

Universidade Federal de Minas Gerais

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

MARIANNE SILVA OLIVEIRA

**Detecção de mudanças de uso e cobertura da terra no Sinclinal Moeda
(MG) no período de 1991 a 2011 e previsões de mudanças futuras
através de modelo espacial de simulação**

Belo Horizonte

2012

Universidade Federal de Minas Gerais

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

MARIANNE SILVA OLIVEIRA

**Detecção de mudanças de uso e cobertura da terra no Sinclinal Moeda (MG)
no período de 1991 a 2011 e previsões de mudanças futuras através de
modelo espacial de simulação**

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: Prof. Dr. José Eustáquio M. de Paiva

Belo Horizonte

2012

O48d
2012

Oliveira, Marianne Silva.

Detecção de mudanças de uso e cobertura da terra no Sinclinal Moeda (MG) no período de 1991 a 2011 e previsões de mudanças futuras através de modelo espacial de simulação [manuscrito] / Marianne Silva Oliveira. – 2012.

viii, 56 f.: il., gráfs., mapas, tabs.

Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2012.

Orientador: José Eustáquio M. de Paiva.

Bibliografia: f. 49- 56.

1. Solo – Uso – Belo Horizonte (MG) – Teses. 2. Mapeamento da cobertura do solo – Teses. 3. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 4. Sistemas de informação geográfica – Teses. I. Paiva, José Eustáquio Machado de. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III Título.

CDU: 631.4(815.1)

Agradecimentos

Ao meu pai Bias e minha mãe Liliane pelo apoio fundamental para eu seguir meus caminhos.

Ao Guilherme por sua presença ao meu lado durante este amargo período.

Aos amigos da Modelagem: Carol Guilen, pela atenção e orientação que foi imprescindível para eu conseguir aperfeiçoar o trabalho e, junto com Thiago Lima, pelo aprendizado conjunto nas “oficinas de modelo”; Denise Formoso pelo apoio e na compartilha de momentos críticos; e Erika Machado por persistirmos, mesmo diante de tantas incertezas;

Ao Prof. Ricardo Alexandrino pelo reconhecimento da minha competência profissional na realização deste trabalho.

A Wilfred Brandt por apresentar o Sinclinal Moeda e seu contexto e pelas ideias que em muito contribuíram para delinear os objetivos deste estudo.

À CAPES pela concessão da bolsa;

“Someone’s intelligence can be measured by the quantity of uncertainties that he can bear ”

“Enlightenment is man’s emergence from his self-incurred immaturity. Immaturity is the inability to use one’s own understanding without the guidance of another.”

IMMANUEL KANT

(What is Enlightenment?, 1784)

RESUMO

O Sinclinal Moeda constitui uma região altimontana localizada ao sul de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, que representa um centro de biodiversidade local com presença de ecossistemas raros e espécies endêmicas além de abrigar nascentes e reservas subterrâneas de importância hidrológica regional. A presença humana na região remonta à pré-história, sendo a ocupação efetivada pela exploração do ouro na época colonial, o que pode ser atestada pelos inúmeros vestígios arqueológicos que compõe o rico acervo histórico-cultural abrigado pela região. A mineração é - historicamente, e ainda no presente - a atividade econômica mais relevante na região, com destaque para mineração de ferro. A partir de 1990, a implantação de empreendimentos imobiliários na forma de condomínios tem se intensificado na região. Tendo em vista que a expansão indiscriminada das atividades de uso da terra podem representar potenciais conflitos para a conservação do patrimônio geológico, ecológico e histórico-cultural abrigado pelo Sinclinal Moeda, o presente estudo tem como objetivos: (i) detectar as mudanças de uso e cobertura da terra no período de 1991 a 2011; (ii) elaborar previsões de mudanças futuras através de um modelo espacial de simulação. A partir da série temporal de imagens Landsat-5 TM dos anos 1991, 2001, 2006 e 2011 classificadas para uso e cobertura da terra foi possível identificar a expansão da mineração para quase 10% da área total do Sinclinal e a quadruplicação da área de ocupação urbana, ambas através da perda majoritária de vegetação campestre. O modelo espacial de simulação envolveu a estimativa da quantidade de mudanças através de Cadeias de Markov e o cálculo da influência dos determinantes espaciais na alocação espacial das mudanças através de Regressão Logística. Embora o modelo tenha apresentado ótimo desempenho na projeção da quantidade de mudança, verificou-se desempenho pouco satisfatório na alocação espacial das mesmas que se concentraram nas adjacências e entorno das áreas previamente ocupadas com as classes de uso investigadas. A projeção das mudanças futuras caracteriza o cenário tendencial de acordo com o recente histórico, em que prevalece a expansão da mineração seguida pela expansão dos condomínios, no qual as estimativas apontam para a ocupação de mais de 15.000 ha por estas atividades, chegando a 22% do total da área de estudo.

Palavras-Chave: Mudanças de Uso e Cobertura da Terra, Modelo Espacial de Simulação, Sinclinal Moeda.

ABSTRACT

The Moeda Syncline is a highland region located south of the capital Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, which is a center for local biodiversity with rare ecosystems and endemic species besides housing water sources and underground reservoirs of regional hydrological importance. Human presence in the region dates back to prehistoric times, and settling was effected by gold exploration in colonial times, which can be attested by numerous archaeological remains which compose the rich cultural heritage housed by the region. Mining has been the most important economic activity in the region, especially iron mining. Since 1990, the implementation of real estate ventures in the form of condominiums has intensified in the region. Considering that the indiscriminate expansion of land use activities may represent potential conflicts with the conservation of geological, ecological and cultural heritage maintained by Moeda Syncline, the present study aims to: (i) detect changes of use and land cover in the period from 1991 to 2011, (ii) develop estimates of future changes through a spatial model simulation. From the time series images of Landsat-5 TM for the years 1991, 2001, 2006 and 2011 classified for use and land cover, were able to identify an expansion of approximately 10% of the total area of the Moeda Syncline under mining and quadrupled the urban settlement area, both through majority loss of grassland vegetation. The spatial model simulation involved the estimation of the amount of changes via Markov Chains and the calculation of the influence of spatial determinants in spatial allocation of changes through logistic regression. Although the model has shown excellent performance in the projection of the amount of change, there has been unsatisfactory performance on spatial allocation of those which were concentrated adjacent to and surrounding the areas previously occupied by studied classes. The projection of future changes characterized the trend scenario according to recent history, by the prevailing expansion of mining followed by the expansion of condominiums, which estimates a settlement of more than 15,000 ha by these activities, reaching 22% of the total area.

Key-words: Land use cover change, simulation spatial model, Moeda Syncline

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Siglas e Abreviaturas	viii
1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1 Mudanças de Uso e Cobertura da terra.....	01
1.2 Modelos de Simulação Espacial.....	03
1.3 O Sinclinal Moeda.....	05
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo Geral.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1 Área de Estudo.....	19
3.2 Base de Dados Espaciais.....	19
3.3 Detecção de Mudanças.....	22
3.4 Modelos Espacial de Simulação	22
ARTIGO	27
Resumo	27
Introdução	28
Materiais e Métodos.....	30
Resultados.....	35
Discussão.....	42
Referências.....	45
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
5. REREFÊNCIAS.....	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Mapa Hipsométrico da região do Sinclinal Moeda.....	06
Figura 2: Mapa de Vegetação do Sinclinal Moeda.....	09
Figura 3: Unidades de Conservação no Sinclinal Moeda.....	10
Figura 4 : Concessões de lavras no Sinclinal Moeda.....	15
Figura 5: Localização do Sinclinal Moeda sobre imagem Landsat -5 TM composição colorida RGB-743	20
Figura 6: Etapas do modelo espacial de simulação de mudanças de uso e cobertura da terra.....	23
Figura 7: Localização do Sinclinal Moeda sobre imagem Landsat -5 TM composição colorida RGB-743	30
Figura 8: Etapas do modelo espacial de simulação de mudanças de uso e cobertura da terra.....	32
Figura 9: Área total em hectares ocupada pelas classes urbano e mineração (A), vegetação arbórea e campestre (B) para os anos de 1991, 2001, 2006 e 2011.....	36
Figura 10: Classificação de uso e cobertura da terra no Sinclinal Moeda para os anos de 1991, 2001, 2006 e 2011	38
Figura 11: Mapas de Potenciais de Transição para a classe 'mineração' (A) e classe 'urbano'(B).....	39
Figura 12: Simulações de uso e cobertura da terra para os anos de 2016, 2021, 2026 e 2031.....	40
Figura 13: Mudanças simuladas de uso e cobertura da terra para os anos de 2016, 2021, 2026 e 2031 com com base no período 2006- 2011.....	41
Figura 14: Área total (ha) das classes 'urbano' e 'mineração' projetada para os anos de 2011, 2016, 2021, 2026 e 2031.....	42

LISTA DE TABELAS

	Págs.
Tabela 1: Descrição das classes de cobertura da terra.....	21
Tabela 2: Descrição das classes de cobertura da terra.....	31
Tabela 3: Mudanças em área (hectares) por intervalos de tempo no período de 1991 a 2011.....	36
Tabela 4: Probabilidades de transição da classe 'vegetação' para as classes 'mineração' e 'urbano'.....	42
Tabela 5: Mudanças simuladas em área (ha) para o período de 2011 a 2031.....	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

APA	Área de Proteção Ambiental
APPs	Áreas de Preservação Permanente
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
ESEC	Estação Ecológica
FAO	<i>Food and Agricultural Organization of the United Nations</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEF	Instituto Estadual de Florestas
IGBP	<i>International Geosphere-Biosphere Programme</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
LCM	<i>Land Change Modeler</i>
LUCC	<i>Land Use Cover Change</i>
MONA	Monumento Natural
PAR	Parque
QF	Quadrilátero Ferrífero
RL	Regressão Logística
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UC	Unidade de Conservação

1. INTRODUÇÃO

1.1 Mudanças de Uso e Cobertura da Terra

A iniciativa do programa IGBP - International Geosphere-Biosphere Programme, através do projeto “*Land Use and Land Cover Change - LUCC Project*” formalizado em 1995, constituiu um esforço fundamental para a emergência da “Ciência das Mudanças da Terra” (*Land Change Science*) com base numa perspectiva integrada de ciências ambientais, humanas e ciências da terra, através do sensoriamento remoto e sistemas geográficos de informações (LAMBIN; GEIST, 2006).

A ciência das mudanças da terra pode ser definida como uma matéria interdisciplinar, que investiga a natureza do uso e cobertura da terra, suas mudanças no espaço e no tempo e os processos sociais, econômicos, culturais, políticos e ecológicos que influenciam a produção dos padrões das mudanças (TURNER et al., 2007), além de contribuir para o manejo adaptativo das mudanças nos sistemas de uso da terra ao fornecer subsídios para o gerenciamento e a tomada de decisões (ASPINALL, 2008).

O conceito de “terra” consiste no segmento da superfície terrestre definido no espaço e reconhecido em função de características e propriedades compreendidas pelos atributos da biosfera, atmosfera, solos, substrato geológico, hidrologia e atributos resultantes das atividades antrópicas (FAO, 1976). De acordo com o Manual Técnico de uso da terra (IBGE, 2006), os conceitos de ‘uso’ e ‘cobertura’ da terra estão diretamente relacionados e podem ser usados alternativamente. O “uso da terra”, dentre as várias definições existentes, está geralmente associado às atividades conduzidas pelo homem na exploração dos recursos ambientais e relacionadas à função socioeconômica. A “cobertura da terra” é definida como o conjunto de elementos naturais além das construções artificiais que recobrem a superfície da terra (IBGE, 2006).

As mudanças de uso e cobertura da terra constituem fontes de alterações significativas da superfície terrestre e acarretam impactos potenciais para a atmosfera, para a diversidade biótica, para bens e serviços ambientais (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESMENT, 2005). De acordo com Quarto

Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas do Planeta elaborado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima (IPCC) em 2007, as mudanças de uso da terra, juntamente com a queima de combustíveis fósseis, são os principais fatores responsáveis pela emissão do dióxido de carbono, o mais importante gás de efeito estufa provocado pelas atividades humanas (AVILA, 2007).

A intensificação e a diversificação de usos da terra têm levado a mudanças rápidas nos ciclos biogeoquímicos, nos processos hidrológicos e na dinâmica das paisagens, os quais, por fim, influenciam o bem estar humano (KOK, 2007). Logo, tem se tornado crescente a necessidade de ampliar o conhecimento sobre os processos de uso da terra, visando inclusive à possibilidade de gerar previsões sobre o comportamento dos sistemas ambientais, identificando ações necessárias para se prevenir e/ou reverter possíveis consequências negativas.

A mudança, em qualquer espaço, é dirigida pela combinação particular de fatores - forças dirigentes - que configuram os padrões espaciais de paisagem (BURGI et al., 2004). Neste sentido, a compreensão integrada de fatores biofísicos e socioeconômicos nos processos de uso da terra (MILNE et al., 2009) é necessária para o entendimento das transformações na paisagem. A identificação das forças dirigentes das mudanças da cobertura encerra uma tarefa complexa, pois estas configuram uma rede de fatores físicos, biológicos, econômicos, políticos e sociais que podem ter natureza causal ou contextual em relação às transformações da paisagem (GEIST; LAMBIN, 2002) e podem interagir e operar sob uma gama de escalas no tempo e no espaço influenciando na dinâmica das paisagens (MUNROE; MÜLLER, 2007).

De acordo com LAMBIN & GEIST (2006), a detecção das mudanças de uso e cobertura da terra e o reconhecimento da atuação das forças dirigentes das mudanças, constituem passos fundamentais nos estudos de dinâmica de paisagem. A partir do avanço das técnicas de sensoriamento remoto, através da aquisição, processamento e interpretação de imagens de satélite, a detecção das mudanças de uso e cobertura da terra tem sido facilitada, o que permite a quantificação dos padrões espaciais da paisagem (COPPIN et al., 2004).

Os estudos sobre mudanças de uso e cobertura da terra, inicialmente voltados apenas para a detecção de mudanças da paisagem e entendimento das

forças dirigentes, ao longo dos anos têm direcionado o foco da investigação para a modelagem de sistemas, para a previsão de mudanças e exploração de possíveis cenários futuros (HOUET et al., 2010). O objetivo não é prever o futuro de forma determinística, mas sim representar as possibilidades de desenvolvimento sobre condições específicas que podem auxiliar na implementação de políticas e intervenções ambientais, na tomada de decisão e mitigação de potenciais consequências negativas das ações. Portanto, a projeção de paisagens futuras requer a consideração das tendências passadas, processos atuais de mudança do uso da terra e a incorporação de cenários plausíveis (HOUET et al., 2010).

O desenvolvimento e a aplicação de modelos espaciais foram adotados como principais ferramentas para o estudo da dinâmica de uso e cobertura da terra (GAUCHEREL; HOUET, 2009), pois permitem a investigação dos elementos da paisagem e sua configuração espacial visando, sobretudo, compreender o comportamento dos sistemas ambientais ao longo do tempo, de modo a auxiliar na projeção de seus estados futuros.

1.2 Modelos de Simulação Espacial

Modelos são representações da realidade que permitem visualizar e compreender os fenômenos estudados através de uma estruturação simplificada e objetiva que apresenta, ao mesmo tempo, as características e as relações entre os elementos de forma generalizada. O uso de modelos na investigação dos sistemas ambientais permite levantar hipóteses, fazer diagnósticos, previsões e simulações, além de constituírem ferramentas promissoras para a exploração e extração de dados, que permitem eficácia na comunicação das informações (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Modelos de simulação se tornaram recentemente um campo de pesquisa promissor, recebendo especial atenção por parte de pesquisadores de diversas áreas. A importância da simulação advém de sua capacidade de multiplicar a nossa imaginação individual, permitindo que grupos de pessoas compartilhem,

através de uma experiência comum, modelos mentais de uma certa realidade, independente de sua complexidade (LÉVY, 1998).

Os modelos espaciais ganham cada vez mais importância, haja vista a grande disponibilidade de dados espaciais obtidos via sensoriamento remoto associada a uma ampla capacidade de manipulação e análise fornecida pelos Sistemas Geográficos de Informações (SIGs), o que permite o monitoramento de processos dinâmicos em diferentes resoluções espaciais e temporais (GAUCHEREL; HOUET, 2009). Atualmente se encontra disponível uma gama de modelos espacialmente explícitos aplicáveis a uma diversidade de fenômenos ambientais tais como mudanças de uso e cobertura da terra, mudanças climáticas, dinâmica florestal, distribuição de espécies, propagação de fogo, difusão de epidemias, entre outros.

Modelos espaciais de simulação, que realisticamente reproduzem padrões espaciais de mudanças, são hoje requisito para o entendimento e avaliação de complexas questões ambientais em escalas local, regional e global, levando em consideração o aspecto temporal seja na simulação, predição e construção de cenários futuros, nos quais o funcionamento de um sistema pode ser explorado em diferentes condições (SOARES-FILHO et al., 2007). Este enfoque exploratório e prospectivo permite que os modelos sejam usados como ferramentas de suporte ao planejamento e análise ambiental e têm se tornado um importante instrumento de auxílio ao ordenamento territorial.

O primeiro passo na construção de um modelo de simulação de mudanças passa pela definição dos elementos ou estados de uma paisagem e suas transições possíveis. Em geral a análise espacial das mudanças é realizada através da comparação de mapas da paisagem, os quais podem ser derivados de uma série de dados, incluindo dados históricos de uso e cobertura da terra, obtidos via sensoriamento remoto. Esta comparação permite estimar as quantidades de mudança ou taxas de transição de um estado para o outro num intervalo de tempo discreto. Um modelo de transição requer apenas que seja especificado um número finito de estados e que sejam conhecidas as taxas de transição (probabilidades) de um estado para outro em um intervalo de tempo discreto (SOARES-FILHO et al., 2007).

A partir da análise das mudanças para um intervalo de tempo é possível desenvolver um modelo matemático que estima a probabilidade de mudança em função de um conjunto de determinantes espaciais, que constituem as variáveis explicativas da configuração espacial dos padrões de mudanças. A análise do efeito dessas variáveis resulta no mapa de favorabilidade ou probabilidade de mudança, através do cálculo dos efeitos dos determinantes espaciais na alocação espacial das mudanças (MAS et al., 2011). Diversos métodos têm sido aplicados para tal propósito, sendo, em geral, caracterizados como técnicas dirigidas aos dados, notadamente a regressão logística entre outros como os pesos de evidência e algoritmos baseados em redes neurais. Modelos que utilizam métodos empírico-estatísticos são denominados modelos dirigidos aos dados (*Data-driven models*), nos quais o tratamento das informações pode incluir desde técnicas de álgebra espacial até métodos estatísticos mais sofisticados com a implementação de abordagens utilizando autômatos celulares, lógica *fuzzy* e inteligência artificial (PAEGELOW; OLMEDO, 2008).

