cobertura do solo utilizado neste trabalho foi o *Land Change Model* (LCM) adaptado para o programa ARCGIS 9.3. Neste estudo, a mudança de cobertura do solo investigada no modelo foi a transição de não urbano para urbano. Nos tópicos a seguir serão descritos os detalhamentos das etapas do método aplicado.

5.1 Base de dados

5.1.1 Imagens de satélite

Para este estudo foram obtidas as imagens do satélite LANDSAT-5 sensor *Thematic Mapper*, resolução de 30 metros, para os anos de 2001, 2006, e 2011 disponibilizadas no catálogo de imagens da Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2013). As órbitas e datas das imagens são apresentadas na Tabela 2. Para registro das imagens foram utilizados 50 pontos de controle obtidos em campo com rastreamento de satélites do sistema GPS e com uso da base cartográfica oficial do Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado - PDDI (MINAS GERAIS, 2011). Conforme observado na Figura 17, a coleta desses pontos foi realizada em regiões com morfologia distinta variando desde um relevo plano a um relevo fortemente ondulado.

Tabela 2: Dados das imagens LANDSAT-5 utilizadas no trabalho.

Satélite/Sensor	Órbita/Ponto	Data
LANDSAT 5/TM	218/73 e 218/74	02/04/2001
LANDSAT 5/TM	218/73 e 218/74	21/07/2006
LANDSAT 5/TM	218/73 e 218/74	21/09/2011

A classificação das imagens foi baseada na análise de regiões, obtidos por segmentação. A segmentação da imagem utilizou o método de crescimento de regiões, com limiar de 40 níveis radiométricos e área mínima de 50 pixels. Esse método permitiu que a imagem fosse dividida em um número de regiões

homogêneas, cada uma, identificada por um rótulo. O resultado desse processo foi uma imagem rotulada. Tendo como base essa imagem segmentada, foi aplicado o treinamento supervisionado usando o classificador Distância de Battacharya com um limiar de aceitação de 99%.

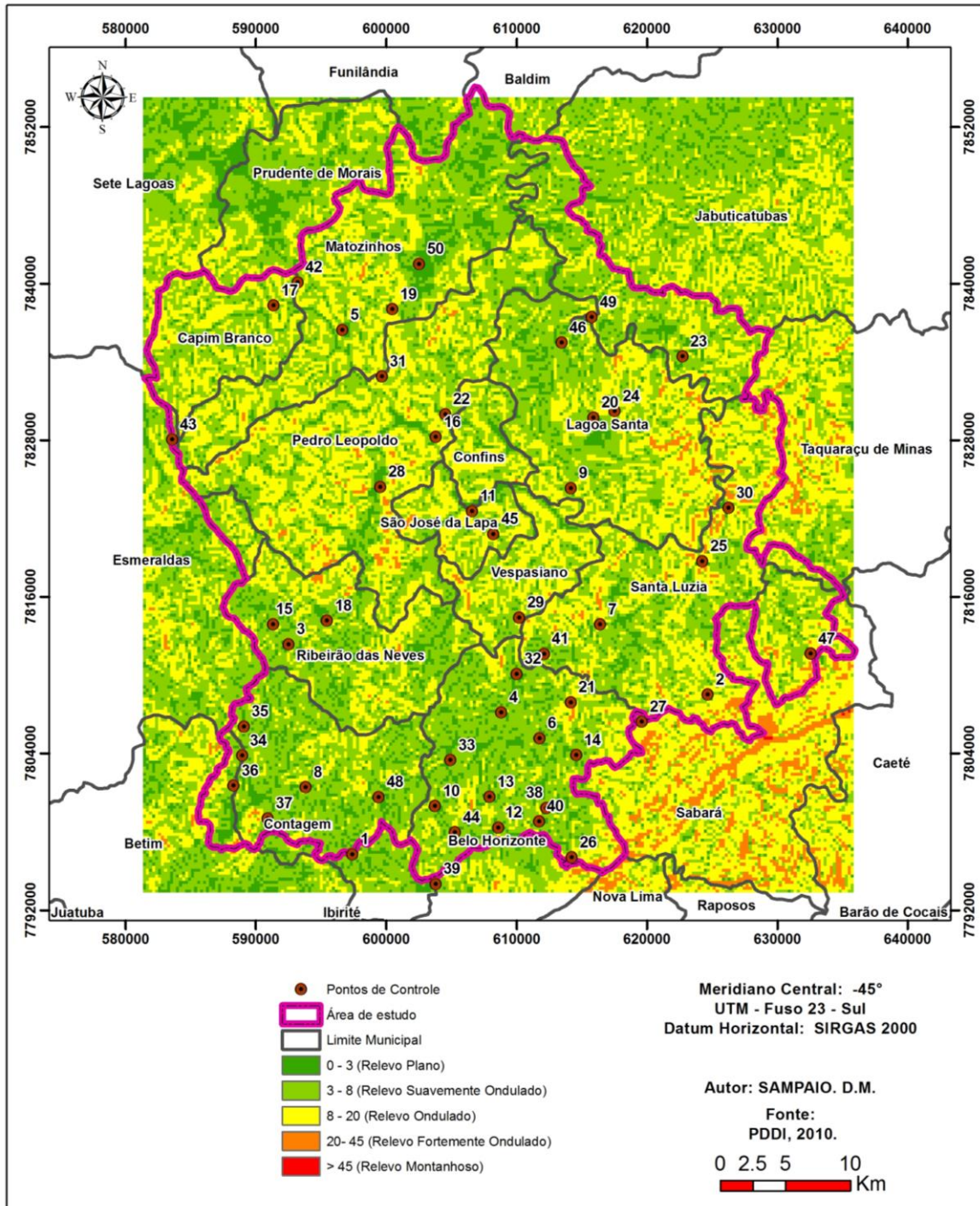


Figura 17: Pontos de controle na área de estudo.

Na pós-classificação foi realizada a edição vetorial dos polígonos classificados erroneamente com objetivo de corrigi-los. As referências utilizadas foram as imagens do satélite Ikonos disponibilizadas na base do *Google Earth* para os anos de 2001, 2006 e 2011, além de dados coletados em campo. Todo o trabalho de pré-processamento, e de classificação foi desenvolvido com o uso do programa SPRING, versão 5.1.8.

Considerando o objetivo da pesquisa, foram classificadas cinco classes de cobertura do solo: Água, Mancha Urbana, Vegetação de porte arbóreo, Vegetação de porte herbáceo e Outras coberturas do solo. A Tabela 3 apresenta a descrição dos alvos correspondentes às classes mencionadas.

Tabela 3: Descrição das classes de cobertura da terra.

Classe	Descrição
Água	Represas, lagos naturais e artificiais.
Mancha Urbana	Áreas de ocupação urbana, aglomerados, bairros, condomínios, comunidades.
Vegetação de porte Arbóreo	Vegetação arbórea. Fitofisionomias: Floresta Estacional Atlântica, Cerrados sensu strictu e capoeiras (formações secundárias).
Vegetação de porte Herbáceo	Vegetação predominantemente arbustiva e/ou gramíneo-lenhosa. Fitofisionomias: Campos naturais.
Outras coberturas do solo	Agropecuário, solo exposto, dentre outros.

5.1.2 Variáveis explicativas

A elaboração de um modelo de predição de mudança exige a seleção de variáveis adequadas representadas em escalas cartográficas apropriadas (VELDKAMP e LAMBIN, 2001). Neste sentido, realizou-se a seleção de vários dados espaciais disponíveis, que apresentam relação direta ou indireta com a expansão urbana horizontal. Os dados de informações espaciais foram organizados e compilados em um banco de dados aplicado no formato compatível ao do programa ARCGIS 9.3.

Os dados selecionados são: áreas com ocorrência de mudança de cobertura do solo entre 2001 e 2006, distância da mancha urbana de 2001 e distância da vegetação de porte herbáceo (dados trabalhados que foram extraídos da classificação das

imagens LANDSAT-5), densidade populacional e uso censitário (IBGE, 2002), número de ligações de energia elétrica, zoneamento de áreas com permissão de adensamento urbano, geologia para ocupação, distância de estradas existentes e distância de centros urbanos e comerciais já consolidados (MINAS GERAIS, 2011).

As áreas com ocorrência de mudança de cobertura do solo entre 2001 e 2006, foram elaboradas a partir do operador *Variable Transformation Utility* do aplicativo LCM. Este operador transforma as áreas categóricas em áreas quantitativas, determinando uma frequência relativa das áreas que sofreram mudanças de cobertura do solo nos períodos analisados. Assim, as áreas com baixa probabilidade de mudança são aquelas áreas já urbanizadas em 2001, as áreas com média probabilidade são os espaços não urbanizados em 2006 e as áreas com alta probabilidade de mudança, são aquelas situadas no entorno imediato dos espaços que sofreram alteração da cobertura do solo entre 2001 e 2006.

As variáveis ambientais, como, geologia para ocupação e distância da vegetação de porte herbáceo foram selecionadas por ser esperado que a expansão horizontal da mancha urbana tenha predileção por áreas sem riscos geológicos e que também não necessite de grandes supressões vegetais de porte arbóreo.

As variáveis originadas das intervenções antrópicas, tais como distância da mancha urbana de 2001, densidade populacional, uso censitário, número de ligações de energia elétrica, zoneamento de áreas com permissão de adensamento urbano, distância de estradas existentes e distância de centros urbanos e comerciais já consolidados, foram escolhidas devido ao poder de influência que estas variáveis têm com a mudança de cobertura do solo já ocorrida na área em estudo.

A inserção das variáveis no aplicativo de modelagem Land Change Modeler – LCM demandou um processamento nos dados de entrada para ajustá-los as referências espaciais e formatações compatíveis. No presente trabalho, os ajustes realizados foram: transformação dos dados para o formato raster, projeção cartográfica no sistema UTM, meridiano central -45° , Datum SIRGAS2000, reamostragem dos pixels

para a resolução espacial de 50m, e também o recorte espacial idêntico para que as imagens pudessem ter as mesmas quantidades de linhas e de colunas.

Com o objetivo de inserir algumas variáveis com os valores de uma distribuição próxima uma da outra foi realizado uma categorização das variáveis de distância de centros urbanos já consolidados e distância da vegetação de porte herbáceo. Esse procedimento analisou a frequência relativa dos pixels com valores distribuídos dentro da área de mudança de cobertura do solo observada nas imagens de 2001 a 2006. Após essa análise, é realizada a categorização dos valores de pixels para determinada classe. Por exemplo, a distância de um centro urbano consolidado que apresenta 100,57 metros passa a pertencer à categoria de 100 a 200 metros. Esse procedimento tem o objetivo de facilitar os cálculos necessários para construção do sub-modelo de potencial de transição da cobertura do solo. A categorização dos valores das variáveis foi realizada por ferramenta adequada do aplicativo LCM. Todas as variáveis utilizadas no modelo são apresentadas a seguir (Figura 18 a Figura 22).

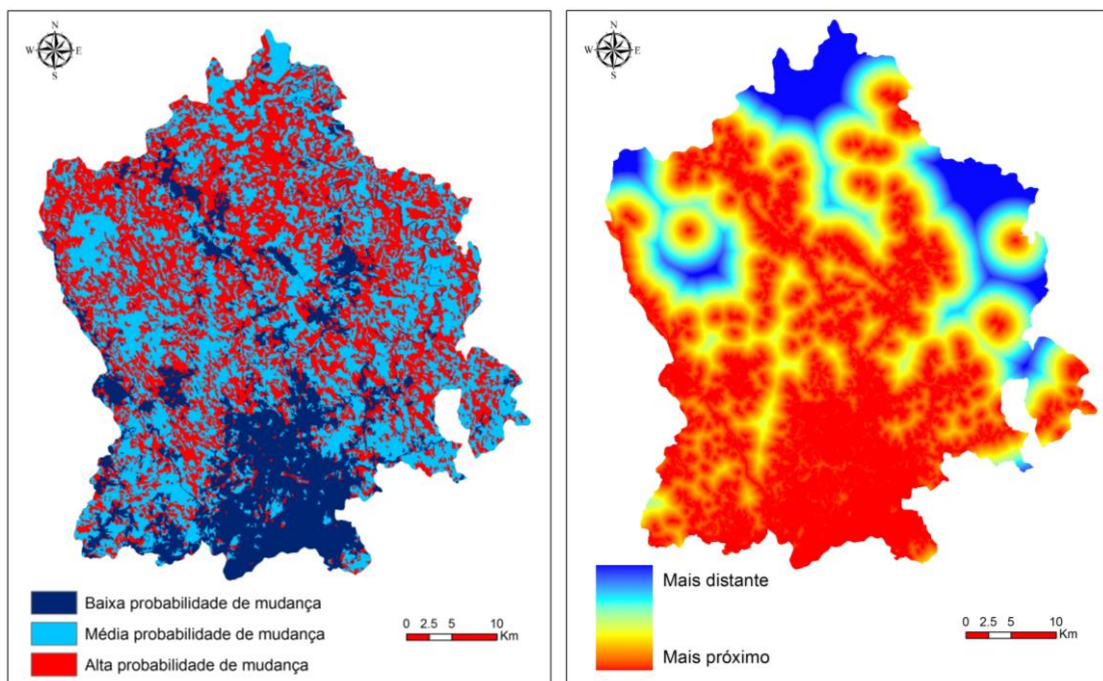


Figura 18: Áreas com possibilidade de ocorrência de mudança de cobertura do solo calculadas entre 2001 e 2006 e distância da mancha urbana de 2001.

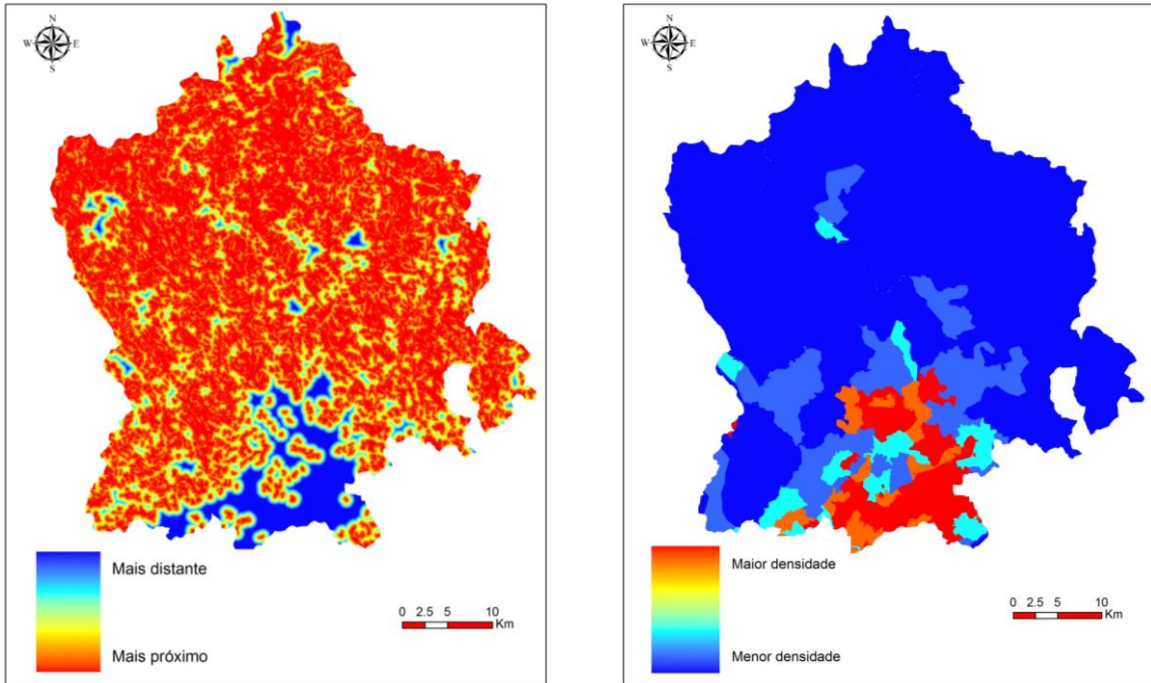


Figura 19: Distância da vegetação de porte herbáceo e densidade populacional.

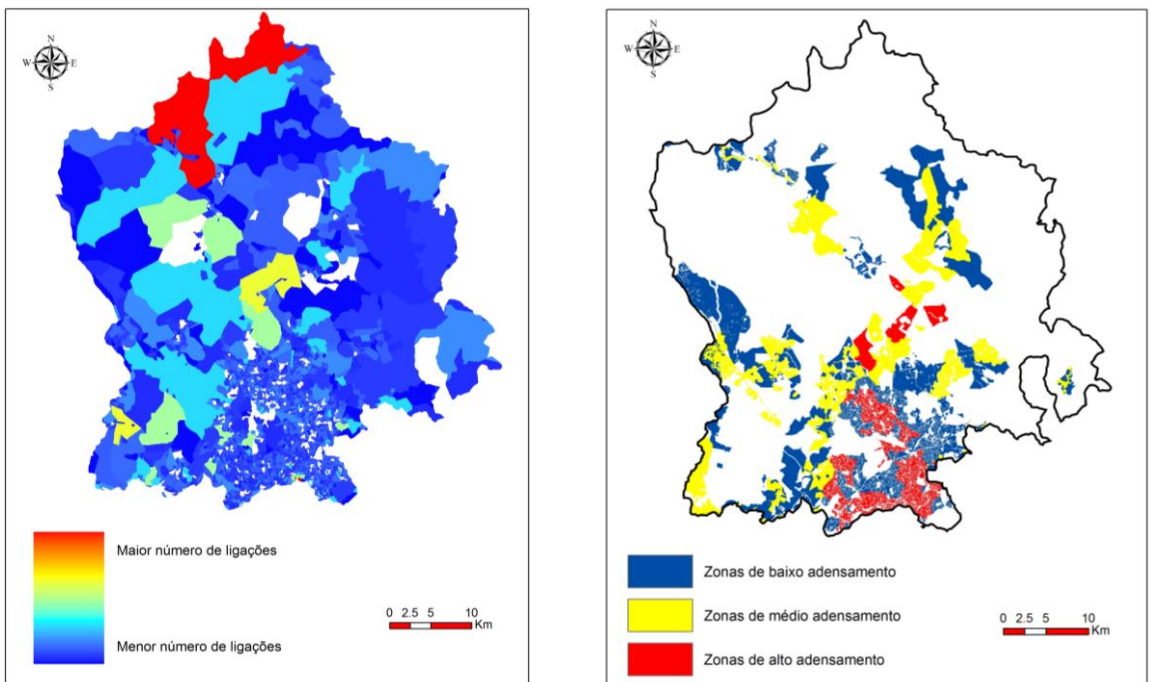


Figura 20: Número de ligações de energia elétrica registradas em 2000 e Zonas de baixo a alto adensamento urbano.

