

UTILIZAÇÃO DO LAND CHANGE MODELER (LCM) COMO FERRAMENTA DE ANÁLISE DA VARIAÇÃO NO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO: APLICAÇÃO NA APA DA SERRA DE SÃO JOSÉ EM MINAS GERAIS

Using Land Change Modeler (LCM) as a tool to analyze variations on land cover and spatial occupation: practical application on "Serra de São José" conservation area in Minas Gerais.

Gabriel Bias-Fortes

Doutor em Geografia – UERJ, Brasil.

bias_fortes@yahoo.com.br

Leandro Andrei Beser de Deus

Doutor em Planejamento Ambiental – Docente PPGeo/UERJ, Brasil.

leandrobaser@gmail.com

Recebido: 20.06.2022

Aceito: 09.08.2022

Resumo

A estrutura geomorfológica conhecida como Serra de São José no estado de Minas Gerais é um marco paisagístico, histórico e cultural nos municípios que a circundam, motivo pelo qual criou-se nos anos 90 uma unidade de conservação visando a preservação da região. Destarte, pretende-se no estudo seguinte analisar a evolução do uso e ocupação do solo na área da área de proteção ambiental (APA) Serra de São José – num período aproximado de 25 anos a partir de sua criação como unidade de conservação ambiental – por meio da análise de imagens de satélite Landsat 5 e 8. Para esta análise, há de se realizar um estudo do uso e ocupação dos solos desta área em dois momentos distintos – no ano de 1990 (em que fora criada a unidade) e no ano de 2015 – a partir da classificação das imagens processadas digitalmente em ferramentas disponibilizada no software ArcGis versão 10.3 com base em três classes pré-estabelecidas: Cobertura Natural, Uso Agropecuário e Uso Urbano Industrial. Com esta classificação proposta, utiliza-se o software Idrisi para detectar as mudanças do uso e ocupação através da variação entre as classes estabelecidas entre um período e outro (de 1990 a 2015) utilizando a ferramenta de LCM (Land Change Modeler) disponível no software, na qual foram identificadas mudanças entre áreas as classes analisadas, indicando uma expansão de áreas de uso urbano industrial sobre áreas de uso agropecuário e destas sobre áreas de cobertura natural. Esta análise possibilita, além de avaliar a eficácia da APA como unidade de conservação, detectar o foco das principais alterações ocorridas nos limites da área de estudo a fim de auxiliar o planejamento ambiental.

Palavras-chave: APA Serra de São José, Idrisi, variação do uso e ocupação do solo.

Abstract

The geomorphological structure known as "Serra de São José" in Minas Gerais, Brazil, is a scenic, historical and cultural landmark in the surrounding municipalities. The reason that stimulated the creation, in 1990, of a conservation unit in this region - aimed at its preservation. Thus, the following study intends to analyze the evolution of land cover and spatial occupation in the "Serra de São José" environmental protection area (represented by initials APA in Portuguese) through the analysis of Landsat 5 and 8 satellite images in an approximate period of 25 years from its creation as a conservation unit. For this analysis, it carried out a study of land use and spatial occupation in this area at two different times - in 1990 (when the conservation unit was created) and in 2015 - using tools available in ArcGIS software (version 10.3) that provide the classification of digitally processed images based on three pre-established classes of land using: Natural Coverture, Farming Utilization and Urban-industrial Utilization. With this suggested classification, the Idrisi software is used to detect changes in land use and spatial occupation, examining variation between pre-established classes through the periods (from 1990 to 2015) by the use of the LCM (Land Change Modeler) tool available on software's package, in which changes have been identified between those analyzed areas trough time – the analyses indicate that urban-industrial areas expanded over farming areas and the latter expanded over natural coverture areas. This analysis makes it possible to detect the focus of the main changes that occurred (in this area) to assist in environmental planning, plus allows for evaluating the effectiveness of this specific APA as a conservation unit.

Keywords: "Serra de São José" environmental protection unit, Idrisi, land cover and spatial occupation variations.

1. INTRODUÇÃO

A área de proteção ambiental (APA) da Serra de São José em Minas Gerais – criada pelo decreto estadual 30.934 de 1990 a fim de preservar o patrimônio natural, histórico, cultural e paisagístico regional – fora anteriormente uma área de proteção estadual¹, fato que já indicava uma preocupação na preservação da estrutura geomorfológica tanto no aspecto ambiental quanto cultural. De acordo com Januário (2008), ocorreram entre 1986 e 1987 várias solicitações para aumentar a fiscalização na área, apontando a atividade de mineração como causadora de impactos ambientais, e em 1989 a Fundação Estadual do Meio Ambiente buscou as condições que resultariam na criação da APA. Além da função preservação ambiental, a criação da APA visava também a preservação de aspectos históricos e culturais relacionado às cidades históricas que se estabeleceram na base da Serra de São José; segundo Cirino e Lima (2008):

A APA São José tem uma grande diversidade de fauna e flora, além de mananciais de água. Apresenta também uma importância cultural e histórica, contendo indícios de vida pré-histórica, ocupação indígena e atividade mineradora durante o "ciclo do ouro", além de calçamentos de pedra feito por escravos. Dada a sua localização e

¹ Conforme Januário (2008), sua criação pelo decreto estadual 21.308 de 1981 fora motivada pelas denúncias de degradação ambiental provocadas por queimadas, desmatamentos e atividade mineradora na área da serra de São José.

configuração, tal recurso ambiental apresenta um grande potencial para o turismo paisagístico-ecológico e de aventura. (CIRINO; LIMA, 2008, p. 649).

Com uma área de aproximadamente 4.780 hectares, a APA da Serra de São José ocupa o território de cinco municípios mineiros e recentemente parte de seu território foi utilizada como referência para criação do refúgio de vida silvestre “Libélulas da Serra de São José”², que, por se tratar de unidade de conservação de proteção integral, atribuiu restrições de uso e ocupação mais rígidas em parte da APA (limites de ambas as unidades de conservação podem ser vistos na Figura 1).