1.3 O Sinclinal Moeda

Ao sul do município de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais, está localizado o conjunto de terras altas que constituem o Sinclinal Moeda e que pode ser visualizado no mapa hipsométrico (FIG.1). As áreas de maior altimetria correspondem às cristas e cumeadas, estas que constituem as bordas da estrutura geológica do Sinclinal¹ e apresentam altitudes superiores a 1400 metros. A oeste, se localiza a Serra da Moeda - alinhamento montanhoso que se estende de forma retilínea por aproximadamente 50 km no sentido Norte-Sul. A leste, é possível visualizar o alinhamento da Serra das Serrinhas, onde está localizado o Pico do Itabirito, com 1578 metros, uma das maiores elevações do Estado tombado pela Constituição do Estado de Minas Gerais como patrimônio histórico-geológico. A área central do Sinclinal corresponde ao compartimento do relevo com menores elevações e declividades. O conjunto altimontano do Sinclinal

¹ Dobramento do terreno com concavidade voltada para o céu (GUERRA; GUERRA, 2003)

Moeda é nitidamente distinguível na paisagem regional, apresentando altitudes relativas entre 700 e 800 metros em relação aos vales do Rio Paraopeba (oeste) e do Rio das Velhas (leste).

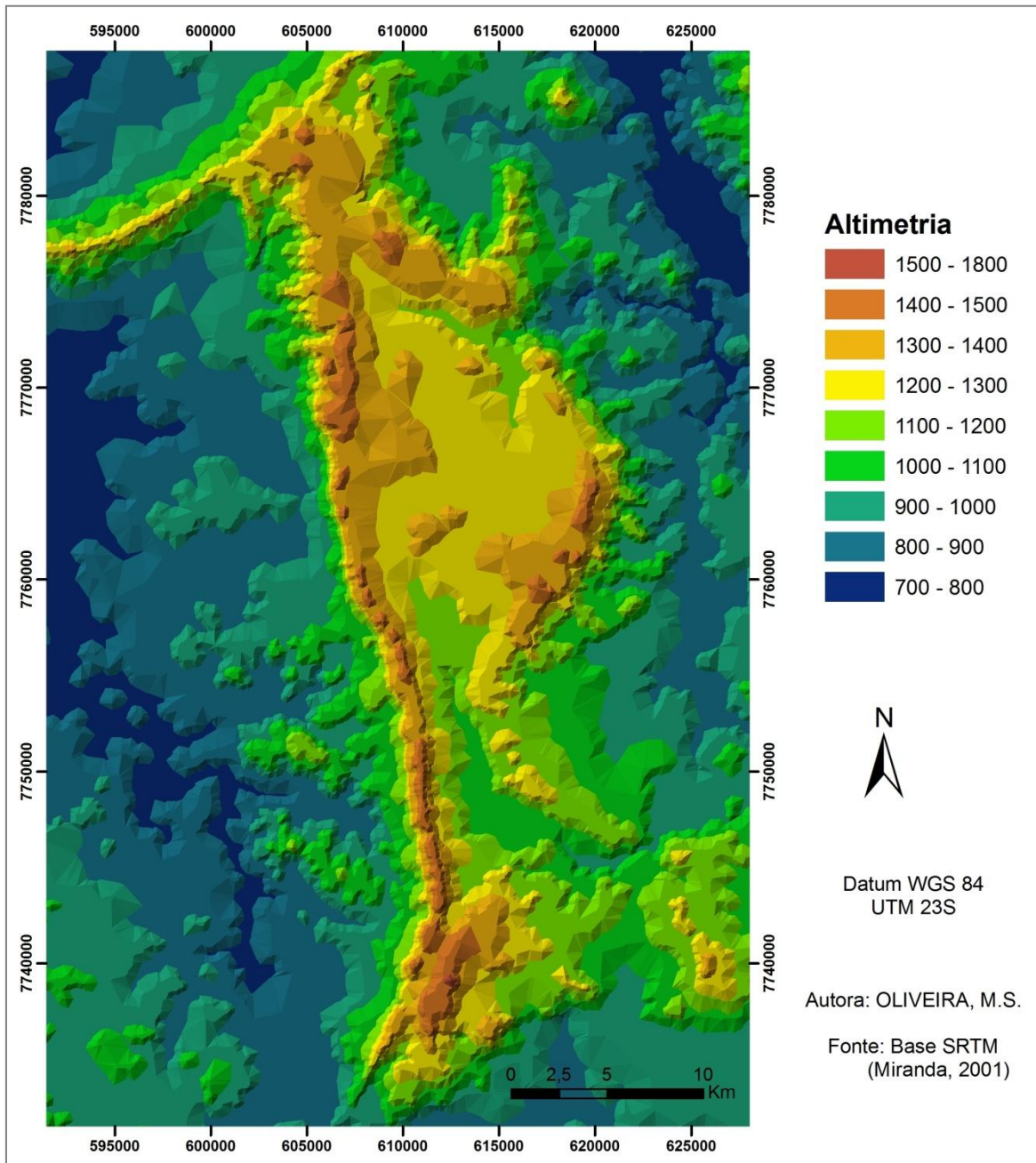


Figura 1: Mapa Hipsométrico da região do Sinclinal Moeda

O Sinclinal Moeda constitui o limite oeste de uma das províncias minerais mais importantes do mundo, o “Quadrilátero Ferrífero”: esse se destaca no cenário geológico mundial por suas reservas minerais de ferro, ouro, alumínio,

manganês e topázio (AUGUSTIN; MOREIRA, 2008). Além de se destacarem pela abundância de recursos minerais, o Quadrilátero Ferrífero, como um todo, e o Sinclinal Moeda, em particular, constituem exemplares importantes do ponto de vista científico e de pesquisa, pelas ocorrências geológicas e geomorfológicas singulares que representam testemunhos da evolução do relevo da Terra ao longo de milhões de anos, e que devem ser protegidos em função de sua geobiodiversidade (MACHADO & RUCHKYS, 2011).

Os ambientes montanos abrigam ecossistemas únicos sendo considerados centros de biodiversidade e de endemismos. São geralmente isolados, resultando na presença de espécies únicas. O isolamento também torna a biota vulnerável à extinção por distúrbios que afetem suas populações. É nos topos das serras que podem ser encontrados os 'ecossistemas de Canga²', que apresentam ocorrência rara em Minas Gerais e no Brasil, merecendo, portanto, uma atenção especial quanto à sua conservação.

As áreas de Canga no Quadrilátero Ferrífero (QF) ocupam 186,5 km², sendo que na área do Sinclinal Moeda ocupam aproximadamente 34 Km², segundo informações extraídas do mapeamento de áreas de Canga no QF (LOBATO et al., 2005). As Cangas do Sinclinal Moeda diferem pela cronologia, tipo de canga e tamanho dos fragmentos, em que os menores tamanhos e a menor conectividade dos fragmentos tornam estes ecossistemas mais vulneráveis a distúrbios do que no restante do QF. Para a vegetação sobre canga no QF, levantamentos florísticos são escassos e recentes (VINCENT, 2004; JACOBI et al, 2007; VIANNA; LOMBARDI; 2007).

As cangas constituem habitats geologicamente diversos, sendo que a variabilidade da estrutura física da canga, composição química dos seus componentes, idade de formação e grau de intemperismo, podem ser aspectos importantes na estruturação das diferentes comunidades ecológicas (BALTAZAR et al 2005). O primeiro registro de *Onychophora*³ - invertebrados considerados

² Concreções ferruginosas (lateritos) derivadas de rochas metamórficas sedimentares ricas em hematita (SIMMONS, 2005).

³ Animal pertencente ao Filo *Onychophora* conhecido popularmente como *Peripatus* e que constitui um possível elo na cadeia evolutiva entre os *Annelidae* e os *Arthropodae* (OLIVEIRA; WIELOCH, 2008).

“fósseis vivos” devido às poucas modificações que sofreram ao longo de cerca de 400 milhões de anos - foi realizado na região da Serra da Moeda em uma caverna de canga (OLIVEIRA; WIELOCH, 2008), fato que reforça a necessidade de proteção destes ecossistemas raros e singulares, ainda pouco investigados.

Os campos rupestres sobre canga estão entre os ecossistemas mais ameaçados do Brasil, pois ocorrem geralmente associados a depósitos de minério de ferro e, portanto, sofrem uma acelerada perda de habitat com a expansão da atividade minerária, especialmente com o incremento da demanda mundial de ferro (JACOBI et al., 2007).

A vegetação de campos rupestres caracteriza-se por um estrato herbáceo, entremeado por pequenos arbustos e podem ocorrer sobre afloramentos de diferentes tipos de rocha e em geral ocorrem em elevações acima da cota de 1000m (VIANNA; LOMBARDI; 2007). De todas as espécies ameaçadas de extinção da flora de Minas Gerais, cerca de 66% ocorrem nos campos rupestres (MENDONÇA; LINS, 2000). Na Serra da Moeda, ocorre campo rupestre sobre canga, quartzito e, embora mais escasso, sobre granito (JACOBI; CARMO, 2008).

No Sinclinal Moeda é possível observar a ocorrência predominante de fitofisionomias campestres como Campos e Campos Rupestres, com presença de fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual Montana e Cerrado, como mostra o mapa de vegetação (FIG. 2). Nota-se que, de modo geral, as categorias de Cerrado e de Floresta além de áreas de Capoeira (formações secundárias) acompanham a tendência de diminuir a área de distribuição na medida em que a altitude aumenta. Já os campos apresentam comportamento diverso: os Campos Nativos acompanham a mesma tendência do Cerrado e Florestas em diminuir a área ocupada com o aumento da altitude; os Campos Rupestres sobre Rocha Quartzítica possuem máxima ocupação na faixa de 1300-1400 m e os Campos sobre Canga e os Campos Limpos Naturais Rupestres ambos apresentam um pico de área ocupada aos 1400-1500 metros (SOLÁ, 2008a). Esse mosaico vegetacional assume um valor ecológico muito alto para a manutenção da fauna da região que juntamente com a flora abrangem um grande número de espécies, endêmicas, raras e ameaçadas.

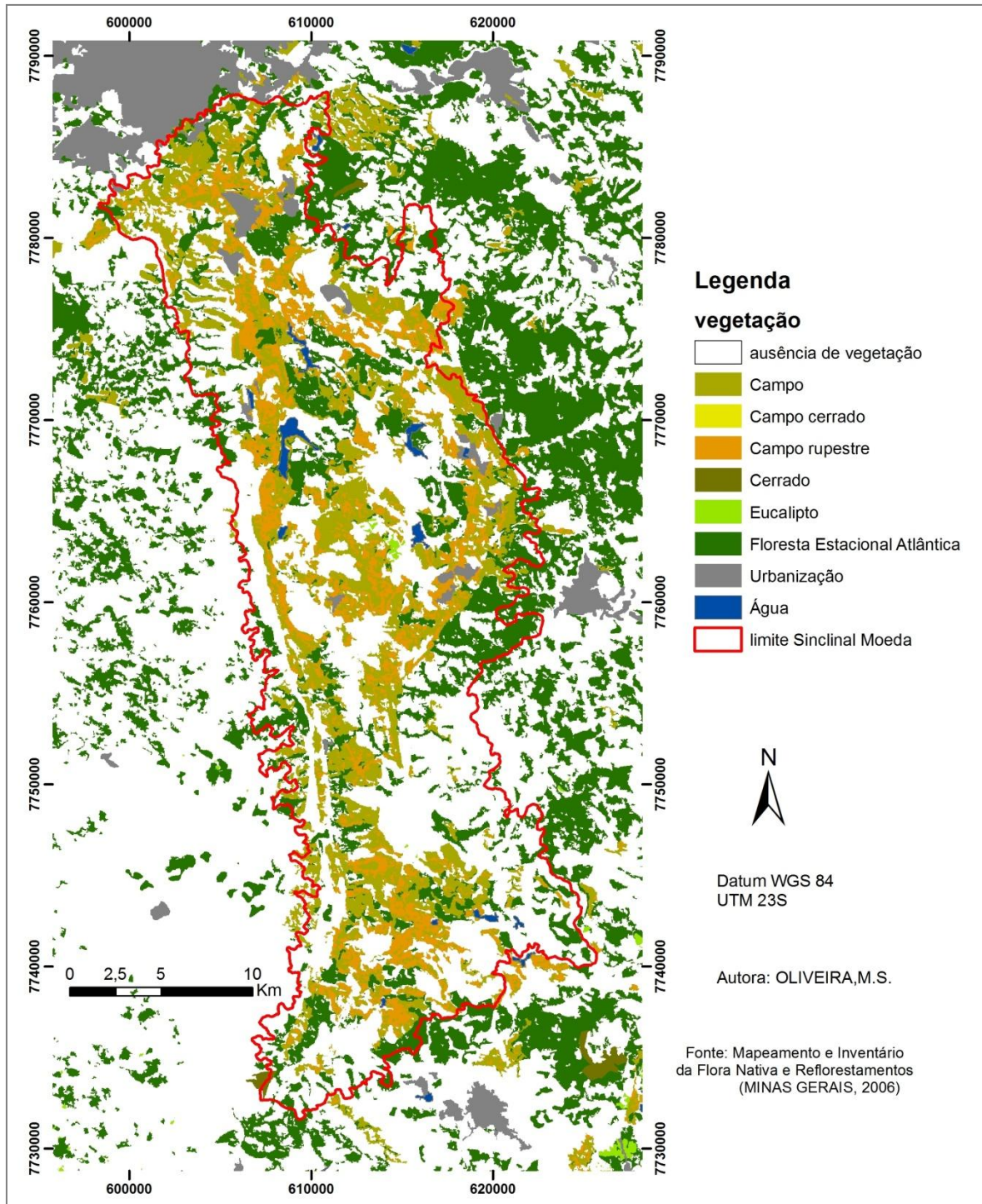


Figura 2: Mapa de Vegetação do Sinclinal Moeda

No Sinclinal Moeda estão presentes as seguintes Unidades de Conservação de Proteção Integral (FIG.3): Parque Estadual da Serra do Rola Moça (PAR) ao lado da Estação Ecológica de Fechos (ESEC), o Monumento Natural da Serra da Moeda (MONA) próximo à Estação Ecológica de Aredes (ESEC). As unidades de uso sustentável RPPNs – Reservas Particulares do Patrimônio Natural são de

propriedades de empresas mineradoras. A APAsul – Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belo Horizonte abrange a parte norte do Sinclinal Moeda.

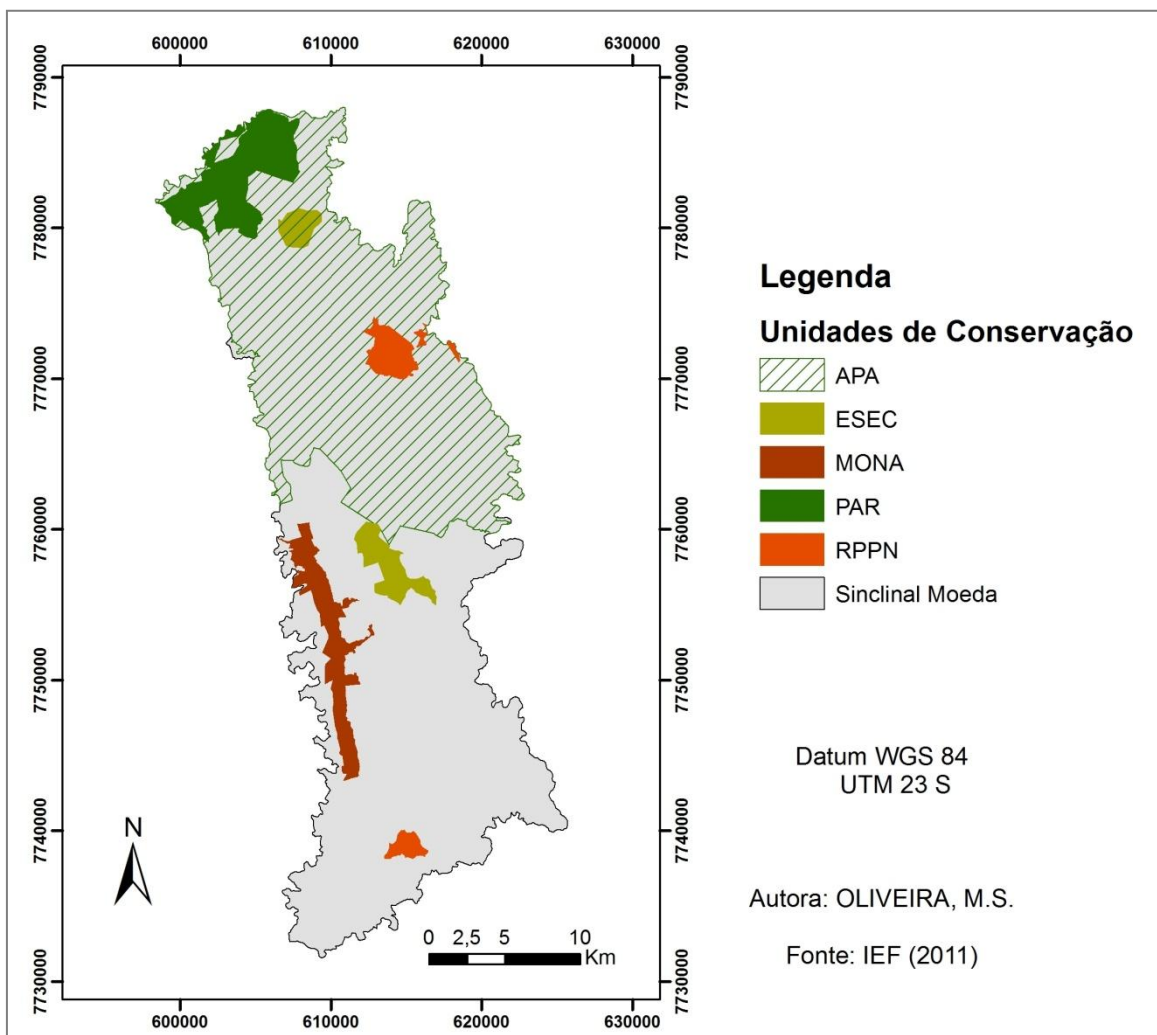


Figura 3: Unidades de Conservação no Sinclinal Moeda

Além de abrigar ecossistemas com alta diversidade e endemismo, o ambiente montano do Sinclinal Moeda destaca-se ainda por sua importância hidrológica regional, ao abrigar reservas subterrâneas e área significativa para recarga de mananciais (AUGUSTIN; MOREIRA, 2008) onde estão localizadas inúmeras nascentes do Rio das Velhas (a leste) e do Rio Paraopeba (a oeste), ambos afluentes do Rio São Francisco e dois dos seus maiores tributários.