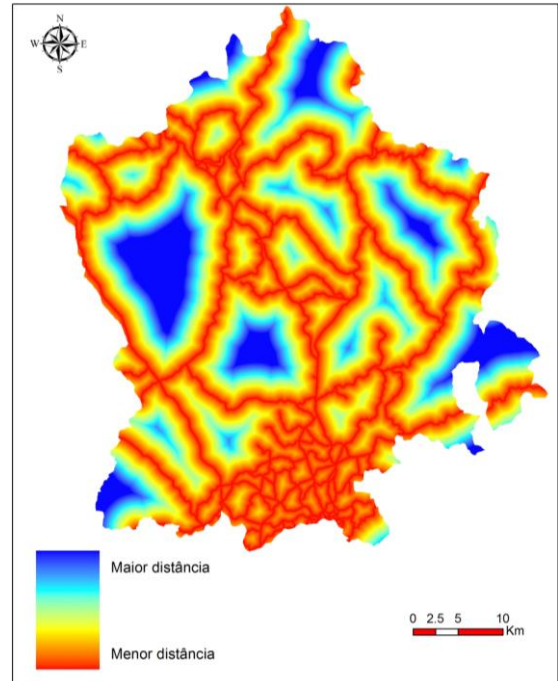
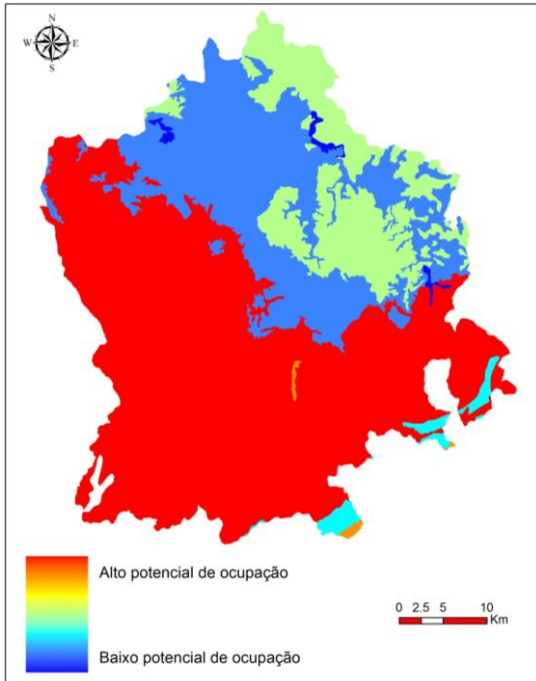


Figura 21: Geologia potencial para ocupação urbana e distância de estradas existentes.

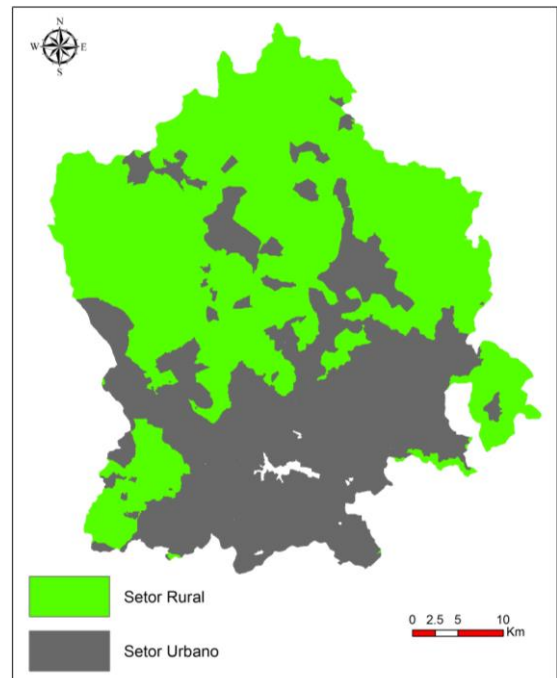
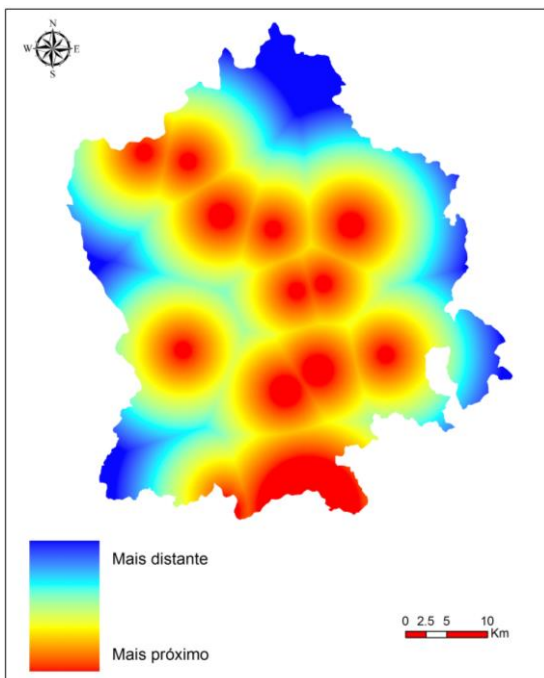


Figura 22: Distância de centros urbanos e comerciais já consolidados e uso censitário.

Antes de incluir as variáveis no modelo, são realizados testes para verificar o poder de explicação das mesmas em relação à expansão urbana horizontal. Nesta etapa as variáveis foram testadas segundo a estatística V de Cramer (ϕ), que avalia a associação entre duas variáveis nominais, baseada no teste do qui-quadrado, variando de 0 a 1, sendo 0 nenhuma associação e 1 totalmente associado. Na fase de teste V de Cramer as variáveis tiveram sua associação testada em relação à mudança de cobertura do solo urbano ocorrida entre 2001 e 2006. Para escolher as variáveis foram selecionadas inicialmente aquelas com maiores valor de V de Cramer e conseqüentemente, que atingiram o maior valor na elaboração do sub-modelo de transição MLP. Neste sub-modelo, independente do poder de explicação da variável é recomendado que o grupo selecionado deva atingir, no mínimo, um índice de relação superior a 80% para ser criado o mapa de potencial de transição de mudança (CLARK LABS, 2006).

5.2 Sub-Modelo de potencial de transição

Os sub-modelos de potencial de transição representam as probabilidades de mudança de uso, calculadas a partir do mapa de mudanças (de 2001 e 2006) e também considera a influência do conjunto de variáveis explicativas na alocação espacial das mudanças. O resultado desta etapa são os mapas de potenciais de transição que contêm as probabilidades de mudança calculadas para cada pixel.

Para elaborar o sub-modelo de potencial de transição, foi utilizada a rede neural. As redes neurais são modelos matemáticos baseados no conceito biológico de redes neurais humanas (GONZALEZ et al, 2011; EASTMAN, 2009). De acordo com Haykin (1999), isso significa que um conjunto de neurônios artificiais interconectados obtém uma determinada informação com o próprio sistema, a qual é então incorporada ou processada e posteriormente disponibilizada ao restante da rede. As conexões ou sinapses da rede correspondem aos elos de aprendizagem, e simulam o processo de aprendizagem desenvolvido no cérebro. Quando aplicada em um processo de tomada de decisão, como por exemplo, o que ocorre durante a classificação de imagens ou reconhecimento de padrões, as sinapses são alimentadas por cadeias

hierárquicas de dados de entrada e de saída, provendo mecanismos para criação de padrões de comportamento de resposta (AANSTOOS et al, 2009).

5.3 Modelo de previsão de mudança de estágio

Para a elaboração do modelo de previsão de mudança de estágio, foram introduzidos os mapas de cobertura do solo de dois períodos distintos t^1 e t^2 , para se obter o balanço de perdas e ganhos entre os usos de cobertura da terra entre 2001 e 2006 (*Change Analysis*).

Considerando a área de expansão urbana entre t^1 e t^2 , foi criado um mapa de tendência espacial da expansão urbana, através de uma superfície de interpolação com base em um polinômio (*Spatial Trend of Change*), com a finalidade de conhecer de forma generalizada, as regiões que poderão ter as maiores áreas urbanizadas. Depois de realizadas essas análises preliminares, foram incluídas as variáveis explicativas selecionadas de acordo com os critérios já destacados anteriormente (*Transition Sub-model Structure*). Seguindo o processo, foram estabelecidos os parâmetros para a execução da rede neural propriamente dita, onde o valor máximo dos pixels “mancha urbana” foram selecionados. Os parâmetros de treinamentos foram mantidos com os valores padrão, que correspondem ao erro médio quadrático (EMQ) 0,01, interações 10.000; e taxa de acurácia de 100% (Figura 23).

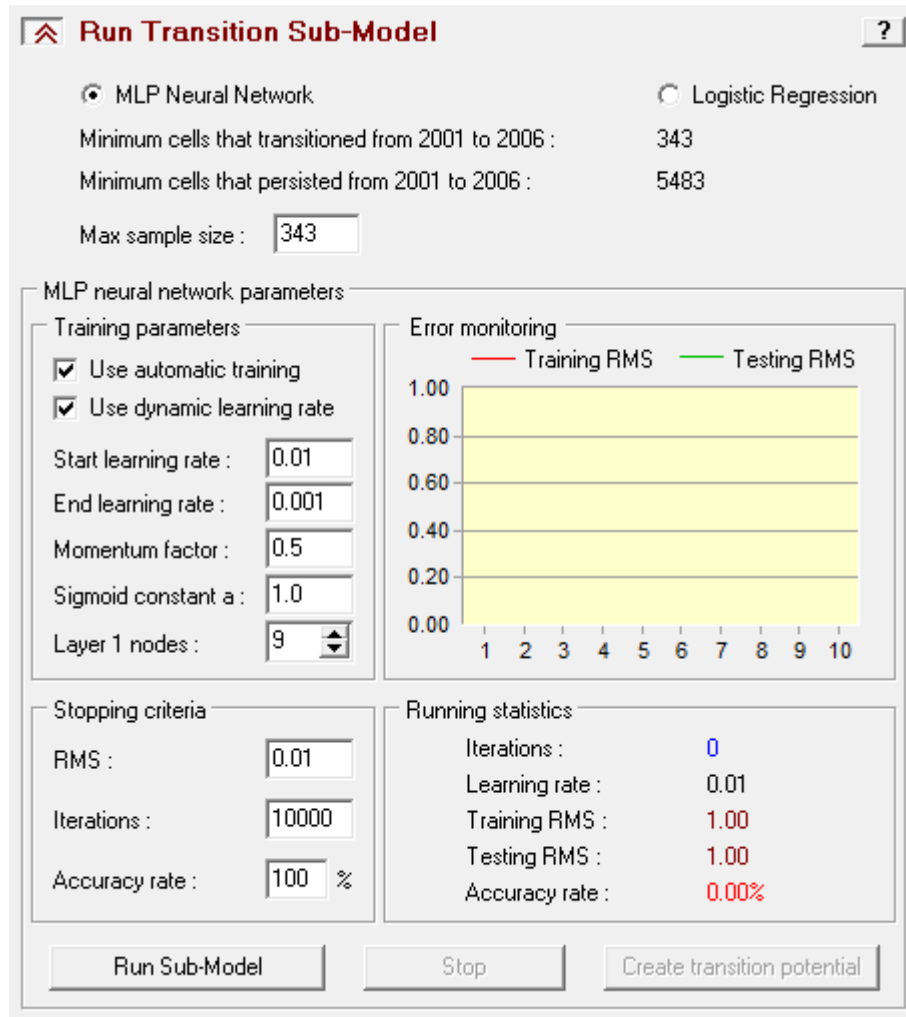


Figura 23: Painel de seleção dos parâmetros e critérios para finalização da rede neural do LCM.

Na sequência, foi executado o sub-modelo de transição de mudança (*Run Transition Sub-Model*) com os valores de critérios de finalização padrões do aplicativo. O produto gerado nesta etapa foi a imagem de Potencial de Transição, também conhecida por *soft prediction* (predição suave), a qual determinou a probabilidade que cada pixel tende a ser convertido de: diversas classes para o uso urbano. Para modelar as potencialidades de transição identificadas na rede neural, foi executada a Cadeia de Markov. A partir do valor identificado na Cadeia de Markov foi criada a projeção para o tempo conhecido t^3 (*Change Allocation*). Esse produto é a imagem final resultante do modelo que deve ser validada.

5.4 Validação

A etapa de validação é uma fase fundamental na análise dos modelos de predição de mudança de cobertura do solo por ser o processo capaz de verificar a validade ou não do modelo, ou mesmo de indicar onde o modelo deve ser melhorado.

Para a validação do modelo foi realizada a comparação dos mapas de cobertura do solo projetado e de cobertura do solo classificado, a partir das imagens de sensoriamento remoto, para o ano de 2011. Nesta etapa o mapa de cobertura do solo projetado foi subtraído em relação ao mapa de cobertura do solo obtido por sensoriamento remoto. Ambos os mapas correspondem a imagens matriciais, e a operação foi desenvolvida a partir do uso do operador *Minus*, o qual resulta na diferença entre os produtos. Depois dessa subtração foi possível identificar e classificar os pixels das imagens como acertos (valores igual à zero) e os erros (valores diferentes de zero). O resultado final foi reclassificado em acerto e erro. Desta forma, o percentual de ajuste do modelo foi obtido a partir dos cálculos das áreas de acerto em relação à área total da área em estudo.

5.5 Simulação do Cenário Futuro

Após validar o modelo, foram gerados os cenários de dez em dez anos até 2031. Esses cenários foram elaborados a partir da integração das taxas de transição e dos mapas potenciais de transição gerados, que informam a quantidade e a alocação espacial das mudanças a serem simuladas. Assim, estes cenários incorporam a tendência de urbanização observada entre os períodos das imagens, tendo como base para as projeções, a probabilidade de expansão da mancha urbana horizontal calculada pela cadeia de Markov. Considerando a inclusão de variáveis explicativas, restritivas, estimuladoras e obras viárias propostas, foram elaborados três cenários com características distintas.

O cenário 1 (um) representa a predição de mudança de cobertura do solo para o ano 2031, considerando apenas as Variáveis Explicativas na execução do modelo.

O cenário 2 (dois) também representa a predição de mudança de cobertura do solo para o ano 2031, porém além de incluir as Variáveis Explicativas, também leva em conta as Obras Viárias propostas na região em estudo.

O cenário 3 (três) representa uma análise completa para mudança de cobertura do solo para o ano 2031. Nesta etapa foram incluídas as variáveis explicativas, restritivas, estimuladoras e as obras viárias propostas.

Com objetivo de espacializar os efeitos da expansão urbana em relação às restrições legais e ações estimuladoras existentes na região em estudo, no cenário 3, foram utilizadas as funções *Constraints and Incentives* e a *Planned Infrastructure Changes* do LCM. A primeira função permite inserir no modelo variáveis que podem restringir ou estimular a expansão urbana horizontal na área em estudo. Neste trabalho foram consideradas as variáveis restritivas (unidades de conservação de uso integral e sustentável e as áreas com vocação a preservação dos cursos de água), as variáveis estimuladoras (eixo estruturador do rodanel, centralidades urbanas e comerciais propostas e distância de loteamentos com licença de implantação aprovada) e as obras viárias propostas (rodanel, anel viário norte, via 540, via norte sul, projetos VIURBS metropolitano e contorno norte e leste de Lagoa Santa), Figura 24 e Figura 25. A segunda função permite que o usuário insira no modelo uma determinada obra de infraestrutura considerando o ano que ela poderá influenciar o submodelo de Potencial de Transição.

Para inserir no modelo as variáveis restritivas e estimuladoras foi gerado um mapa de valores mínimos e máximos que atuam como multiplicadores para análise do modelo. Nesse mapa de restrições e estímulos o valor 1 não tem efeito. Números superiores a 1 atuam como incentivo (aumentam o potencial de transição), enquanto os multiplicadores menores que 1, atuam como restrições. Um multiplicador referente a 0 atua como restrição absoluta. O mapa das variáveis estimuladoras e restritivas representa as unidades de conservação existentes na área de estudo com proteção integral e sustentável cujos valores de multiplicadores aplicados respectivamente foram 0 e 0,02. Para as áreas com vocação a preservação dos cursos de água o valor aplicado foi 0. Para o eixo estruturador do rodanel, bem

como para as centralidades urbanas e comerciais propostas e distância de loteamentos com licença de implantação aprovada, o valor do multiplicador foi 2. A Tabela 4, apresenta o tipo de ação no modelo que cada variável restritiva ou estimuladora representa na área em estudo.

