

# Modelagem da dinâmica da expansão urbana no Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte e análises sobre as novas infraestruturas viárias previstas até 2031

Daniel Martins Sampaio  
Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais  
danielsampaio.geo@gmail.com

Marcos Antônio Timbó Elmiro  
Professor Adjunto do Departamento de Cartografia da UFMG  
timboelmiro@gmail.com

Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega  
Professor Adjunto do Departamento de Cartografia da UFMG  
raanobrega@ufmg.br

## Resumo

Este estudo teve como objetivo elaborar um modelo de dinâmica de cobertura do solo para simular cenários de expansão urbana no Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e verificar as influências espaciais da implantação de infraestruturas de acessibilidade previstas neste espaço, considerando o horizonte preditivo para 2031. Através do emprego de técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e modelagem de dados, foi possível identificar que as maiores mudanças de cobertura do solo urbano ocorreram nas porções noroeste e leste do Vetor Norte. As variáveis utilizadas foram testadas e o modelo de predição de mudança de cobertura do solo urbano alcançou um índice de acurácia de 82,61%, proporcionando a elaboração de um cenário projetado para o ano-base 2011. Este cenário foi validado com o mapeamento realizado a partir da imagem de satélite da mesma data e apresentou um índice de acerto de 92,60%, com 7,40% atribuídos a erros de comissão. Após esta análise, foram elaborados três cenários preditivos para 2031, onde se verificou que a maior tendência de mudança de cobertura do solo urbano poderá ocorrer em parte dos municípios de Ribeirão das Neves, São José da Lapa, Vespasiano e Santa Luzia. Como conclusão, a modelagem da dinâmica do crescimento urbano mostrou-se eficiente e a análise desenvolvida contribui para o estudo e a aplicação de políticas públicas para ordenar a expansão urbana prevista.

## Palavras-chave:

Geoprocessamento, Modelagem de Dados, Cobertura do Solo, Infraestrutura Viária, Belo Horizonte.

## Abstract

*This study aimed to model the dynamics of ground cover in order to predict scenarios of urban growth within the northern sector Belo Horizonte Metropolitan Region (RMBH) and therefore investigate the spatial influence of the planned transportation infrastructure with a foreseen horizon for 2031. Using GIS techniques, remote sensing and data modeling enabled to identify the urban areas located in northwest and east of Northern Sector of RMBH were groundcovers changes were more intense. The variables employed in the model were tested and prediction model of landcover changes reached 82.61% accuracy providing the elaboration of a scenario to 2011. This scenario was validated based on 2011 satellite image and presented 92.60% accuracy and 7.40% of commission error. Next, three predictive scenarios were simulated for 2031. The results pointed to a strong tendency of urban landcover changes occur in part of the municipalities of Ribeirao das Neves, Sao Jose da Lapa, Santa Luzia and Vespasiano. As conclusion, the proposed modeling of the dynamics of urban growth was efficient. The investigation can contribute to formulate and support public policies necessary for planning the urban growth.*

**Keywords:** GIS, Data Modeling, Landcover, Transportation Infrastructure, Belo Horizonte.

## Introdução

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

Com uma composição de trinta e quatro municípios, a expansão urbana da RMBH traz consigo uma dinâmica de processos econômicos, políticos e sociais sobre um território de características diversificadas. O maior lançamento de lotes imobiliários na RMBH ocorreu em 1946, quando foi implantada a Cidade Industrial de Contagem. Naquela época, foram aprovados 113 loteamentos em Belo Horizonte, Contagem e Betim, totalizando 80.600 unidades (MINAS GERAIS, 2009). Na década de 1980, o mercado de terras da RMBH apresentou duas características: de um lado, a expansão de loteamentos populares nas áreas mais periféricas, a norte e oeste; e de outro, a expansão de um novo tipo de loteamento, os chamados “condomínios fechados” e os sítios de recreio, localizados no eixo sul, ao longo da rodovia BR-040, na direção do Rio de Janeiro, bem como sítios situados a norte da região metropolitana, principalmente no município de Lagoa Santa (MENDONÇA, 2002).

O cenário atual do crescimento da mancha urbana na RMBH destaca a crescente expansão da região norte, impulsionada por obras de infraestrutura e empreendimentos públicos e privados previstos ou já implantados. Estas intervenções vêm valorizando as terras da região e contribuindo para a especulação imobiliária, seja para a instalação de zonas residenciais como industriais. Normalmente, as regiões que apresentam tais atuações desse mercado privado tendem a sofrer uma rápida ocupação do território, e a gerar impactos em diferentes magnitudes. De acordo com Costa (2006), muitos desses impactos podem gerar a segregação espacial e a piora da qualidade ambiental em áreas hoje preservadas. Assim, a acelerada ocupação urbana prevista no Vetor Norte tem sido uma preocupação para os órgãos governamentais que trabalham com a temática ambiental e o planejamento urbano.

As obras já implantadas mais relevantes no Vetor Norte são: o Aeroporto Internacional Tancredo Neves, o Aeroporto-Indústria, a Linha Verde e a Cidade Administrativa de Minas Gerais. Além dessas obras, vale destacar que está prevista na região a implantação do Rodoanel. Esta rodovia será construída a partir do Contorno de Betim até as proximidades do distrito de Ravena. O empreendimento deverá ter a extensão de 65 km em pista dupla, com acostamentos e faixas de segurança, e, de acordo com o Programa de Desenvolvimento e Gestão da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MINAS GERAIS, 2011), o Rodoanel será uma via estruturante na região metropolitana, capaz de ordenar a ocupação de uma área ainda desocupada, que envolve as urbanizações de periferia dos municípios de Contagem, Ribeirão das Neves, Vespasiano, Santa Luzia e Sabará, devendo, ainda, proporcionar a instalação

de atividades produtivas ao longo de seu percurso, como nos entroncamentos com as estradas BR 040, Justinópolis/Ribeirão das Neves, Linha Verde, MG 020 e BR 262/381.

Este estudo teve como objetivo elaborar um modelo de dinâmica de cobertura do solo para simular cenários de expansão urbana no Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e verificar as influências espaciais da implantação de infraestruturas de acessibilidade previstas neste espaço, considerando o horizonte preditivo para 2031. Entendem-se como cobertura do solo os elementos naturais e antrópicos localizados sobre a superfície terrestre. Segundo o IBGE (2006), a cobertura do solo pode ser composta por vegetação, água, gelo, afloramentos, solo exposto e superfícies semelhantes, além das construções artificiais criadas pelo homem, que recobrem a superfície da terra. Entende-se como modelagem espacial o processo de diagnóstico da situação ambiental através do mapeamento e análise de dados espaço-temporais, bem como a formulação de soluções utilizando o desenvolvimento de algoritmos de representação espaço-temporal.

No processo de modelagem espacial, Veldkamp e Verburg (2004) destacam a necessidade de compreender a dinâmica da cobertura do solo urbano e sua interação com as variáveis físicas, biológicas, econômicas e sociais da região em estudo. Em complemento, Milne et al. (2009) salientam que as análises de transformações da paisagem exigem um conhecimento integrado das variáveis socioambientais, para que o processo de cobertura do solo seja compreendido. Atualmente, as ferramentas de modelagem de dados geográficos disponíveis permitem dimensionar as mudanças de cobertura do solo com análises temporais e espaciais, facilitando a compreensão dos fatores que influenciam essas mudanças. Permitem, também, fazer a projeção delas para o futuro, auxiliando na compreensão do presente e na proposição de políticas de planejamento do desenvolvimento territorial.