Os registros da presença humana na região do Sinclinal Moeda remontam à pré-história. Os sítios arqueológicos ocorrem em inúmeros pequenos afloramentos de rocha que formam áreas abrigadas, assim como em grutas e cavernas além da presença de sítios espeleológicos, que podem contribuir substancialmente para o conhecimento da pré-história e da etno-história de Minas Gerais (SOLÁ, 2008b).

A chegada do europeu na região ocorreu em fins do século XVII em busca do ouro abundante dos aluviões. A Bandeira liderada por Fernão Dias Paes Leme, partindo de São Paulo em 1674, adentrou o território do atual Estado de Minas Gerais marcando o início efetivo de sua ocupação (VILLALTA; RESENDE, 2007). Parte do trajeto da Bandeira de Fernão Dias deu-se junto à Serra da Moeda, alcançando o Vale do Paraopeba. Consta-se que foi no distrito de Piedade do Paraopeba, que a bandeira de Fernão Dias fez o segundo ponto de parada após sair de São Paulo (GUIMARÃES et al., 2008).

O grande afluxo de pessoas atraído pela descoberta do ouro foi o principal fator, inicialmente, para o adensamento populacional na região das Minas (VILLALTA; RESENDE, 2007). Nas proximidades e arredores da Serra da Moeda, deu-se a fundação de inúmeros povoados e arraiais que, com o passar dos anos, acabaram se estabelecendo como sedes civil e religiosa da região. Além desses, fazendas de grande e médio porte e unidades produtivas menores foram estabelecidas por toda a região, nas quais, além da possibilidade de exploração de lavras, a produção alimentar era realizada tanto para o consumo interno quanto para os núcleos urbanos em formação (GUIMARÃES; REIS, 2007).

Os trabalhos de prospecção arqueológica identificaram diversas ruínas de fazendas oriundas de séculos passados. Entretanto, apesar de um grande acervo arquitetônico se encontrar em ruínas, muitas fazendas e casas rurais ainda permanecem, marcando a paisagem ao longo do tempo (GUIMARÃES et al., 2008). Muitas fazendas antigas foram substituídas por outras mais modernas, mas a maioria delas preservou o muro de pedra, ou mesmo o seu alicerce, ou estruturas e equipamentos antigos como fornos, estábulos, moinhos entre outras benfeitorias que materializam o diversificado e relevante patrimônio histórico-cultural presente na região que apresenta um rico acervo histórico-arquitetônico

contemplando casarios, monumentos, edificações, templos religiosos, os caminhos entre outros (CAMPOS, 2012)

A cartografia histórica sugere que o conjunto de terras altas do Sinclinal Moeda representava um espaço geográfico de passagem e entreposto comercial que integrava as atividades econômicas e culturais do vale do Rio Paraopeba e as do Rio das Velhas e demais cidades históricas durante o ciclo do ouro no Quadrilátero Ferrífero (SOLÁ, 2008c). O Sinclinal Moeda apresenta um grande conjunto de caminhos de diversos tipos como trilhas de pedestres, estradas cavaleiras, tropeiras e carroçáveis, com estruturas arrimadas, calçamentos e galerias pluviais, muitos em função da proximidade do sistema denominado “Estrada Real” (CAMPOS, 2012).

Vários sítios de mineração histórica foram identificados pelos trabalhos de prospecção arqueológica na região do Sinclinal Moeda. Estes conjuntos oferecem a oportunidade ímpar de estudo sobre os métodos e técnicas minerárias empregadas durante os séculos XVIII e XIX, uma vez que cada processo extrativo utilizado deixou distintos vestígios (GUIMARÃES et al., 2008). A “mineração de cascalho”, foi utilizada para a extração do ouro aluvional nos primeiros anos da exploração das jazidas auríferas nas Minas Gerais, de modo que tal técnica está intimamente associada ao emprego de barragens e canais para o desvio das águas do seu curso original, para posterior apuração de sedimentos nas bateias. A “mineração de morro” explorava as jazidas auríferas presentes nas formações rochosas de encostas, o que exigia técnicas mais apuradas e, portanto, maior investimento no processo de extração mineral. Estão associadas a este procedimento as catas de talha a céu aberto, método que consistia em abrir fendas nas rochas, do cume até sua base, para que então com o uso de força humana e/ou hidráulica fossem extraídos os sedimentos (GUIMARÃES; REIS, 2007).

O sítio arqueológico denominado “Forte de Brumadinho” constitui um típico representante das unidades mineradoras da primeira metade do século XVIII. Implantado em posição geograficamente privilegiada, na encosta oeste da Serra da Calçada – porção norte da Serra da Moeda - é constituído por uma fortificação, uma grande cata a céu aberto, um extenso sistema hidráulico e uma estrada calçada que ligava a área de lavra, na parte mais baixa, ao topo da Serra

(GUIMARÃES, 2002). Admite-se, que o conjunto imediato do Forte define apenas o núcleo central da atividade minerária, uma vez que em uma perspectiva mais ampla, contemplam-se outros vários pontos desta região serrana como locais onde o ouro setecentista marcou sua presença (CAMPOS, 2010).

Outro sítio arqueológico relacionado à dinâmica da mineração colonial trata-se do conjunto de vestígios da antiga “Casa de Moeda Falsa do Paraopeba”, também conhecida por “Fábrica do Paraopeba”, uma fundição clandestina de moedas de ouro localizada nos contrafortes da até então chamada Serra do Paraopeba ⁴. Tal sítio arqueológico reflete o contexto do rigor tributário em oposição à constituição de uma “cultura da sonegação” contra os pesados tributos impostos pela Coroa às atividades minerárias. Cabe ressaltar que a moeda ali produzida foi chamada de falsa pelo fato de que o ouro não era fundido nas Casas de Fundição Reais e, portanto, não recebiam o selo da Coroa portuguesa que legalizava a sua circulação depois de cobrado o devido imposto (VEIGA, 1998). Índícios documentais confirmam a presença da fundição clandestina entre os anos de 1729 e 1732 que foi responsável pela origem do atual topônimo da Serra da Moeda (CAMPOS, 2009).

Já a partir da segunda metade do século XVIII, com a exaustão da produção aurífera, outras atividades econômicas passaram a ocupar espaços cada vez maiores na dinâmica da economia colonial. É neste contexto que a extração e o processamento do minério de ferro passaram a ser uma nova fonte de riquezas. A “Fábrica de Ferro de Congonhas do Campo” – conhecida como “Usina Patriótica” ou “Fábrica de Ferro do Prata”- implantada às margens do Ribeirão da Prata, localizada ao sul do Sinclinal Moeda, constituiu experiência pioneira em se tratando da produção de ferro utilizando-se a força hidráulica e produzindo em escala industrial em Minas Gerais (VEIGA, 1998). Do ponto de vista histórico e arqueológico, este sítio se reveste de enorme importância na história da siderurgia no Brasil, o que justifica seu tombamento pelo IPHAN no ano de 1937. Além disto, a Fábrica de Ferro do Prata tem sua importância histórica associada à figura de Wilhelm Ludwig von Eschwege, um de seus proprietários e

⁴ Antiga denominação da atual Serra da Moeda

empreendedor de diversas atividades ligadas à pesquisa e produção mineral na região do atual Quadrilátero Ferrífero (CAMPOS, 2012).

A produção de minério de ferro em escala industrial, iniciada com a experiência da Fábrica de Ferro de Congonhas do Campo, insere-se no contexto que tornou viável o desenvolvimento das linhas ferroviárias no Brasil a partir da segunda metade do século XIX. Tais implementos foram responsáveis, em grande medida, pela transformação radical das formas de se praticar o comércio e o transporte nas Minas Gerais que, até aquele momento, eram feitos em caminhos e estradas de terra em carros de bois e lombos de animais (GUIMARÃES et al., 2008). O surgimento das estações ferroviárias e novas cidades implantadas ao redor destas paradas – como exemplo a sede do município de Moeda - contribuem para alterar o papel predominante que os caminhos do Sinclinal Moeda possuíam até então no transporte e comércio.

A mineração é - historicamente, e ainda no presente - a atividade econômica mais relevante em todo o sinclinal. As minas do Sinclinal são responsáveis por 36% de todo o minério de ferro produzido no Brasil e 46% no Estado de Minas Gerais. A extração de outros minérios tem contribuições significativas para a economia do Estado, como o manganês (52%), a água mineral (22%), o talco (20%), o serpentinito (43%), o filito (63%) e a dolomita (25%). No que se refere ao minério de ferro, o Sinclinal Moeda contém 33% das reservas do Estado, 23% das reservas nacionais e 7% das reservas conhecidas no mundo (BRANDT,W., 2008).

Quase a totalidade das bordas do Sinclinal de Moeda encontra-se tomadas com áreas concedidas para lavra (FIG.4). As áreas de concessão de lavras correspondem majoritariamente ao ferro, sendo em menor proporção o manganês e o ouro. As jazidas de ferro ocorrem em toda a região, enquanto as de manganês se concentram principalmente na Serra da Moeda. As jazidas de ouro se encontram na porção norte da Serra da Moeda além de uma área na porção centro-sul da Serra das Serrinhas. Há também diversas ocorrências em menor quantidade, onde se destacam o mármore, o dolomito, rochas ornamentais, talco, alumínio e cobre. Na Região do Platô se encontram concessões de argila e água mineral.

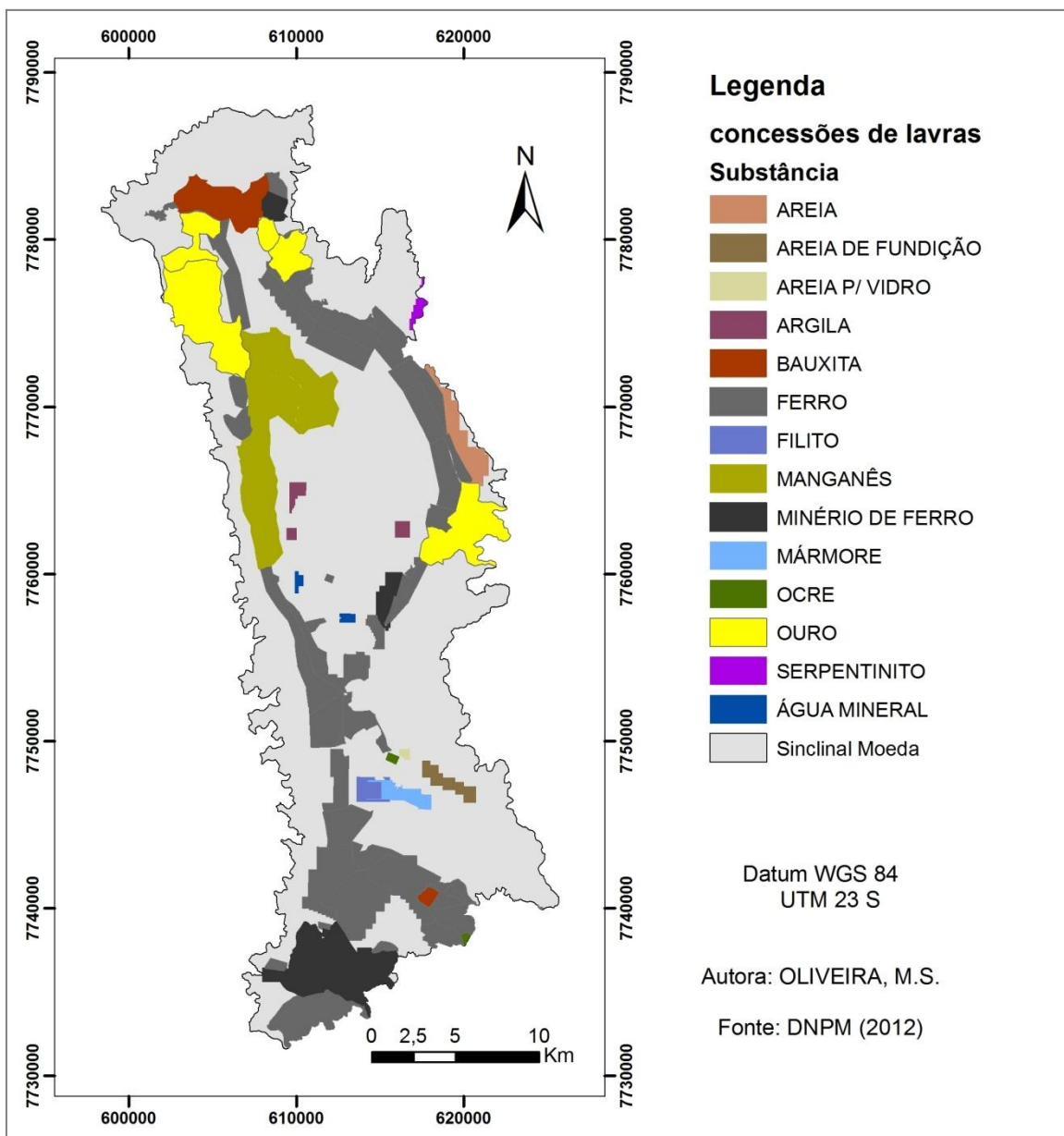


Figura 4 : Concessões de lavras no Sinclinal Moeda

Outra atividade desenvolvida a partir da abundância de recursos naturais na região do Sinclinal Moeda é o turismo. O eco-turismo, bem como o turismo de aventura e o turismo rural, ligados às belas paisagens e a riqueza hidrográfica da região, começam a favorecer o aparecimento de estabelecimentos de apoio, como pousadas e pequenos restaurantes e podem contribuir para oferta de fontes alternativas de renda das comunidades locais (BARBOSA, 2008). O potencial turístico da região do Sinclinal Moeda está ligado à presença e conservação dos atrativos naturais e paisagísticos, além dos aspectos históricos e culturais.

A população tradicional da região da Serra da Moeda se concentra nos povoados e comunidades rurais, atualmente com baixos níveis populacionais e tendo na produção agropecuária de pequeno porte e subsistência sua principal base econômica (RIGOTTI, 2008). Pela caracterização da população a partir dos Censos Agropecuários observa-se que o trabalho familiar é responsável por grande parte da produção primária. A baixa produtividade das culturas tradicionais predominantes e a ausência de explorações alternativas indicam a fragilidade econômica da agropecuária local, o que restringe a possibilidade de manutenção da mão de obra local e de garantias de emprego para as próximas gerações (AMARO, 2008).

A partir da década de 1950, houve o surgimento de empreendimentos imobiliários na região do Sinclinal Moeda através de casas de campo, sítios, chácaras e segundas residências, cujo público alvo era as classes de mais alta renda provenientes da capital mineira (COSTA, 2003). Tais empreendimentos foram incentivados pela implantação da rodovia federal BR-040 que liga Belo Horizonte ao Rio de Janeiro, principal eixo viário que atravessa o Sinclinal no sentido Norte-Sul, e paralelamente à Serra da Moeda.

A partir do início da década de 1990, esses empreendimentos se intensificaram na forma de condomínios – loteamentos fechados, composto por áreas exclusivamente residenciais e com acesso restrito - que procuram atender à demanda da camada mais rica da população metropolitana, que busca local seguro, com menos violência e melhor qualidade de vida (SOUZA; BRITO, 2006). A intensificação da produção imobiliária desse tipo de loteamento tem sido acompanhada do adensamento de outras áreas próximas, ocupadas por população com menores faixas de renda, atraída para atender à demanda por serviços de apoio nos condomínios (BHERING, 2002).

Diante da potencialidade de recursos ambientais existentes no Sinclinal Moeda, a investigação das tendências de uso da terra na região constitui uma tarefa importante, principalmente tendo-se em vista a crescente expansão das atividades minerárias e da ocupação urbana, as quais representam potenciais conflitos para a conservação do patrimônio ecológico, geológico e histórico-cultural abrigado pela região (BRANDT, 2008).

Neste sentido, ressalta-se a importância do estudo das mudanças de uso e cobertura da terra por meio da simulação de mudanças futuras com base nas tendências de mudanças do histórico recente, de forma a fornecer subsídios para o planejamento do uso e ocupação da região do Sinclinal Moeda.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O estudo pretende investigar a dinâmica de uso e cobertura da terra no Sinclinal Moeda por meio da identificação das principais tendências de mudanças ao longo do histórico recente de transformações da paisagem e da simulação de mudanças futuras.

2.1 Objetivos específicos

i) Detectar as mudanças de uso e cobertura da terra no período de 1991 a 2011 por meio de análise espacial.

ii) Elaborar previsões de mudanças futuras para o uso e cobertura da terra por meio de um modelo espacial de simulação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A delimitação da área de estudo foi realizada a partir da cota altitudinal de 1.100 metros, compreendendo uma área de 70.000 hectares que corresponde ao ambiente altimontano do Sinclinal Moeda (FIG.5), o qual é delimitado pela Serra da Moeda (a oeste) e Serra das Serrinhas (a leste), áreas de maior elevação que correspondem às bordas da estrutura geológica do Sinclinal. Localizada ao sul do município de Belo Horizonte, no Estado de Minas Gerais, Brasil, a área de estudo abrange parte dos municípios de Itabirito, Moeda, Belo Vale, Congonhas, Ouro Preto, Nova Lima e Brumadinho, sendo estes dois últimos pertencentes à Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Além destes municípios, o Sinclinal Moeda também atinge o território dos municípios de Rio Acima e Ibirité.

3.2 Base de dados espaciais

3.2.1 Série Temporal de Imagens de Satélite

As imagens do satélite LANDSAT-5 sensor *Thematic Mapper*, resolução 30 metros, para os anos de 1991, 2001, 2006 e 2011 foram obtidas a partir do catálogo de imagens disponibilizado gratuitamente pela Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI/INPE). Após o co-registro das imagens, deu-se a etapa de pré-processamento digital com montagem de composições coloridas RGB-743 seguida da aplicação de realce.