Tabela 4: Variáveis restritivas e estimuladoras para expansão urbana.

Nome da variável	Relação na modelagem de crescimento urbano	Tipo de ação no modelo
Unidades de Conservação com proteção integral e sustentável	Restritiva	Áreas inadequadas para ocupação urbana
Área com vocação a preservação dos cursos de água		
Entorno de loteamentos com licença aprovada	Estimuladora	Áreas com atuação do setor imobiliário
Eixo estimulador do Rodoanel		
Centros urbanos e comerciais propostos		

Para inserir no modelo a análise das infraestruturas de acessibilidades propostas na região em estudo (Figura 25), foi utilizada a função *Planned Infrastructure Changes*. No PDDI (MINAS GERAIS, 2011) são previstas a construção de novas vias estruturantes no Vetor Norte da RMBH, portanto, no modelo foram considerados o Rodoanel, a Via 540 e a Via Norte Sul com influência a partir de 2020, as Vias projetadas no VIURBS metropolitano e o Contorno Norte-Leste de Lagoa Santa com influência em 2023 e o Anel Viário Norte com influência para 2025. Vale destacar que a decisão destas datas de influência teve como base uma ampla pesquisa na mídia por meio de visitas aos sites que trazem as últimas decisões do governo frente à implantação das mesmas.

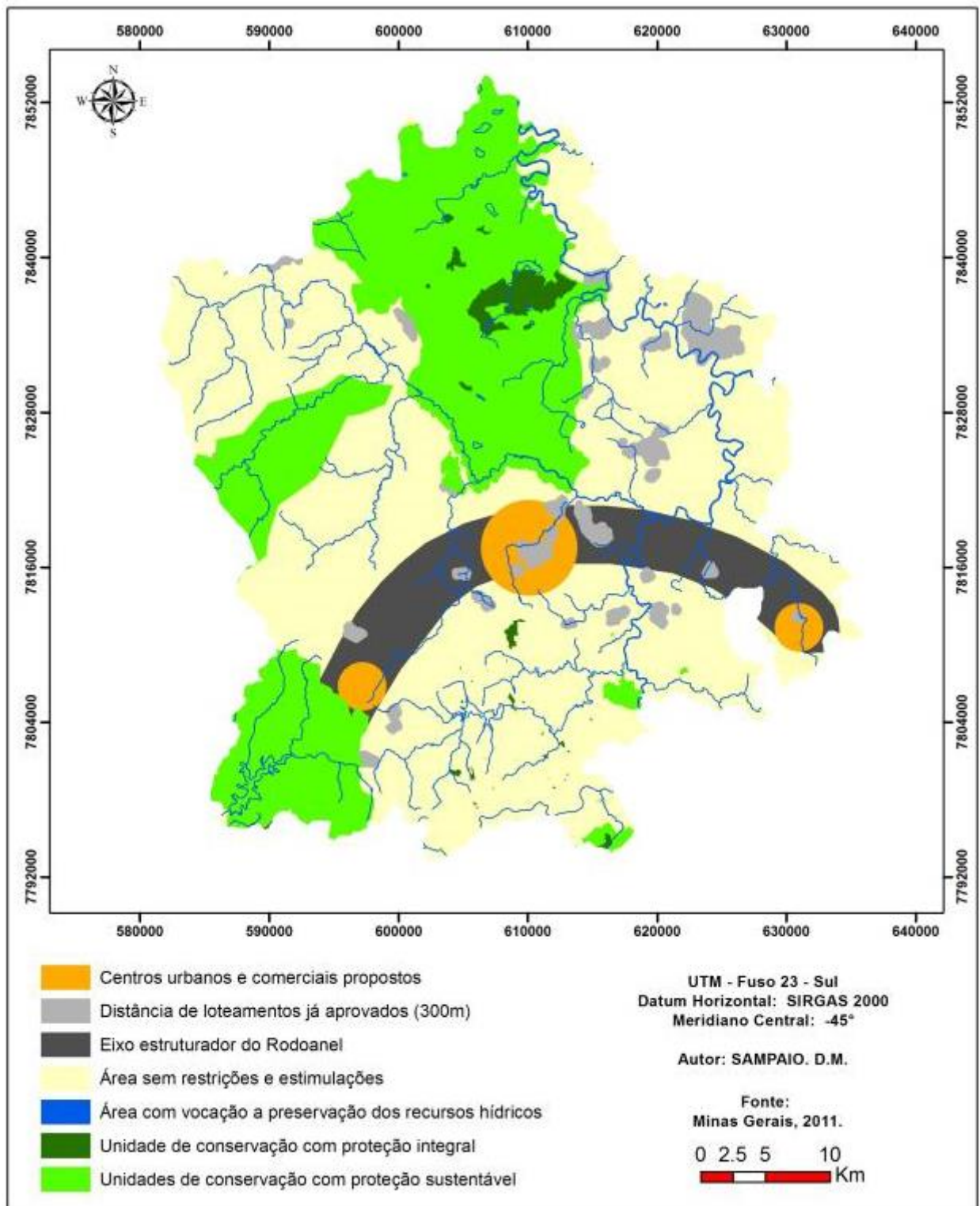


Figura 24: Variáveis restritivas e estimuladoras para expansão urbana.

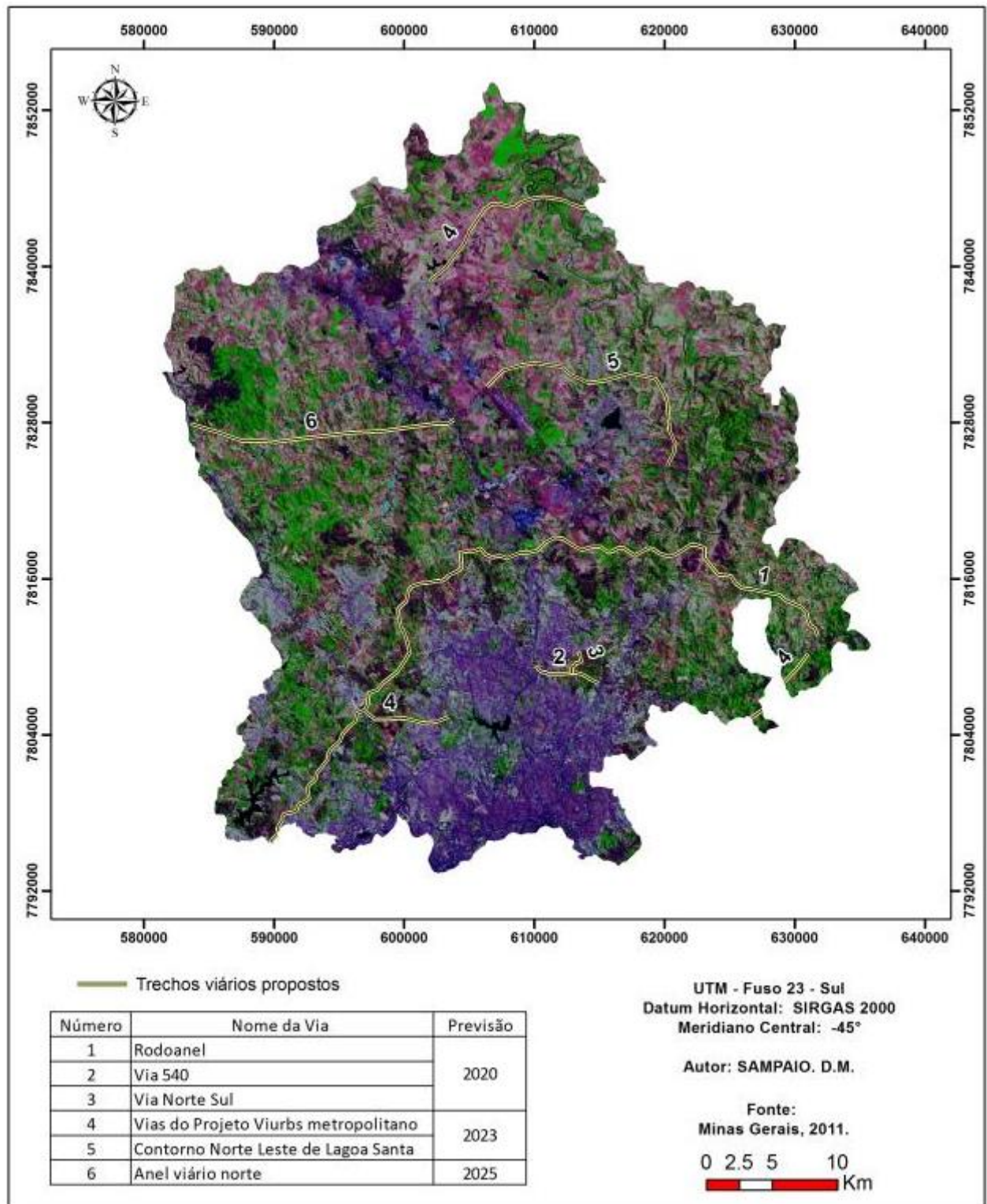


Figura 25: Trechos viários propostos na região de estudo.

6 RESULTADOS

6.1 Cobertura do solo

Os mapeamentos de cobertura do solo entre os anos 2001 e 2011 são apresentados nas Figura 26 a Figura 28.

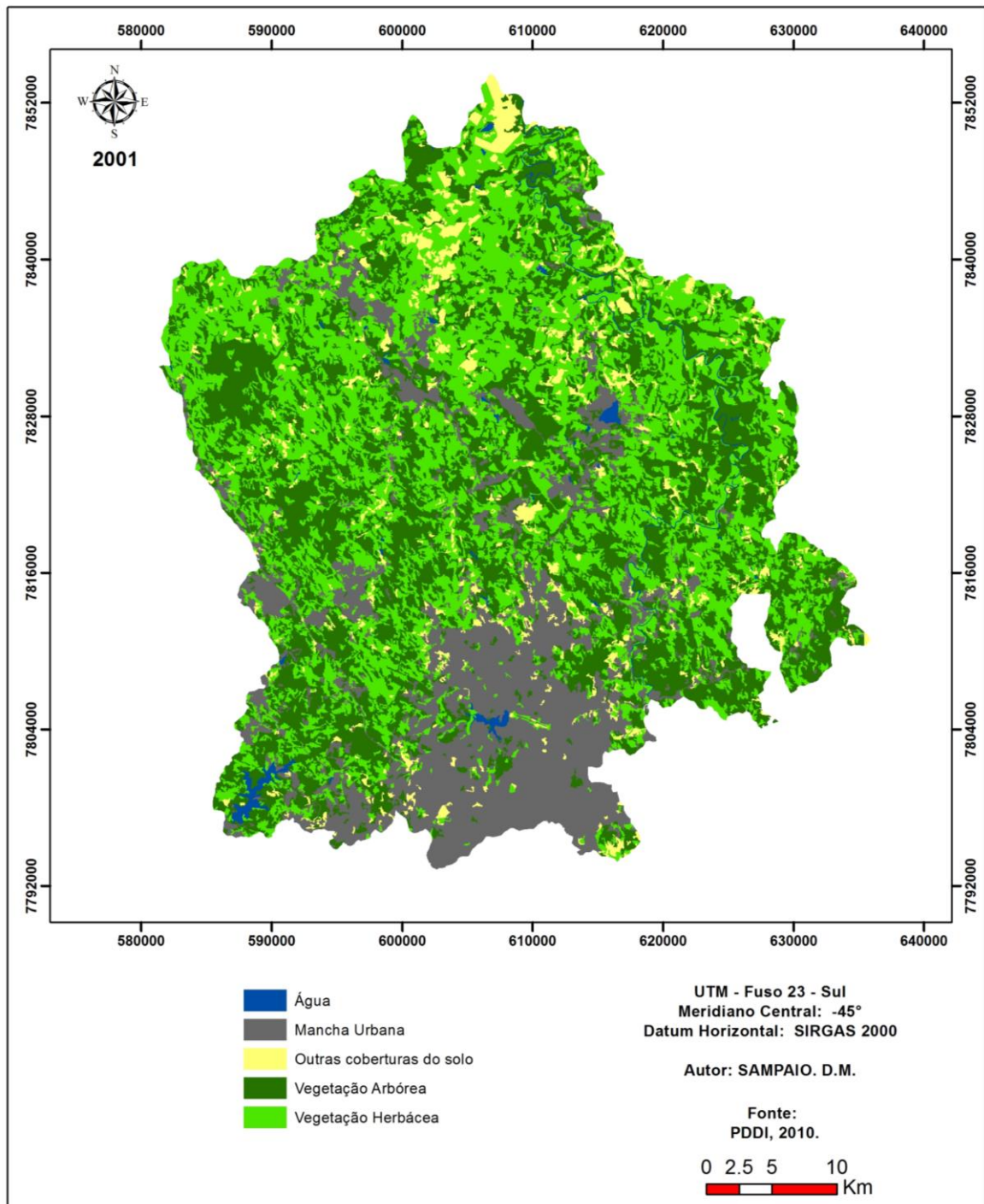


Figura 26: Mapa de cobertura do solo do Vetor Norte em 2001.

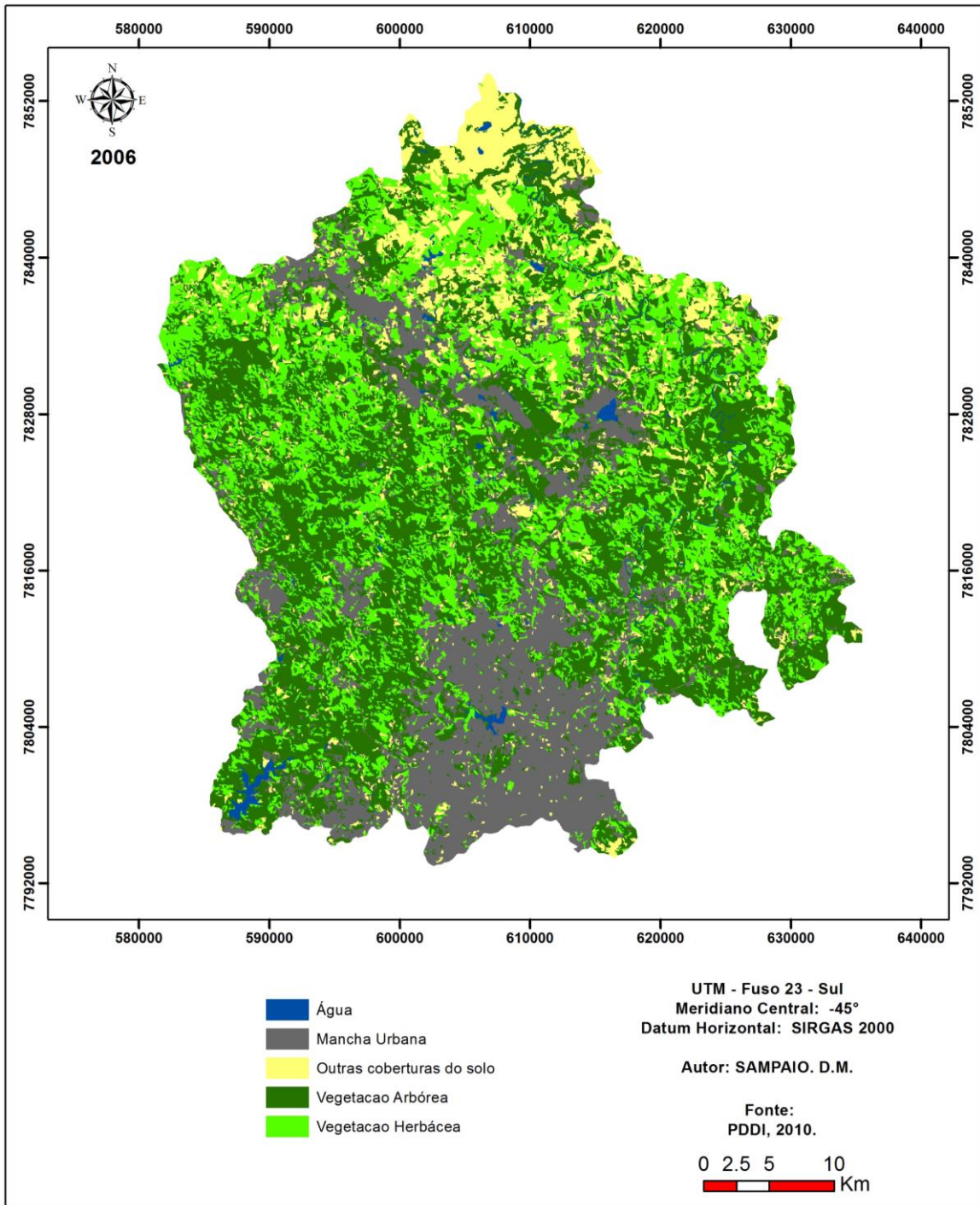


Figura 27: Mapa de cobertura do solo do Vetor Norte em 2006.