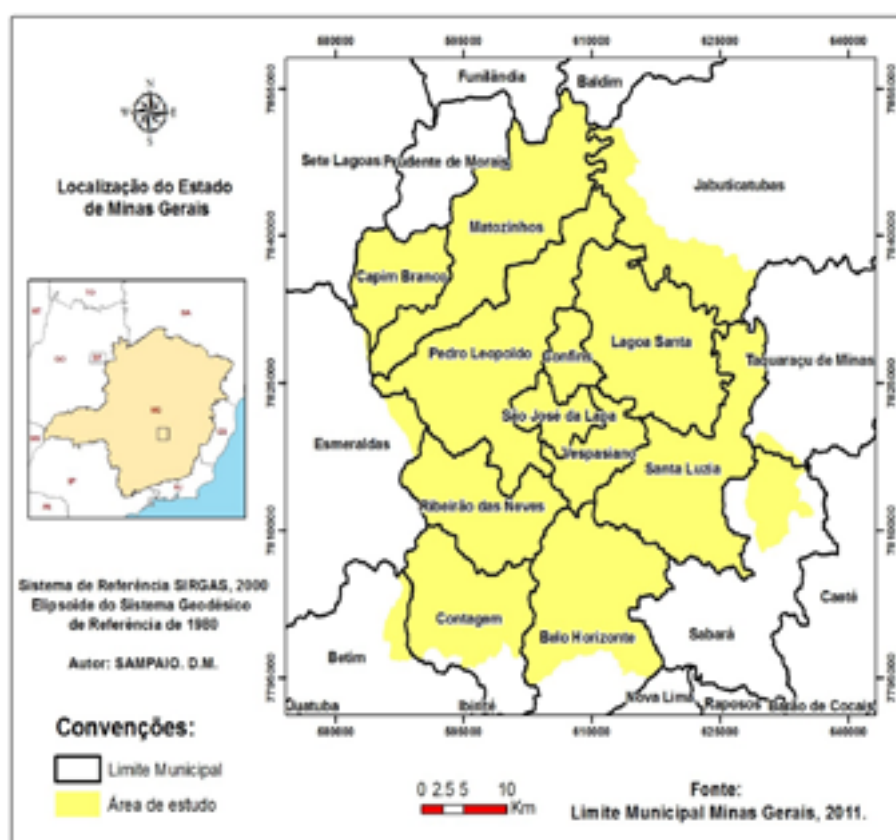
As áreas urbanas estão entre as que mais sofrem alterações de padrão de cobertura do solo, e por isso têm recebido atenção quanto à aplicação de modelagem espacial. Dentre os estudos encontrados com essa abordagem de modelagem dinâmica espacial de mudanças de cobertura do solo no Brasil, é possível destacar os trabalhos desenvolvidos por Almeida (2003) para as cidades de Bauru e Piracicaba, em São Paulo, e a modelagem da dinâmica espacial urbana de Americana, também em São Paulo (TRENTIN, 2008). O uso de um modelo dinâmico visa auxiliar nas tarefas de realizar projeções e previsões em diferentes cenários que simulem mudanças dos atributos do meio ambiente no espaço geográfico. Este passo pode subsidiar a compreensão do processo que envolve a representação da realidade, indicando a evolução temporal em determinada região em meio às diversidades do espaço existente no entorno, e, ainda, representar os cenários espaciais condicionados a importantes variáveis de mudanças, representados pelas temáticas ambientais, socioeconômicas e políticas.

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

## Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo corresponde predominantemente à área definida no Programa de Desenvolvimento e Gestão Metropolitana de Belo Horizonte como Vetor Norte da RMBH, a qual é composta pelos municípios de Ribeirão das Neves, Santa Luzia, Vespasiano, Lagoa Santa, Pedro Leopoldo, São José da Lapa, Confins, Capim Branco, Jaboticatubas e pelos bairros localizados na área de influência das Administrações Regionais de Venda Nova e Norte do Município de Belo Horizonte (MINAS GERAIS, 2008). Esta região está localizada entre as coordenadas 580.000E e 7.795.000N e 630.000E e 7.850.000N, UTM, fuso 23 Sul, e totaliza uma área de 199.424 hectares (Figura 1).

Figura 1: Mapa de localização da Área de Estudo.

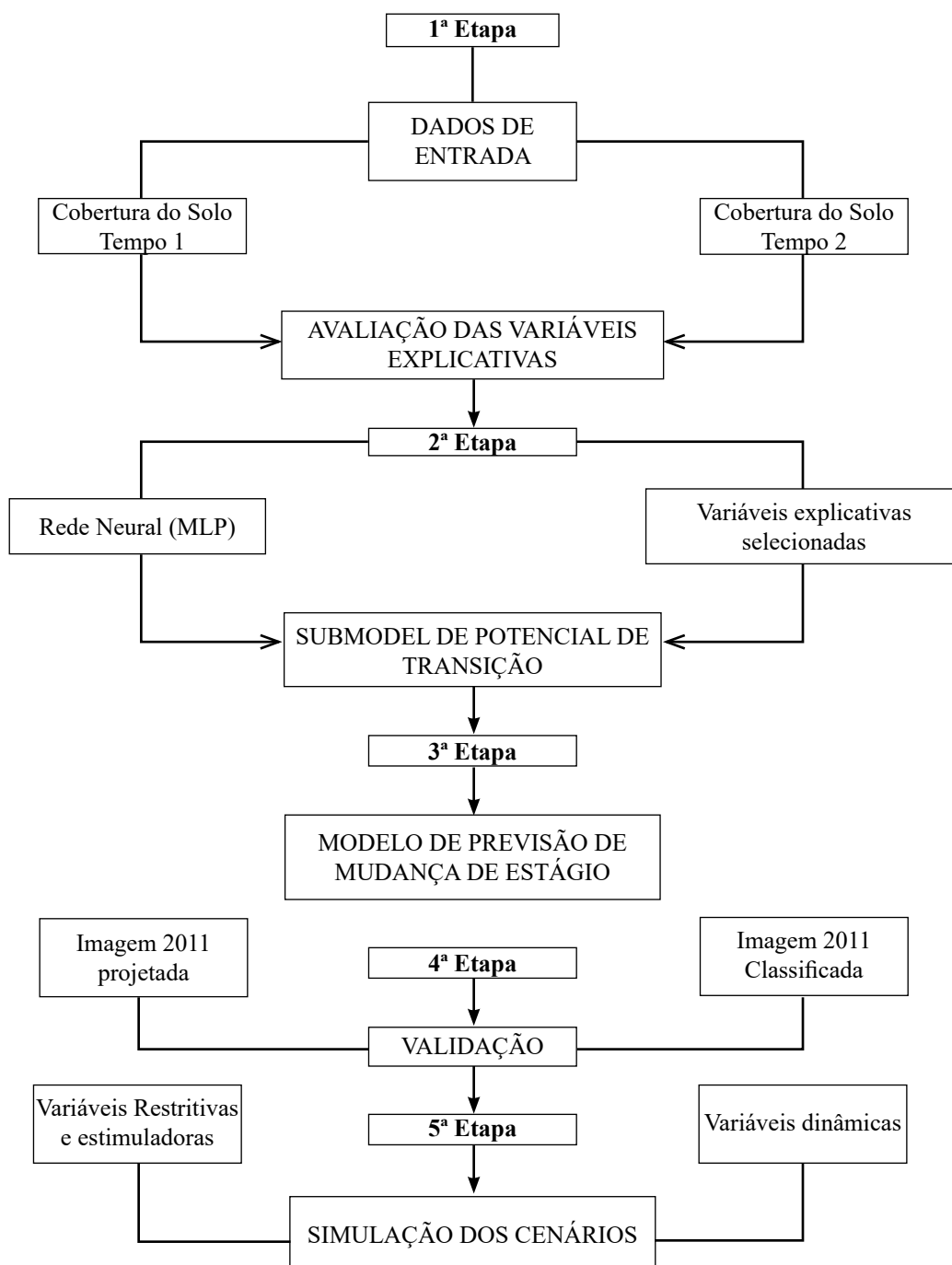


MODELO DE PREVISÃO DE MUDANÇA DE ESTÁGIO

## Materiais e métodos

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

Figura 2: Fluxograma metodológico da modelagem para a simulação de mudanças de cobertura do solo.



A primeira etapa envolveu a análise de mudanças de uso da terra a partir dos dois mapas de cobertura do solo de datas distintas, para subsidiar a seleção das variáveis explicativas. A segunda etapa utilizou os mapas das variáveis explicativas selecionadas para gerar os potenciais de mudanças de cobertura do solo com base em uma rede neural. Na terceira etapa, foi realizada a alocação espacial da probabilidade de mudanças previstas por meio da Cadeia de Markov. A etapa seguinte envolveu a avaliação do desempenho do modelo por meio da comparação do mapeamento empírico, obtido

na simulação, com o mapeamento observado da área de estudo, ambos datados de 2011. A quinta etapa consistiu na simulação de mudanças de cobertura do solo urbano, incluindo variáveis estimuladoras e restritivas.