Para a classificação das imagens foi utilizado o método por regiões, a partir da segmentação com limiar de 25 e área mínima de 30 pixels, seguida do treinamento supervisionado para escolha das amostras, com o uso do classificador *Distância de Battacharya* para 99,9% de acurácia. A etapa de pós-classificação consistiu na edição vetorial dos polígonos classificados erroneamente e sua correção com base em referências como imagens do satélite Ikonos para o ano de 2006, imagens de alta resolução da base *Google Earth* para os anos de 2011 e 2006 além de dados de campo.

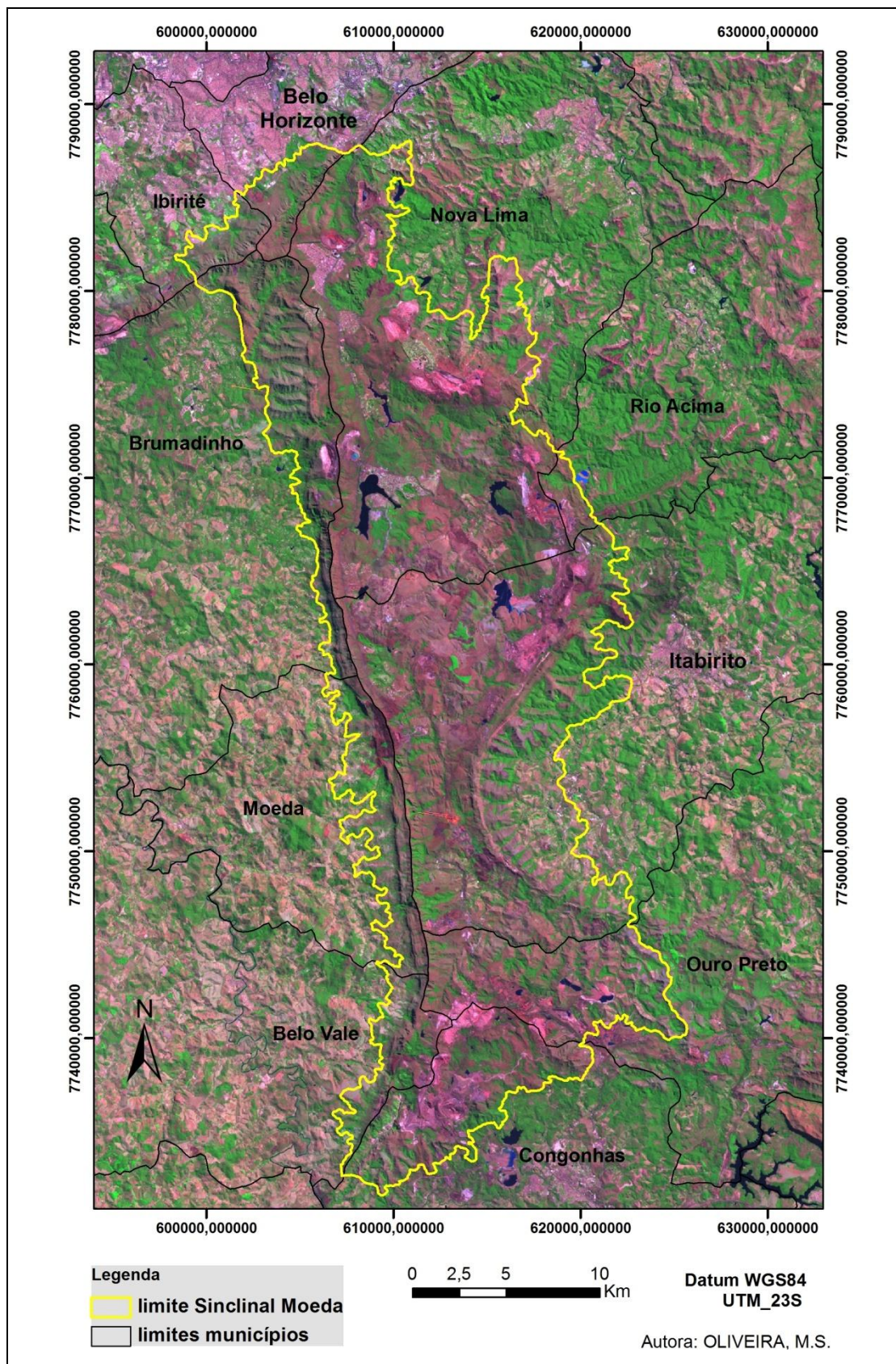


Figura 5: Localização do Sinclinal Moeda sobre imagem Landsat -5 TM composição colorida RGB-743 para o ano de 2011.

Nas etapas de registro, pré-processamento e classificação foi utilizado o software SPRING- *Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas versão 5.1.8* (CÂMARA et al., 1996).

Foram identificadas seis classes de cobertura da terra: água, mineração, urbano, arbórea, campestre e outros usos, cujos alvos estão descritos na Tabela 1. Para elaboração do modelo, as classes arbórea e campestre foram posteriormente reunidas numa única classe denominada 'vegetação'.

Tabela 1: Descrição das classes de cobertura da terra

Classe	Descrição
água	Lagos naturais e artificiais
mineração	Áreas de atividade minerária: cavas, infra-estrutura, áreas de entorno com solo exposto.
urbano	Áreas de ocupação urbana, aglomerados, bairros e condomínios.
arbórea	Vegetação arbórea. Fitofisionomias: Floresta Estacional Atlântica, Cerrados sensu strictu e capoeiras (formações secundárias)
campestre	Vegetação predominantemente arbustiva e/ou gramíneo-lenhosa. Fitofisionomias: Campos naturais, campos rupestres
outros usos	Usos que ocupam áreas minoritárias na região: agropecuária, industrial, comercial, entre outros

3.2.2 Determinantes Espaciais

Dados referentes à altimetria, hidrografia, estradas, áreas de concessão de lavra e unidades de conservação foram utilizados como determinantes espaciais das mudanças de uso e cobertura da terra investigadas. A partir da base topográfica SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* (MIRANDA, 2001) foi gerado o mapa de altimetria. A hidrografia foi gerada a partir de cartas topográficas digitalizadas do IBGE. Os limites espaciais das Unidades de Conservação (UCs) foram obtidos do mapeamento do Instituto Estadual de Florestas (IEF) com base nas informações do Cadastro Estadual de UCs para o ICMS Ecológico no Estado de Minas Gerais para o ano de 2011. O mapa de estradas foi obtido a partir do Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda (BRANDT, 2008). Os dados sobre direitos minerários e áreas de concessão de lavras foram obtidos através do Sistema de Informações Geográficas de Mineração - *SigMine* do Departamento Nacional de Produção

Mineral (DNPM). Para atenuar o efeito da presença de diferentes escalas, toda base espacial incluindo as imagens classificadas foram reamostradas para a resolução de 100 metros no formato raster. Os procedimentos de análise espacial das informações para a área de estudo foram realizados no software ArcGIS versão 9.3.

3.3 Detecção de Mudanças

A detecção das mudanças foi feita por meio de procedimentos de álgebra espacial utilizando-se as imagens classificadas para o uso e cobertura da terra nos anos de 1991, 2001, 2006 e 2011. As mudanças foram quantificadas em termos de perdas e ganhos de área por classe de uso e cobertura da terra para intervalos temporais de 5, 10 e 20 anos, o que permitiu identificar as principais tendências de mudanças ao longo do período de 1991 a 2011.

3.4 Modelo Espacial de Simulação

O modelo espacial para simulação das mudanças de uso e cobertura da terra consiste nas seguintes etapas (FIG. 6): estimativa da quantidade de mudanças, alocação espacial das mudanças, validação do modelo e simulação de mudanças futuras. Estas etapas serão descritas nas subseções a seguir.

As mudanças investigadas no modelo contemplaram apenas as transições de ocorrência mais relevante em termos de área ocupada no Sinclinal Moeda: (1) a transição de vegetação para mineração e (2) a transição de vegetação para ocupação urbana. O modelo espacial de simulação foi executado através do aplicativo *Land Change Modeler* – LCM que integra software IDRISI versão *Selva* (EASTMAN, 2011).

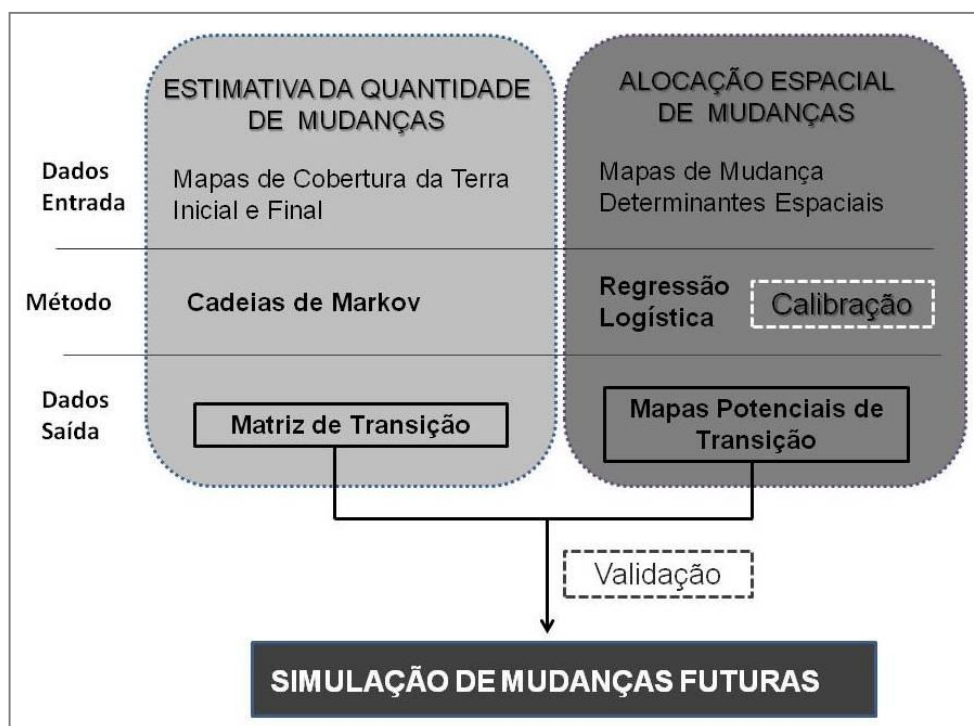


Figura 6: Etapas do modelo espacial de simulação de mudanças de uso e cobertura da terra

3.4.1 Estimativa da Quantidade de Mudanças

Tomando como dados de entrada os mapas de uso de cobertura da terra para os anos de 2006 (inicial) e 2011 (final), foi realizado o cálculo das taxas de transição com base em Cadeias de Markov, o que informa sobre a quantidade de mudanças a serem simuladas. Como produto é gerada a matriz de transição que contém as probabilidades de uma determinada classe permanecer a mesma ou mudar para outras classes durante um certo intervalo de tempo.

Cadeias de Markov são modelos matemáticos para descrever processos que se movem em uma seqüência de passos e através de um número finito de estados discretos. A probabilidade de se obter um determinado estado num instante t+1 depende apenas do estado observado num instante t (PAEGELOW; OLMEDO, 2008).

O modelo de Markov é expresso em notação matricial:

$$P = (P_{ij}) = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{vmatrix}$$

Na matriz, **P_{ij}** é a probabilidade de transição da *i*-ésima para a *j*-ésima classe de uso da terra; *n* são as classes de uso da terra presentes na área de estudo. **P_{ij}** deve seguir as seguintes condições:

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

A probabilidade de estado P(n) em qualquer tempo é obtida através da P(n-1) que é probabilidade preliminar multiplicada pela probabilidade de transição P_{ij}:

$$\mathbf{P(n) = P(n-1)P_{ij}}$$

Dessa forma, a Cadeia de Markov requer apenas o estabelecimento de um número finito de estados e que as probabilidades de transição sejam conhecidas (PAEGELOW; OLMEDO, 2008). No LCM, as probabilidades ou taxas de transição são derivadas de amostras relativas ao mapa de mudanças resultante dos mapas inicial e final e são calculadas para cada data a ser simulada com base no intervalo de tempo determinado.

3.4.2 Alocação Espacial das Mudanças

Os potenciais de transição são as probabilidades de mudança de classe calculadas a partir do mapa de mudanças e considerando a influência do conjunto de determinantes espaciais na alocação espacial das mudanças. Como produto, são gerados os mapas de potenciais de transição que contêm as probabilidades de mudança calculadas para cada pixel.

O método estatístico de Regressão Logística (RL) é aplicável nos casos onde a variável resposta é discreta e possui caráter qualitativo, assumindo dois ou mais possíveis estados (TABACHNICK; FIDELL, 2007). No LCM, cada transição do modelo é considerada como uma variável resposta qualitativa (Y) com dois resultados possíveis: permanência da classe inicial (Y=0) ou mudança para a classe final (Y=1).

Na RL, a probabilidade $P(x)$ de se obter os dois resultados possíveis ($Y=0$ ou $Y=1$) é calculada através de uma função não-linear resultante da melhor combinação linear das variáveis explicativas (X_n) ou preditoras.

$$P(x) = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}}$$

A RL consiste na extração do logaritmo natural da razão de chance ou *odds* em relação aos dois níveis da variável de saída, ou seja, a razão entre a probabilidade $P(1)$ de pertencer a uma classe e a probabilidade $P(0)$ de pertencer a outra classe. O logaritmo de *odds* ou *logit* corresponde à regressão linear multivariada convencional. O método comumente adotado para a estimativa de parâmetros em RL é a Máxima Verossimilhança, que fornece valores para os coeficientes (β_n) que maximizam a probabilidade de se obter o conjunto de dados observados (TABACHNICK; FIDELL, 2007).

Os determinantes espaciais constituem as variáveis explicativas (X_n) que serão utilizados no modelo: Mapas de classe para altimetria, áreas de concessão de lavras e unidades de conservação; Mapas de distância para cursos d'água, estradas pavimentadas e áreas urbanas. A escolha dos determinantes espaciais além de considerar a disponibilidade de dados espaciais para a região buscou contemplar variáveis utilizadas no estudo das vocações e conflitos de interesse da ocupação do território da região metropolitana de Belo Horizonte (MOURA et al., 2011) no qual os pesos de relevância das variáveis foram atribuídos com base no conhecimento especialista (*knowledge-driven model*).

A etapa de calibração visa à seleção do melhor conjunto de variáveis explicativas, de forma a produzir o melhor ajuste do modelo, que na RL pode ser verificado através do parâmetro *pseudo-R²* que apresenta valores entre 0 e 1, em que valores próximo a 1 indicam melhor ajuste.

3.4.3 Validação do modelo

A etapa de validação permite avaliar a performance do modelo através da comparação dos dados empíricos obtidos na simulação com os dados observados na realidade (PONTIUS et al., 2004).

A validação do modelo foi realizada a partir da comparação dos mapas de mudanças simuladas e de mudanças observadas para o ano de 2011. A simulação de mudanças foi realizada tomando como dados de entrada os mapas de cobertura da terra para os anos de 2001 e 2006. A escolha deste intervalo temporal diferente daquele usado modelo (2006-2011) se deu em função de limitações do aplicativo LCM, que não é capaz de fazer simulações para uma mesma data utilizada nos dados entrada, no caso para o ano de 2011. Para tornar viável este procedimento de validação, foi certificado que as taxas de transição e o ajuste do modelo para os mesmos parâmetros da calibração apresentam valores muito próximos para os dois períodos.

A estatística Kappa é uma medida de similaridade entre dois mapas baseada na razão da porcentagem de acertos observados pela porcentagem de acertos esperados por aleatoriedade. 'Kappa histo' e 'Kappa location' são extensões recentes que se referem respectivamente aos acertos referentes à quantidade e à localização das mudanças nos mapas (PONTIUS, 2000; PONTIUS, 2002). O índice 'Kappa fuzzy' consiste na razão da porcentagem esperada de acertos entre dois mapas pela fração acertos estatisticamente esperados na realocação aleatória das células nos dois mapas (HAGEN, 2003). Foi utilizado o aplicativo *Map Comparison Kit - MCK* (VISSER, 2004), que gerou os índices K_histo, K_location e K_fuzzy com valores entre 0 e 1, em que valores próximos de 1 indicam boa performance do modelo (VISSER; NIJS, 2006).

3.4.4 Simulação de Mudanças

A simulação de mudanças no aplicativo LCM é feita a partir da integração das taxas de transição e dos mapas potenciais de transição gerados que informam respectivamente sobre a quantidade e a alocação espacial das mudanças a serem simuladas. Utilizando como dados de entrada do modelo os mapas dos anos 2006 e 2011, foram então simulados os mapas de uso e cobertura da terra para os anos de 2016, 2021, 2026 e 2031.

SIMULAÇÃO DE MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA NO SINCLINAL MOEDA (MG) USANDO MODELO ESPACIAL

Marianne Silva Oliveira

Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Instituto de Geociências - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

doizenne@gmail.com

RESUMO

A expansão indiscriminada das atividades de uso da terra como mineração e ocupação urbana podem representar potenciais conflitos para a conservação do patrimônio geológico, ecológico e histórico-cultural abrigado pelo Sinclinal Moeda. Tendo em vista o exposto, o presente estudo tem como objetivos: (i) detectar as mudanças de uso e cobertura da terra no período de 1991 a 2011; (ii) elaborar previsões de mudanças futuras usando um modelo espacial de simulação. A partir da série temporal de imagens Landsat-5 TM dos anos 1991, 2001, 2006 e 2011 classificadas para uso e cobertura da terra foi possível identificar a expansão da mineração para quase 10% da área total do Sinclinal e a quadruplicação da área de ocupação urbana, ambas através da perda majoritária de vegetação campestre. O modelo espacial de simulação envolveu a estimativa da quantidade de mudanças por Cadeias de Markov e o cálculo da influência dos determinantes espaciais na alocação espacial das mudanças por Regressão Logística. A simulação das mudanças futuras caracterizou o cenário tendencial de acordo com o recente histórico, em que prevalece a expansão da mineração seguida pela expansão dos condomínios com a ocupação de 22% do total do Sinclinal Moeda por estas atividades. Embora o modelo tenha apresentado ótimo desempenho na projeção da quantidade de mudanças de uso da terra, verificou-se desempenho pouco satisfatório na alocação espacial das mesmas.

Palavras-chave: Mudança de uso da terra, modelo espacial, simulação, Sinclinal Moeda.