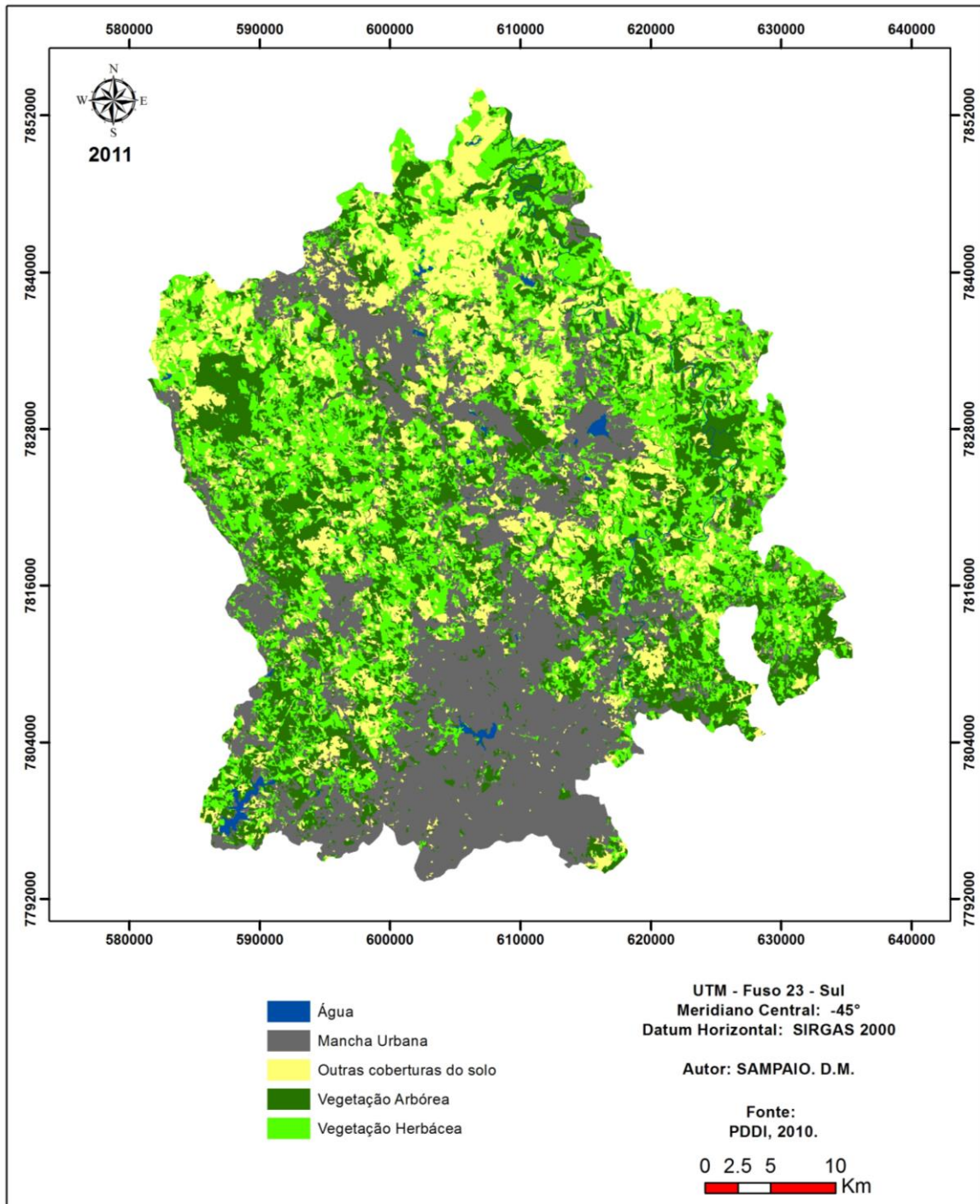


Figura 28: Mapa de cobertura do solo do Vetor Norte em 2011.

A Tabela 5, apresenta o cálculo das classes de cobertura do solo entre 2001 a 2011 para os anos estudados.

Tabela 5: Áreas das classes de cobertura do solo.

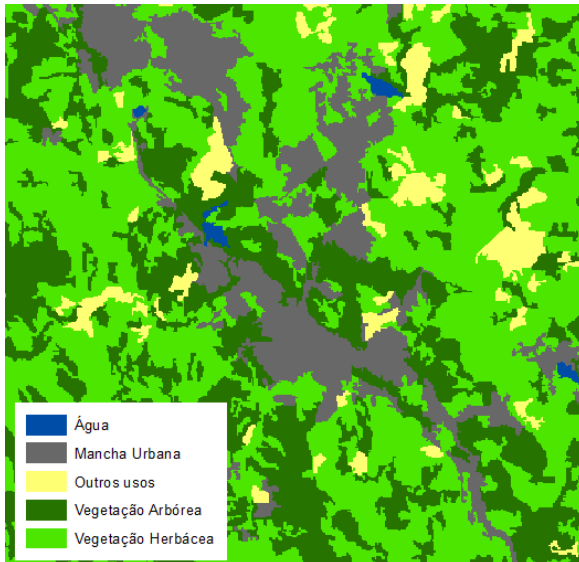
Classes	2001		2006		2011	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Água	2101.74	1.05	2385.02	1.19	2045.22	1.02
Mancha Urbana	37932.75	19.00	43371.64	21.73	57348.48	28.73
Outras coberturas do Solo	10994.97	5.51	20391.82	10.22	38162.36	19.12
Vegetação de Porte Arbóreo	70629.95	35.38	79815.87	39.98	47590.37	23.84
Vegetação de Porte herbáceo	77964.29	39.06	53659.37	26.88	54477.28	27.29
Totais	199623.71	100	199623.71	100	199623.71	100

De acordo com a Tabela 5, as classes de cobertura do solo predominantes na área de estudo são as áreas de: Vegetação de Porte Herbáceo, Vegetação de Porte Arbóreo e Mancha Urbana. No decorrer dos anos há aumento das áreas de Mancha Urbana e Outras Coberturas do Solo e diminuição de Água e Vegetação de Porte Arbóreo. Em 2001, a Vegetação de Porte Herbáceo representava 39,06% da área de estudo, a Vegetação de Porte Arbóreo recobria 35,38% e as Manchas Urbanas 19%. Em 2006, a Vegetação de Porte Herbáceo diminuiu 12,18%, enquanto as áreas com Vegetação de Porte Arbóreo e Mancha Urbana aumentaram 4,6% e 2,73% respectivamente. Em 2011, a Vegetação de Porte Herbáceo obteve um pequeno aumento de 0,46%, diferentemente da Mancha Urbana nesse período, que apresentou um aumento de 7%. A Vegetação de Porte Arbóreo teve uma diminuição significativa de 16,14%. Esses dados indicam que há uma relação de transição entre essas coberturas, visto que o aumento das áreas de Manchas Urbanas representa grande parte do valor da soma das áreas que sofreram uma redução da Vegetação de Porte Arbóreo.

A região que apresentou a maior redução da Vegetação de Porte Arbóreo e Herbáceo, seguida do aumento da cobertura Mancha Urbana, foi à porção noroeste da área de estudo. A Figura 29, apresenta a região central de Pedro Leopoldo, comparando o uso do solo em 2001 e 2011 e também as imagens de satélite dos respectivos anos. A proximidade dessa região as áreas urbanas já consolidadas,

pode explicar o crescimento urbano acelerado observado nessa região em intervalo de dez anos. Conforme abordado no item 4.3 deste relatório, essa mudança de cobertura do solo urbano apresenta uma correlação entre os pressupostos de expansão urbana para o Vetor Norte.

Uso do solo em 2001



Uso do solo em 2011

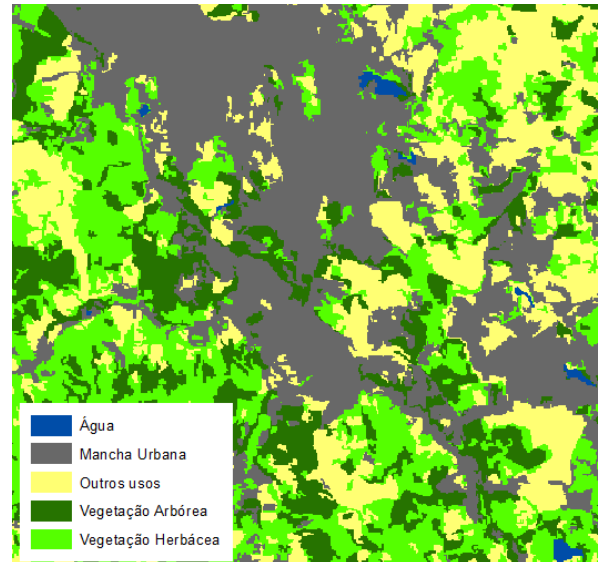


Imagem de Satélite de 2001



Imagem de Satélite de 2011

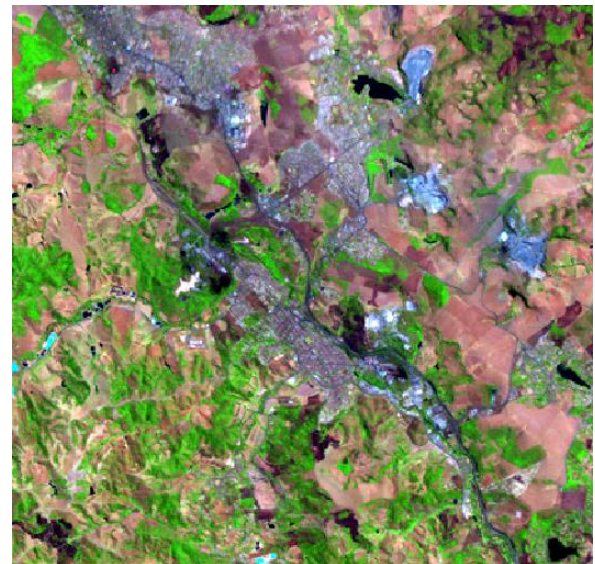


Figura 29: Região Central do Município de Pedro Leopoldo, onde foi observado um crescimento urbano acelerado.

6.2 Variáveis explicativas

De acordo com os critérios de potencial de explicação, baseadas na estatística V de Cramer (ϕ), as três variáveis testadas que apresentaram os valores mais baixos foram distância dos rios, eixos estruturadores existentes e declividade. Assim optou-se a retirada destas da modelagem, pois executando o modelo com elas não foi atingido um índice de ajuste acima de 80% para o sub-modelo potencial de transição. A variável áreas com possibilidade de ocorrência de mudança de cobertura do solo calculadas entre 2001 e 2006 apresentou o maior valor de explicação de 0,3741 (Tabela 6).

Tabela 6: Valores de Cramer (ϕ) testados

Variável	Cramer
Áreas com ocorrência de mudança de cobertura do solo entre 2001 e 2006	0,3741
Distância de centros urbanos e comerciais existentes	0,3532
Uso censitário	0,1853
Densidade populacional	0,1672
Zoneamentos metropolitanos de adensamento	0,1227
Centros urbanos e comerciais existentes	0,1195
Número de ligações de energia elétrica	0,1150
Geologia para ocupação urbana	0,1059
Distância da mancha urbana 2001	0,1029
Distância de estradas	0,0553
Declividade	0,0437
Eixos estruturadores existentes	0,0387
Distância dos rios	0,0335

6.3 Modelo de mudança da cobertura de solo urbano

A partir do cruzamento dos mapas de cobertura do solo datados respectivamente em 2001 e 2006, foi elaborado o mapa das áreas onde ocorreu a expansão urbana no período (Figura 30).

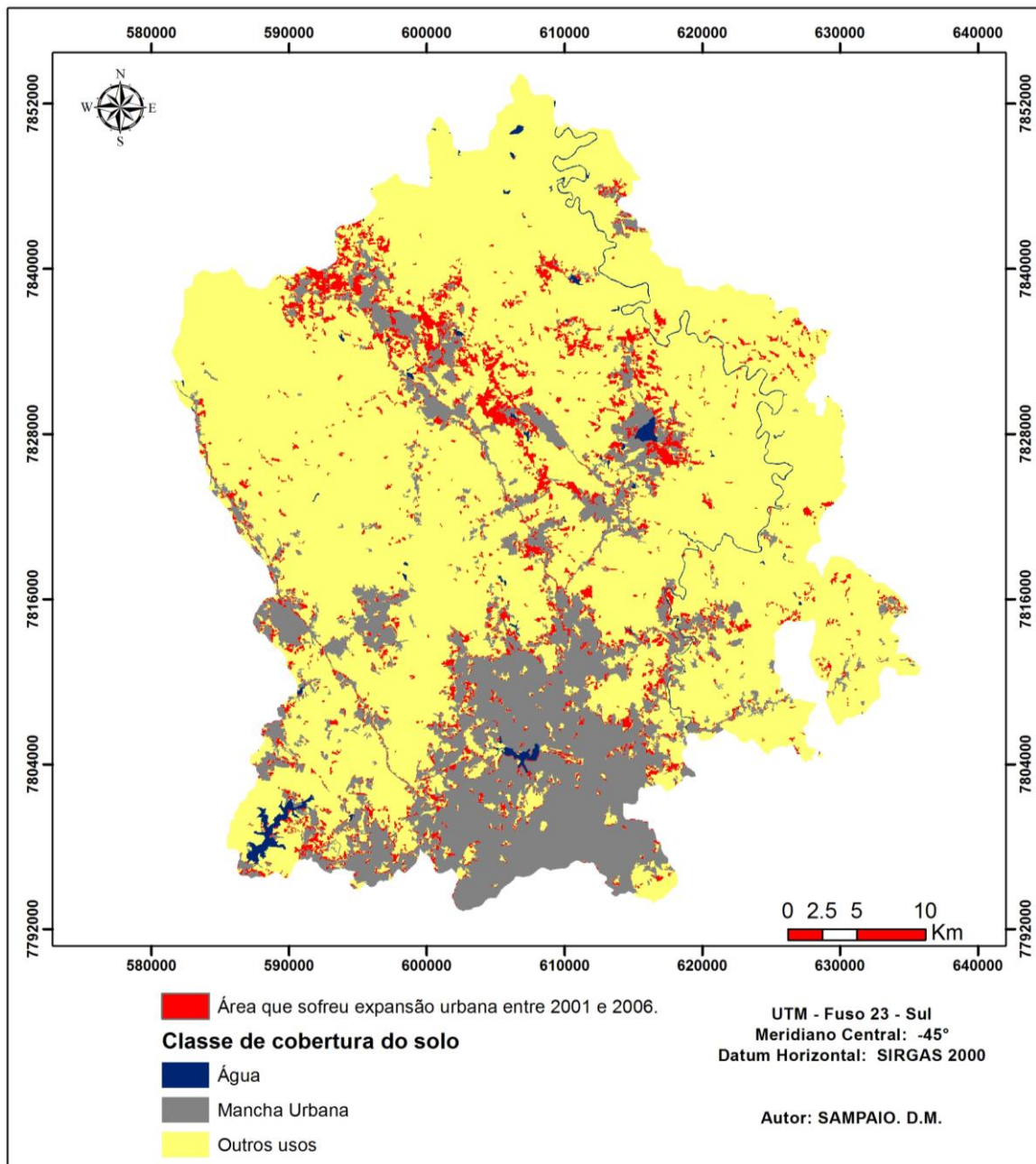


Figura 30: Áreas que sofreram expansão urbana entre 2001 e 2006.

Considerando os dados das áreas que sofreram expansão urbana entre 2001 e 2006, foi gerado mapa da tendência espacial a expansão urbana. Conforme

observado na Figura 31, os tons de vermelho representam as áreas com maior tendência a sofrer expansão urbana e as áreas verdes as menores tendências.

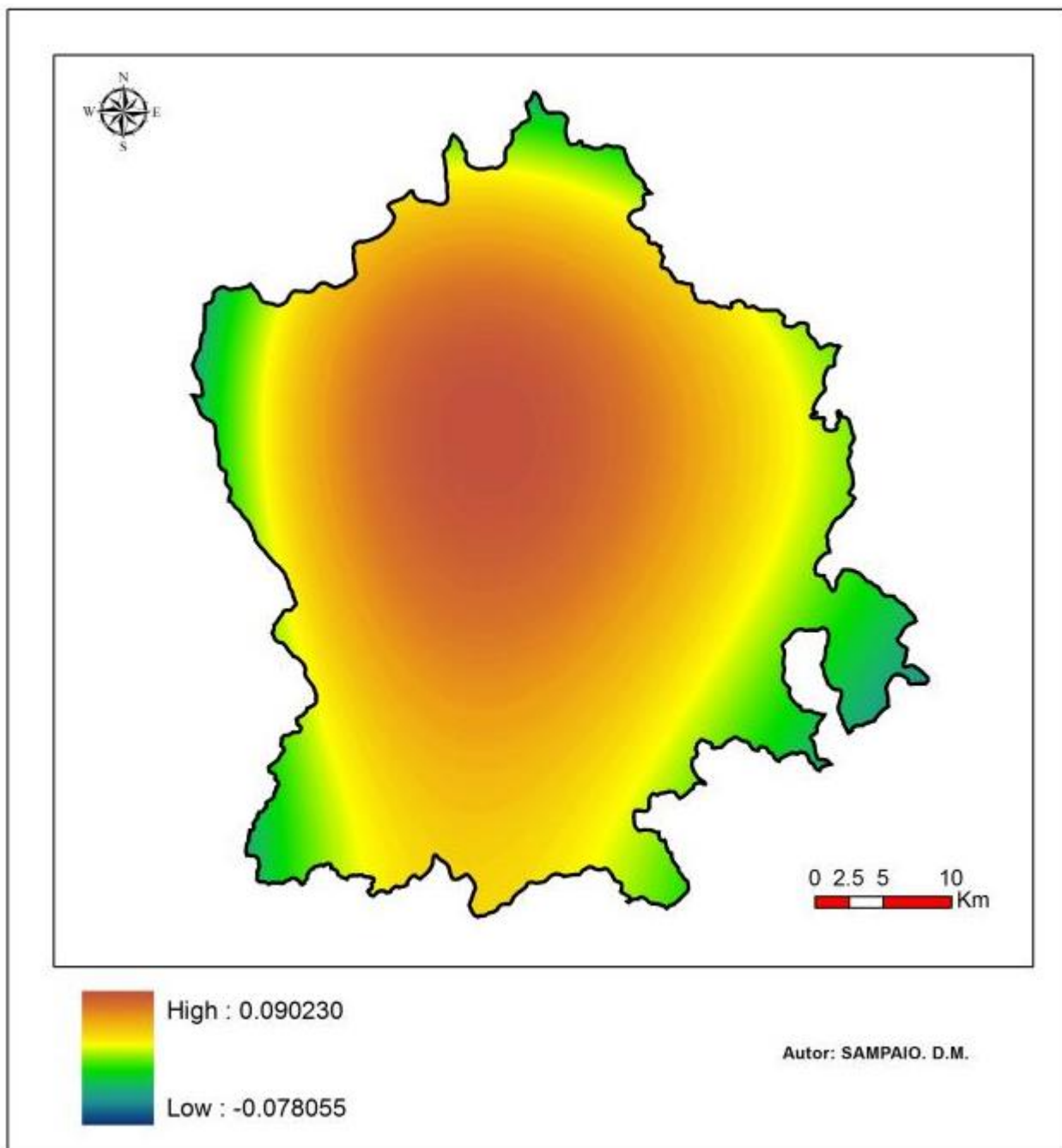


Figura 31: Áreas com tendência a expansão urbana.