## Imagens de satélites

O estudo utilizou imagens do satélite LANDSAT-5 sensor *Thematic Mapper*, resolução espacial de 30 metros, para os anos de 2001, 2006 e 2011, disponibilizadas no catálogo de imagens da Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2013), as quais foram submetidas a pré-processamentos para adequação ao modelo metodológico proposto. As órbitas e datas das imagens são apresentadas na Tabela 1. O registro das imagens é o pré-processamento responsável pela correção geométrica das imagens, e é uma etapa vital para análise multitemporal da cobertura do solo, a fim de que a geometria das imagens a serem analisadas possa ser consistente e compatível. Para o registro das imagens, foram utilizados pontos de controle obtidos em campo com receptores GPS e a base cartográfica oficial adquirida do Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado - PDDI (MINAS GERAIS, 2011). Após o correto registro das imagens, foi realizado o pré-processamento digital, com montagem de composições coloridas RGB-543 seguida da aplicação de realce.

Tabela 1: Dados das imagens LANDSAT-5 utilizadas no trabalho.

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

A classificação das imagens foi baseada na análise dos segmentos. A segmentação da imagem utilizou o método de crescimento de regiões, com limiar de 40 níveis radiométricos e área mínima de 50 pixels. Esse método permite que a imagem seja dividida em um número de regiões homogêneas, onde cada uma é identificada por um rótulo, e o resultado desse processo é uma imagem rotulada. Tendo como base essa imagem segmentada, foi então aplicado o treinamento supervisionado para escolha das amostras, com o uso do classificador Distância de Battacharya, adotando um limiar de aceitação de 99%. Os dados do treinamento foram comparados com todos os segmentos da imagem e rotulados de acordo com a classe à qual mais se assemelha.

No processo de pós-classificação, foi realizada a edição vetorial dos polígonos classificados erroneamente. As referências utilizadas foram as imagens do satélite Ikonos-II disponibilizadas na base do aplicativo Google Earth. Foram visualizadas as imagens correspondentes aos anos de 2001, 2006 e 2011, além de dados coletados em campo para a composição da base cartográfica de referência. Os processos de pré-processamento e de classificação das imagens desenvolvidos neste trabalho foram desenvolvidos com o uso do programa SPRING, versão 5.1.8.

De forma a atender ao objetivo da pesquisa, foi proposto o mapeamento de cinco classes de cobertura do solo: Água, Mancha Urbana, Vegetação de porte arbóreo,

Vegetação de porte herbáceo e Outros usos. A Tabela 2 apresenta a descrição dos alvos correspondentes às classes mencionadas. Uma vez processadas as informações das classes de cobertura do solo, estas passaram a ser tratadas como dados de entrada para o modelo de predição de mudança.

Tabela 2: Descrição das classes de cobertura do solo.

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

## Variáveis explicativas

A elaboração de um modelo de predição de mudança exige a seleção de variáveis adequadas representadas em escalas cartográficas apropriadas (VELDKAMP; LAMBIN, 2001). Neste sentido, foi realizada a seleção de diversas feições geográficas disponíveis, as quais acredita-se que possuam relação direta ou indireta com a expansão urbana horizontal. Desta forma, as feições geográficas foram organizadas e compiladas em um banco de dados elaborado em formato compatível ao do programa Arcgis 9.3, plataforma sobre a qual a ferramenta de modelagem e predição foi desenvolvida.

Para definir as variáveis preditivas, foi realizada a pesquisa da mudança da cobertura do solo no Vetor Norte e o histórico da evolução urbana na área. Depois de realizada essa análise, foi possível notar que a expansão urbana na região possui relações com algumas variáveis físicas e econômicas, tais como proximidades de centros urbanos e da mancha urbana existente. Ao analisar o padrão atual do Vetor Norte, verificou-se que as maiores transformações espaciais na região estão localizadas no entorno de grandes investimentos do setor imobiliário e de infraestrutura, que segundo Minas Gerais (2011), foram implantados após certas decisões políticas. Dessa maneira, os pressupostos para expansão urbana no Vetor Norte da RMBH foram elaborados por meio da consulta aos estudos realizados pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado - PDDI (MINAS GERAIS, 2011).

Com base nas cinco classes de cobertura do solo estabelecidas, bem como no cenário analisado para a área de estudo, o processo de modelagem proposto considera

que a região possui os seguintes critérios para a mudança de cobertura do solo urbano:

Com os altos custos de moradia nos centros urbanos já consolidados, a escassez de novos espaços territoriais e o nítido interesse governamental em estruturar a região em estudo, o crescimento urbano será maior nos municípios do entorno, situados a norte da capital mineira;

Os espaços que poderão sofrer as maiores mudanças de cobertura do solo para ocupação urbana são as áreas situadas no entorno de onde estão previstos os projetos de acessibilidade compostos por rodovias, os espaços com altos coeficientes urbanísticos de ocupação, as áreas situadas em zonas de aquecimento econômico e as áreas sem impedimentos físicos ambientais para ocupação urbana;

As áreas que representam espaços restritivos à ocupação urbana são as unidades de conservação e as massas de água, incluindo lagos e reservatórios naturais ou artificiais;

Os espaços que representam condições socioambientais estimuladoras para a expansão urbana são as zonas de influência dos centros urbanos e comerciais, as áreas de influência do eixo viário do Rodoanel propostas no Vetor Norte e o entorno de até 300 metros de grandes empreendimentos imobiliários com licença de implantação já aprovada.

Assim, os dados selecionados foram: as áreas com ocorrência de mudança de cobertura do solo entre 2001 e 2006, as distâncias da mancha urbana de 2001 e as distâncias da vegetação de porte herbáceo (dados extraídos da classificação das imagens LANDSAT-5), a densidade populacional e os setores censitários (IBGE, 2002), os números de ligações de energia elétrica realizadas no ano de 2000, o zoneamento de áreas com permissão de adensamento urbano, a geologia para ocupação, as distâncias de estradas existentes e as distâncias de centros urbanos e comerciais já consolidados (MINAS GERAIS, 2011).

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

As variáveis originadas das intervenções antrópicas, tais como distância da mancha urbana de 2001, densidade populacional, uso censitário, zoneamento de áreas com permissão de adensamento urbano, distância de estradas existentes e distância de centros urbanos e comerciais já consolidados, foram escolhidas devido ao poder de influência que estas variáveis têm na mudança de cobertura do solo já ocorrida na área em estudo. Destaca-se que a escolha da variável número de ligações de energia elétrica registradas em 2000 deve-se à relação existente entre esse dado e a expansão urbana. A região que apresenta maiores registros dessas novas ligações indica uma mudança de cobertura do solo para a classe urbano.

A inserção das variáveis no aplicativo de modelagem *Land Change Model* – LCM necessitou de processamento nos dados para ajustá-los às referências espaciais e formatações compatíveis. No presente trabalho, os ajustes realizados foram: transformação dos dados para formato raster, projeção cartográfica no sistema UTM,



Datum SIRGAS2000, meridiano central -45°W, reamostragem dos pixels para a resolução espacial de 50 metros, e também o recorte espacial idêntico para que as imagens pudessem ter as mesmas quantidades de linhas e de colunas.

A categorização dos valores das variáveis foi realizada por ferramenta implementada no aplicativo LCM, sobre o qual o modelo de predição foi construído. Todas as variáveis utilizadas no modelo são apresentadas na sequência de figuras seguinte (Figuras 3 a 7).

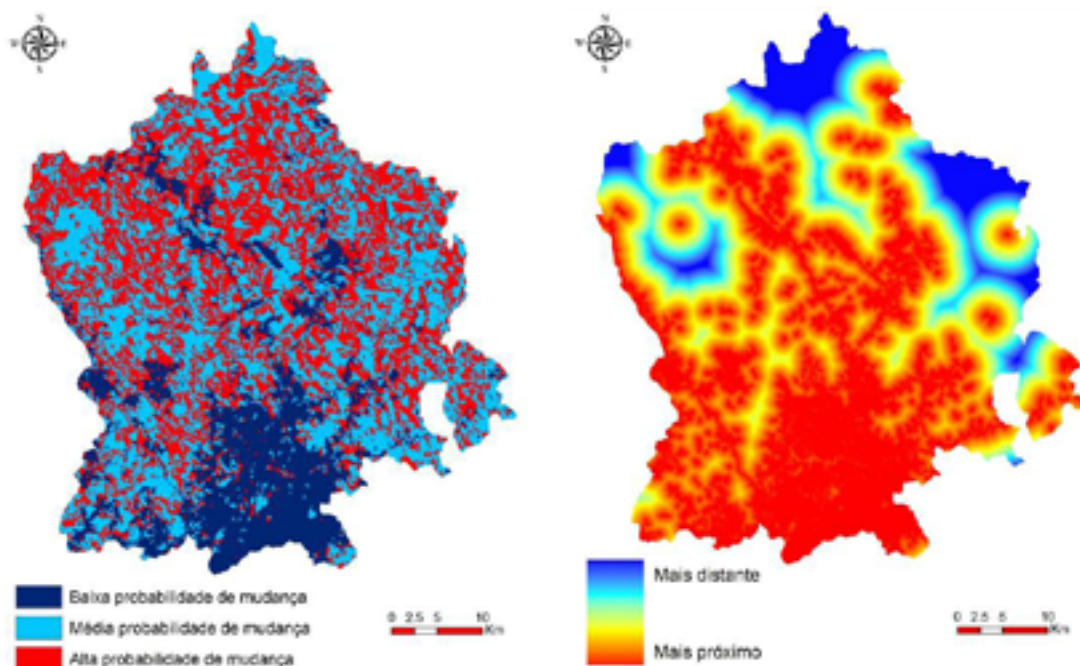


Figura 3: Áreas com possibilidade de ocorrência de mudança de cobertura do solo calculadas entre 2001 e 2006 e distância da mancha urbana de 2001.