ABSTRACT

The indiscriminate expansion of land use activities such as mining and urban settlement may represent potential conflicts to the conservation of the geological, ecological and cultural heritage sheltered by Moeda Syncline. In view of the above, the present study aims to: (i) detect changes in land use and cover during the period from 1991 to 2011, (ii) develop estimates of future changes through a spatial model simulation. From the time series images of Landsat-5 TM in 1991, 2001, 2006 and 2011 classified for the use and land cover were able to identify an expansion of approximately 10% of the total area under mining of the Syncline and quadrupled the urban settlement area, both through the majority of grassland vegetation loss. The spatial model simulation involved the estimation of the amount of changes via Markov Chains and the calculation of the influence of spatial determinants of changes in spatial allocation through logistic regression. The simulation of future changes characterized the trend scenario according to recent history, prevailing at the expansion of mining followed by the expansion of condominiums with the occupation of 22% of the total Moeda Syncline with these activities. Although the model has shown excellent performance in the projection of the amount of changes in land use, there has been unsatisfactory performance in their spatial allocation.

Keywords: Land use change, spatial model, simulation, Moeda Syncline.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças de uso e cobertura da terra constituem fontes de alterações significativas da superfície terrestre e acarretam impactos potenciais para a atmosfera, para a diversidade biótica, para bens e serviços ambientais (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005). Os estudos sobre mudanças de uso e cobertura da terra, inicialmente voltados apenas para a detecção de mudanças da paisagem e entendimento das forças dirigentes, ao longo dos anos têm direcionado o foco da investigação para a modelagem de sistemas, através da previsão de mudanças e da exploração de possíveis cenários futuros (HOUET et al., 2010).

O desenvolvimento e a aplicação de modelos espaciais foram adotados como principais ferramentas para o estudo da dinâmica de uso e cobertura da terra (GAUCHEREL; HOUET, 2009), visto a grande disponibilidade de dados espaciais obtidos via sensoriamento remoto associada a uma ampla capacidade de manipulação e análise fornecida pelos Sistemas Geográficos de Informações (SIGs), o que permite o monitoramento de processos dinâmicos em diferentes resoluções espaciais e temporais.

A partir da análise das mudanças para um determinado intervalo de tempo é possível desenvolver um modelo matemático que estima a probabilidade de mudança em função

de um conjunto de determinantes espaciais, que constituem as variáveis explicativas da configuração espacial dos padrões de mudanças (MAS et al., 2011). Modelos que utilizam métodos empíricos estatísticos são denominados modelos dirigidos ao dados (*Data-driven models*), nos quais o tratamento das informações pode incluir desde técnicas de álgebra espacial até métodos estatísticos mais sofisticados com a implementação de abordagens utilizando autômatos celulares combinados com métodos como regressão logística, pesos de evidência, lógica *fuzzy* e algoritmos baseados em redes neurais (PAEGELOW; OLMEDO, 2008).

O Sinclinal Moeda é uma região altimontana localizada ao sul de Belo Horizonte, Minas Gerais e que constitui a borda oeste do “Quadrilátero Ferrífero”- região de destaque no cenário geológico mundial por suas reservas minerais, além de abrigar ocorrências geológicas e geomorfológicas singulares que representam testemunhos da evolução do relevo da Terra ao longo de milhões de anos, e que devem ser protegidos em função de sua geobiodiversidade (MACHADO & RUCHKYS, 2011).

Os ambientes montanos são considerados centros de biodiversidade e de endemismos, pois abrigam ecossistemas raros como é o caso dos ecossistemas de canga - concreções ferruginosas derivadas de rochas metamórficas sedimentares ricas em hematita

(SIMMONS, 2005). As áreas de Canga no Sinclinal Moeda ocupam aproximadamente 34 Km² e constituem habitats geologicamente diversos pela cronologia, composição e tamanho dos fragmentos (LOBATO et al., 2005). Dentre as fitofisionomias campestres que predominam no Sinclinal Moeda, os campos rupestres ocorrem em áreas significativas sobre canga, quartzito e, embora mais escasso, sobre granito (JACOBI; CARMO, 2008) e se destacam pela sua biodiversidade, pois do total de espécies ameaçadas de extinção da flora de Minas Gerais, cerca de 66% ocorrem nos campos rupestres (MENDONÇA; LINS, 2000).

Além de abrigar ecossistemas com alta diversidade e endemismo, o ambiente montano do Sinclinal Moeda destaca-se ainda por sua importância hidrológica regional, ao abrigar reservas subterrâneas e área significativa para recarga de mananciais (AUGUSTIN; MOREIRA, 2008) onde estão localizadas inúmeras nascentes do Rio das Velhas (a leste) e do Rio Paraopeba (a oeste), ambos afluentes do Rio São Francisco e dois dos seus maiores tributários.

A presença humana na região remonta à pré-história, mas a ocupação através de vilas e povoados ocorreu com a exploração do ouro na época colonial, o que pode ser atestada pelos inúmeros vestígios arqueológicos que compõe o rico acervo histórico-cultural abrigado pela região (GUIMARÃES, et al., 2008). A mineração é - historicamente, e

ainda no presente - a atividade econômica mais relevante na região, com destaque para mineração de ferro. As minas do Sinclinal são responsáveis por 36% de todo o minério de ferro produzido no Brasil e 46% no Estado de Minas Gerais. No que se refere ao minério de ferro, o Sinclinal Moeda contém 33% das reservas do Estado, 23% das reservas nacionais e 7% das reservas conhecidas no mundo (BRANDT, W., 2008).

A partir de 1990 se intensificou a implantação de empreendimentos imobiliários na forma de condomínios – loteamentos fechados, composto por áreas exclusivamente residenciais e com acesso restrito - que procuram atender à demanda das camadas de mais alta renda da população metropolitana (SOUZA; BRITO, 2006). A intensificação da produção imobiliária desse tipo de loteamento tem sido acompanhada do adensamento de outras áreas, próximas, ocupadas por população com menores faixas de renda atraída para atender à demanda por serviços de apoio nos condomínios (BHERING, 2002).

Tendo em vista que a expansão indiscriminada das atividades de uso da terra podem representar potenciais conflitos para a conservação do patrimônio geológico, ecológico e histórico-cultural abrigado pelo Sinclinal Moeda, o presente estudo tem como objetivos: (i) detectar as mudanças de uso e cobertura da terra no período de 1991 a 2011; (ii) elaborar previsões de mudanças futuras por meio de modelo espacial de simulação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A delimitação da área de estudo foi realizada a partir da cota altitudinal de 1.100 metros, compreendendo uma área de 70.000 hectares que corresponde ao ambiente altimontano do Sinclinal Moeda (FIG.7) que é delimitado pela Serra da Moeda (a oeste) e Serra das Serrinhas (a leste), áreas de maior altimetria que correspondem às bordas da estrutura geológica do Sinclinal. Localizada ao sul do município de Belo Horizonte, no Estado de Minas Gerais, Brasil, a área de estudo abrange parte dos municípios de Ibirité, Itabirito, Rio Acima, Moeda, Belo Vale, Congonhas, Ouro Preto, Nova Lima e Brumadinho, sendo estes dois últimos pertencentes à Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH).

2.2 Base de dados espaciais

2.2.1 Série Temporal de Imagens de Satélite

As imagens do satélite LANDSAT-5 sensor *Thematic Mapper*, resolução 30 metros, para os anos de 1991, 2001, 2006 e 2011 foram obtidas a partir do catálogo de imagens disponibilizado gratuitamente pela Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI/INPE). Após o co-registro das imagens, deu-se a etapa de pré-processamento digital com montagem de composições coloridas RGB-

743 seguida da aplicação de realce. Para a classificação das imagens foi utilizado o método por regiões, a partir da segmentação com limiar de 25 e área mínima de 30 pixels, seguida do treinamento supervisionado para escolha das amostras, com o uso do classificador *Distância de Battacharya* para 99,9% de acurácia.

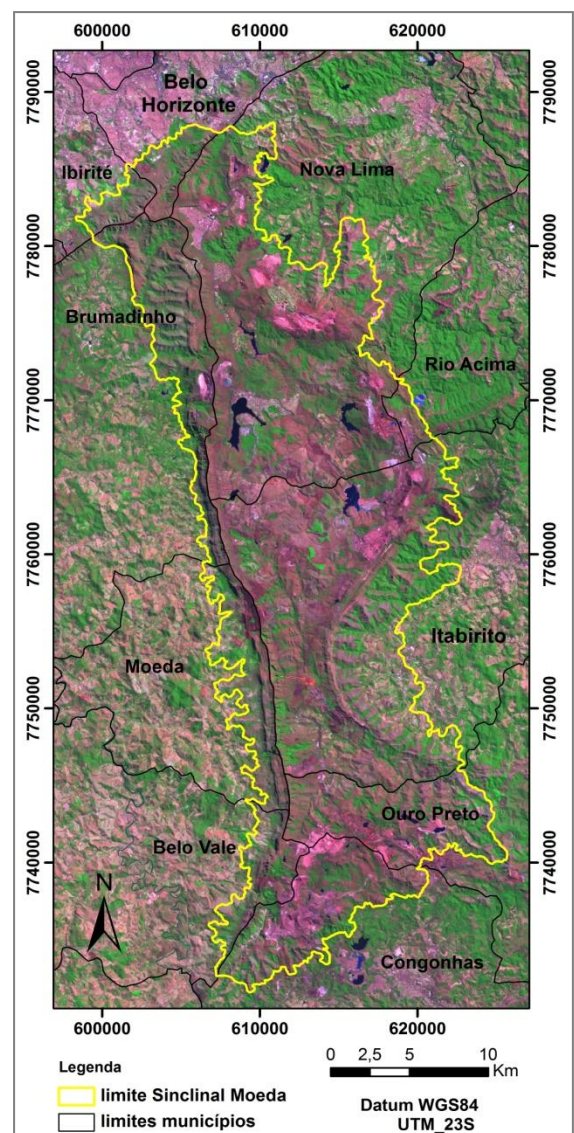


Figura 7: Localização do Sinclinal Moeda sobre imagem Landsat -5 TM composição colorida RGB-743 para o ano de 2011.

A etapa de pós-classificação consistiu na edição vetorial dos polígonos classificados erroneamente e sua correção com base em referências como imagens do satélite Ikonos para o ano de 2006, imagens de alta resolução da base *Google Earth* para os anos de 2011 e 2006 além de dados de campo. Nas etapas de registro, pré-processamento e classificação foi utilizado o software SPRING- *Sistema de Processamento de*

Informações Georreferenciadas versão 5.1.8 (CÂMARA et al., 1996).

Foram identificadas seis classes de cobertura da terra: água, mineração, urbano, arbórea, campestre e outros usos, cujos alvos estão descritos na Tabela 2. Para elaboração do modelo, as classes arbórea e campestre foram posteriormente reunidas numa única classe denominada ‘vegetação’.

Tabela 2: Descrição das classes de cobertura da terra

Classe	Descrição
água	Lagos naturais e artificiais
mineração	Áreas de atividade mineraria: cavas, infra-estrutura, áreas de entorno com solo exposto
urbano	Áreas de ocupação urbana, aglomerados, bairros e condomínios
arbórea	Vegetação arbórea, Fitofisionomias: Floresta Estacional Atlântica, Cerrados sensu strictu e capoeiras (formações secundárias)
campestre	Vegetação predominantemente arbustiva e/ou gramíneo-lenhosa Fitofisionomias: Campos naturais, campos rupestres
outros usos	Usos que ocupam áreas minoritárias na região: agropecuária, industrial, comercial entre outros

2.2.2 Dados Espaciais

Dados espaciais referentes à altimetria, hidrografia, estradas, áreas de concessão de lavra e unidades de conservação foram utilizados como determinantes espaciais das mudanças de uso e cobertura da terra investigadas. A partir da base topográfica SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* (MIRANDA, 2001) foi gerado o mapa de altimetria. A hidrografia foi gerada a partir de cartas topográficas digitalizadas do IBGE. Os limites espaciais das Unidades de Conservação (UCs) foram obtidos do

mapeamento do Instituto Estadual de Florestas (IEF) com base nas informações do Cadastro Estadual de UCs para o ICMS Ecológico no Estado de Minas Gerais para o ano de 2011. O mapa de estradas foi obtido a partir do Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda (BRANDT, 2008). Os dados sobre direitos minerários e áreas de concessão de lavras foram obtidos através do Sistema de Informações Geográficas de Mineração - *SigMine* do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

Para atenuar o efeito da presença de diferentes escalas, toda base espacial incluindo as imagens classificadas foram reamostradas para a resolução de 100 metros no formato raster. Os procedimentos de análise espacial foram realizados no software ArcGIS versão 9.3 (ESRI).

2.3 Detecção de Mudanças

A detecção das mudanças foi feita por meio de procedimentos de álgebra espacial utilizando-se as imagens classificadas para o uso e cobertura da terra nos anos de 1991, 2001, 2006 e 2011. As mudanças foram quantificadas em termos de perdas e ganhos

de área por classe de uso e cobertura da terra para intervalos temporais de 5, 10 e 20 anos, o que permitiu identificar as principais tendências de mudanças ao longo do período de 1991 a 2011.

2.4 Modelo Espacial de Simulação

O modelo espacial para simulação das mudanças de uso e cobertura da terra consiste nas seguintes etapas (FIG. 8): estimativa da quantidade de mudanças, alocação espacial das mudanças, validação do modelo e simulação de mudanças futuras. Estas etapas serão descritas nas subseções a seguir.

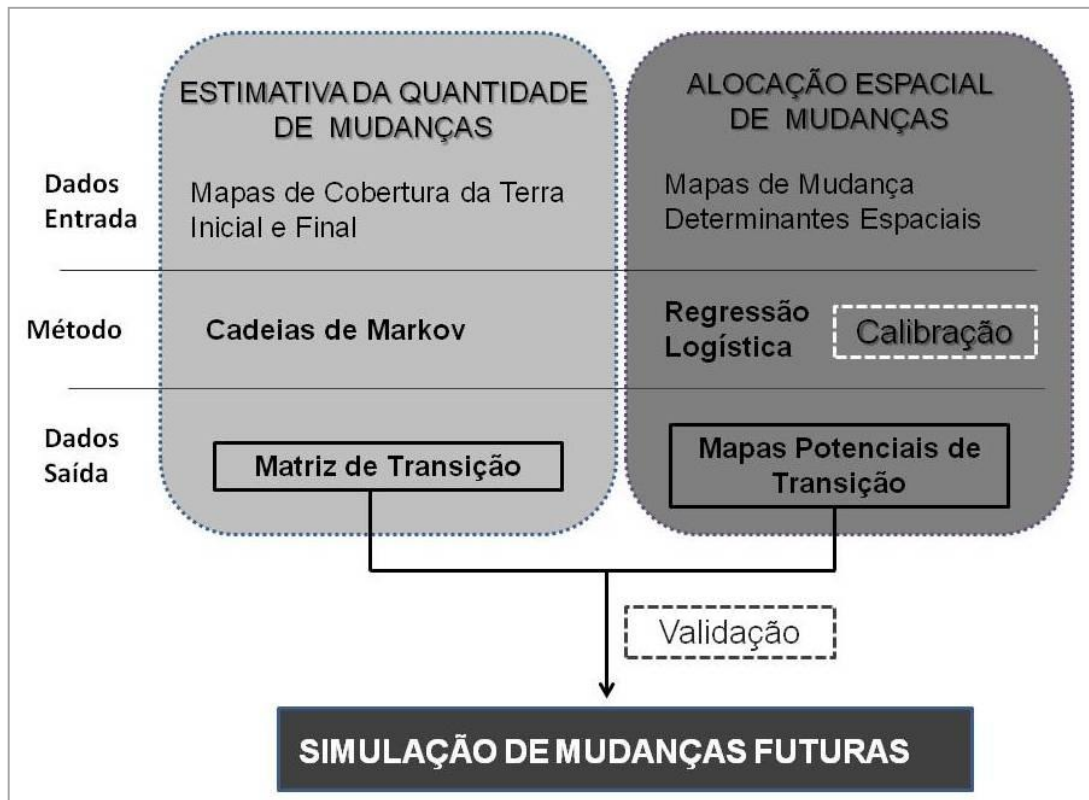


Figura 8: Etapas do modelo espacial de simulação de mudanças de uso e cobertura da terra

As mudanças investigadas no modelo contemplaram apenas as transições de ocorrência mais relevante em termos de área ocupada no Sinclinal Moeda: (1) a transição de vegetação para mineração e (2) a transição de vegetação para ocupação urbana. O modelo espacial de simulação foi executado através do aplicativo *Land Change Modeler – LCM* que integra software IDRISI versão *Selva* (EASTMAN, 2011).

2.4.1 Estimativa da Quantidade de Mudanças

Tomando como dados de entrada os mapas de uso de cobertura da terra para os anos de 2006 (inicial) e 2011 (final), foi realizado o cálculo das taxas de transição com base em Cadeias de Markov, o que informa sobre a quantidade de mudanças a serem simuladas. Como produto é gerada a matriz de transição que contém as probabilidades de uma determinada classe permanecer a mesma ou mudar para outras classes durante um certo intervalo de tempo.

Cadeias de Markov são modelos matemáticos para descrever processos que se movem em uma seqüência de passos e através de um número finito de estados discretos. A probabilidade de se obter um determinado estado num instante t+1 depende apenas do estado observado num instante t (PAEGELOW; OLMEDO, 2008).

O modelo de Markov é expresso em notação matricial:

$$P = (P_{ij}) = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix}$$

Na matriz, P_{ij} é a probabilidade de transição da i -ésima para a j -ésima classe de uso da terra; n são as classes de uso da terra presentes na área de estudo.

P_{ij} deve seguir as seguintes condições:

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

$$\sum_{i=1}^n P_{ij} = 1 (i, j = 1, 2, 3, \dots, n)$$

A probabilidade de estado $P(n)$ em qualquer tempo é obtida através da $P(n-1)$ que é probabilidade preliminar multiplicada pela probabilidade de transição P_{ij} :

$$P(n) = P(n-1)P_{ij}$$

Dessa forma, a Cadeia de Markov requer apenas o estabelecimento de um número finito de estados e que as probabilidades de transição sejam conhecidas (PAEGELOW; OLMEDO, 2008). No LCM, as probabilidades ou taxas de transição são derivadas de amostras relativas ao mapa de mudanças resultante dos mapas inicial e final e são calculadas para cada data a ser simulada com base no intervalo de tempo determinado.

2.4.2 Alocação Espacial das Mudanças

Os potenciais de transição são as probabilidades de mudança de classe calculadas a partir do mapa de mudanças e considerando a influência do conjunto de determinantes espaciais na alocação espacial das mudanças. Como produto, são gerados os mapas de potenciais de transição que contêm as probabilidades de mudança calculadas para cada pixel.