Com as variáveis explicativas definidas, o modelo foi executado (*Run Transition Sub-Model*), e resultou em uma modelagem com taxa de acurácia de 82,61% (Figura 32).

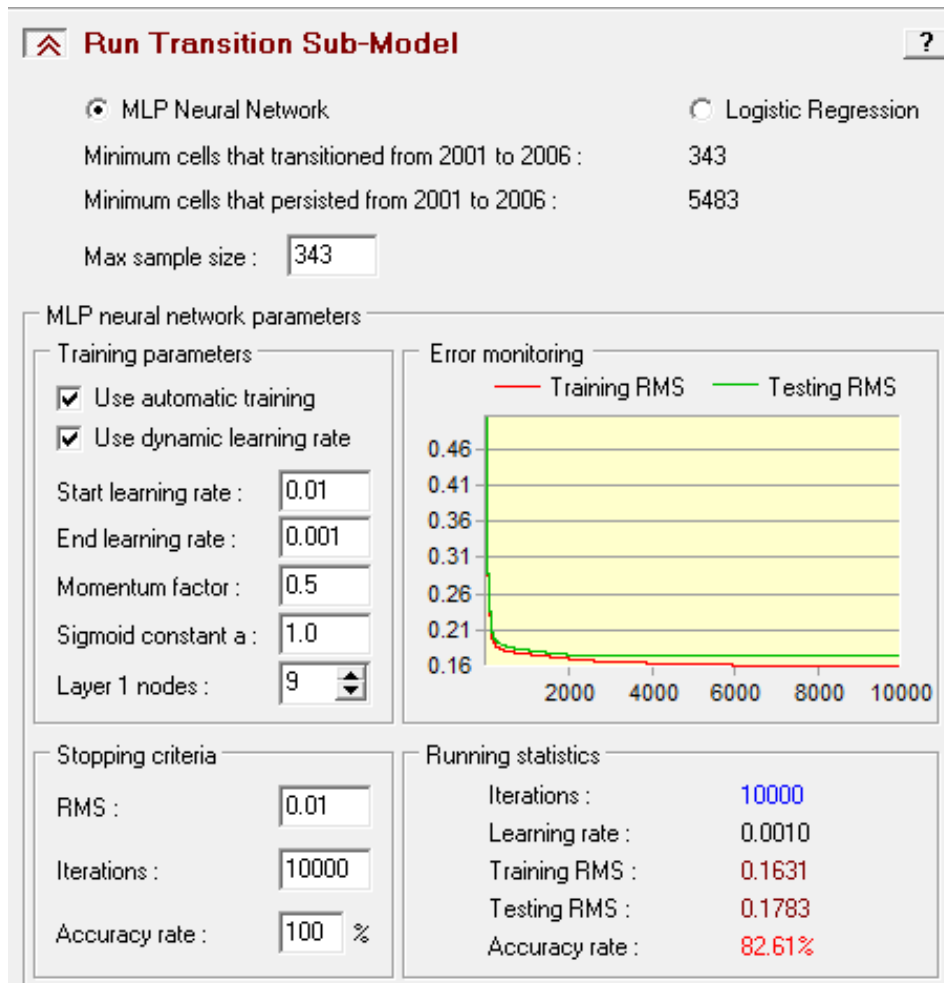


Figura 32: Painel de execução do sub-modelo (*Run Transition Sub-Model*) e taxa de acurácia final.

O produto da execução do sub-modelo foi o mapa de potencial de transição, representando em tons de vermelho as áreas com maiores chances de se tornarem urbanas (*soft prediction*) e em tons de azul, as áreas com menores chances de serem urbanizadas em 2011 (Figura 33). Logo depois, foi elaborado o mapa simulado para 2011, apresentado na Figura 34.

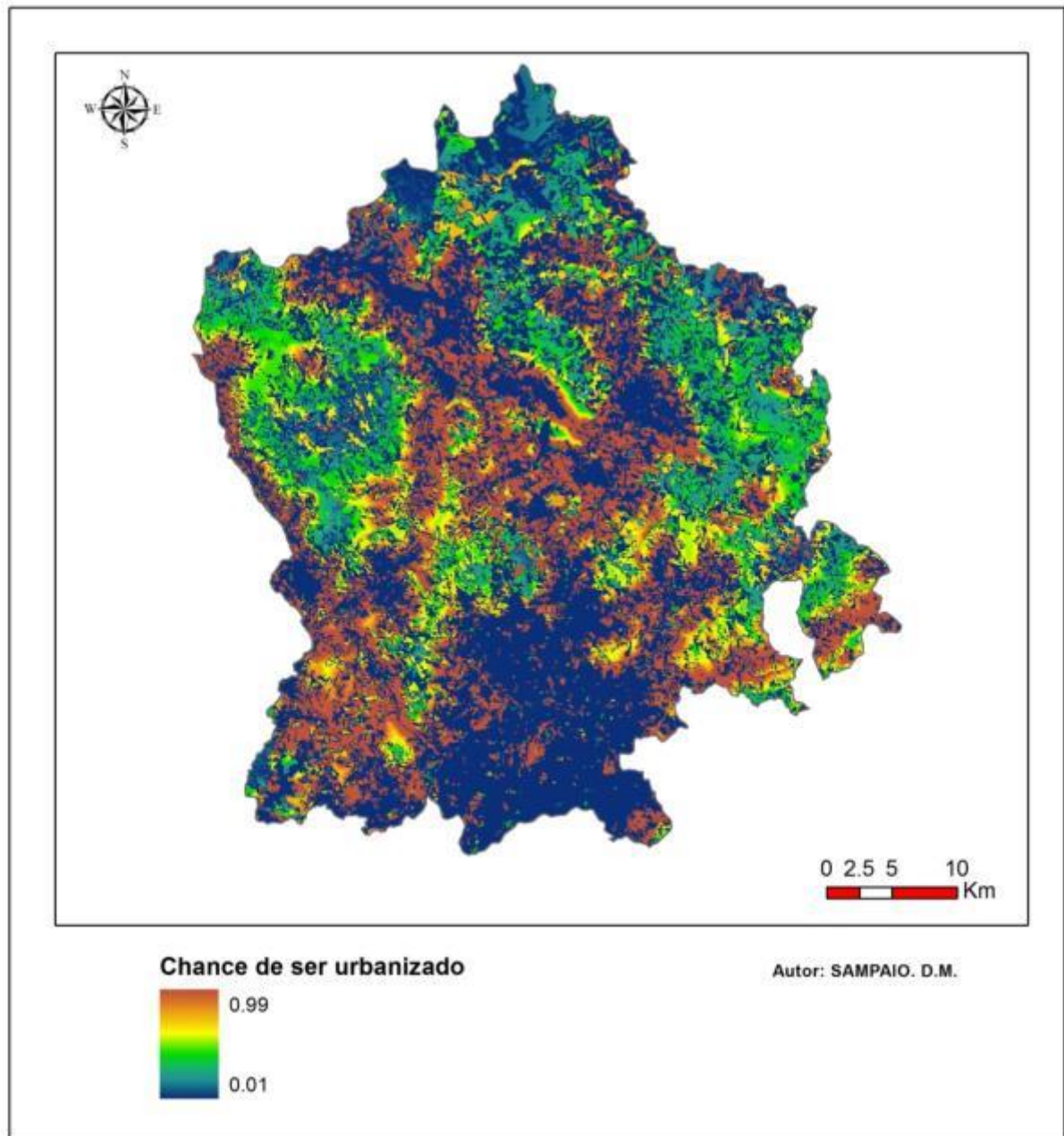


Figura 33: Potencial de transição das classes não urbanas para mancha urbana em 2011.

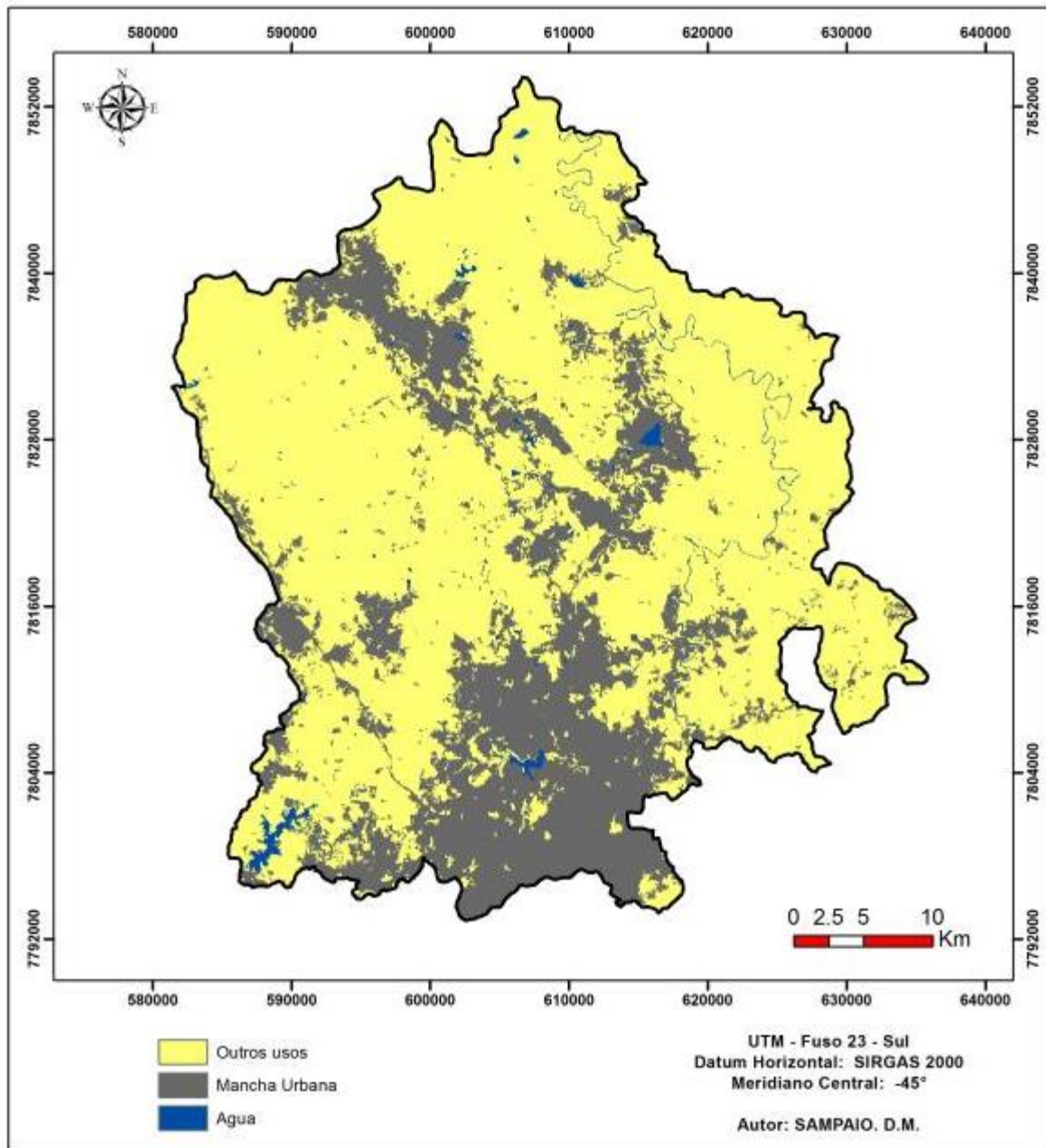


Figura 34: Mapa de cobertura do solo simulado para 2011.

6.4 Validação

Como a finalidade de avaliar se o modelo é condizente com o mapa de cobertura do solo projetado, em relação à distribuição das classes, foram calculados os pixels da imagem simulada e a imagem de referência (obtida da classificação das imagens de sensoriamento remoto) para 2011. O resultado indicou que a classe simulada, que

apresentou um mapeamento equivalente à classe classificada (acertos), representaram 92,60%, contra 7,40% de classes simuladas em inconformidade com a classe classificada (erros de comissão). As Figura 35 e Figura 36, indicam que o resultado foi satisfatório entre as duas imagens comparadas. A partir desse resultado, considerou-se que o LCM estava calibrado para trabalhar os cenários de expansão urbana futuros.

Uso Classificado 2011 – Vetor Norte

Uso projetado 2011 – Vetor Norte

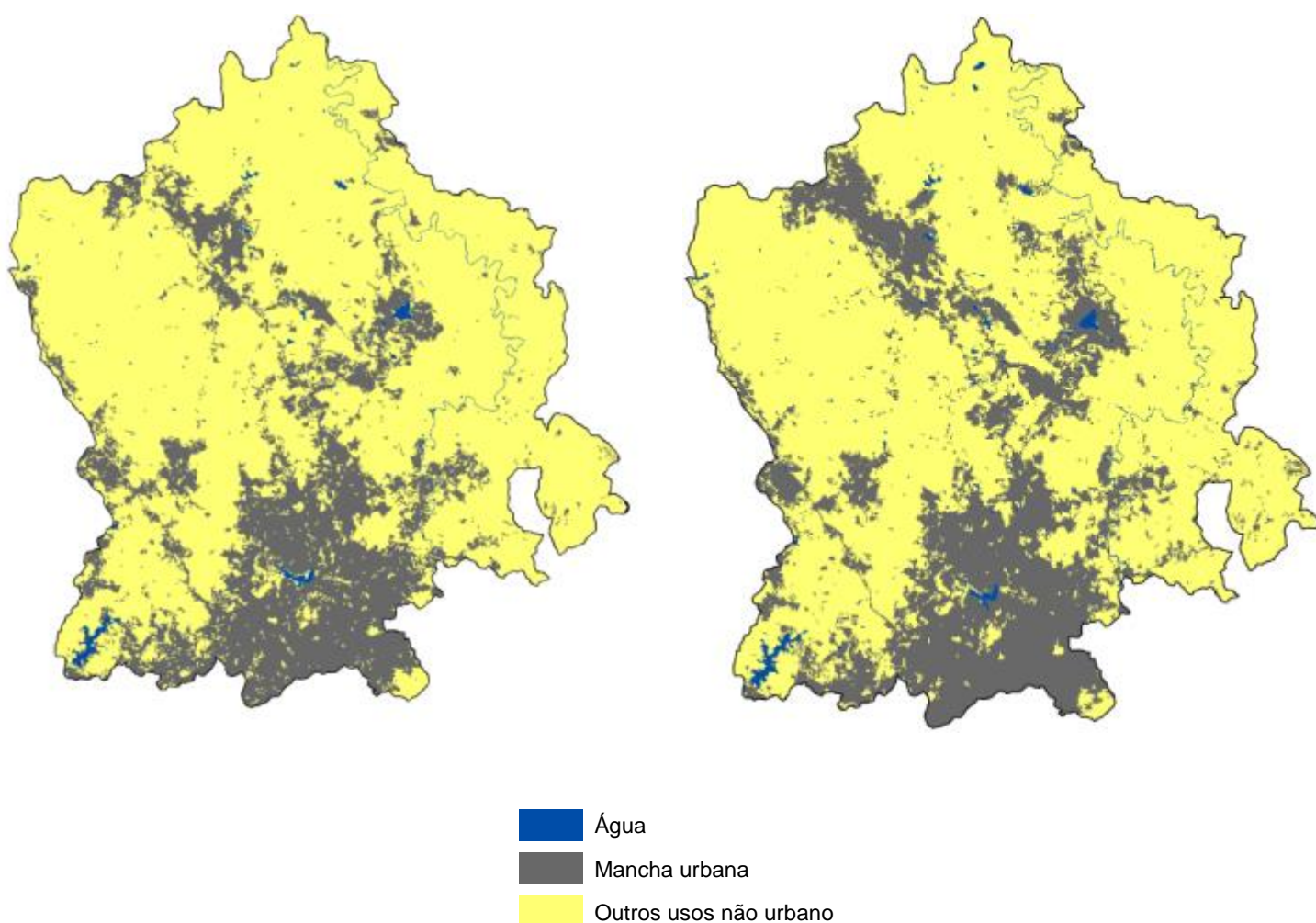
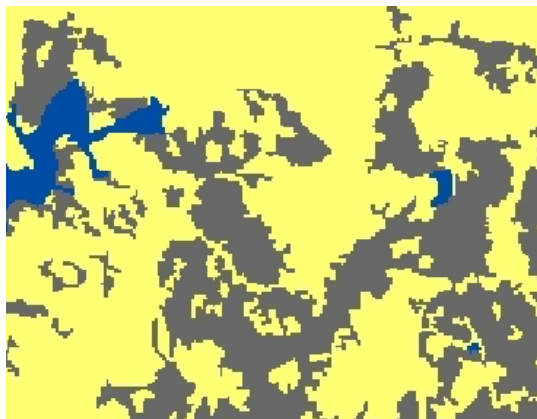


Figura 35: Comparação dos mapas de cobertura do solo urbano classificado e simulado para 2011, no Vetor Norte da RMBH.