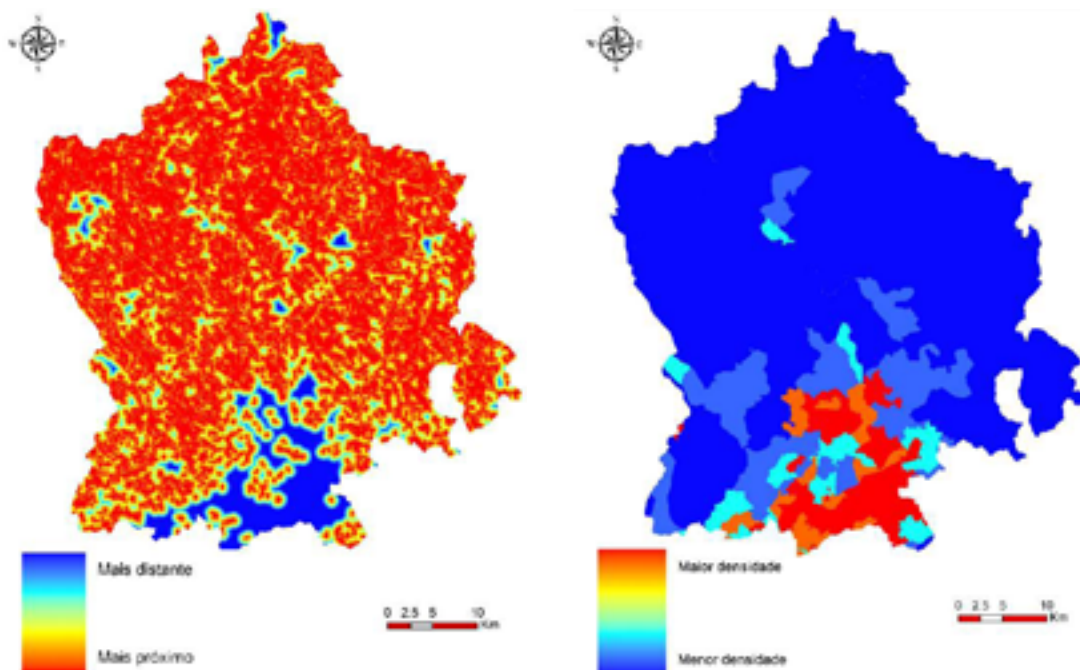


Figura 4: Distância da vegetação de porte herbáceo e densidade populacional.

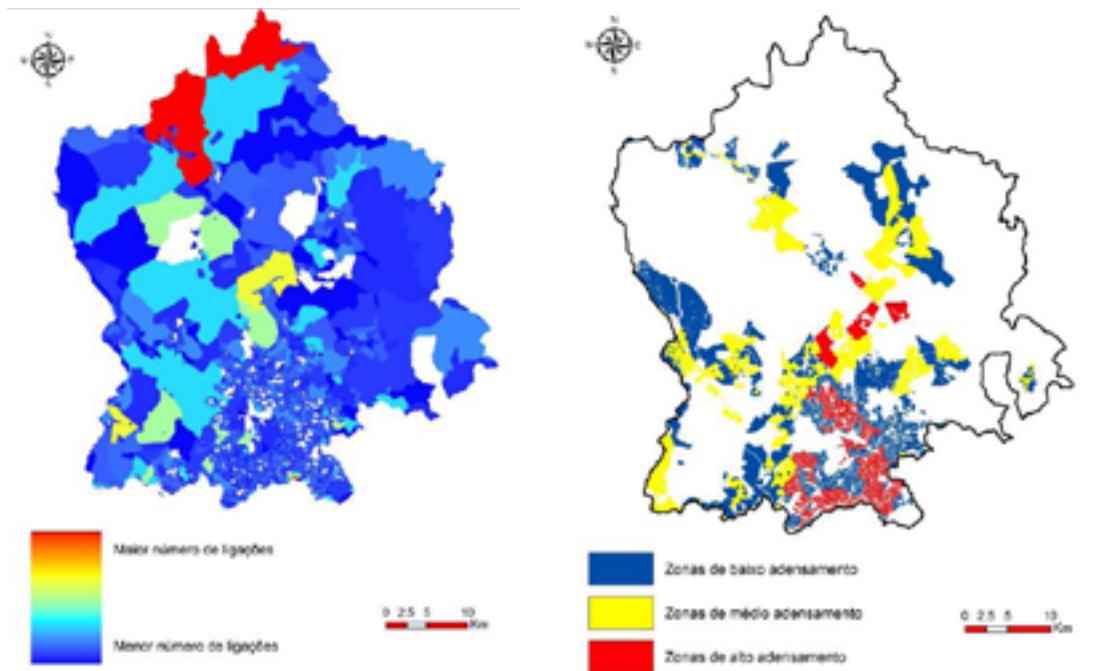


Figura 5: Número de ligações de energia elétrica registradas em 2000 e zonas de baixo a alto adensamento urbano.

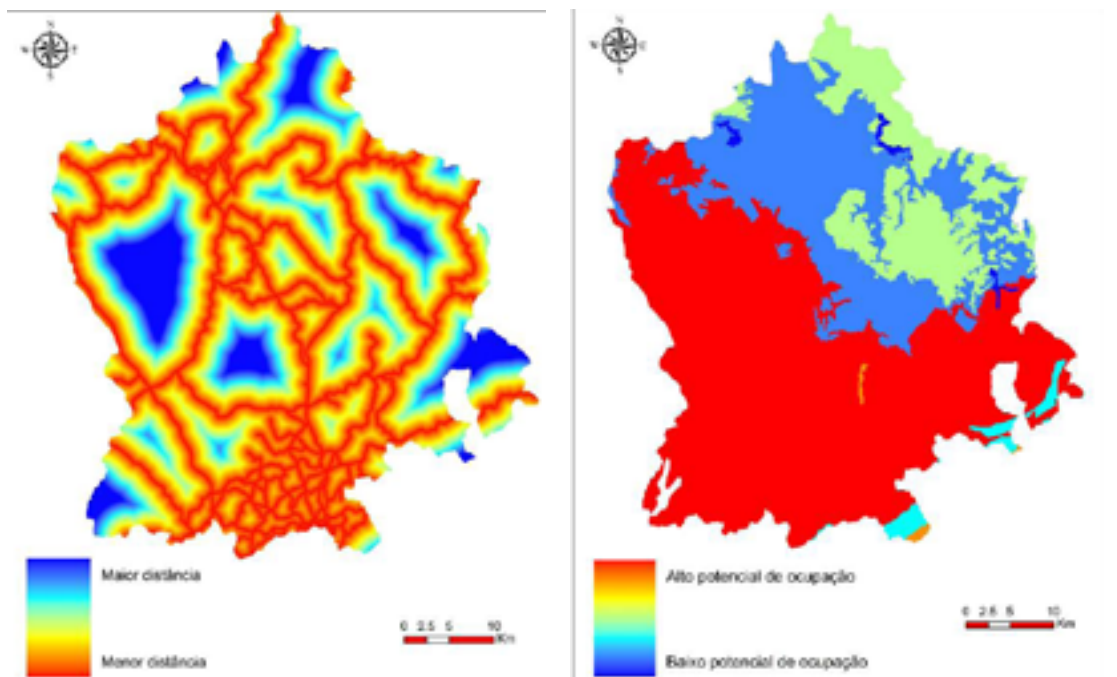


Figura 6: Geologia potencial para ocupação urbana e distância de estradas existentes.