O método estatístico de Regressão Logística (RL) é aplicável nos casos onde a variável resposta é discreta e possui caráter qualitativo, assumindo dois ou mais possíveis estados (TABACHNICK; FIDELL, 2007). No LCM, cada transição do modelo é considerada como uma variável resposta qualitativa (Y) com dois resultados possíveis: permanência da classe inicial (Y=0) ou mudança para a classe final (Y=1).

Na RL, a probabilidade P(x) de se obter os dois resultados possíveis (Y=0 ou Y=1) é calculada através de uma função não-linear resultante da melhor combinação linear das variáveis explicativas (X_n) ou preditoras.

$$P(x) = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n)}}$$

A RL consiste na extração do logaritmo natural da razão de chance ou *odds* em relação aos dois níveis da variável de saída, ou seja, a razão entre a probabilidade P(1) de pertencer a uma classe e a probabilidade P(0)

de pertencer a outra classe. O logaritmo de *odds* ou logit corresponde à regressão linear multivariada convencional.

O método comumente adotado para a estimativa de parâmetros em RL é a Máxima Verossimilhança, que fornece valores para os coeficientes (β_n) que maximizam a probabilidade de se obter o conjunto de dados observados (TABACHNICK; FIDELL, 2007).

Os determinantes espaciais constituem as variáveis explicativas (X_n) que serão utilizados no modelo: Mapas de classe para altimetria, áreas de concessão de lavras e unidades de conservação; Mapas de distância para cursos d'água, estradas pavimentadas e áreas urbanas. A escolha dos determinantes espaciais além de considerar a disponibilidade de dados espaciais para a região buscou contemplar variáveis utilizadas no estudo das vocações e conflitos de interesse da ocupação do território da região metropolitana de Belo Horizonte (MOURA et al., 2011) no qual os pesos de relevância das variáveis foram atribuídos com base no conhecimento especialista (*knowledge-driven model*).

A etapa de calibração visa à seleção do melhor conjunto de variáveis explicativas, de forma a produzir o melhor ajuste do modelo, que na RL pode ser verificado através do parâmetro *pseudo-R²* que apresenta valores entre 0 e 1, em que valores próximo a 1 indicam melhor ajuste.

2.4.3 Validação do modelo

A etapa de validação permite avaliar a performance do modelo através da comparação dos dados empíricos obtidos na simulação com os dados observados na realidade (PONTIUS et al., 2004). A validação do modelo foi realizada a partir da comparação dos mapas de mudanças simuladas e de mudanças observadas para o ano de 2011. A simulação de mudanças foi realizada tomando como dados de entrada os mapas de cobertura da terra para os anos de 2001 e 2006. A escolha deste intervalo temporal diferente daquele usado modelo (2006-2011) se deu em função de limitações do aplicativo LCM, que não é capaz de fazer simulações para uma mesma data utilizada nos dados entrada, no caso para o ano de 2011. Para tornar viável este procedimento de validação, foi certificado que as taxas de transição e o ajuste do modelo para os mesmos parâmetros da calibração apresentam valores muito próximos para os dois períodos.

A estatística Kappa é uma medida de similaridade entre dois mapas baseada na razão da porcentagem de acertos observados pela porcentagem de acertos esperados por aleatoriedade. ‘Kappa histo’ e ‘Kappa location’ são extensões recentes que se referem respectivamente aos acertos referentes à quantidade e à localização das mudanças nos mapas (PONTIUS, 2000; PONTIUS, 2002). O índice ‘Kappa fuzzy’ consiste na razão da porcentagem esperada de

acertos entre dois mapas pela fração acertos estatisticamente esperados na realocação aleatória das células nos dois mapas (HAGEN, 2003). Foi utilizado o aplicativo *Map Comparision Kit* - MCK (VISSER, 2004), que gerou os índices K_histo, K_location e K_fuzzy com valores entre 0 e 1, em que valores próximos de 1 indicam boa performance do modelo (VISSER; NIJS, 2006).

2.4.4 Simulação de Mudanças

A simulação de mudanças no aplicativo LCM é feita a partir da integração das taxas de transição e dos mapas potenciais de transição gerados que informam respectivamente sobre a quantidade e a alocação espacial das mudanças a serem simuladas. Utilizando como dados de entrada do modelo os mapas dos anos 2006 e 2011, foram então simulados os mapas de uso e cobertura da terra para os anos de 2016, 2021, 2026 e 2031.

3. RESULTADOS

3.1 Detecção de Mudanças

A mineração, com área inicial de 2.504 ha em 1991, tem área duplicada no ano de 2006, e passa a ocupar 6.801 ha no ano de 2011. A classe ‘urbano’, com apenas 587 ha no ano de 1991, quadruplicou sua área de ocupação ao longo dos 20 anos seguintes,

totalizando 2.423 ha no ano de 2011 (FIG. 9A), área quase três vezes menor em relação à área ocupada pela mineração. A vegetação campestre, além de ser a classe predominante de cobertura da terra no Sinclinal Moeda, é também a classe alvo da maior parte das

mudanças, o que pode ser verificado pela redução em área de 5.830 ha no período de 1991 a 2011. A perda de vegetação arbórea totalizou aproximadamente 1.000 ha ao longo do período de 20 anos (FIG.9B).

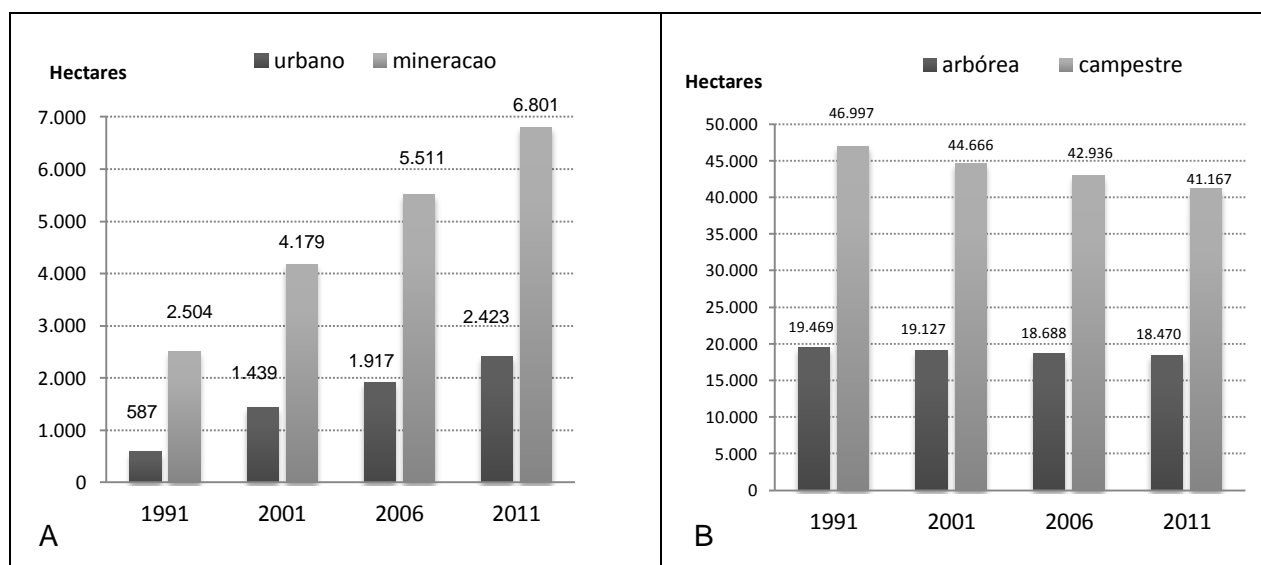


Figura 9: Área total em hectares ocupada pelas classes urbano e mineração (A), vegetação arbórea e campestre (B) para os anos de 1991, 2001, 2006 e 2011.

A vegetação campestre, além de ser a classe predominante de cobertura da terra no Sinclinal Moeda, é também a classe alvo da maior parte das mudanças, o que pode ser verificado pela redução em área de 5.830 ha no período de 1991 a 2011.

A quantidade de mudanças, proporcionalmente ao intervalo de tempo, foi maior para o período de 2001 a 2011, com perda de 4.073 ha de vegetação e incrementos de 2.576 ha de mineração e 1.034 ha de ocupação urbana (TAB. 3).

Tabela 3: Mudanças em área (hectares) por intervalos de tempo no período de 1991 a 2011

período	total anos	vegetação	mineração	urbano	outros usos
1991-2011	20	-6804	4252	1849	516
1991-2001	10	-2731	1676	815	163
2001-2011	10	-4073	2576	1034	353
2001-2006	5	-2122	1313	534	101
2006-2011	5	-1951	1263	500	252

A classe ‘outros usos’ apresenta área de mudança total de 516 ha, valor minoritário em relação às demais classes.

Ao longo da série temporal dos mapas de uso e cobertura da terra para os anos de 1991, 2001, 2006 e 2011 (FIG.10) é possível observar a expansão crescente das classes mineração e urbano. O surgimento de núcleos urbanos ocorre na porção centro-norte da área de estudo, enquanto a expansão da mineração se dá majoritariamente nas adjacências das áreas já existentes.

3.2 Modelo Espacial de Simulação

3.2.1 Calibração do Modelo

A escolha dos determinantes espaciais foi feita com base no melhor ajuste do modelo para cada transição investigada. Na transição ‘vegetação-mineração’, foram utilizados como determinantes espaciais: altimetria (alt), distância aos cursos d’água (d_hidro), áreas de concessão de lavras (con_lav) e unidades de conservação (ucs), cujos coeficientes obtidos na regressão logística estão descritos na equação (1). O valor obtido para o pseudo-R² foi de 0,1471.

$$\text{Logit (mineração)} = -12,6916 + 1,548004 * \text{con_lav} - 1,441140 * \text{ucs} + 0,006288 * \text{alt} - 0,000713 * \text{d_hidro}$$

Equação (1)

Na transição ‘vegetação-urbano’, foram utilizados como determinantes espaciais: distância a áreas urbanas (d_urb), distância a estradas pavimentadas (d_estP) e unidades de conservação (ucs), cujos coeficientes obtidos na regressão logística estão descritos na equação (2). O valor obtido para o pseudo-R² foi de 0,2817.

$$\text{Logit (urbano)} = - 2,1778 - 0,002501 * \text{d_urb} - 2,060851 * \text{ucs} + 0,000240 * \text{d_estP}$$

Equação (2)

Com base nos valores de pseudo- R² é possível afirmar que a transição de vegetação para ocupação urbana apresenta melhor ajuste em relação à transição para mineração.

3.2.2 Potenciais de Transição

Na transição de vegetação para mineração, as áreas de maior probabilidade de mudança (0,1 a 0,24) foram observadas nas regiões de maior altimetria, especificamente na parte centro –norte do Sinclinal, ao longo da Serra da Moeda e na porção sul desta que constitui a borda oeste da área de estudo (FIG.11A). Na transição de vegetação para a classe ‘urbano’, as áreas com maior probabilidade de mudança (0,1 a 0,26) foram alocadas nas adjacências e entorno de áreas urbanas pré-existentes (FIG.11B).

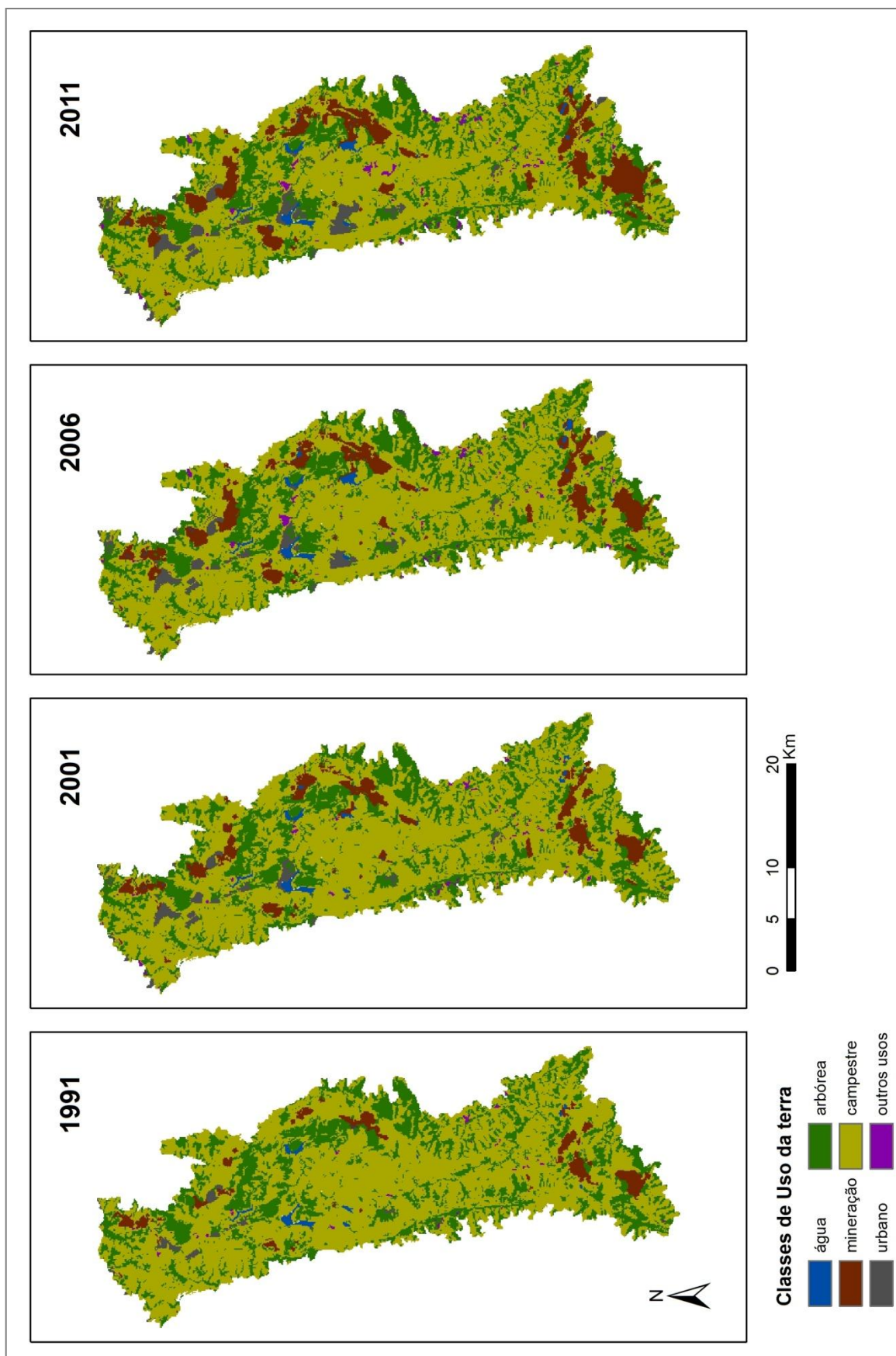


Figura 10: Classificação de uso e cobertura da terra no Sincinical Moeda para os anos de 1991, 2001, 2006 e 2011

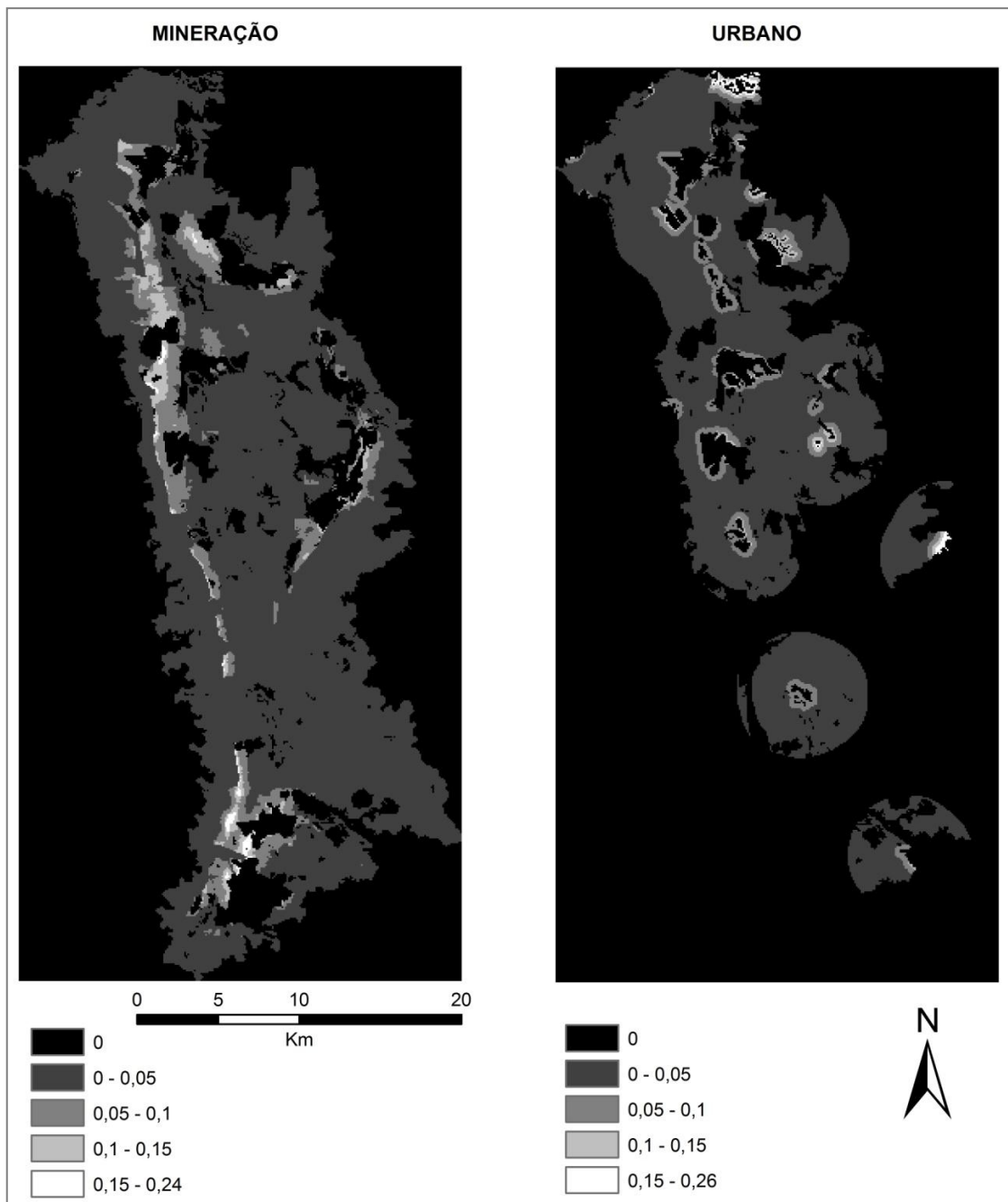


Figura 11: Mapas de Potenciais de Transição para a classe ‘mineração’ (A) e classe ‘urbano’(B)

3.2.3 Validação do Modelo

Os valores obtidos para os índices Kappa indicam ótima performance quanto à projeção da quantidade de mudanças ($K_{\text{histo}}=0,905$) e baixo desempenho relativo à alocação espacial das mudanças simuladas ($K_{\text{location}} = 0,100$ e $K_{\text{fuzzy}}= 0,046$).