Cobertura classificada 2011 – Detalhe



Cobertura simulada 2011 – Detalhe

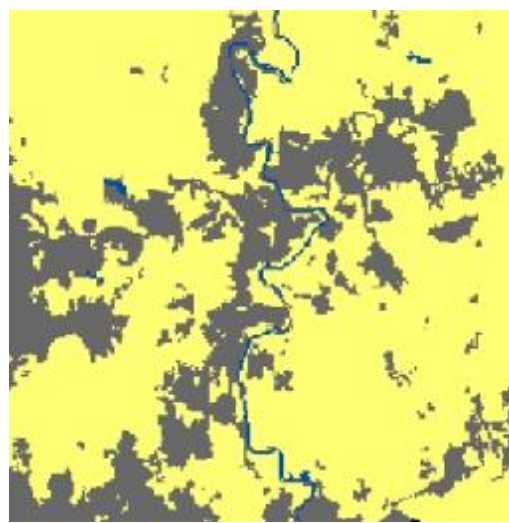
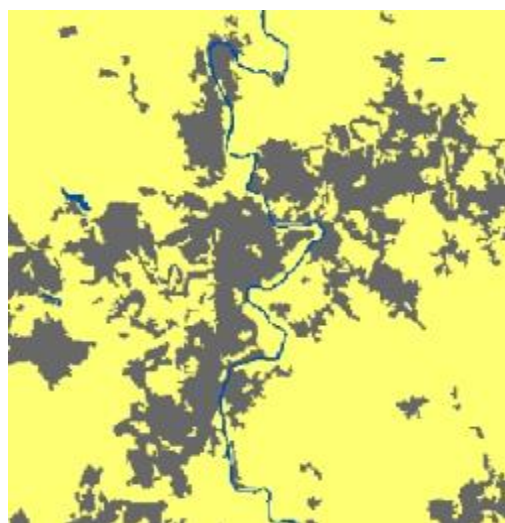
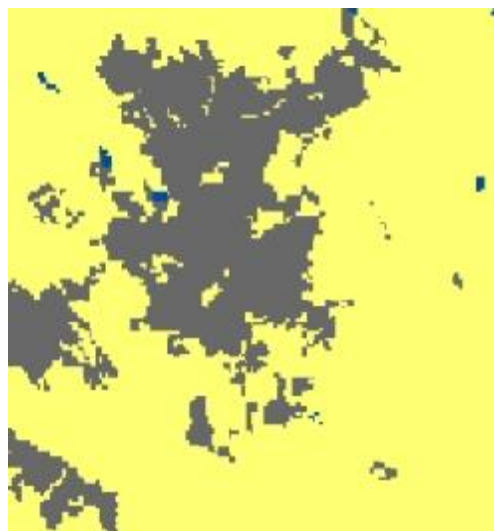
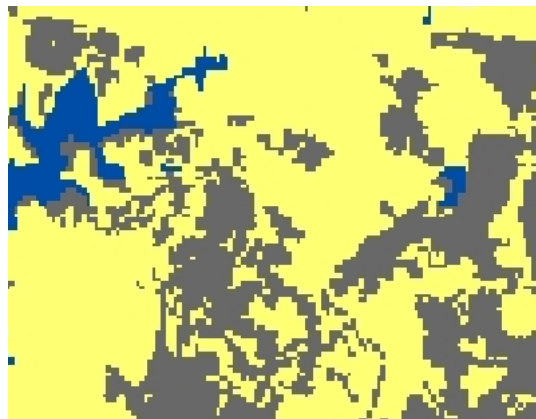
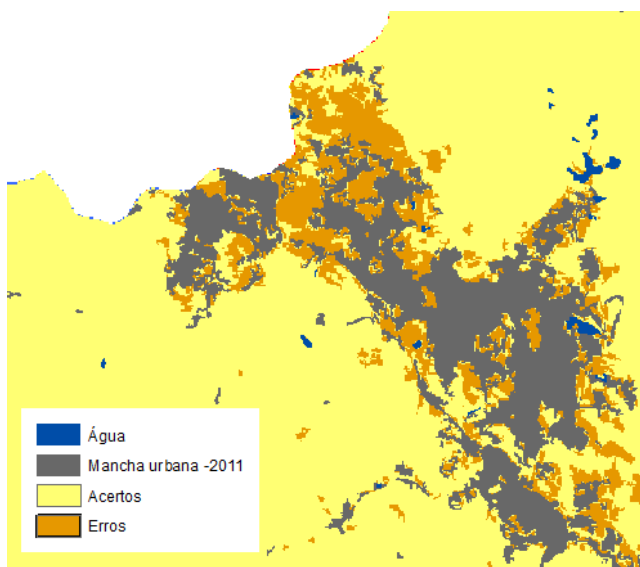


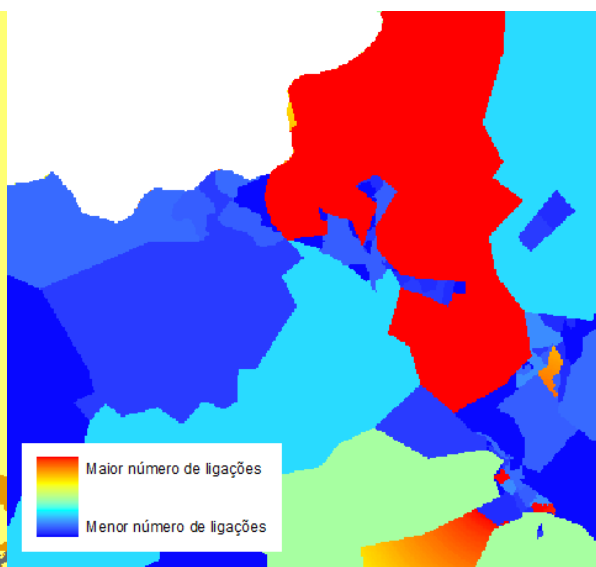
Figura 36: Detalhes da cobertura do solo urbano simulado e classificado para 2011, no Vetor Norte da RMBH.

A porção noroeste da área de estudo representa a região com maior concentração de erros de comissão. Nos estudos de modelagem dinâmica da cobertura do solo esses erros podem estar relacionados a problemas nas classificações das imagens de satélite ou na influência das variáveis explicativas exercidas no modelo. Conforme apresentado Figura 37, comparando essa região com as variáveis explicativas utilizadas neste trabalho, verifica-se que este setor concentra as menores distâncias de centros urbanos e comerciais existentes e o maior número de ligações de energia elétrica, que apresentaram um considerável índice de associação baseado no teste V de Cramer. Esses dados indicam que os erros de comissão aqui verificados podem ter sido induzidos pelas variáveis explicativas supracitadas.

Erros e acertos 2011



Variável Ligação de energia



Variável distância dos centros

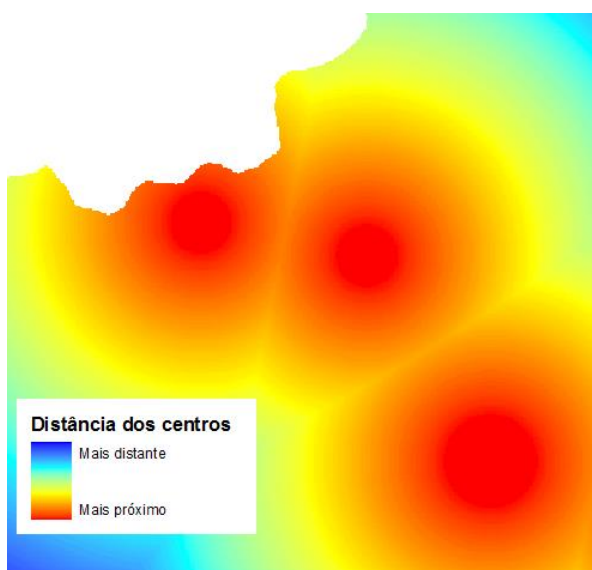


Imagem de Satélite de 2011

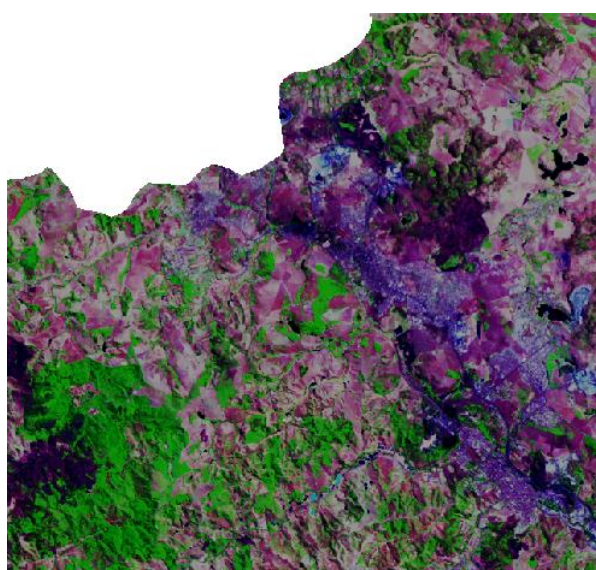


Figura 37: Porção Noroeste da área de estudo, onde se verificou erros de comissão.

6.5 Cenários futuros

De acordo com a metodologia proposta, foram elaborados três diferentes cenários para simular a cobertura do solo urbano para o ano de 2031. O cenário 1, incorpora a tendência de urbanização preditiva, considerando na modelagem a influência das variáveis explicativas selecionadas, Figura 38.

O cenário 2, incorpora a tendência de urbanização preditiva, considerando na modelagem, a influência das variáveis explicativas selecionadas e as obras viárias propostas no Vetor Norte, Figura 39.

No cenário 3, foram inseridas no modelo, as variáveis explicativas, variáveis restritivas (Unidades de conservação de uso integral e sustentável e áreas com vocação a preservação dos cursos de água), as variáveis estimuladoras (eixo estruturador do rodoanel, centralidades urbanas e comerciais propostas e distância de loteamentos com licença de implantação aprovada) e as obras viárias propostas (rodoanel, anel viário norte, via 540, via norte sul, projetos VIURBS metropolitano e contorno norte e leste de Lagoa Santa), Figura 40.

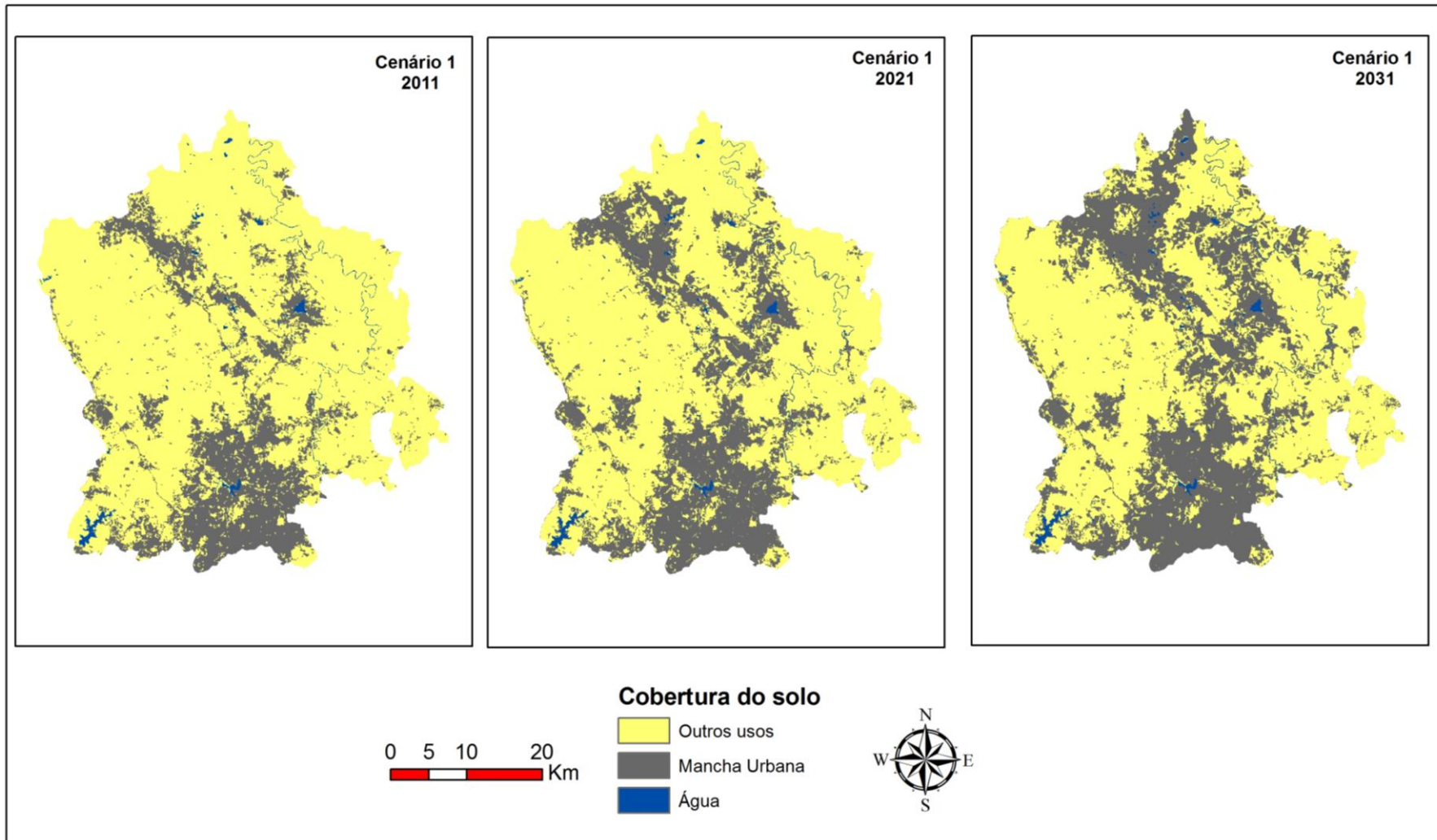


Figura 38: Mapas dos cenários 1 projetados respectivamente para 2011, 2021 e 2031.

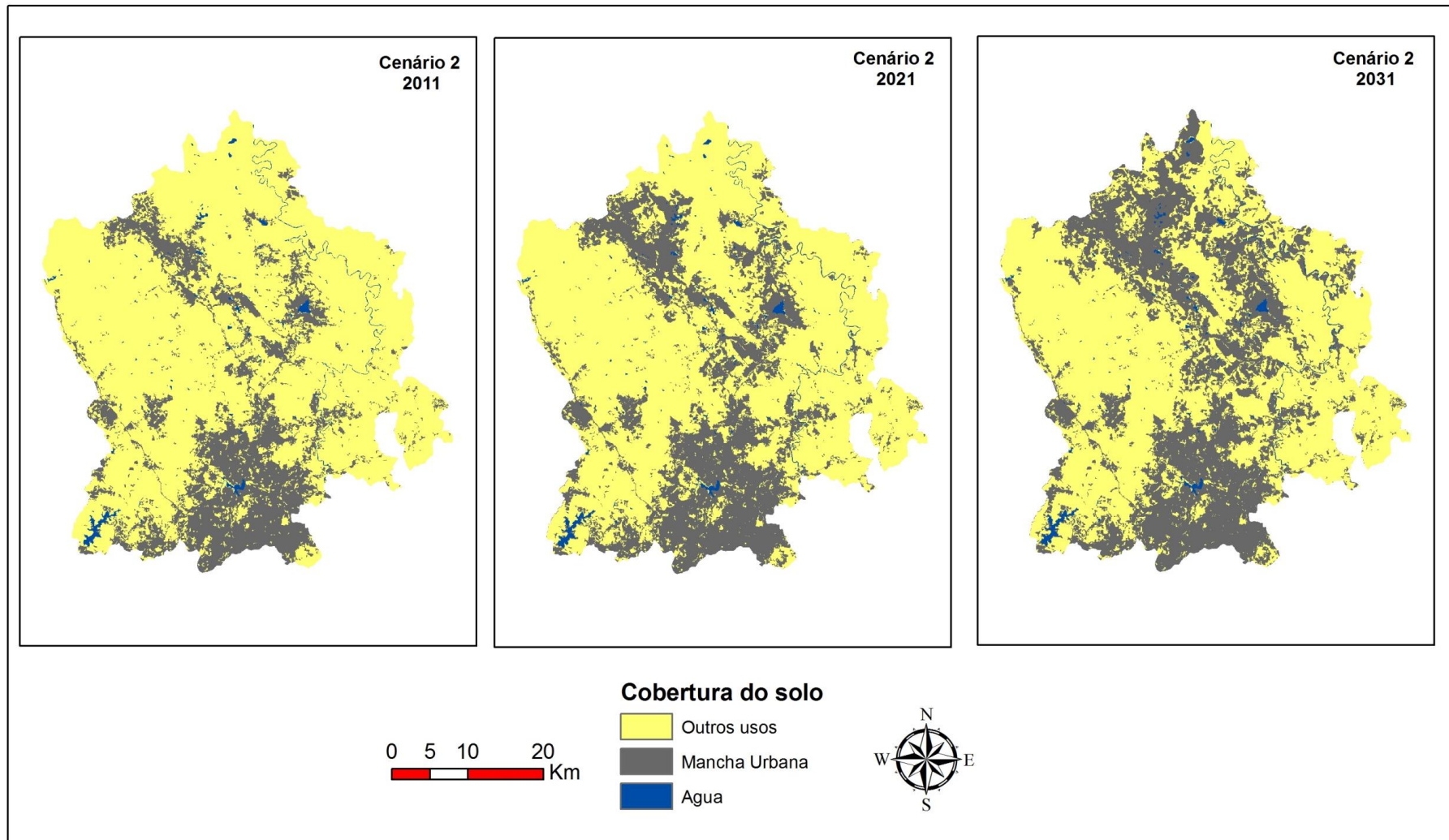


Figura 39: Mapas dos cenários 2 projetados respectivamente para 2011, 2021 e 2031.