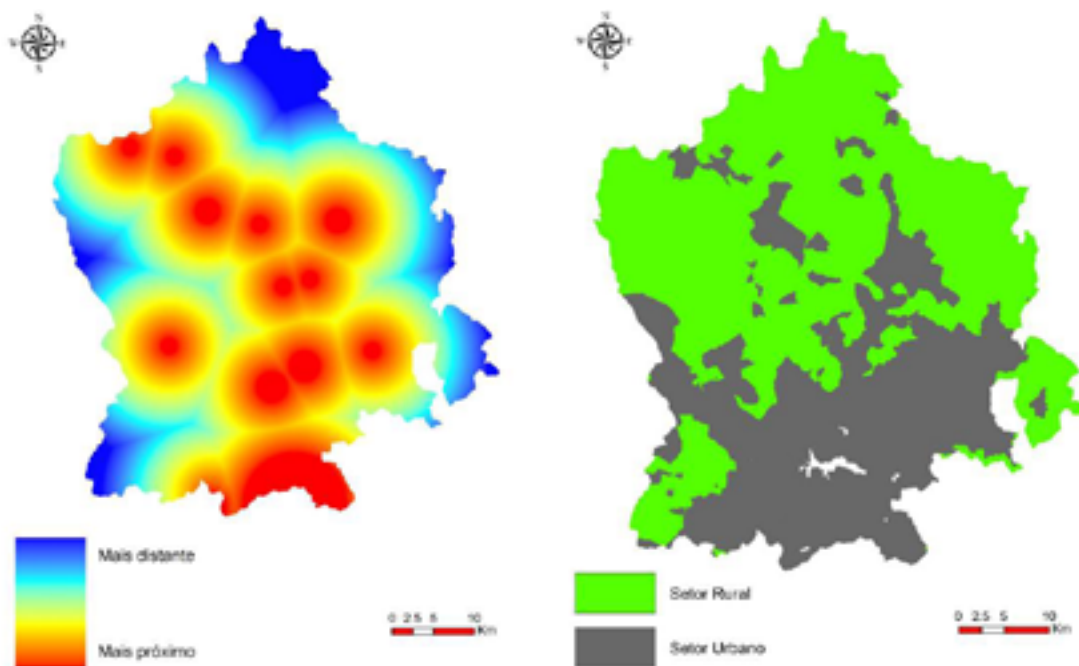


Figura 7: Distância de centros urbanos e comerciais já consolidados e uso censitário.

### Submodelo de Potencial de Transição

Os submodelos de potencial de transição representam as probabilidades de mudança da cobertura do solo, e foram calculados a partir do mapa de mudanças (datados de 2001 e 2006). Estes submodelos consideram a influência do conjunto de variáveis explicativas na alocação espacial das mudanças. O resultado desta etapa são os mapas de potenciais de transição que contêm as probabilidades de mudança calculadas para cada pixel.

Para elaborar o submodelo de potencial de transição, foi utilizado o processo de rede neural. As redes neurais são modelos matemáticos baseados no conceito biológico de redes neurais humanas (GONZALEZ et al., 2011; EASTMAN, 2009). De acordo com Haykin (1999), isso significa que um conjunto de neurônios artificiais interconectados obtém uma determinada informação com o próprio sistema, a qual é então incorporada/processada e posteriormente disponibilizada ao restante da rede. As conexões ou sinapses da rede correspondem aos elos de aprendizagem e simulam o processo de aprendizagem desenvolvido no cérebro. Quando aplicada em um processo de tomada de decisão, como, por exemplo, o que ocorre durante a classificação de imagens ou reconhecimento de padrões, as sinapses são alimentadas por cadeias hierárquicas de dados de entrada e de saída, provendo mecanismos para criação de padrões de comportamento de resposta (AANSTOOS et al., 2009). Para o submodelo, o processo de redes neurais permitiu que, a partir da alimentação de dados de entrada, fosse desenvolvida automaticamente uma série de processamentos e análises para estabelecer padrões de entendimento dos dados e com isso gerar informações de saída, ou seja, as probabilidades de mudança da cobertura do solo.

## Validação

Para a validação do modelo, foi realizada a comparação dos mapas de mudanças de cobertura do solo projetado e de mudanças de cobertura do solo observadas (resultantes da classificação das imagens LANDSAT) para o ano de 2011. Nesta etapa, o mapa de cobertura do solo projetado foi subtraído aritmeticamente em relação ao mapa de cobertura do solo observado. Ambos os mapas correspondem a imagens matriciais e a operação pode ser desenvolvida de forma simples, a partir do uso do operador *Minus*, o qual resulta na diferença entre os planos de informação. Depois dessa subtração, foi possível identificar e classificar os pixels das imagens como acertos (valores iguais a zero) e erros (valores diferentes de zero). O resultado final foi reclassificado em acerto e erro. Desta forma, o percentual de ajuste do modelo é obtido a partir dos cálculos das áreas de acerto em relação à área total da região em estudo. Vale ressaltar que as áreas onde o modelo apresentou divergência no padrão previsto de cobertura do solo, em comparação ao resultado da classificação das imagens, são posteriormente analisadas como erros de comissão (áreas classificadas e que na realidade não correspondem à classe) e erros de omissão (áreas que deixaram de ser classificadas).

## Simulações de cenários futuros

Após validar o modelo, foram gerados os cenários de dez em dez anos até 2031. Esses cenários foram elaborados a partir da integração das taxas de transição e dos mapas potenciais de transição gerados, os quais informam a quantidade e a alocação espacial das mudanças a serem simuladas. Assim, estes cenários incorporam a tendência de urbanização observada entre os períodos das imagens, tendo como base para as projeções a probabilidade de expansão da mancha urbana horizontal calculada pela cadeia de Markov. Cadeias de Markov são utilizadas para analisar o comportamento de um determinado fenômeno, com base em observações de períodos passados, e equacionar um modelo capaz de simular o comportamento desses fenômenos em um determinado instante futuro. Foram elaborados três cenários com características distintas, considerando a inclusão de variáveis explicativas, restritivas, estimuladoras e obras viárias propostas:

- O cenário 1 (um) representa a predição de mudança de cobertura do solo para 2031 sem adição de variáveis restritivas, estimuladoras e obras viárias previstas. Este cenário considera somente as Variáveis Explicativas na execução do modelo;
- O cenário 2 (dois) também representa a predição de mudança de cobertura do solo para 2031, porém, além de incluir as Variáveis Explicativas, também leva em conta as obras viárias propostas na região em estudo;
- O cenário 3 (três) representa uma análise completa para mudança de cobertura do solo para 2031. Nesta etapa, foram incluídas as variáveis

explicativas, restritivas, estimuladoras e as obras viárias propostas.

Com o objetivo de espacializar os efeitos da expansão urbana em relação às restrições legais e ações estimuladoras existentes na região em estudo, no cenário 3, foram utilizadas as funções: 1) *Constraints and Incentives* e 2) *Planned Infrastructure Changes* do LCM. A função *Constraints and Incentives* permite inserir no modelo variáveis que podem restringir ou estimular a expansão urbana horizontal na área em estudo. Neste trabalho, foram consideradas como variáveis restritivas as unidades de conservação, unidades de uso integral e de uso sustentável do solo, bem como as áreas com vocação à preservação dos cursos de água. Para o caso das variáveis estimuladoras, foram considerados o eixo estruturador do Rodoanel, as centralidades urbanas e comerciais propostas e a distância de loteamentos com licença de implantação aprovada, bem como as obras viárias propostas na região, tais como o Rodoanel, Anel Viário Norte, Via 540, Via Norte Sul, projetos VIURBS metropolitano e os contornos norte e leste de Lagoa Santa.

Para inserir no modelo as variáveis restritivas e estimuladoras, foi gerado um mapa de valores mínimos e máximos que atuam como fatores multiplicadores para análise do modelo. Nesse mapa de restrições e estímulos, o valor 1 não tem efeito. Valores superiores a 1 atuam como incentivo (aumentam o potencial de transição), enquanto os valores correspondentes ao intervalo [0,1] atuam como restrições. Um multiplicador referente a 0 atua como restrição absoluta.