3.2.4 Simulação de Mudanças Futuras

Nos mapas de uso e cobertura da terra simulados para os anos de 2016, 2021, 2026 e 2031 (FIG.12) é possível observar as mudanças projetadas para a transição da vegetação para as classes mineração e ocupação urbana.

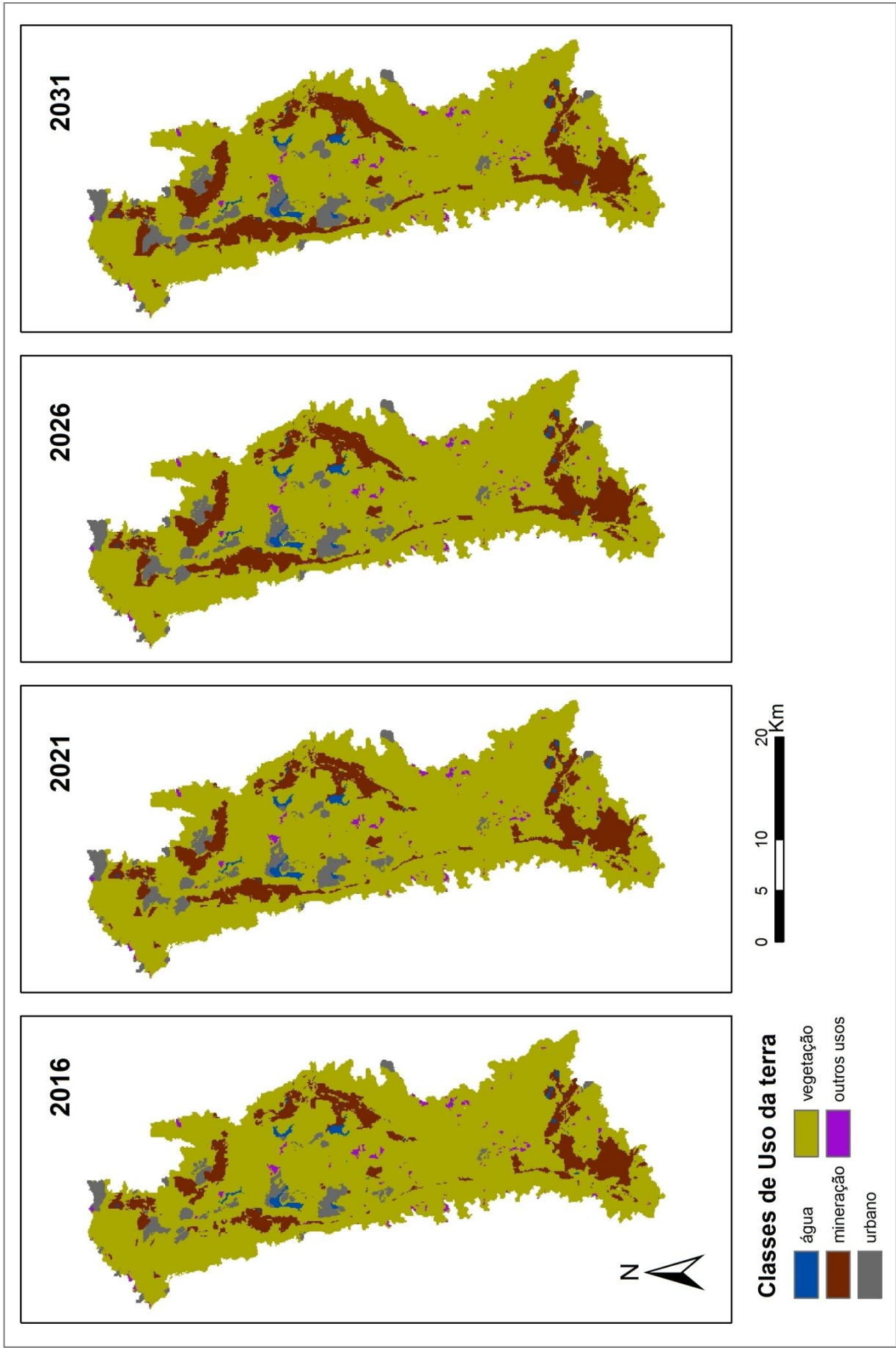


Figura 12: Simulações de uso e cobertura da terra para os anos de 2016, 2021, 2026 e 2031

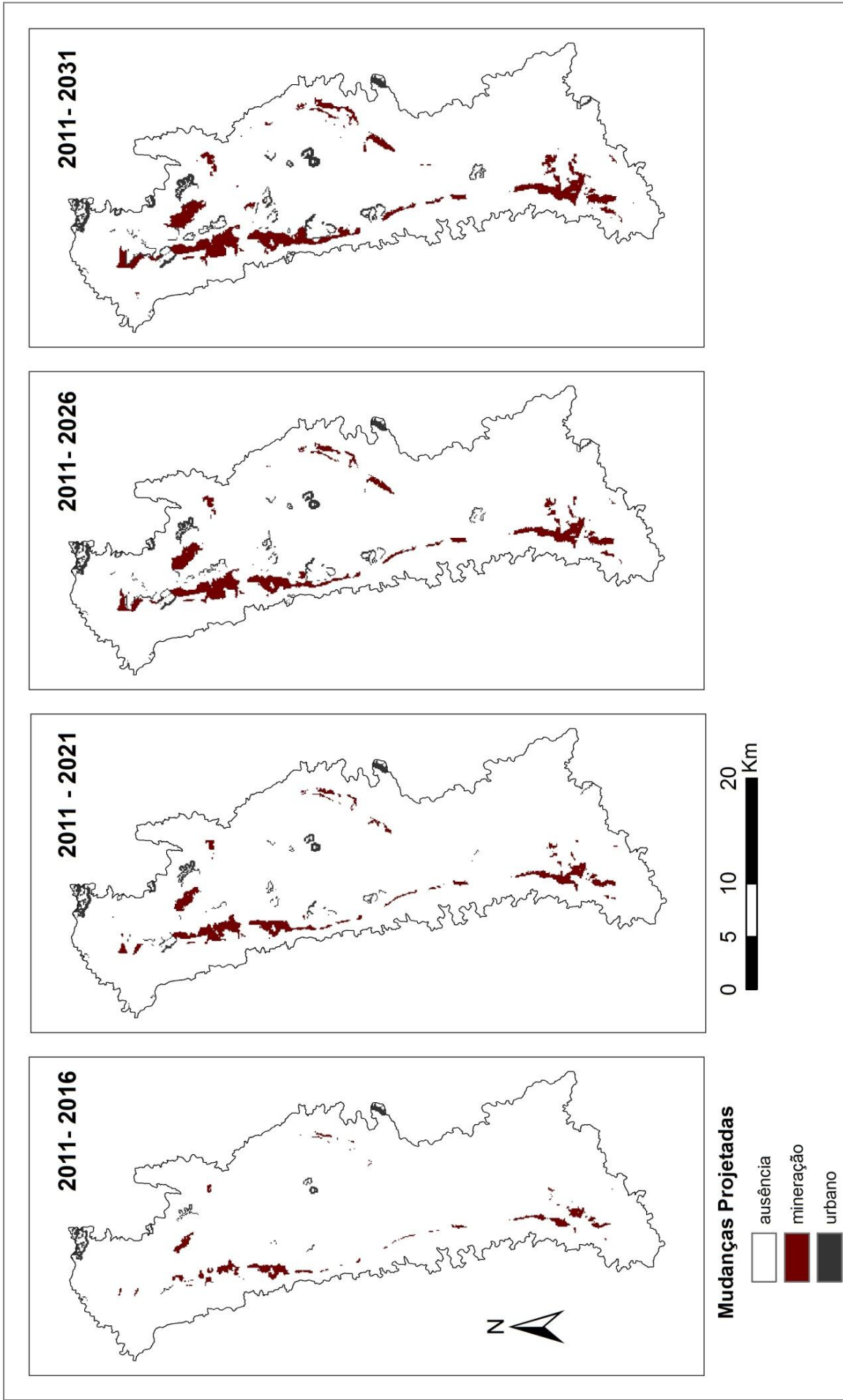


Figura 13: Mudanças simuladas de uso e cobertura da terra para os anos de 2016, 2021, 2026 e 2031 com base no período 2006-2011

Através da comparação dos mapas de mudanças simuladas (FIG.13) é possível visualizar o padrão de alocação espacial das mudanças, estas que tendem a se situar em áreas adjacentes aos espaços já ocupados pelas classes alvos de transição.

As taxas de transição calculadas no LCM para cada ano simulado (TAB. 4) apresentam valores decrescentes de probabilidade da classe ‘vegetação’ permanecer a mesma ao longo dos anos (0,96 a 0,87) e sua transição para a classe mineração possui valores de probabilidade crescentes (0,02 a 0,07) e relativamente maiores do que as probabilidades da classe de ocupação urbana.

Tabela 4: Probabilidades de transição da classe ‘vegetação’ para as classes ‘mineração’ e ‘urbano’

ano	mineração	urbano	vegetação
2016	0.0206	0.0083	0.9665
2021	0.0402	0.0162	0.9347
2026	0.0587	0.0239	0.9046
2031	0.0764	0.0312	0.8760

Mesmo com taxas de transição da vegetação para mineração e ocupação urbana com valores crescentes, as áreas de incremento são decrescentes ao longo dos quinquênios para o período de 2011 a 2031 (TAB. 5).

A perda de vegetação projetada para o intervalo de 20 anos totaliza 6.417 ha, sendo 4.555 ha transformados em mineração e 1.862 ha em ocupação urbana.

Tabela 5: Mudanças simuladas em área (ha) para o período de 2011 a 2031

período	total anos	vegetação	mineração	urbano
2011-2016	5	-1723	1228	495
2016-2021	5	-1639	1167	472
2021-2026	5	-1563	1107	456
2026-2031	5	-1492	1062	439
2011-2021	10	-3362	2395	967
2021-2031	10	-3055	2169	895
2011-2031	20	-6417	4555	1862

Sendo assim, no ano de 2031 a mineração deverá ocupar o total de 11.365 ha e a classe urbano 4.285 ha (FIG.14), o que corresponde a aumentos superiores a 160% da área ocupada por estas classes no ano de 2011.

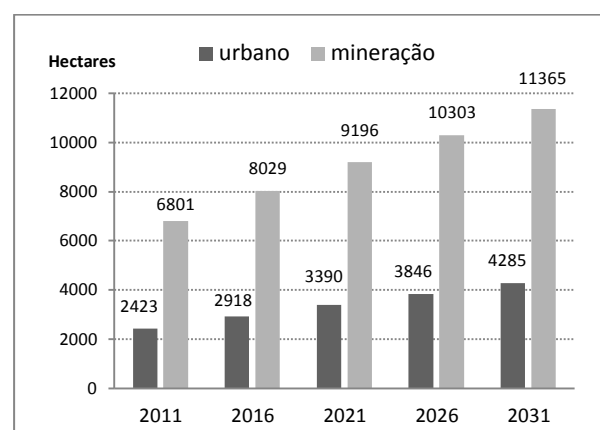


Figura 14: Área total (ha) das classes ‘urbano’ e ‘mineração’ projetada para os anos de 2011, 2016, 2021, 2026 e 2031.

4. DISCUSSÃO

4.1 Detecção das mudanças de uso da terra

A investigação do histórico da dinâmica da paisagem pode auxiliar na identificação das tendências de mudanças (ANTROP, 2005).

Neste sentido, a detecção de mudanças para o período de 1991 a 2011 permitiu identificar como principais vetores de transformação da paisagem o uso da terra pela mineração e ocupação urbana, estas que somavam apenas 3.000 ha em 1991 e, nos 20 anos seguintes, ultrapassaram 9.000 ha, sendo a mineração com 6.800 ha em 2011 equivalente a quase 10% da área total do Sinclinal Moeda.

Os ecossistemas de canga e os campos rupestres são majoritariamente afetados pela mineração, estes que constituem ambientes singulares em termos de biodiversidade, e atualmente estão bastante ameaçados no Brasil (JACOBI et al., 2007). Em comparação com as fitofisionomias campestres, a vegetação arbórea sofreu menores perdas, fato que pode estar relacionado à localização dos fragmentos de Floresta Atlântica Estacional em fundos de vales e vertentes íngremes, locais que caracterizam restrições de uso e são alvos de proteção legal na condição de Áreas de Preservação Permanente (APPs).

A expansão da atividade minerária e a ocupação indiscriminada do terreno para loteamentos e condomínios, pode representar, a médio e a longo prazos, impactos para hidrografia local e regional, à medida em que as atividades de uso da terra interceptem mananciais e contribuam para diminuir as áreas de recarga da água subterrânea com consequente redução substancial nos volumes que mantêm as nascentes dos vales principais

da área em questão (AUGUSTIN; MOREIRA, 2008).

4.2 Modelagem de Mudanças de uso e cobertura da terra

O desempenho do modelo na alocação espacial das mudanças pode ser considerado pouco satisfatório, o que se deve ao baixo ajuste - valores de *pseudo-R²* inferiores a 0,5 - para as transições. Isto significa que o conjunto de determinantes espaciais utilizado tem baixa capacidade de explicar a configuração espacial das mudanças. Para melhorias no ajuste do modelo, recomenda-se que novos conjuntos de determinantes espaciais sejam testados e com a inclusão de variáveis que contemplem dados socio-econômicos relativos à população, renda, empreendimentos imobiliários, tamanho de propriedades, dados sobre produção mineral entre outras que possam ser configuradas como variáveis explicativas da dinâmica de uso da terra.

A mudança, em qualquer espaço, é dirigida pela combinação particular de fatores - forças dirigentes - e que configuram os padrões espaciais de paisagem (BURGI et al., 2004) o que torna necessário a compreensão integrada de fatores biofísicos e socio-econômicos nos processos de uso da terra (MILNE et al., 2009).

A etapa de validação confirma, por um lado, as consequências do baixo ajuste do

modelo na alocação espacial das mudanças, através dos baixos valores para os índices *Kappa location* e *Kappa fuzzy*. Por outro lado, a validação revela o ótimo desempenho do modelo na projeção da quantidade de mudanças, através do índice *Kappa histo* com valor próximo de 1. As mudanças foram majoritariamente projetadas nas adjacências e no entorno das áreas já previamente ocupadas com as classes de uso investigadas, o que é coerente com o padrão de mudanças detectado no recente histórico de transformações da paisagem.

Para a expansão urbana no Sinclinal Moeda é esperado além do aumento da densidade dos povoados, o aumento dos parcelamentos nas regiões próximas, caracterizando uma urbanização composta de assentamentos dispersos, com núcleos de comércio e assentamentos populares atraídos pela oferta de serviços de apoio aos condomínios (AMARO, 2008). Embora projeção das mudanças pelo modelo tenha concentrado a expansão da ocupação urbana nas regiões adjacentes, não houve a simulação do surgimento de novos núcleos, o que pode indicar uma limitação do modelo em relação à projeção de eventos aleatórios, como a possibilidade de haver a presença de mudanças em áreas que mantiveram probabilidades muito baixas ou nulas ao longo do tempo (MAS et al., 2011).

Para a mineração, o modelo teve bom desempenho na projeção das mudanças

prioritariamente dentro das áreas de concessão de lavras e áreas de maiores altimetria. Porém, algumas áreas de expansão da mineração foram equivocadamente projetadas no interior de unidades de conservação, como é o caso do Monumento Natural da Serra da Moeda, o que pode indicar potenciais conflitos locais para o uso da terra. Várias dificuldades envolvem a simulação espacial da expansão das atividades minerárias, estas que abrangem áreas de apoio destinadas a obras de infraestrutura que podem se situar fora das áreas de concessão de lavras.

A simulação das mudanças no presente estudo ilustra o cenário tendencial verificado no recente histórico, em que prevalece a expansão da mineração seguida pela expansão dos condomínios, no qual as estimativas apontam para a ocupação de mais de 15.000 ha por estas atividades, chegando a 22% do total do Sinclinal Moeda. O modelo aqui proposto poderá ainda ser utilizado para a construção de cenários alternativos, o que permitirá a proposição de situações como a expansão sem restrições das atividades minerárias ou ocupação urbana em contraposição a situações de expansão de áreas protegidas, para conservação e uso sustentável de recursos ambientais. Esta diversidade de cenários poderá subsidiar o planejamento do uso da terra na região, em que os impactos potenciais poderão ser discutidos, levando em consideração os

planos diretores municipais, zoneamentos e demais instrumentos legais que regulamentam o uso e ocupação do solo em níveis locais e regionais.