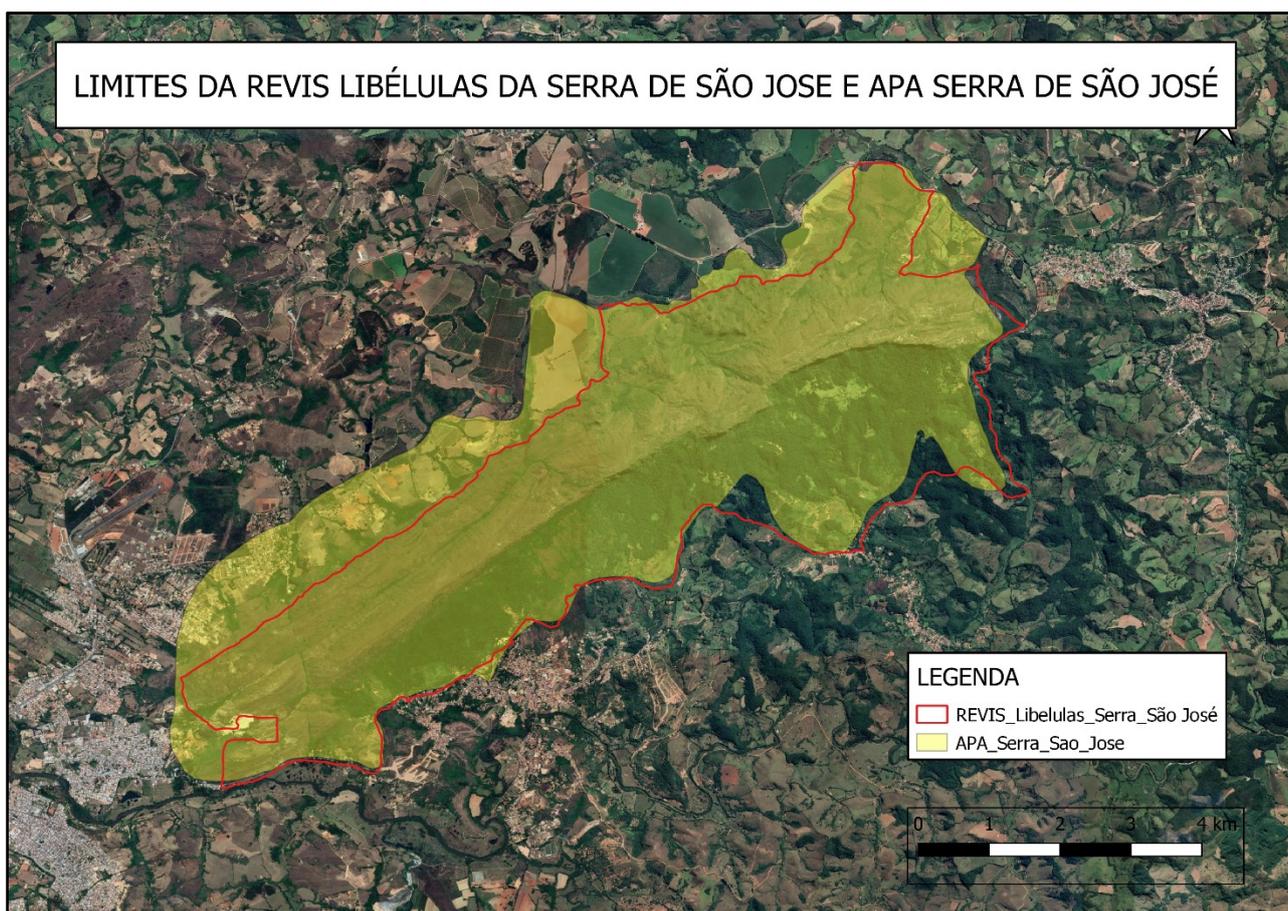


Figura 1 – APA Serra de São José e REVIS Libélulas Serra de São José.

Nota: Uso do módulo de impressão no software QGIS com imagem do Google Satellite.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

O interior da área da APA é preenchido no sentido SO – NE pela Serra de São José, que dá nome à unidade de conservação e se constitui como monumento natural, histórico

² Criada pelo decreto estadual 43.908 de 2004, o refúgio de vida silvestre (REVIS) Libélulas da Serra de São José foi a primeira unidade de conservação no Brasil voltada para a preservação de espécies de libélulas (Bedê *et al.*, 2015).

e cultural. Acerca das características geomorfológicas da Serra de São José, Costa-Cardoso *et al.* (2015) a descrevem como:

Trata-se de um maciço quartzítico que se ergue a uma altitude de máxima de 1430 m, destacando-se da paisagem circundante, onde predominam altitudes de cerca 900 m. A hidrografia da APA São José é constituída pela bacia do rio das Mortes - sub-bacia do rio Grande, representada por dois dos seus mais importantes afluentes: rio Elvas na região sul, e rio Carandaí na porção norte do município de Prados. Na área da APA, existem importantes locais de recarga hídrica, que produzem mananciais de água formadores de diversos cursos d'água de pequeno e médio porte. (COSTA-CARDOSO *et al.*, 2015, p. 316).

Apesar dos esforços legais de preservação, Cirino e Lima (2008) apontam para continuidade de impactos ambientais como desmatamento, retirada de espécies nativas, incêndios, atividade mineradora e expansão urbana, além de práticas agropecuárias insustentáveis. Particularmente no que se refere à expansão urbana, observa-se na localidade de águas santas (municípios de São João Del Rey e Tiradentes) um crescimento na porção noroeste da APA.