O mapa das variáveis estimuladoras e restritivas representa as unidades de conservação existentes na área de estudo, com proteção integral e sustentável, cujos valores de multiplicadores aplicados foram, respectivamente, 0 e 0.02. Para as áreas com vocação à preservação dos cursos de água, o valor aplicado foi 0. Para o eixo estruturador do Rodoanel, bem como para as centralidades urbanas e comerciais propostas e distância de loteamentos com licença de implantação aprovada, o valor do multiplicador foi 2. Ressalte-se que foi definida uma distância de 300 metros dos lotes com licença de implantação aprovada, para aplicação do multiplicador 2. A Tabela 3 apresenta o tipo de ação no modelo que cada variável restritiva ou estimuladora representa na área em estudo.

Tabela 3: Variáveis restritivas e estimuladoras para expansão urbana.

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

A função *Planned Infrastructure Changes* permite que o usuário insira no modelo uma determinada obra de infraestrutura considerando o ano em que ela poderá

influenciar o submodelo de Potencial de Transição. Tal função permite enriquecer o modelo, ao considerar uma intervenção ainda inexistente, que porém foi proposta ou aprovada em caráter oficial, com previsão de ser iniciada e concluída dentro do intervalo de tempo para o qual o modelo de predição foi proposto.

No Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Belo Horizonte (MINAS GERAIS, 2011), são previstas as construções de novas vias estruturantes no Vetor Norte da RMBH. Com isso, as infraestruturas de acessibilidade propostas na região em estudo puderam ser inseridas neste trabalho. No modelo foram considerados o Rodoanel, a Via 540 e a Via Norte Sul com influência a partir de 2020, as Vias projetadas no VIURBS metropolitano e o Contorno Norte-Leste de Lagoa Santa com influência em 2023, e o Anel Viário Norte com influência para 2025. Vale destacar que a decisão destas datas de influência teve como base uma ampla pesquisa na mídia, por meio de visitas aos sites que trazem as últimas decisões do governo frente à implantação dessas infraestruturas.

## Resultados

### Variáveis explicativas

De acordo com os critérios de potencial de explicação, baseadas na estatística V de Cramer ( $\phi$ ), as três variáveis testadas que apresentaram os valores mais baixos foram: “*distância dos rios*”, “*eixos estruturadores existentes*” e “*declividade*”. Desta forma, estas variáveis foram desconsideradas da modelagem, pois, executando o modelo com elas, não foi atingido um índice de ajuste acima de 80% para o submodelo potencial de transição. Todavia, a variável “*áreas com possibilidade de ocorrência de mudança de cobertura do solo calculadas entre 2001 e 2006*” apresentou o maior valor de explicação, atingindo um  $\phi$  de 0,3741 (Tabela 4).

Tabela 4: Valores de Cramer ( $\phi$ ) testados.

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

Com as variáveis explicativas definidas, o modelo foi executado (*Run Transition Sub-Model*), e resultou em uma modelagem com taxa de acurácia de 82,61%. Essa taxa é considerada satisfatória, pois, independentemente do poder de explicação da variável, é recomendável que o grupo selecionado deva atingir, no mínimo, um índice de ajuste superior a 80% para ser criado o mapa de potencial de transição de mudança (CLARK LABS, 2006).

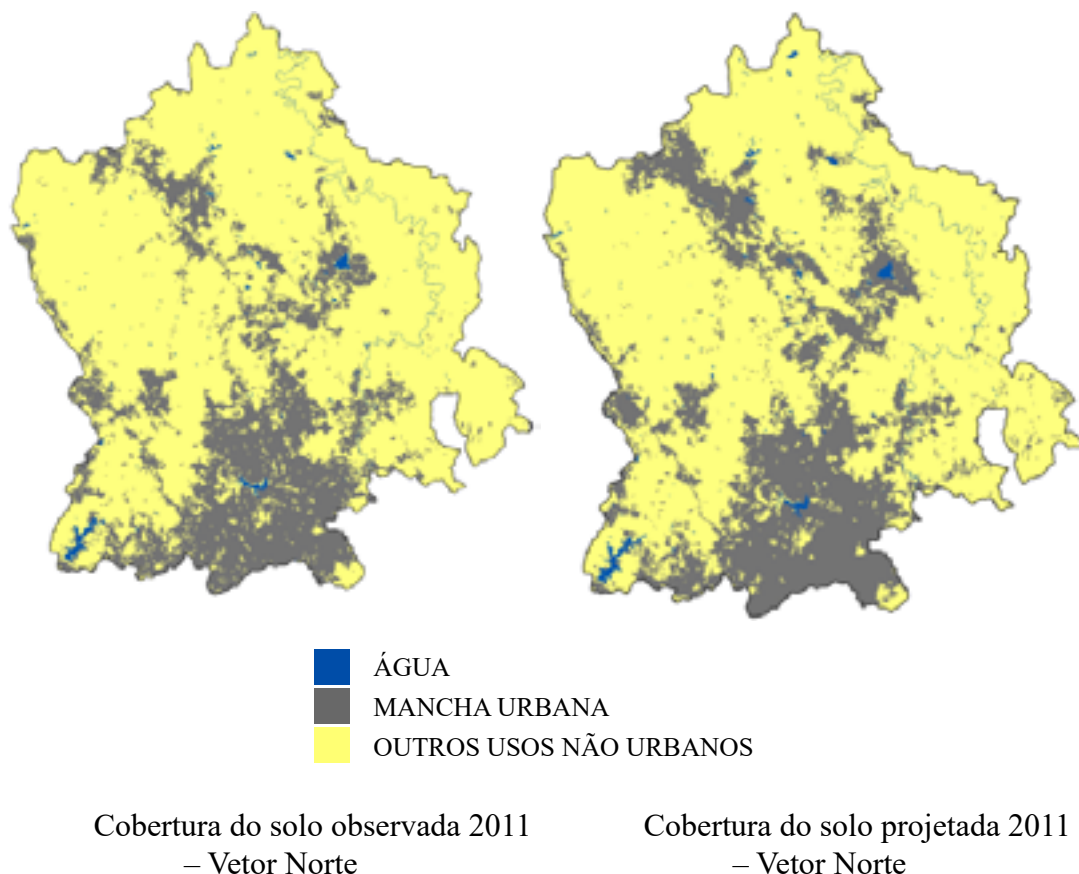
## Validação

Para o processo de validação dos resultados, foram calculados os pixels das imagens projetada e observada para 2011. Tal procedimento foi desenvolvido no sentido de avaliar se o modelo é condizente com o mapa de cobertura do solo projetado, considerando a distribuição das classes mapeadas. O resultado indicou um índice de acerto efetivo de 92,6%. Tal acerto é explicado pela quantificação dos pixels onde houve coincidência entre as classes de cobertura do solo mapeadas e as classes de



cobertura do solo observadas. De forma análoga, foi possível computar que o modelo obteve 7,4% dos pixels classificados incorretamente (erro de comissão), conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8: Validação da mancha urbana observada e a mancha urbana projetada pelo modelo em 2011 para o Vetor Norte da RMBH.