5. REFERÊNCIAS

- AMARO, J. J. V. Serra da Moeda: a natureza da economia de uma rede urbana em expansão. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008
- ANTROP, M. Why landscapes of the past are important for the future. **Landscape Urban Planning**, 70 (1), p. 21–34, 2005.
- AUGUSTIN, C. H. R. R e MOREIRA, S. O Sinclinal de Moeda: Um patrimônio Geológico e Geomorfológico. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008.
- BHERING, I. G. A. Condomínios fechados : os espaços da segregação e as novas configurações do urbano. Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002. 468 p.
- BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008.
- BRANDT, W. Importância da Mineração no Sinclinal e na Serra da Moeda. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008.
- BURGI, M., HERSPERGER, A.M., SCHNEEBERGER, N. Driving forces of landscape change—current and new directions. **Landscape Ecology**, 19, p. 857–868, 2004.
- CÂMARA, G., SOUZA, R.C.M., FREITAS U.M., GARRIDO, J. *SPRING*: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**, 20 (3), p.395-403,1996.
- DNPM. Sistema de Informações Geográficas da Mineração – SIGMINE. Disponível em: <<http://sigmine.dnmp.gov.br>>. Acesso em: 15 mar. 2012.
- EASTMAN, J.R. IDRISI Selva: **Guide to GIS and Image Processing**. Worcester: ClarkLabs. 2011. 327 p.
- GAUCHEREL, C.; HOUET, T. Preface to the selected papers on spatially explicit landscape modelling: current practices and challenges. **Ecological Modelling**, 220 (24), p. 3477-2480, 2009.
- GUIMARÃES,C.M.; ZARANKIN, A.; CAMPOS, L. C .M.; PEREIRA, A. B. A. Origens Históricas da Ocupação da Serra da Moeda. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra,Fiemg.Belo Horizonte, 2008.
- HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, 17 (3), p.235-249, 2003.
- HOUET,T.,LOVELAND,T.R.,LAURENCE,H.,GAUCHEREL,C.,NAPTON,D.,SAYLER,K. Exploring subtle land use and land cover changes: a framework for future landscape studies. **Landscape Ecology**, 25, p.249-266, 2010.
- JACOBI, C.M e CARMO, F. F. Patrimônio Ecológico: Biodiversidade, Espécies Endêmicas e Ameaçadas. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008.
- JACOBI C.M., CARMO F.F., VINCENT R.C., STEHMANN J.R. Plant communities on ironstone outcrops – a diverse and endangered Brazilian ecosystem. **Biodiversity and Conservation**. 16, p. 2185-2200, 2007.
- LOBATO, L.M.; BALTAZAR, O.F.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BAARS, F.J.; TIMBÓ, M.A.; BERNI, G.V;MENDONÇA, B.R.V.; FERREIRA, D.V. 2005. **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa**. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005.
- MAS, J.F., KOLB.M., HOUET, T., PAEGELOW, M.,CAMACHO. M.T.O. Una comparación de programas de modelación de câmbios de cobertura / uso del suelo. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE.

- MACHADO, M. M. & RUCHKYS, U. A. **Quadrilátero Ferrífero: Do desbravamento ao Geopark**. Centro de Referência em Patrimônio Geológico-MHNJB-UFMG, 2011.
- MENDONÇA, M. P.; LINS, L.V. **Lista vermelha das espécies ameaçadas de extinção da Flora de Minas Gerais**. Fundação Biodiversitas e Fundação Zôo-Botânica de Belo Horizonte, Belo Horizonte, Brasil, 2000. 157 p.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and Human Well-being: Opportunities and Challenges for Business and Industry**. World Resources Institute, Washington, DC, USA, 2005.
- MILNE, E., ASPINALL, R.J, VELDKAMP, T.A.,. Integrated modelling of natural and social systems in land change science. **Landscape Ecology**, 24, p.1145–1147, 2009.
- MIRANDA, E.E.de. (org). **Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>**. Acesso em: 10 out. 2011.
- MOURA, A.C.M., MAGALHÃES, D.M., PARIZZI, M.G. Vocações e Conflitos de Interesse na Ocupação do Território da Região Metropolitana de Belo Horizonte – Apoio ao Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado – PDDI. Curitiba, **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, – SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE.
- PAEGELOW, M. e CAMACHO, M.T.O. **Modelling Environmental Dynamics: advances in geomatic solutions**. Springer: Verlag Berlin Heidelberg. 2008. 390 p.
- PONTIUS, Jr. R.G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 66 (8), p. 1011–1016, 2000.
- PONTIUS, Jr.R.G. Statistical Methods to Partition Effects of Quantity and Location During Comparison of Categorical Maps at Multiple Resolutions. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. 68 (10), p.1041-1039, 2002.
- PONTIUS, Jr. R.G., HUFFAKER, D., DENMAN, K. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. **Ecological Modelling**, 179 (4), p. 445–461, 2004.
- SIMMONS, G.C. Cavernas do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **O Carste**, 17 (3), p. 74-77, 2005.
- SOUZA, R.G.V., BRITO, F.R.A.A Expansão Urbana da Região Metropolitana de Belo Horizonte e suas implicações para a redistribuição espacial da população: a migração dos ricos In: **Anais XV Encontro de Estudos Populacionais**, , Caxambu - MG ,18 a 22 de setembro de 2006, ABEP.
- TABACHNICK, B.G., FIDELL, L.S. **Using multivariate statistics**. Boston, Pearson Education, Inc., 2007.
- VISSER, H. **The MAP COMPARISON KIT: methods, software and applications**. RIVM report 550002005/2004. Bilthoven: RIVM. 2004. 127 p.
- VISSER, H., de NIJS, T. The Map Comparison Kit. **Environmental Modelling & Software**, 21 (3), p 346-358, 2006.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação do histórico recente do uso e cobertura da terra no Sinclinal Moeda permitiu identificar como principais vetores de transformação da paisagem o uso da terra pela mineração e pela ocupação urbana. Ao longo do período de 1991 a 2011 verificou-se a expansão da mineração para uma área equivalente a quase 10% do total do Sinclinal Moeda e a quadruplicação da área de ocupação urbana através dos condomínios.

Segundo o levantamento das propriedades das principais empresas de mineração no Sinclinal Moeda, a área destas totaliza aproximadamente 30.000 hectares, sendo deste total quase 7.000 ha atualmente utilizados para mineração e áreas de apoio e 1.720 ha destinados à preservação ambiental, restando ainda 23.000 ha sem uso (BRANDT, W., 2008). Essa alta concentração de terras nas mãos das mineradoras demonstra o papel ativo destas empresas no uso e ocupação das terras no Sinclinal Moeda, que podem ser destinadas tanto a atividades minerárias, como também à expansão urbana e imobiliária ou à conservação ambiental. Neste sentido, tanto a ocupação recente, quanto as perspectivas futuras de uso da terra no Sinclinal Moeda são vistas a partir de diversos conflitos entre as áreas de preservação e mineração; entre a propriedade fundiária altamente concentrada nas companhias mineradoras e a proliferação de lançamentos imobiliários residenciais de acesso controlado; entre as necessidades do planejamento de longo prazo dos zoneamentos ecológicos econômicos das áreas de proteção ambiental e o imediatismo do capital imobiliário (COSTA, 2003).

A simulação das mudanças no presente estudo ilustra o cenário tendencial verificado no recente histórico, em que prevalece a expansão da mineração seguida pela expansão dos condomínios, no qual as estimativas apontam para a ocupação de mais de 15.000 ha por estas atividades, chegando a 22% do total do Sinclinal Moeda nos próximos 20 anos. O modelo de simulação espacial proposto pelo estudo poderá ainda ser utilizado para a construção de cenários alternativos, o que permitirá a proposição de situações como a expansão sem restrições das atividades minerárias ou ocupação urbana em contraposição a situações de expansão de áreas protegidas, para conservação e uso sustentável de recursos

ambientais. Esta diversidade de cenários poderá subsidiar o planejamento do uso da terra na região, em que os impactos potenciais poderão ser discutidos, levando em consideração os planos diretores municipais, zoneamentos e demais instrumentos legais que regulamentam o uso e ocupação do solo em níveis locais e regionais.

5. REFERÊNCIAS

- AMARO, J. J. V. Serra da Moeda: a natureza da economia de uma rede urbana em expansão. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008.
- ANTROP, M. Why landscapes of the past are important for the future. **Landscape Urban Planning**, 70 (1), p. 21–34, 2005.
- ASPINALL, R.J e HILL, M.J. **Land use change: science, policy, and management**. Taylor and Francis Group. USA, 2008.
- AUGUSTIN, C. H. R. R e MOREIRA, S. O Sinclinal de Moeda: Um patrimônio Geológico e Geomorfológico. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008.
- AVILA, A.M.H. Uma Síntese do Quarto Relatório do IPCC. **Revista Multiciência**, Mudanças Climáticas. Campinas, Ed. 8ª, pp 163-168, 2007.
- BALTAZAR, O.F.; BAARS F.J.; LOBATO, L.M.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BERNI, G.V.; SILVEIRA, V.D. Mapa Geológico na Escala 1: 50.000 com Nota Explicativa. In: LOBATO et al. **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa**. CODEMIG. Belo Horizonte. 2005.
- BARBOSA, M .F. P. Potencial Turístico da Serra da Moeda. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008
- BHERING, I. G. A. Condomínios fechados : os espaços da segregação e as novas configurações do urbano. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002. 468 p.

BRANDT, Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008.

BRANDT, W. Importância da Mineração no Sinclinal e na Serra da Moeda. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008.

BURGI, M., HERSPERGER, A.M., SCHNEEBERGER, N. Driving forces of landscape change—current and new directions. **Landscape Ecology**, 19, p.857–868, 2004.

CÂMARA, G., SOUZA, R.C.M., FREITAS U.M., GARRIDO, J. *SPRING*: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**. 20 (3), p. 395-403, 1996.

CAMPOS, L. C. M. Mas por qual motivo a Serra da Moeda possui este nome?- Vou te contar... Café com Histórias . **Tribuna – Jornal da ASMAP**, Brumadinho, MG, n. 47. Caderno Por Dentro do Vale, n.9, nov. 2009. p. 04. Disponível em: <<http://www.brumadinhotour.com.br/pordentrodovale/cafecomhistoriaserradamoeda.php>> Acesso em: 15 abr. 2012.

CAMPOS, L. C. M. Entre boatos e lendas: as ruínas do Forte de Brumadinho- Vou te contar... Café com Histórias – **Tribuna – Jornal da ASMAP**, Brumadinho, MG, n. 49. Caderno Por Dentro do Vale, n.11, jan. 2010. p. 04. Disponível em: <<http://www.brumadinhotour.com.br/pordentrodovale/cafecomhistoriaruinastortefortebumadinho.php>>. Acesso em: 15 abr. 2012.

CAMPOS, L. C. M. Patrimônio arqueológico da Serra da Moeda, Minas Gerais: uma “unidade histórico-cultural”. **Revista CPC**, São Paulo, n.13, p. 6-31, 2012.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. Ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1999. 236 p.

- COPPIN P., JONCKHEERE, I., NACKAERTS, K., MUYS, B., LAMBIN, E. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v 25, n 9, p. 1565–1596, 2004.
- COSTA, H.S. M. Natureza, mercado e cultura: caminhos da expansão metropolitana de Belo Horizonte. In: MENDONÇA, J. G., GODINHO, M. H. L. **População, espaço e gestão na metrópole**: novas configurações, velhas desigualdades. Belo Horizonte: PUC Minas, 2003. p.159-179.
- DNPM. **Sistema de Informações Geográficas da Mineração – SIGMINE**. Disponível em: <<http://sigmine.dnpm.gov.br>>. Acesso em: 15 mar. 2012.
- EASTMAN, J.R. IDRISI Selva: **Guide to GIS and Image Processing**. Worcester: ClarkLabs. 2011. 327 p.
- FAO, 1976. A framework for land evaluation. **FAO Soils Bulletin**, n. 29. Rome: Wageningen: ILRI, 1976. 72 p
- GAUCHEREL, C. & HOUET, T. Preface to the selected papers on spatially explicit landscape modelling: current practices and challenges. **Ecological Modelling**, 220 (24), p. 3477-2480, 2009.
- GEIST, H.J., LAMBIN, E.F. Proximate causes and underlying driving forces of tropical deforestation. **Bioscience** , 52, p.143– 150, 2002.
- GUERRA, A.T.; GUERRA, A.J.T. **Novo Dicionário Geológico – Geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2003.
- GUIMARÃES, C. M. **Projeto arqueológico de prospecção e topografia do Forte de Brumadinho e Entorno**. Belo Horizonte: Laboratório de Arqueologia da Fafich/UFMG, 2002.
- GUIMARÃES, C .M.; ZARANKIN, A.; CAMPOS, L. C .M.; PEREIRA, A. B. A. Origens Históricas da Ocupação da Serra da Moeda. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra,Fiemg.Belo Horizonte, 2008.

- GUIMARÃES, Carlos Magno; REIS, Flávia Maria da Mata. Agricultura e mineração no século XVIII. In: RESENDE, Maria Efigênia Lage de; VILLALTA, Luiz Carlos (Orgs.). **As Minas setecentistas**. Belo Horizonte: Companhia do Tempo; Autêntica, 2007. p. 321-335.
- HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. **International Journal of Geographical Information Science**, 17 (3), p.235-249, 2003.
- HOUET, T., LOVELAND, T.R., LAURENCE, H., GAUCHEREL, C., NAPTON, D., SAYLER, K. Exploring subtle land use and land cover changes: a framework for future landscape studies. **Landscape Ecology**, 25, p.249-266, 2010.
- IBGE, 2006. **Manual técnico de uso da terra**. Manuais técnicos em Geociências, n. 7. Rio de Janeiro: IBGE, 2ªed. 2006. 91 p.
- JACOBI, C.M e CARMO, F. F. Patrimônio Ecológico: Biodiversidade, Espécies Endêmicas e Ameaçadas. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008.
- JACOBI C.M., CARMO F.F., VINCENT R.C., STEHMANN J.R. Plant communities on ironstone outcrops – a diverse and endangered Brazilian ecosystem. **Biodiversity and Conservation**, 16, p. 2185-2200, 2007.
- KOK, K, VERBURG. P.H., VELDKAMP, T.A. Integrated Assessment of the land system: The future of land use. **Land Use Policy**, 24, p. 517–520, 2007.
- LAMBIN, E.F., GEIST, H.J. **Land-Use and Land-Cover Change**. Local Processes and Global Impacts, Global Change—The IGBP Series. Springer, 2006.
- LÉVY, P. **Cyberculture**. Odile Jacob, France, 1998.
- LOBATO, L.M.; BALTAZAR, O.F.; REIS, L.B.; ACHTSCHIN, A.B.; BAARS, F.J.; TIMBÓ, M.A.; BERNI, G.V.; MENDONÇA, B.R.V.; FERREIRA, D.V. 2005. **Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa**. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005.

- MACHADO, M. M. & RUCHKYS, U. A. **Quadrilátero Ferrífero: Do desbravamento ao Geopark**. Centro de Referência em Patrimônio Geológico-MHNJB-UFMG. 2011.
- MAS, J.F., KOLB.M., HOUET, T., PAEGELOW, M., CAMACHO. M.T.O. Una comparación de programas de modelación de câmbios de cobertura / uso del suelo. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto** – SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE. 5801 p.
- MENDONÇA, M. P.; LINS, L.V. **Lista vermelha das espécies ameaçadas de extinção da Flora de Minas Gerais**. Fundação Biodiversitas e Fundação Zôo-Botânica de Belo Horizonte, Belo Horizonte, Brasil, 2000. 157 p.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and Human Well-being: Opportunities and Challenges for Business and Industry**. World Resources Institute, Washington, DC, USA, 2005.
- MILNE, E., ASPINALL, R.J, VELDKAMP, T.A.. Integrated modelling of natural and social systems in land change science. **Landscape Ecology**, 24, p.1145–1147, 2009.
- MINAS GERAIS. **Mapeamento e Inventário da Flora Nativa e dos Reflorestamentos de Minas Gerais** – Universidade Federal de Lavras, 2006.
- MIRANDA, E.E.de. (org). **Brasil em Relevo. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005**. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 02 fev.2012.
- MOURA, A.C.M., MAGALHÃES, D.M., PARIZZI, M.G. Vocações e Conflitos de Interesse na Ocupação do Território da Região Metropolitana de Belo Horizonte – Apoio ao Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado – PDDI. Curitiba, **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2011.
- MUNROE, D.K., MÜLLER, D. Issues in spatially explicit statistical land-use/cover change (LUCC) models: examples from western Honduras and the Central Highlands of Vietnam. **Land Use Policy**, 24, p. 521–530, 2007.

OLIVEIRA, I.S., WIELOCH, A.H. Primeiro registro de Onychophora em campo ferruginoso – Serra da Moeda In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008.

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

PONTIUS, Jr. R.G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 66 (8), p. 1011–1016, 2000.

PONTIUS, Jr.R.G. Statistical Methods to Partition Effects of Quantity and Location During Comparison of Categorical Maps at Multiple Resolutions. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. 68 (10), p.1041-1039 , 2002.

PONTIUS, Jr. R.G., HUFFAKER,D., DENMAN,K. Useful techniques of validation for spatially explicit land-change models. **Ecological Modelling**,179 (4), p. 445–461, 2004.

RIGOTT, J. I. R. Caracterização Sócio-demográfica da região do Sinclinal Moeda. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação**. SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008.

SIMMONS, G.C. Cavernas do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **O Carste**. 2005, 17 (3): 74-77.

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.

SOLÁ, M.E. A vegetação nativa do Sinclinal Moeda. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da**

- Moeda: uma contribuição para sua conservação.** SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008 (a).
- SOLÁ, M.E. Pré-história, abrigos e cavernas da Serra da Moeda. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação.** SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008 (b).
- SOLÁ, M.E. A Serra da Moeda: toponímia. In: BRANDT Meio Ambiente. **Patrimônio Natural e Cultural – Zoneamento Ecológico Econômico da Serra da Moeda: uma contribuição para sua conservação.** SindiExtra, Fiemg. Belo Horizonte, 2008 (c).
- SOUZA, R.G.V., BRITO, F.R.A. A Expansão Urbana da Região Metropolitana de Belo Horizonte e suas implicações para a redistribuição espacial da população: a migração dos ricos In: **XV Encontro de Estudos Populacionais, ABEP**, Caxambu - MG 18 a 22 de setembro de 2006. Disponível em: <http://www.abep.org.br/usuario/GerenciaNavegacao.php?caderno_id=658&nivel=2> Acesso em 15 março de 2012
- TURNER, B.L. II, LAMBIN, E.F., REENBERG, A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. **PNAS**,104(52), p. 20666–20671, 2007.
- VEIGA, José Pedro Xavier da. Efemérides mineiras: 1664-1897. Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 1998. 4 v.
- VELDKAMP, T.A., VERBURG, P.H.,. Modelling land use change and environmental impact. **Journal of Environmental Management**, 72, p.1–3, 2004.
- VILLALTA, Luiz Carlos; RESENDE, Maria Efigênia Lage de. **História de Minas Gerais: As Minas setecentistas.** Belo Horizonte: Autêntica, 2007.
- VIANA, P.L.; LOMBARDI, J.A. Florística e caracterização dos campos rupestres sobre canga na Serra da Calçada, Minas Gerais, Brasil. **Rodriguésia** 58 (1), p 159-177, 2007.

VINCENT, R.C. 2004. Florística, fitossociologia e relações entre a vegetação e o solo em área de campos ferruginosos no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 2004. 145p. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004.

VISSER, H. **The MAP COMPARISON KIT: methods, software and applications**. RIVM report 550002005/2004. Bilthoven: RIVM. 2004. 127 p.

VISSER, H., de NIJS, T. The Map Comparison Kit. **Environmental Modelling & Software**. 21 (3) pp 346-358, 2006