Dado este contexto, propõe-se um estudo que detecte as principais alterações no uso e ocupação do solo no intervalo de tempo que compreenda o ano de criação da APA (1990) e a situação 25 anos depois (2015) a partir da utilização de técnicas de processamento digital de imagens (PDI) para classificação do uso e cobertura do solo e de Land Change Modeler (LCM) para identificar as alterações no intervalo proposto. Este estudo analítico possibilita, além de avaliar a eficácia da APA como unidade de conservação, detectar onde fora o foco das principais alterações do uso e cobertura do solo (considerando o intervalo de tempo e as classificações pré-estabelecidas).

De acordo com Eastman (2012) o PDI é um campo de estudo voltado para utilização de técnicas de análise em computador para dados em imagens no formato digital e está direcionado a quatro operações básicas: (1) Correção das imagens, (2) Realce das imagens, (3) Classificação das imagens e (4) Transformação das imagens. Na análise proposta, utiliza-se principalmente da classificação de imagens (apropriando-se das ferramentas disponíveis no software ArcGis) como forma de percepção do uso e cobertura da área de estudo nos dois momentos indicados (1990 e 2015).

No que se refere ao LCM, trata-se de um módulo inserido no software Idrisi voltado para a “função de analisar as mudanças no uso da terra entre duas datas, avaliar as perdas, ganhos e persistências no uso do solo, as contribuições de cada tipo de uso do solo para conversão em outra classe, além de prever e modelar as variáveis relativas às transições do ambiente e habitat” (MARTELLI; LOLLO, 2015 apud EASTMAN, 2012).

Dessa forma, o principal objetivo do estudo é, por meio do uso das ferramentas de PDI disponíveis no ArcGis e do módulo LCM no Idrisi, analisar as principais alterações que ocorreram no uso e cobertura do solo no território da APA da Serra de São José em Minas Gerais no intervalo entre 1990 e 2015. De forma complementar, há de se verificar as tendências futuras do uso e cobertura do solo do módulo de predições do software Idrisi (utilizando a técnica das Cadeias de Markov) considerando um cenário 25 anos posteriores a 2015 e refletir acerca da eficiência da APA como instrumento de conservação da Serra de São José considerando todo seu valor paisagístico, histórico e cultural.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A análise técnica que resultou na avaliação final acerca das alterações do uso e cobertura do solo na área de estudo seguiu três etapas diferentes que subdividem (quando o caso) em tarefas específicas.

2.1. Obtenção das imagens de satélite e insumos iniciais

A primeira etapa consiste na obtenção das imagens de base para o recorte da área de estudo e classificação do uso e cobertura do solo nos dois períodos de análise. Além das imagens, fora obtida o arquivo em formato *shapefile* da área de estudo (APA Serra de São José) no site do instituto estadual de florestas (IEF) de Minas Gerais.

As imagens foram obtidas gratuitamente pelo *site Earth Explorer* da *United States Geological Survey* (USGS) pelo critério de busca “Tiradentes/MG” e intervalo de tempo correspondente ao primeiro e último dia dos anos de 1990 e 2015. A USGS oferece a possibilidade de download de produtos de diversos satélites, todavia, para a análise selecionou-se imagem dos satélites *Landsat 5* para o período de 1990 (data de referência 22/05/1990) e *Landsat 8* para o período de 2015 (data de referência 12/06/2015).

As datas de referência para o *download* das cenas foram estabelecidas em meses próximos e correspondentes ao período de menor nebulosidade na área de estudo e foram selecionadas as imagens da coleção 1, nível 2 (imagens do nível 1 que passaram por procedimentos de correção na refletância da superfície)³.

³ As Landsat Collection Tiers em conformidade com a definição dada pela USGS, consistem na estrutura de inventário dos produtos e dados no nível 1 – organizadas com base na qualidade dos dados e nível do processamento – obtidos pelos satélites Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)/Thermal Infrared Sensor (TIRS), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM)*, and Landsat 1-5 Multispectral Scanner (MSS) instruments. Apesar da referência da coleção 1 somente ao nível 1, o sítio eletrônico da USGS proporciona a opção de obter as imagens no nível 2 com correções na refletância da superfície (disponível somente no Landsat 8 OLI/TIRS, Landsat 7 ETM+ e Landsat 4-5 TM); conforme a USGS, tais produtos fornecem uma estimativa da refletância espectral da superfície na forma que seria medida no nível do solo na ausência de dispersão ou absorção atmosférica.

2.2. Processamento digital de imagens (PDI) com foco na classificação das imagens

Esta etapa foi realizada pelo *software* ArcGis e seguiu a mesma sequência de tarefas para a classificação tanto da imagem de 1990 quanto da imagem de 2015. O objetivo final desta etapa consistiu na elaboração de um arquivo vetorial com a classificação do uso e cobertura do solo na área de estudo.

O empilhamento das imagens baixadas no *site* do USGS foi feito com o auxílio da ferramenta *Composite Bands* do ArcGis. Para a imagem obtida pelo *Landsat 5*, foram selecionadas as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 (nesta ordem) e as bandas de 1 a 7 (nesta ordem) para a imagem obtida pelo *Landsat 8*. Após a composição da imagem, realizou-se a correção da projeção para WGS 84 23S a partir da ferramenta *Project Raster* (o arquivo vetorial da área de estudo, baixado em SIRGAS 2000, também foi reprojetado para WGS 84 23S).

Após a reprojeção da imagem, foram selecionados os parâmetros para visualização: RGB 3-2-1 para *Landsat 5* e 4-3-2 para *Landsat 8*, ambas marcadas com o tipo *Standard Derivations* (o resultado aproxima a imagem das cores naturais). Uma vez que já foram adquiridas imagens corrigidas pela USGS, não foi necessário o pré-processamento destas imagens.