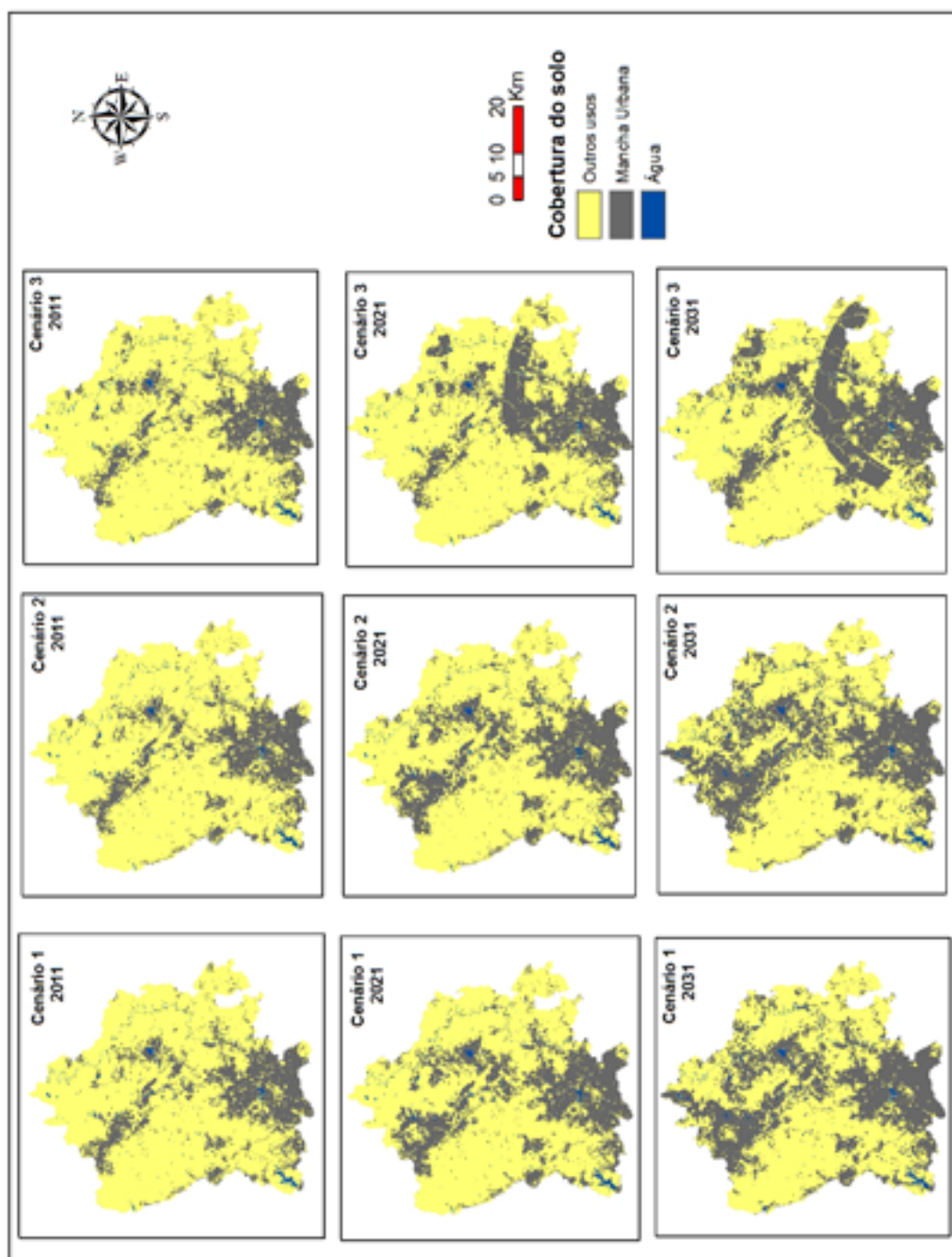


### Aplicação do modelo: cenários futuros simulados

De acordo com a metodologia proposta, foram elaborados três diferentes cenários. O cenário 1 incorpora a tendência de urbanização preditiva para 2031, considerando, na modelagem, a influência das variáveis explicativas selecionadas. (Figura 9). Já o cenário 2 incorpora a tendência de urbanização preditiva para 2031, considerando, na modelagem, a influência das variáveis explicativas selecionadas e as obras viárias propostas no Vetor Norte (Figura 9). No cenário 3, foram inseridas no modelo as variáveis explicativas, as variáveis restritivas (*“unidades de conservação de uso integral e sustentável” e “áreas com vocação à preservação dos cursos de água”*), as variáveis estimuladoras (*“eixo estruturador do Rodoanel”, “as centralidades urbanas e comerciais propostas” e a “distância de loteamentos com licença de implantação aprovada”*), e também as obras viárias propostas (Rodoanel, Anel Viário Norte, Via 540, Via Norte Sul, Projetos VIURBS metropolitano e Contornos Norte e Leste de Lagoa Santa) com predição para 2031.



Figura 9: Simulações de cobertura do solo para os cenários 1, 2 e 3 nos anos 2011, 2021 e 2031, resultantes da aplicação do modelo proposto.

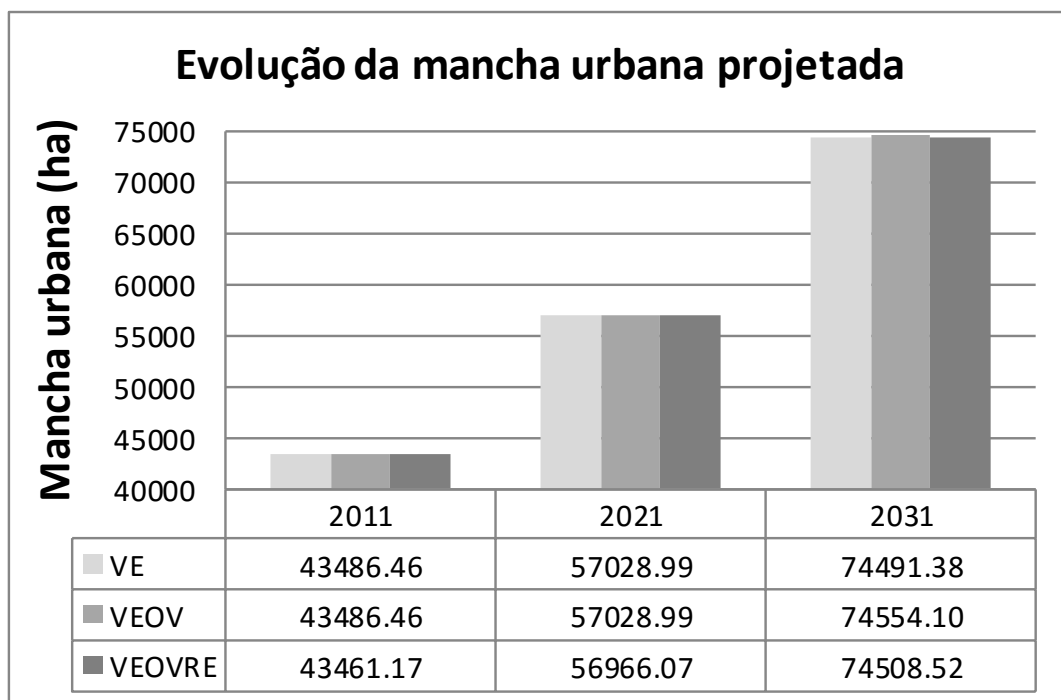


Ao observar os mapas ilustrados na Figura 9, a diferença entre os cenários fica mais evidente quando a projeção atinge o ano de 2031. Em valores absolutos, a expansão urbana simulada para os anos de 2011 e 2021 no cenário 1 (Variáveis Explicativas - VE) e no cenário 2 (Variáveis Explicativas e Obras Viárias - VEOV) foram idênticas (Figura 10). Conforme apresentado no tópico Simulações de Cenários Futuros deste artigo, as obras viárias previstas na área de estudo foram calibradas para exercerem influência no modelo somente no ano de 2020. Essa calibração explica a

não diferença (estabilidade) de área entre os cenários, mesmo incluindo no cenário 2 esta variável. Todavia, os cenários 1 e 2 apresentaram diferenças de cálculos para o ano de 2031, o que revela a baixa ou nenhuma influência das obras viárias no modelo até o ano 2021.

Como era esperado, o cenário 3 (Variáveis Explicativas, Obras Viárias, Restritivas e Estimuladoras – VEOVRE) apresentou uma diferença de áreas urbanas em todos os anos projetados (Figura 10).

Figura 10: Evolução da Mancha Urbana projetada no vetor norte da RMBH.



Comparando as projeções do ano 2031 entre os cenários 1 e 2, observa-se que a quantificação da mancha urbana atinge 74.491,38 hectares para o cenário 1 (VE) e 74.554,10 hectares para o cenário 2 (VEOV). Esses dados revelam que as obras viárias propostas no Vetor Norte exercerão influência para a expansão da mancha urbana. Com a inclusão da variável obras viárias, o cenário 2 no ano 2031 manteve a maior quantificação de mancha urbana, dentre os períodos analisados. A Figura 11 apresenta as principais mudanças de cobertura do solo urbano, ocasionadas pela inclusão da variável obras viárias, observada na porção central da área em estudo. Nesse setor, destaca-se a influência do Contorno Norte-Leste de Lagoa Santa (Figura 11) no crescimento da mancha urbana situada no entorno imediato desta via.