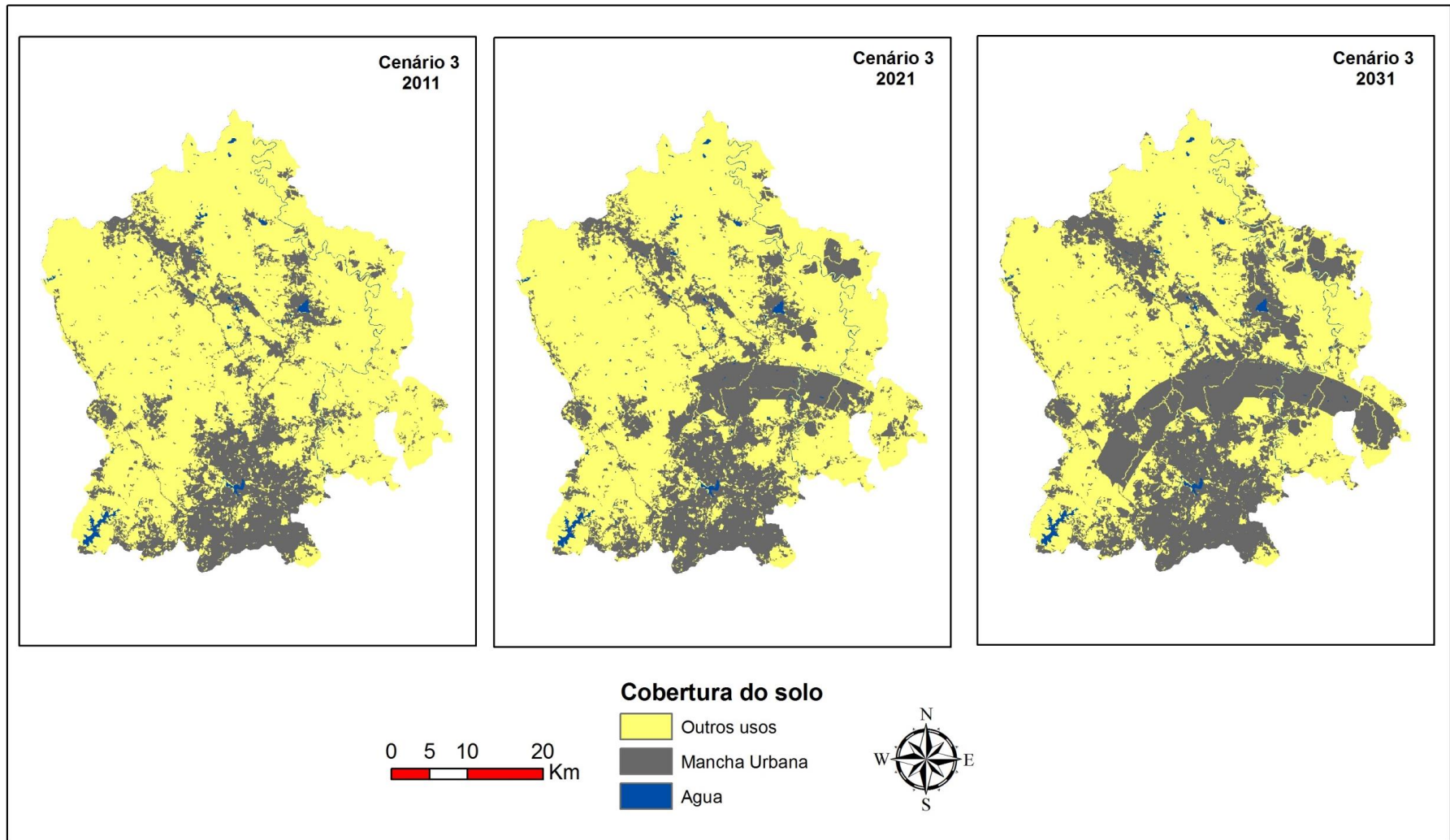


Figura 40: Mapas dos cenários 3 projetados respectivamente para 2011, 2021 e 2031.

Ao observar os mapas, a diferença entre os cenários fica mais evidente quando a projeção atinge o ano de 2031. Em valores absolutos a expansão urbana simulada para os anos de 2011 e 2021 no cenário 1 (Variáveis Explicativas - VE) e no cenário 2 (Variáveis Explicativas e Obras Viárias - VEOV) foram idênticas (Figura 41). Conforme apresentado no item Simulação do Cenário Futuro deste relatório, as obras viárias previstas na área de estudo foram calibradas para exercerem influência no modelo somente no ano de 2020. Essa calibração explica a não diferença de área entre os cenários, mesmo incluindo no cenário 2 esta variável. Todavia, os cenários 1 e 2 apresentaram diferenças de cálculos para o ano de 2031, o que revela a não influência das obras viárias no modelo até o ano 2021.

Como era esperado, o cenário 3 (Variáveis Explicativas, Obras Viárias, Restritivas e Estimuladoras – VEOVRE), apresentou uma diferença de áreas urbanas em todos os anos projetados, Figura 41.

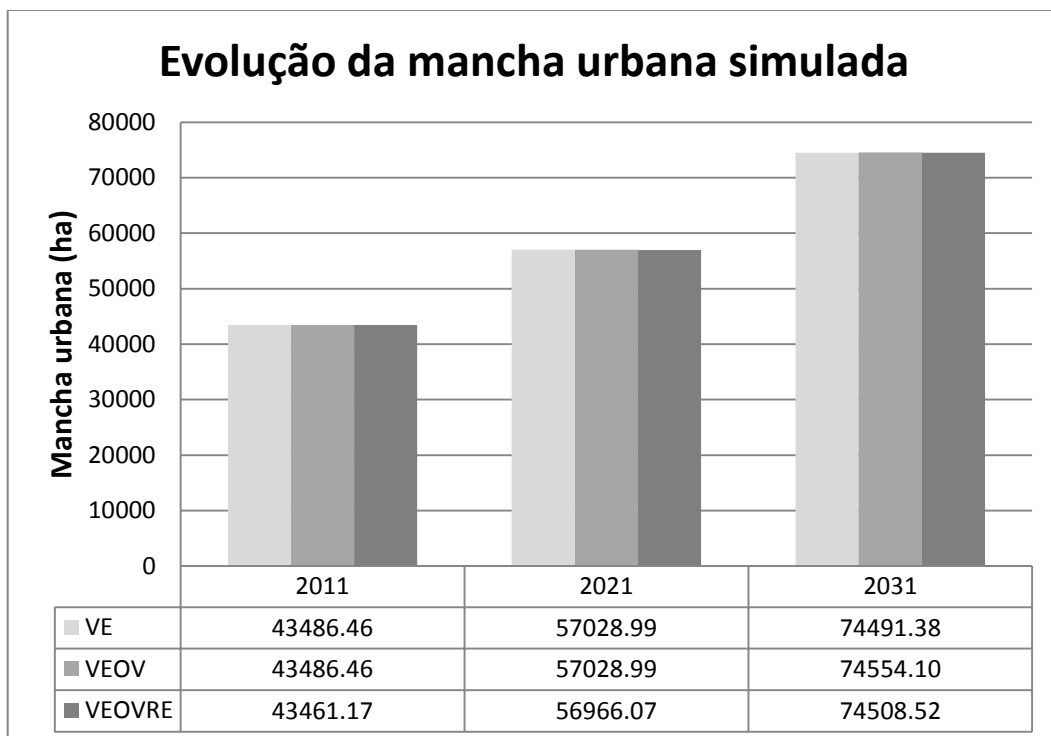


Figura 41: Evolução da Mancha Urbana simulada no Vetor Norte da RMBH.

Comparando a projeção do ano 2031, para os cenários 1 e 2, observa-se uma quantificação de mancha urbana de 74.491,38 hectares para o cenário 1 (VE) e de 74.554,10 hectares para o cenário 2 (VEOV). Esses dados revelam que as obras viárias propostas no Vetor Norte exercerão influência para expansão da mancha urbana. Com a inclusão da variável obras viárias, o cenário 2 no ano 2031 manteve a maior quantificação de mancha urbana dentre os períodos analisados. A Figura 42 apresenta as principais mudanças de cobertura do solo urbano, ocasionada pela inclusão da variável obra viária, observada na porção central da área em estudo. Nesse setor destaca-se a influência do contorno norte leste de Lagoa Santa (Figura 42) no crescimento da mancha urbana situada no entorno imediato desta via.

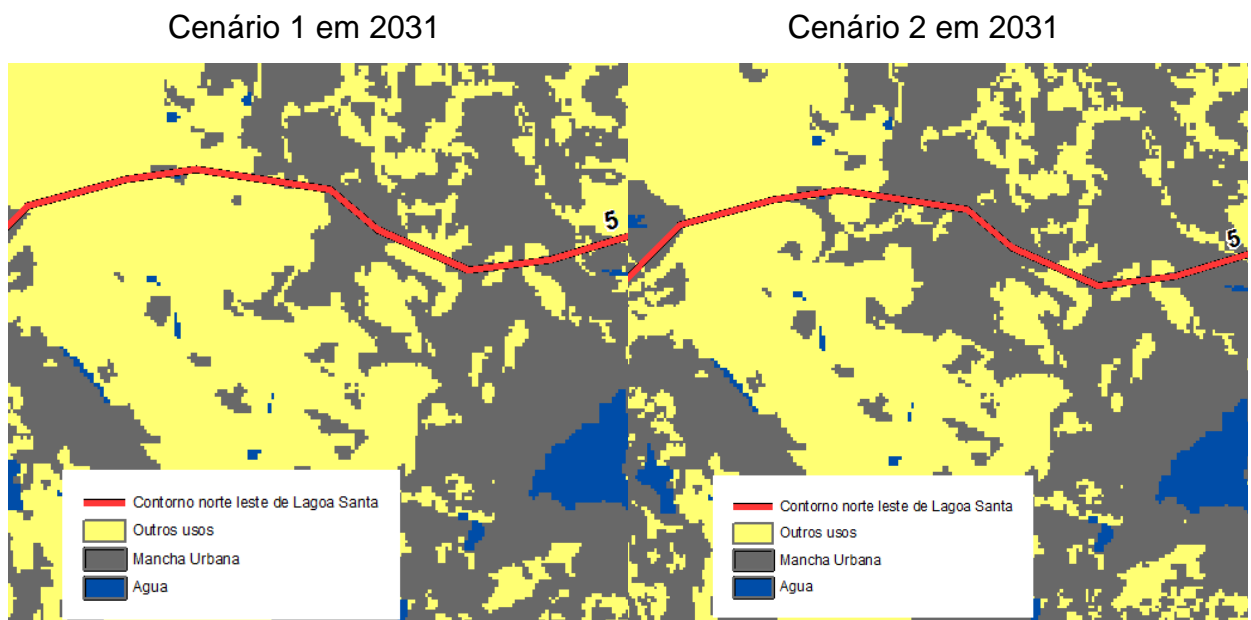


Figura 42: Porção central da área de estudo, onde foi observado o crescimento da mancha urbana (porção central das figuras) no entorno da Via prevista contorno norte leste de Lagoa Santa.

Durante os períodos analisados, o cenário 3 apresentou a segunda maior quantificação de áreas urbanas no Vetor Norte, com 74.508,52 hectares. Observando os mapas do cenário 3 (VEOVRE), é notória a influência das variáveis estimuladoras e restritivas na projeção da mancha urbana, principalmente nas porções sudoeste, central e leste da área de estudo. Dentre as variáveis analisadas

neste cenário, destacou-se a variável que representa o eixo estruturador do rodovial com forte influência para mudança de cobertura do solo para urbano neste setor.

Na área de estudo, a incorporação das variáveis restritivas e estimuladoras qualificou a modelagem, devido a esse processo ter considerado as relevâncias ambientais como fator restritivo para evolução da mancha urbana. Neste sentido, a Figura 43, apresenta a unidade de conservação APA Carste e a evolução da mancha urbana projetada para o ano 2031 nos cenários 2 e 3 respectivamente.

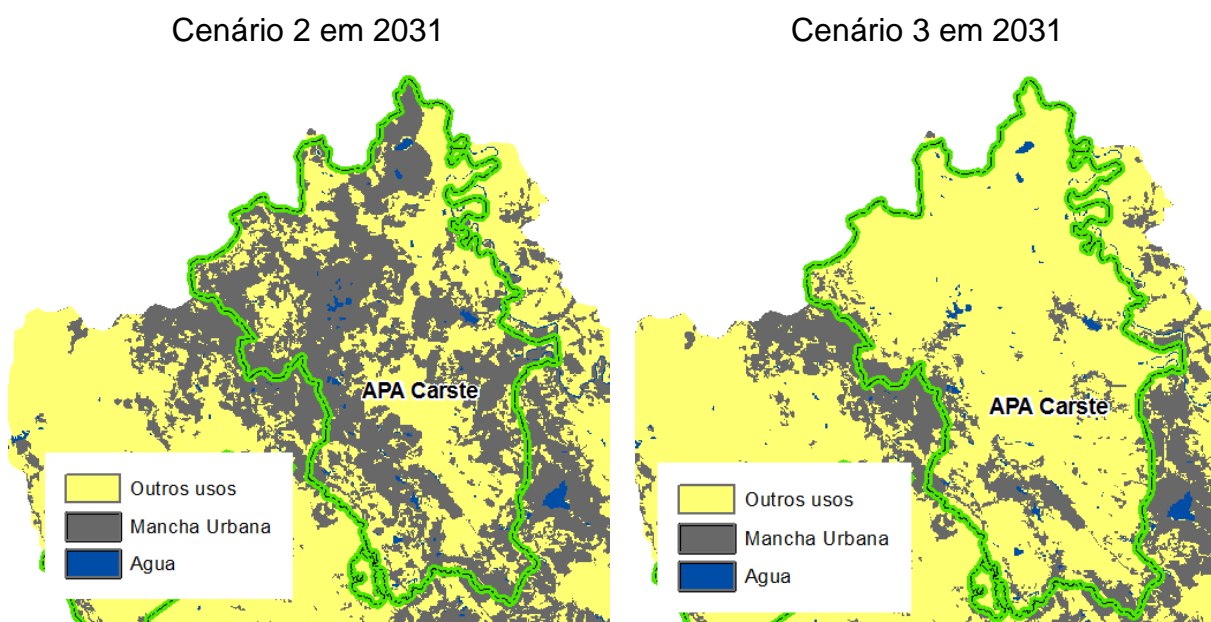


Figura 43: Projeção da mancha urbana para 2031 nos cenários 2 e 3 e APA Carste.

No cenário 3 observa-se que o crescimento urbano na APA Carste é inferior aquele observado no cenário 2. Essa diminuição da mancha urbana na APA Carste se deve a inserção da variável restritiva, representada pelas unidades de conservação de uso sustentável. Por outro lado, o resultado do cenário 2, sinaliza a possibilidade de ocorrer um acelerado adensamento urbano na referida APA.

7 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES

O resultado do modelo de mudança de cobertura do solo apresentado neste estudo, assim como outros modelos aplicáveis ao caso, refere-se a uma representação da realidade prevista no Vetor Norte da RMBH, com algumas limitações e abstrações (HAGGETT e CHORLEY, 1967). As variáveis aqui selecionadas representam apenas uma parcela do universo das variáveis relacionadas a expansão urbana horizontal. Mesmo com as variáveis selecionadas e inseridas no modelo, sabe-se que existem também restrições relacionadas à escala e a alterações políticas que podem interferir no crescimento urbano, como mudança de zoneamento municipal. Como exemplo, a geologia de ocupação pode não apresentar escala detalhada ideal para análise de ocupação, e algumas decisões políticas que envolve o adensamento ou restrição para ocupação urbana, tais como, mudança de governo e revisões de planos diretores municipais, não foram incluídas nesta análise.

A área em estudo apresenta de forma predominante um relevo que varia de plano a suavemente ondulado. Essa característica geomorfológica da área em estudo pode explicar a baixa associação da variável declividade para expansão urbana verificado no teste V de Cramer. As declividades suaves não apresentam grandes restrições para o crescimento urbano.

Os aspectos de limitação mencionados para as variáveis e para o modelo utilizado, sugerem que os resultados deste estudo, embora lógicos e consistentes, sejam analisados com prudência, de modo que serão muito bem vindos estudos posteriores e novas pesquisas para aprimoramento e validação.

A abrangência da área de estudo demandou degradar a resolução original dos dados, alterando os tamanhos dos pixels originais para 50 metros. Foi uma condição para viabilizar o processamento da modelagem devido às limitações computacionais. Sugere-se, portanto, nas abordagens deste problema, utilizar dados em escalas mais detalhadas em um estudo futuro (VELDKAMP e LAMBIN, 2001).