Em seguida, realizou-se a tarefa de maior importância nesta etapa de trabalho: a classificação supervisionada das imagens. A partir da ferramenta *Image Classification* do ArcGis, o primeiro passo foi criar um arquivo de assinatura com as principais classes de uso e ocupação do solo observadas em cada imagem. Inicialmente, foram identificadas 7 classes principais⁴ em ambas as imagens: (1) Cobertura Florestal, (2) Afloramento Rochoso, (3) Vegetação Arbustiva/Campos de Altitude, (4) Sombra, (5) Área Urbanizada, (6) Pastagem/Área de Cultivo e (7) Extração Mineral.

A amostra (número de polígonos selecionados) referente a cada classe sofreu uma pequena variação conforme a imagem analisada (vide quadro 1), em função da diferença de qualidade entre as duas imagens (satélites distintos).

Com a seleção amostral e geração do arquivo de assinatura, o ArcGis possibilitou a classificação por métodos variados (*Maxver*, *Isso Cluster* etc.). Para a análise, foi selecionado o método *Interactive Supervised Classification*⁵. Com o resultado da classificação em cada imagem, passa-se às tarefas relacionadas ao pós-processamento.

⁴ Na área de estudo não foi necessário criar uma classe específica para massa d'água.

⁵ Ferramenta disponível no rol da *Image Classification* do ArcGis de funcionamento similar à *Maximum Likelihood Classification* (ESRI, 2020). No final do processo, a ferramenta gera uma camada *raster* com a classificação a partir do arquivo de assinaturas.

Utilizou-se a ferramenta de filtro (*Majority Filter – Spacital Analyst*) para homogeneizar o resultado e generalizar as classes, limpando os pixels isolados dentro de uma área majoritariamente classificada em outra categoria.

Quadro 1 – Número de polígonos criados para a amostra nos arquivos de assinaturas referentes às imagens de 1990 e 2015.

Assinatura 1990		Assinatura 2015	
Classe	Amostra	Classe	Amostra
1 Cobertura Florestal	5 polígonos	1 Cobertura Florestal	10 polígonos
2 Afloramento Rochoso	15 polígonos	2 Afloramento Rochoso	15 polígonos
3 Arbustiva/Campo Alt.	10 polígonos	3 Arbustiva/Campo Alt.	13 polígonos
4 Sombra	10 polígonos	4 Sombra	10 polígonos
5 Área Urbanizada	26 polígonos	5 Área Urbanizada	20 polígonos
6 Pastagem/Cultivo	18 polígonos	6 Pastagem/Cultivo	15 polígonos
7 Extração Mineral	5 polígonos	7 Extração Mineral	5 polígonos

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

A transformação do arquivo para vetor foi possível pela ferramenta *Raster to Polygon* (com o cuidado de manter a “*Class Name*”) e em seguida utilizou-se da ferramenta “*Clip*” para recortar o arquivo vetorial somente para os limites da área de estudo (APA Serra de São José).

Antes das correções manuais, foi necessário editar a tabela de atributos do recorte selecionado para simplificação em três classes de uso e ocupação do solo: (1) Cobertura Natural, (2) Uso Agropecuário e (3) Uso Urbano Industrial. No quadro 2, observa-se o agrupamento de classes realizado nesta simplificação.

Com a seleção amostral e geração do arquivo de assinatura, o ArcGis possibilitou a classificação por métodos variados (*Maxver, Isso Cluster* etc.). Para a análise, foi selecionado o método *Interactive Supervised Classification*⁶. Com o resultado da classificação em cada imagem, passa-se às tarefas relacionadas ao pós-processamento.

Utilizou-se a ferramenta de filtro (*Majority Filter – Spacital Analyst*) para homogeneizar o resultado e generalizar as classes, limpando os pixels isolados dentro de uma área majoritariamente classificada em outra categoria.

A transformação do arquivo para vetor foi possível pela ferramenta *Raster to Polygon* (com o cuidado de manter a “*Class Name*”) e em seguida utilizou-se da ferramenta “*Clip*”

⁶ Ferramenta disponível no rol da *Image Classification* do ArcGis de funcionamento similar à *Maximum Likelihood Classification* (ESRI, 2020). No final do processo, a ferramenta gera uma camada *raster* com a classificação a partir do arquivo de assinaturas.

para recortar o arquivo vetorial somente para os limites da área de estudo (APA Serra de São José).

Antes das correções manuais, foi necessário editar a tabela de atributos do recorte selecionado para simplificação em três classes de uso e ocupação do solo: (1) Cobertura Natural, (2) Uso Agropecuário e (3) Uso Urbano Industrial. No quadro 2, observa-se o agrupamento de classes realizado nesta simplificação.

Quadro 2 – Agrupamento de classes para simplificação na análise.

Classes Iniciais	Classes Finais
Cobertura Florestal	Cobertura Natural
Afloramento Rochoso	
Vegetação Arbustiva e Campos de Altitude	
Sombra	
Área de Pastagem ou Cultivo	Uso Agropecuário
Área Urbanizada	Uso Urbano Industrial
Extração Mineral	

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018⁷.

Assim, chegou-se à etapa das correções manuais para refinar o resultado da classificação digital. Ao atribuir uma transparência de 75% na visualização, foi possível realizar uma correção mais detalhada na classificação utilizando a imagem como referência. Esta correção ocorreu pela alteração, na tabela de atributos, de polígonos cujos *pixels* foram erroneamente classificados e não corrigidos no filtro da imagem (como polígonos correspondentes a Cobertura Natural que foram classificados como urbanos).

A tarefa final desta etapa consistiu na elaboração do arquivo vetorial com a classificação da imagem nas três classes sugeridas (utilizou-se, para isso, a ferramenta *Dissolve* no ArcGis); este arquivo é que serve como insumo para as análises no *software* Idrisi⁸. O resultado pode ser visto nas Figura 2 (referente a 1990) e Figura 3 (referente a 2015)⁹.