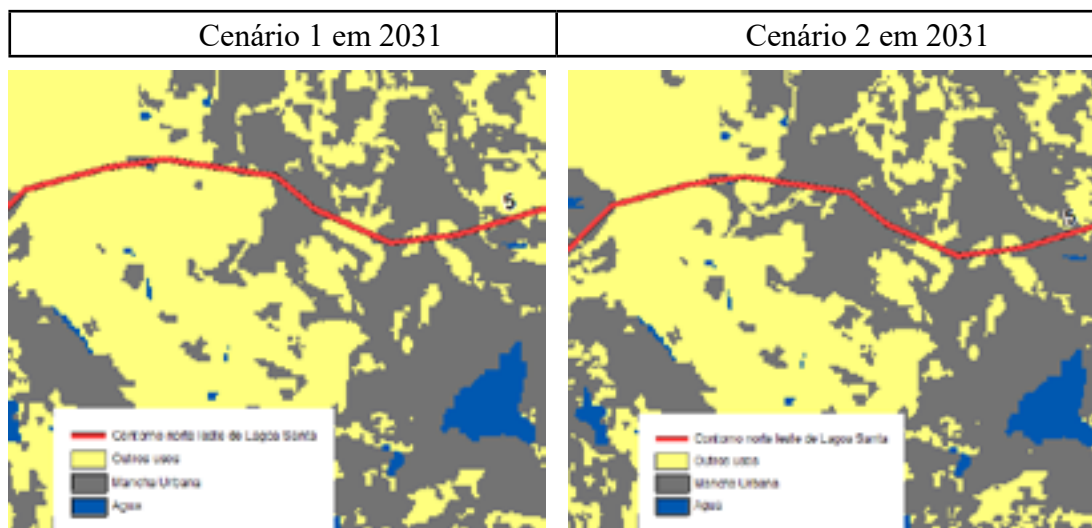


Figura 11: Porção central da área de estudo, onde foi observado o crescimento da mancha urbana (porção central das figuras) no entorno da via prevista Contorno Norte-Leste de Lagoa Santa.

Durante os períodos analisados, o cenário 3 apresentou a segunda maior quantificação de áreas urbanas no Vetor Norte, totalizando 74.508,52 hectares. Observando os mapas do cenário 3 (VEOVRE), é notória a influência das variáveis estimuladoras e restritivas na projeção da mancha urbana. Dentre as variáveis analisadas neste cenário, destaca-se a variável que representa o eixo estruturador do Rodoanel, com forte influência para mudança de cobertura do solo urbano neste setor. No mapa projetado para 2031, é nítida a influência desta variável na composição de áreas urbanas, concentradas em maior parte nas porções sudoeste, central e leste do Vetor Norte. Vale ressaltar que, no modelo, as taxas de crescimento são definidas pelas variáveis explicativas, enquanto as variáveis restritivas e estimuladoras são responsáveis em realocar espacialmente o crescimento urbano, de acordo com o fator multiplicador aplicado para cada variável.

## Conclusões

O trabalho apresentou um modelo de predição de mudança de cobertura do solo urbano consistente. No processo de validação, verificou-se um índice de acerto entre os pixels de 92,6%, contra 7,4% para os pixels errados, considerando as imagens projetada e observada para 2011. O modelo mostrou-se confiável ao atingir um índice de acurácia de 82,61%. Com isso, foi possível elaborar três cenários preditivos para a aplicação do modelo, os quais consideraram possíveis intervenções de obras viárias propostas e também variáveis explicativas, restritivas e estimuladoras para a urbanização existente na região.

Os dados demonstram que parte dos municípios de Ribeirão das Neves, São José da Lapa, Vespasiano e Santa Luzia apresentou a maior tendência de mudança de cobertura do solo das classes atuais para a classe urbano, devido a estes municípios estarem inseridos no eixo estruturador do Rodoanel.

Os resultados da aplicação do modelo indicaram que:

1. A diferença da quantificação de áreas urbanas projetadas nos cenários 1 e 2 para 2031 revelou que a inserção da variável obras viárias, prevista no *software*, exerceu influência para o aumento da cobertura do solo urbano no Vetor Norte;
2. As maiores mudanças de cobertura do solo urbano projetadas entre 2011 e 2031 foram observadas nas porções noroeste e leste do Vetor Norte, inseridos em parte dos municípios de Capim Branco, Pedro Leopoldo, Confins e Sabará;
3. Dentre 13 (treze) variáveis explicativas testadas no modelo, duas tiveram destaque em relação ao potencial de explicação baseado no modelo V de Cramer: as áreas com ocorrência de mudança de cobertura do solo entre 2001 e 2006, com um índice de 0,3741, e a distância de centros urbanos e comerciais existentes com 0,3532. Isso indica que, no Vetor Norte, essas duas variáveis melhor explicam a mudança de cobertura de solo urbano observada entre os anos de 2001 e 2006.

Na área de estudo, a incorporação das variáveis restritivas e estimuladoras elevou a qualidade da modelagem. Ao considerar as relevâncias ambientais como fator restritivo para evolução da mancha urbana e os eixos viários e centralidades propostas como fatores estimuladores, o modelo adquiriu uma perspectiva realística. A possibilidade de aplicar este exercício metodológico classifica o presente estudo como suporte aos gestores das políticas de planejamento do desenvolvimento metropolitano. Vale ressaltar que os cenários apresentados não devem ser entendidos como previsões absolutamente verdadeiras ou indiscutíveis, mas sim como indicadores de uma provável realidade, caso sejam mantidas as tendências de expansão urbana e variáveis correlacionadas. No processo de modelagem, quanto maior for o período projetado, maior é a incerteza da projeção, visto que em cada ano projetado o erro do modelo se acumula.

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

## Referências

- AANSTOOS, J.; OHARA, C. G.; PRASAD, S.; DABBIRU, L.; LEE, M.; NOBREGA, R. A. A. Screening of Earthen Levees Using Synthetic Aperture Radar. In: 2009 AGU Fall Meeting, San Francisco CA. Proceedings of 2009 AGU Fall Meeting, 2009.
- ALMEIDA, C. M. Modelagem da dinâmica espacial como uma ferramenta auxiliar ao planejamento: simulação de mudanças de uso da terra em áreas urbanas para as cidades de Bauru e Piracicaba (SP). 2003. 351f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Divisão de Processamento de Imagens, INPE, São José dos Campos, 2003.
- COSTA, H. S. M. Mercado imobiliário, Estado e natureza na produção do espaço metropolitano. In: Costa, H. S. M. et al. (Org.). Novas periferias metropolitanas. Belo Horizonte: Editora C/Arte, 2006, p. 101-124.
- CLARK LABS, Clark University. LCM for Arcgis 9.3. Land change modeler tutorial. Version 9.3. Clark Labs, 2006.
- EASTMAN, J. Idrisi Taiga Tutorial. Massachusetts: Clark Labs, 2009. 342 p. Disponível em: <[www.clarklabs.org](http://www.clarklabs.org)>. Acesso em: 20 out. 2013.
- GONZALEZ, J. J.; ETTER, A. A.; SARMIENTO, A. H.; ORREGO, S. A.; RAMÍREZ, C.; CABRERA, E.; VARGAS, D.; GALINDO, G.; GARCÍA, M. C.; ORDÓÑEZ, F. M. Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia. Bogotá D.C., 2011.
- HAYKIN, S. S. Neural networks: A comprehensive foundation. New Jersey: Prentice-Hall, 1999.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo demográfico de 2010. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 20 out. 2013.
- \_\_\_\_\_. Manual Técnico de Uso da Terra. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2006.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Departamento de Geração de Imagens (DGI). Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 24 abr. 2013.
- MENDONÇA, J. G. Segregação e mobilidade residencial na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Tese (Doutorado em Planejamento Urbano e Regional) – UFRJ: Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano e Regional, Rio de Janeiro, 2002.
- MILNE, E.; ASPINALL, R. J.; VELDKAMP, T. A. Integrated modelling of natural and social systems in land change science. Landscape Ecology, v. 24, p. 1145-1147, 2009.
- MINAS GERAIS. Secretaria Estadual de Desenvolvimento Regional – SEDRU. Estratégia de Desenvolvimento da Cidade (CDS), com foco na redução da desigualdade social e da pobreza, para o Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). Produto 05 - Relatório de Consolidação do Diagnóstico Participativo, Volume I, 2009.
- \_\_\_\_\_. Secretaria Estadual de Desenvolvimento Regional – SEDRU. Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado da Região Metropolitana de Belo Horizonte - PDDI. Relatório final de definição das propostas de políticas setoriais, projetos e investimentos prioritários. Belo Horizonte: Cedeplar/UFMG, 2011. Disponível em: <[www.rmbh.org.br](http://www.rmbh.org.br)>. Acesso em: 08 ago. 2011.
- TRENTIN, G. A expansão urbano-industrial do município de Americana-SP: geotecnologias aplicadas à análise temporal e simulação de cenários. 237f. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2008.
- VELDKAMP, A.;

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

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