Foram testadas 13 variáveis explicativas no modelo da dinâmica da cobertura do solo urbano. Com a retirada de 3 dessas variáveis que apresentaram baixo poder de associação calculada pela estatística V de Cramer, a taxa de acurácia do LCM, atingiu 82,61%. Assim, os acertos superiores a 80% confirmaram a consistência e eficácia do modelo proposto.

Os cenários apresentados não devem ser entendidos como previsões absolutamente verdadeiras ou indiscutíveis, mais sim como indicadores de uma provável realidade, caso sejam mantidas as tendências de expansão urbana e variáveis correlacionadas. No processo de modelagem, quanto maior for o período projetado, maior é a incerteza da projeção, visto que em cada ano simulado o erro do modelo se acumula. Alguns desses erros referem-se a mudanças de leis para ordenamento de uso e ocupação do solo, como a criação ou extinção de uma Unidade de Conservação.

A diferença de áreas projetadas para a mancha urbana em 2031, nos cenários 1 e 2, revelou que as obras viárias previstas no Vetor Norte exerceram influência para maior quantidade de área urbana na região. Incluindo a variável obras viárias propostas no cenário 2, observou-se uma maior quantificação de mancha urbana do que no cenário 1. Comparando os mapas destes cenários, projetados para o ano de 2031, verifica-se que os maiores fragmentos da mancha urbana, que sofreram aumento de área, estão localizados no entorno imediato das propostas viárias denominadas como Projeto VIURBS, contorno Norte Leste de Lagoa Santa e rodoanel.

No cenário 3, a expansão urbana horizontal avança predominantemente pelas áreas próximas as áreas urbanas existentes, em áreas com elevado coeficiente de adensamento urbano e naquelas áreas que apresentam estímulos a ocupação urbana como Eixo estruturador do rodoanel e Centros urbanos e comerciais propostos. A região centro-leste do Vetor Norte da RMBH, perde mais áreas com Vegetação de porte Herbáceo e de outras coberturas do solo para expansão urbana. Já ao norte do aeroporto de Confins, verificou-se que em áreas que representam

unidades de conservação de uso integral foram predominantemente preservados os usos existentes.

Considerando o resultado de todos cenários, em especial o cenário 2, fica clara a necessidade de intervenções para controle e gestão da ocupação e uso do solo no Vetor Norte da RMBH. Essa região tem grandes incentivos para que ocorra uma rápida expansão urbana e caso ela aconteça de forma desordenada, vários impactos poderão ocorrer, tais como a degradação ambiental, formação de áreas desprovidas de infraestrutura urbana, aumento na produção de resíduos sólidos, dentre outros. Uma forma de mitigar estes possíveis impactos seria a implantação efetiva de políticas públicas que busquem um ordenamento territorial que leva em conta a necessidade do crescimento e o equilíbrio ambiental. A aplicação destas políticas envolveria, por exemplo, o pensamento de ocupar de forma prioritária os terrenos urbanos vazios, existentes no Vetor Norte da RMBH em detrimento da ocupação de novas áreas preservadas.

A técnica de modelagem aplicada neste trabalho apresentou ferramentas computacionais úteis para a gestão e investigação de cenários da expansão urbana. A escolha das variáveis, também revelou o carácter consistente do modelo, conforme observado nos testes desenvolvidos. Essas características demonstram a utilidade da proposta metodológica elaborada frente à geração de informações, capazes de subsidiar decisões relacionadas ao planejamento territorial.

A utilização do aplicativo LCM mostrou-se eficaz para o Vetor Norte na simulação para 2011 e indicou que nas próximas décadas, caso continue a evolução urbana observada desde 2001, será preciso pensar em uma ocupação sustentável capaz de absorver o ritmo de crescimento previsto no modelo. Destaca-se que o uso das bases cartográficas georreferenciadas e os pressupostos que envolvem a dinâmica espacial urbana originados no PDDI (MINAS GERAIS, 2011) foram fundamentais para embasar o modelo, de forma que as simulações pudessem contribuir com o planejamento territorial no Vetor Norte.

Convém ressaltar que, a metodologia proposta, apresenta uma limitação para replicação do modelo em outras regiões. Trata-se da dificuldade de obter bases cartográficas com alta resolução espacial, com qualidade e de escala compatível entre os municípios de interesse. A adequada construção desses dados é um passo indispensável para garantir a confiabilidade dos resultados finais no processo de simulação.

Depois de avaliar os cenários elaborados, alguns questionamentos podem ser feitos em relação às paisagens representadas nos mapas, como: O Vetor Norte está preparado para uma rápida expansão urbana? As áreas de preservação ali existentes sofrerão algum impacto advindo de um cenário com intensa modificação urbana? O novo arranjo espacial considerando a expansão urbana será capaz de se desenvolver de forma sustentável? Os planos diretores municipais serão capazes de garantir a expansão urbana ordenada? As obras de infraestrutura ali previstas e já implantadas estão avaliando de forma correta seus impactos decorrentes e mitigações e compensações socioambientais necessárias? Várias outras questões que merecem uma atenção especial em estudos devem ser identificadas para que seja possível um planejamento da ocupação territorial de forma sustentável.

8 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou um modelo de predição de mudança da cobertura do solo urbano consistente, conforme resultados observados no processo de validação. Com um índice de acurácia do modelo de 82,61%, foi possível gerar três cenários que levam em conta possíveis intervenções de obras viárias propostas e também algumas variáveis explicativas, restritivas, e estimuladores para a urbanização existente na região.

Os resultados mostram que parte dos municípios de Ribeirão das Neves, São José da Lapa, Vespasiano e Santa Luzia apresentaram a maior tendência de mudança de cobertura do solo das classes atuais para urbano, por estarem inseridos no Eixo Estruturador do Rodoanel.

Os resultados da aplicação do modelo indicaram que:

1. A diferença da quantificação de áreas urbanas projetadas nos cenários 1 e 2 para 2031 revelou que as obras viárias previstas no Vetor Norte exercem influência para expansão da manha urbana;
2. As maiores mudanças de cobertura do solo urbano projetada entre 2011 e 2031, ocorreram na porção noroeste e leste do Vetor Norte, inseridos em parte dos municípios de Capim Branco, Pedro Leopoldo, Confins e Sabará;
3. Dentre 13 (treze) variáveis explicativas testadas no modelo duas tiveram destaque em relação ao potencial de explicação baseado na estatística V de Cramer: as áreas com ocorrência de mudança de cobertura do solo entre 2001 e 2006 com um índice de 0,3741 e a distância de centros urbanos e comerciais existentes com 0,3532;
4. No processo de validação verificou-se um índice de acerto entre os pixels de 92,60% contra 7,40% para os pixels errados considerando as imagens simulada e de referência (obtida por sensoriamento remoto) para 2011.

Contudo, é clara a demanda de políticas públicas eficientes para ordenar a provável expansão urbana que tende ocorrer no Vetor Norte. Em meio ao desafio de ocupar novos espaços o presente estudo pode subsidiar o planejamento territorial de urbanização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AANSTOOS, J., OHARA, C. G., PRASAD, S.; DABBIRU, L.; LEE, M.; NOBREGA, R. A. A. **Screening of Earthen Levees Using Synthetic Aperture Radar**. In: 2009 AGU Fall Meeting, 2009, San Francisco CA. Proceedings of 2009 AGU Fall Meeting, 2009.

ACSELRAD, H. **As práticas espaciais e o campo dos conflitos ambientais**. In Acselrad, H. (org). Conflitos ambientais no Brasil. Rio de Janeiro: Relume Dumará: Fundação Heinrick Boll: Relume Dumará, 2004.

ALMEIDA, C. **Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP)**. 2003. 351f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2003.

ANDRADE, Luciana Teixeira. **Segregação socioespacial e construção de identidades urbanas**. In: Mendonça, J.G.; Godinho, M.H.L. (orgs.). População, espaço e gestão na metrópole: Novas configurações, velhas desigualdades. Belo Horizonte: Pucminas, 2003.

ANTUNES, M. A. H.; FREIRE, R. M. B.; BOTELHO, A. S.; TONIOLLI, L. H.. Correções Atmosféricas de Imagens de Satélites Utilizando o Modelo 6S. In: XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, 2003, Belo Horizonte. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Cartografia**, 2003.

ATKINSON, P. Neural networks in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**. v.18, n.4, p.669-709.1997.

BANERJEE, A.; DUFLO, E.; e QIAN, N. **On the Road**: Access to Transportation Infrastructure and Economic Growth in China. MIT, Feb. 2012.

BRASIL.Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 19 jul. 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm>. Acesso em: 19 Ago. 2014.

CALDEIRA, T .P .R. **Enclaves fortificados**: a nova segregação urbana. *Novos Estudos CEBRAP*, n. 47, mar, 1997.p 179-192.

CARNEIRO, T. Nested-CA: **A foundation for multiscale modelling of land use and land cover change**. 2006. 109f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2006.

CEDEPLAR – CENTRO DE DESENVOLVIMENTO E PLANEJAMENTO REGIONAL DE MINAS GERAIS (2010) **Mapa de unidades geotécnicas da Região Metropolitana de Belo Horizonte – RMBH**. Relatório do Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da RMBH. Maria Giovana Parizzi, Ana Clara Mourão Moura, Eduardo Memória e Danilo Marques Magalhães

- CIVCO, D. Artificial neural networks for land cover classification and mapping. **International Journal of Geographic Information Systems**. v.7, n.2, p.173-186.1993.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. Ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1999. 236 p.
- CLARK LABS , Clark University. **LCM for Arcgis 9.3**. Land change modeler tutorial. Version 9.3. Clark Labs, 2006.
- CLARKE, K.. A cellular automaton model of wildfire propagation and extinction. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. V.60, n.11. p.1355-1367 1994.
- CLARKE, K. LEONARD J. GAYDOS. **Loosecoupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore**. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/136588198241617> I- Acesso em 31 de Maio de 2012, In International Journal of Geographical Information Science, 12:7, 1998. 699-714, 18 páginas.
- CHUNYANG, H.; NORIO, O.; QIAOFENG, Z.; PEIJUN, S.; JINGSHUI, Z. **Modeling Urban Expansion Coupling Celular Automata**. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014362280600018X> - Acesso em 02 de Jun. 2012, In Science Direct-Applied Geography 26 (2006) p 323–345, 23.
- COSTA, H. S. M. **Mercado imobiliário, Estado e natureza na produção do espaço metropolitano**. In: Costa, H.S.M., et al. (orgs). Novas periferias metropolitanas. Belo Horizonte: Editora C/Arte, p 101-124. 2006
- COSTA, H. S. M. **Habitação e produção do espaço em Belo Horizonte**. In: Monte-Mór, R.L. (coord.). Belo Horizonte: espaços e tempos em construção. Belo Horizonte: CEDEPLAR/PBH, 1994. p. 51-78
- COUCLELIS, H. **Macrostructure and microbehavior in metropolitan area**. **Environment and Planning B**. v.16, n 2, p.141-154.1989.
- EASTMAN, J. **Raster Procedures for Multi-Criteria/Multi-Objective Decisions**. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v 61, n.5, p.539-547. 1995.
- EASTMAN, J. Idrise Taiga Tutorial. **Massachusetts**: Clark Labs, 2009. 342 p. Disponível em: <www.clarklabs.org>. Acesso em 20 out. 2013.
- EASTMAN, R. **IDRISI Taiga**. Clark Universty. Worcester. 2009. (16.2).
- ESRI. **Arcgis Desktop 9.3**. ESRI. [S.I.]. 2006.
- GONZALEZ, J. J; ETTER A. A; SARMIENTO A. H.; ORREGO S.A; RAMÍREZ C.; CABRERA, E, VARGAS, D, GALINDO, G., GARCÍA M.C., ORDÓÑEZ F.M. **Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia**. Bogotá D.C. 2011.
- HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. **Models, Paradgmes and the New Geography**. In: HAGGET, P.; CHORLEY, R. J. Models e Geography. Londres: Methuen & Co, 1967.
- HAYKIN, S. S. **Neural networks: A comprehensive foundation**. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.

HEROLD, M. **The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling.** *Remote Sensing Environmental*, v.86, p. 286–302, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico de 2002.** Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 18 out. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico de 2010.** Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 20 out. 2013.

LAMBIN et al. **The cause of land use cover change: moving beyond the myths.** *Environmental Change*, p. 261-269, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual Técnico de Uso da Terra.** 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.

LIEBERTRAU, Albert M. **Measures of association.** Newbury Park, CA: Sage Publications. Quantitative, 1983.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation.** 3rd ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 1994. 729 p.

MENDONÇA, Jupira Gomes de Mendonça. **Segregação e mobilidade residencial na**

Região Metropolitana de Belo Horizonte. Tese (Doutorado em Planejamento Urbano e Regional). UFRJ: Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano e Regional, Rio de Janeiro, 2002.

MENDONÇA, J. G.; COSTA, H. S. M. **Entre a homogeneização e a diversidade: segregação sócio-espacial na metrópole belo-horizontina e as especificidades do eixo sul.** *Espaço e Debates*, v. 24, n 45, p 75 – 86 p 2004.

MILNE, E., ASPINALL, R, J, VELDKAMP, T.A. **Integrated modelling of natural and social systems in land change science.** *Landscape Ecology* p 24:1145–1147, 2009.

MINAS GERAIS. Decreto nº 44816 de 20 de maio de 2008. Altera o decreto nº44.500, de 3 de abril de 2007, que institui o plano de governança ambiental e urbanística da Região Metropolitana de Belo Horizonte e dá outras providências. **Diário Executivo Minas Gerais**, 21 de maio. 2006.

MINAS GERAIS. Secretária de Estado de Desenvolvimento Regional e Política Urbana. **Programa de Desenvolvimento e Gestão da Região Metropolitana de Belo Horizonte.** Disponível em: <http://www.institutohorizontes.org.br/imagens/estudoseprojetos/DOCUMENTO_FINAL_VETOR_NORTE.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2011.

MINAS GERAIS. Secretaria Estadual de Desenvolvimento Regional – SEDRU. Estratégia de Desenvolvimento da Cidade (CDS), com foco na redução da desigualdade social e da pobreza, para o Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), Produto 05- Relatório de Consolidação do Diagnóstico Participativo, Volume I, 2009.

MINAS GERAIS. Secretaria Estadual de Desenvolvimento Regional – SEDRU. Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Belo

Horizonte - PDDI. Relatório final de definição das propostas de políticas setoriais, projetos e investimentos prioritários. Belo Horizonte: Cedeplar/UFMG, 2011. Disponível em: <www.rmbh.org.br>. Acesso em: 08 agosto 2011.

NOGUEIRA, C. A., Leite, F.H.D., Veiga, B.N., PARIZZI, M. G. Análise da susceptibilidade erosiva em solos residuais de gnaiss e de calcários da região de Vespasiano, MG In: **Anais**. 12 Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2008, Porto de Galinhas. Anais do 12 CBGE. São Paulo: ABGE, 2008. p.1 - 11

PAEGELOW, M.; CAMACHO, M. T. O. **Modelling Environmental Dynamics: advances in geomatic solutions**. Springer: Verlag Berlin Heidelberg. 2008. 390 p.

PEDROSA, B., CÂMARA, G. **Modelagem Dinâmica: conceitos básicos e exemplos de sistemas** (Cápítulo 1). In: CÂMARA, G., MONTEIRO, A. (Orgs). Introdução a Modelagem Dinâmica Espacial. Belo Horizonte: INPE, p 1-41, 2003.

PENIDO, L. R. **Técnicas de sensoriamento remoto e SIG aplicadas ao planejamento de uma rodovia: estudo de caso - trecho oeste do Rodoanel Metropolitano de São Paulo**. São José dos Campos. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos p 123 (INPE-6966-TDI/654). 1998.

PEREIRA, M. N.; KURKDJIAN, M. L. N. O; FORESTI, C. **Cobertura e uso da terra através de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos, Instituto de Pesquisas Espaciais. 1989. 118 p.

SALMONA, Y. B. **Cerrado com C ou S? Modelagem de cenários futuros para o bioma**. Dissertação de Mestrado, Publicação PPG EFL.DM 197/2013, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, DF, 2013. 87p.

SOARES-FILHO, B. S; CERQUEIRA, G.S; ARAÚJO, W.L; VOLL, E. **Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular** MEGADIVERSIDADE, Nº 1-2, v.3, 2007

THAPA. B. R.; MYRAYAMA. Y. **Scenario based urban growth allocation in Kathmandu Valley, Nepal**. Landscape and Urban Planning. 2012. 105: 1-2. 140-148 March.

TRENTIN, G. **A expansão urbano-industrial do município de Americana-SP: geotecnologias aplicadas à análise temporal e simulação de cenários**. 237f. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2008.

UMBELINO, G. **Simulações de distribuição espacial domiciliar e projeções demográficas intraurbanas com apoio de geotecnologias**. Tese (Doutorado em Demografia) – Cedeplar, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

VELDKAMP, A.; LAMBIN, E. F. Predicting land-use change. **Agriculture Ecosystems & Environment**, 2001. 1-6 p.

VELDKAMP, T. A.; VERBURG, P. H. **Modelling land use change and environmental impact**. Journal of Environmental Management. 2004. 72: 1–3 p.

VERBURG, P. H. **Modeling the spatial dynamics of regional land use:CLUE-S** model. Environmental Management, p. 391-405, 2002.

VELOSO, H.P. 1991. **Sistema fitogeográfico**. In Manual técnico da vegetação brasileira. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, p. 9-38.

YANG, X.; ZHENG , X.-Q.; L V, L. -N. **A Spatiotemporal model of land use change based on ant colony optimization, Markov chain and cellular automata**. Ecological Modelling, p. 11-19, 2012.