⁷ Com este agrupamento, altera-se a simbologia da classificação do arquivo recortado para *Categories – Unique Values* (utilizou-se a cor verde para classe 1, amarelo para classe 2 e laranja para classe 3) a fim de melhorar a visualização e facilitar as correções manuais.

⁸ Recomenda-se deixar o arquivo vetorial final em pasta separada para sua utilização no Idrisi.

⁹ Nas Figuras, deve-se considerar a classificação nas três classes sugeridas (deve-se ter o cuidado para que os dois arquivos possuam a mesma classificação): Cobertura Natural – Verde; Uso Agropecuário – Amarelo; Uso Urbano Industrial – Laranja.

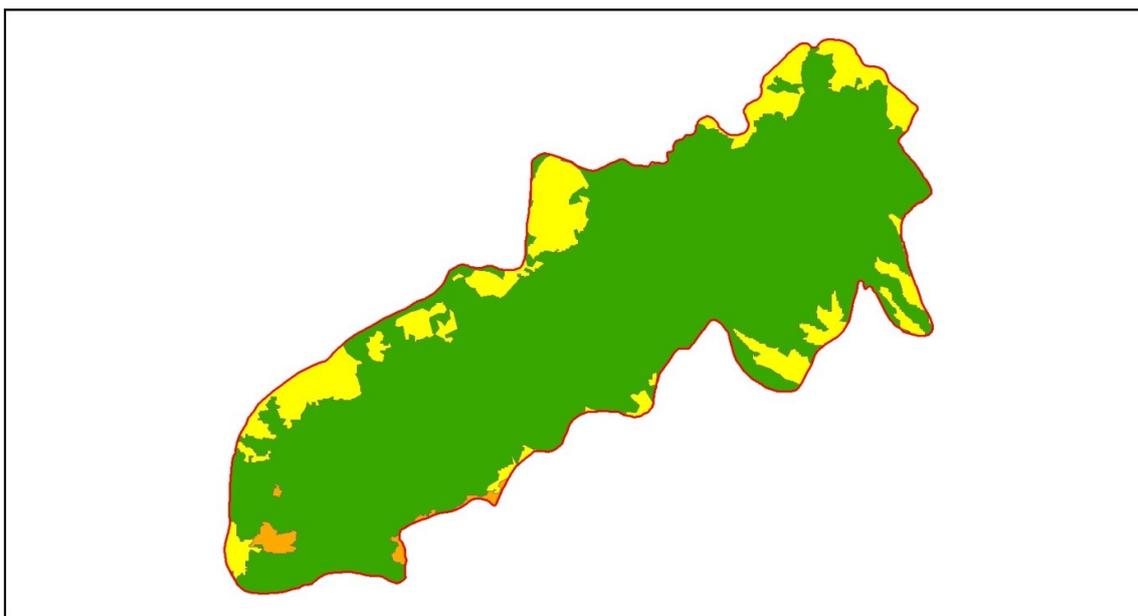


Figura 2 – Arquivo final com a classificação referente à imagem de 1990.

Nota: Figura elaborada no *software* ArcGis.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

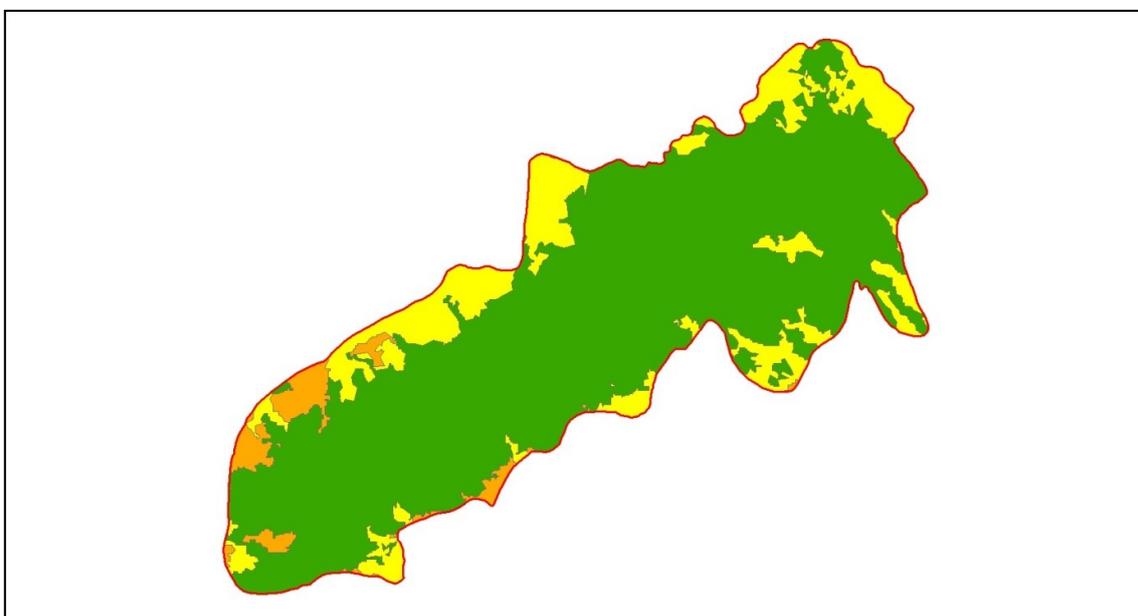


Figura 3 – Arquivo final com a classificação referente à imagem de 2015.

Nota: Figura elaborada no *software* ArcGis.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

2.3. Análise das alterações pelo módulo LCM

Considerando o foco da análise, o *software* Idrisi conta com um módulo de análise de mudanças no uso e cobertura do solo, a partir de (no mínimo) dois tempos distintos (T1 e T2). Entretanto, para se utilizar o LCM, é necessário o preparo dos seus insumos: duas cenas ambientais, em estrutura matricial de uma única área, com parâmetros cartográficos concordantes (sistema de referência e sistema de coordenadas), apresentando classes idênticas e o mesmo número de linhas, colunas e resolução espacial.

Para o presente estudo, as cenas ambientais (1990 e 2015; Figuras 2 e 3) foram convertidas para a estrutura matricial, apresentando os mesmos parâmetros cartográficos (neste caso, UTM WGS 84 23S, sistema de coordenadas métrico). A resolução espacial adotada foi de 30 (m) e as classes Cobertura Natural, Uso Agropecuário e Uso Urbano Industrial foram mantidas.

Por fim, buscou-se o módulo LCM no *software* Idrisi para elaboração dos principais produtos propostos na análise de transição do uso e cobertura do solo: o gráfico de mudanças [1], os mapas de tendência cúbica [2], os modelos de detecção de mudança [3] e a tabela de previsão de mudanças [4], a partir das técnicas de Cadeias de Markov.

3. RESULTADOS

Uma vez que o objetivo do estudo é analisar as principais alterações no uso e cobertura do solo da APA de São José priorizando o critério de conservação, o ideal é expor os resultados que foquem na transição entre a classe correspondente a Cobertura Natural e entre as demais (Uso Agropecuário e Uso Urbano Industrial).

3.1. Gráfico de Mudanças

A partir do LCM, observa-se uma perda (em hectares) das áreas de Cobertura Natural, como pode ser verificado na imagem abaixo extraída do *software* Idrisi (Figura 4). Os valores positivos expressados pelas barras em verde indicam os ganhos de cada classe em hectares, enquanto os valores negativos expressos pelas barras roxas indicam as perdas de cada classe em hectares.

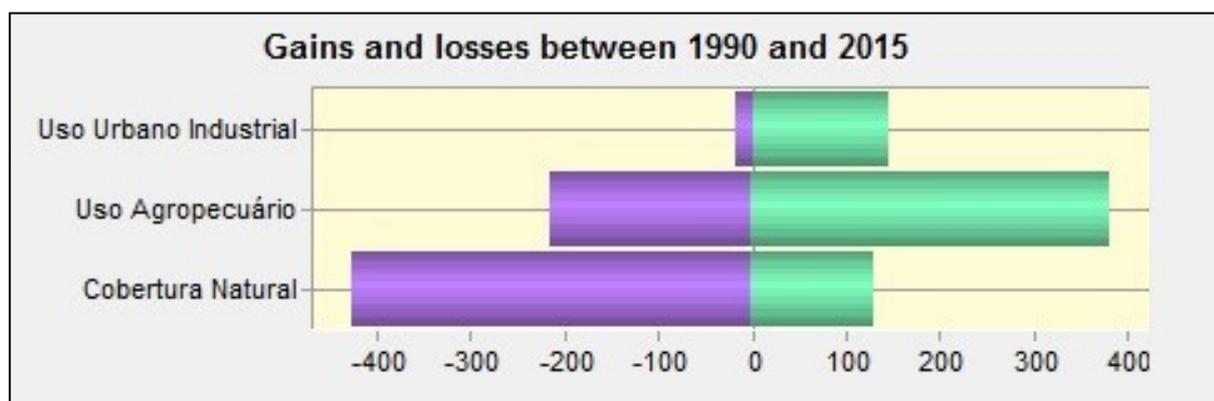


Figura 4 – Gráfico geral de perdas e ganhos.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Nota: Figura extraída do *software* Idrisi. Título em inglês indica "Ganhos e perdas entre 1990 e 2015" (tradução livre).

Nas Figuras 5, 6 e 7 é possível verificar as mudanças (em hectares) entre cada uma das classes no período analisado com as indicações de qual outra categoria fora responsável pelo ganho (valores positivos) ou perda (valores negativos) de área em hectares, ambos expressos em barras roxas.

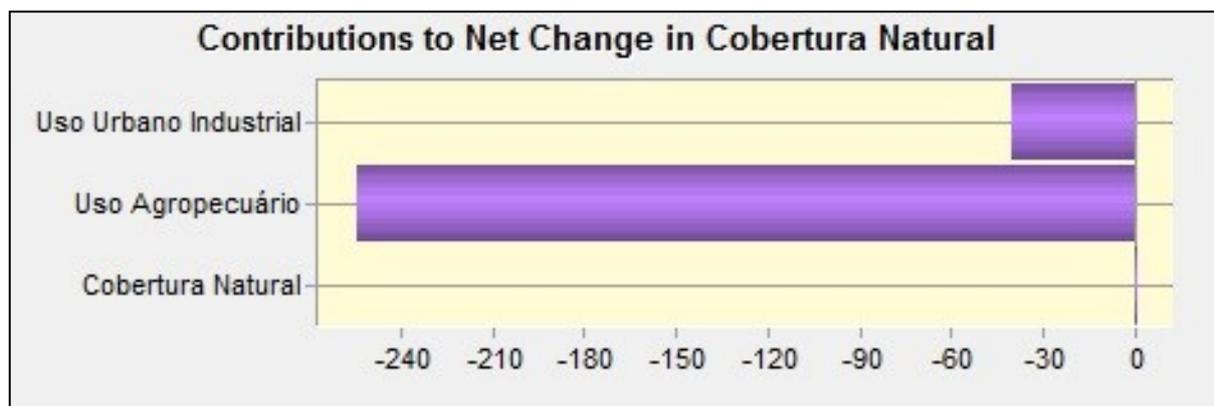


Figura 5 – Gráfico de detalhamento da classe Cobertura Natural.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Nota: Figura extraída do *software* Idrisi. Título em inglês indica "Contribuições na cadeia de transformação da classe Cobertura Natural" (tradução livre).

Como exemplo, percebe-se que a classe Cobertura Natural perdeu, entre 1990 e 2015, mais área para Uso Agropecuário (cerca de 250 ha) que para Uso Urbano Industrial (cerca de 40 ha).

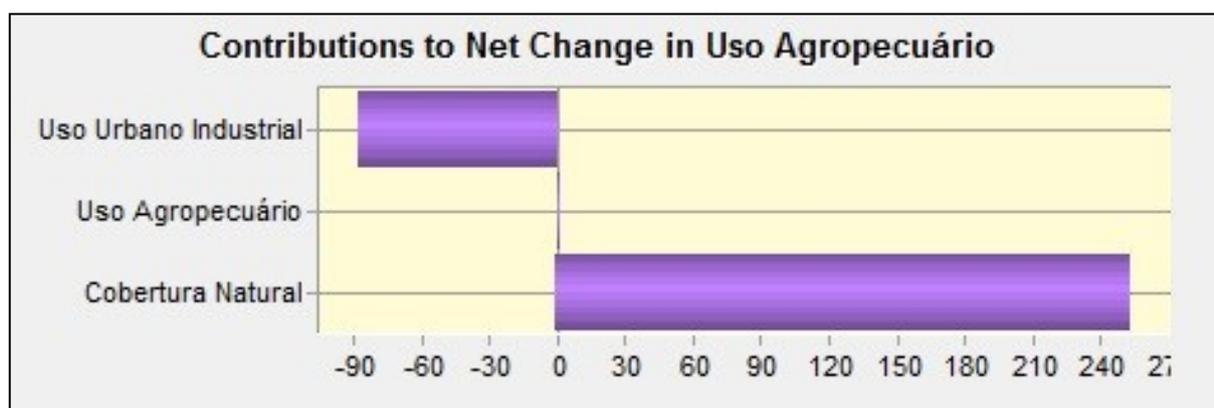


Figura 6 – Gráfico de detalhamento da classe Uso Agropecuário.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Nota: Figura extraída do *software* Idrisi. Título em inglês indica "Contribuições na cadeia de transformação da classe Uso Agropecuário" (tradução livre).

No caso acima, observa-se que a classe Uso Agropecuário perdeu área (em ha) para a classe Uso Urbano Industrial e ganhou área da classe Cobertura Natural.

Por fim, a classe Uso Urbano Industrial não apresentou perdas e se expandiu sobre áreas de Uso Agropecuário e de Cobertura Natural.

Tais resultados podem indicar uma tendência de crescimento das áreas urbanas a partir da sua expansão sobre áreas de uso agropecuário que, conseqüentemente, expandem sobre áreas de Cobertura Natural (Figura 13).

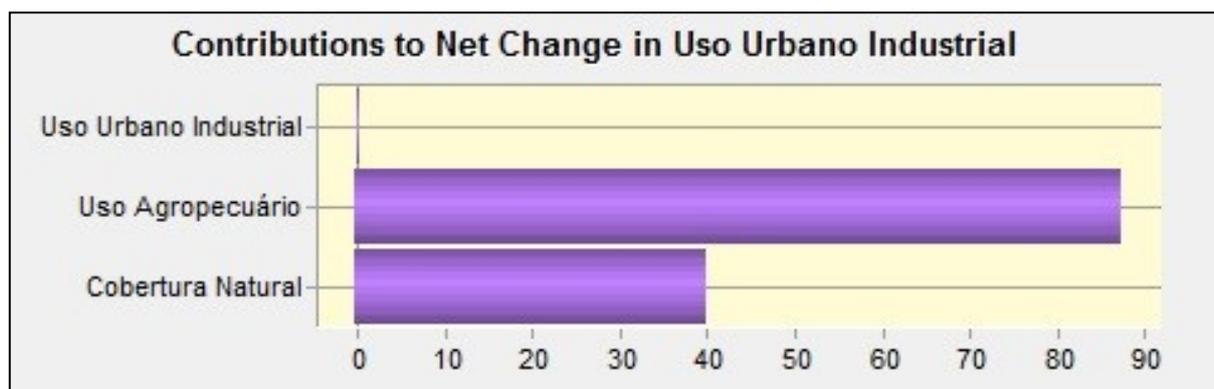


Figura 7 – Gráfico de detalhamento da classe Uso Urbano Industrial.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Nota: Figura extraída do *software* Idrisi. Título em inglês indica "Contribuições na cadeia de transformação da classe Uso Urbano Industrial" (tradução livre).

3.2. Mapas de Tendência Cúbica

Os mapas de tendência cúbica são úteis para indicar o foco das alterações entre uma e outra classe no intervalo de tempo selecionado. Para avaliar as alterações na área de estudo com um maior destaque nas variações relacionadas à funcionalidade da APA, optou-se por mostrar os mapas referentes às variações entre as classes Cobertura Natural para Uso Agropecuário (Figura 8) e Cobertura Natural para Uso Urbano Industrial (Figura 9).

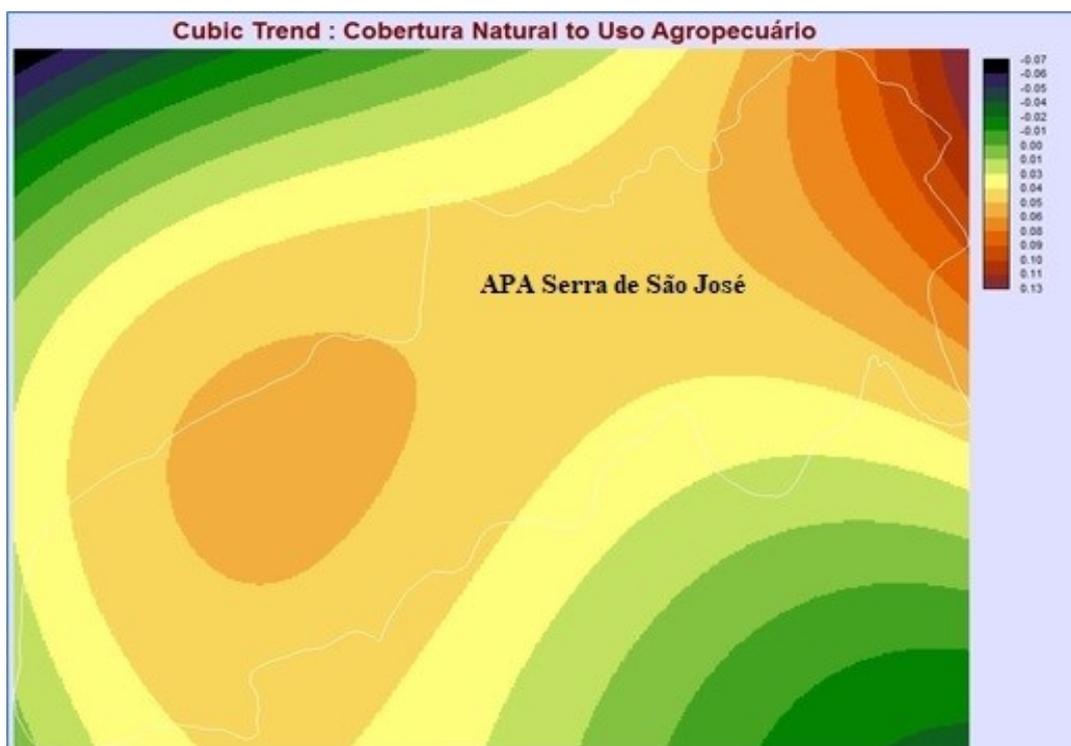


Figura 8 – Mapa de tendência cúbica entre Cobertura Natural e Uso Agropecuário na APA Serra de São José. *Nota:* Figura extraída do *software* Idrisi.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

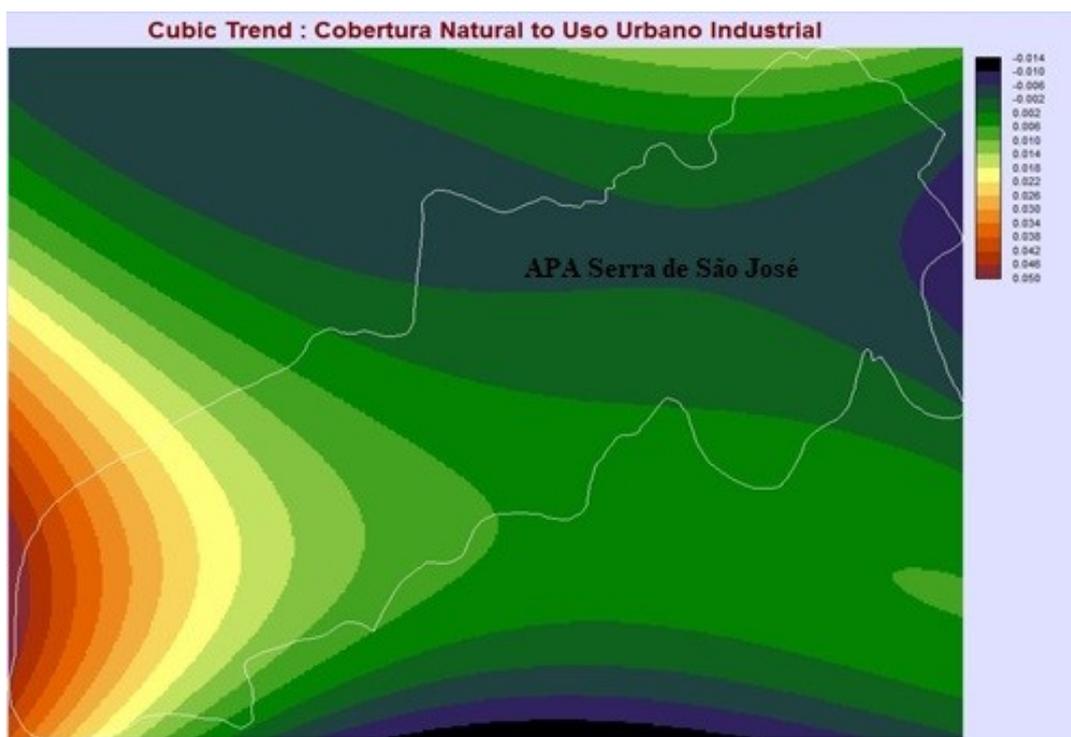


Figura 9 – Mapa de tendência cúbica entre Cobertura Natural e Uso Urbano Industrial na APA Serra de São José.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2018.

Nota: Figura extraída do *software* Idrisi.

A partir das Figuras 8 e 9, observa-se que as áreas periféricas da unidade de conservação indicam maior intensidade nas transformações, ambas relacionadas à alteração da classe de Cobertura Natural para outra classe.

Quanto à transição entre Cobertura Natural e Uso Agropecuário (Figura 8), percebe-se uma maior intensidade na porção norte em comparação à porção sul da APA, resultado que pode ser justificado por sua sobreposição com o REVIS Libélulas da Serra de São José (como pode ser visto na Figura 10); por se tratar de uma unidade de conservação de proteção integral, possui regras mais restritivas de ocupação). O interior da APA, por se tratar de área de afloramento rochoso e relevo acidentado, tende a apresentar uma menor intensidade nas alterações.

Particularmente na transição entre Cobertura Natural e Uso Urbano Industrial (Figura 9), o foco de maior intensidade corresponde à expansão urbana da localidade Águas Santas nos municípios de São João Del Rey e Tiradentes (Figura 10).

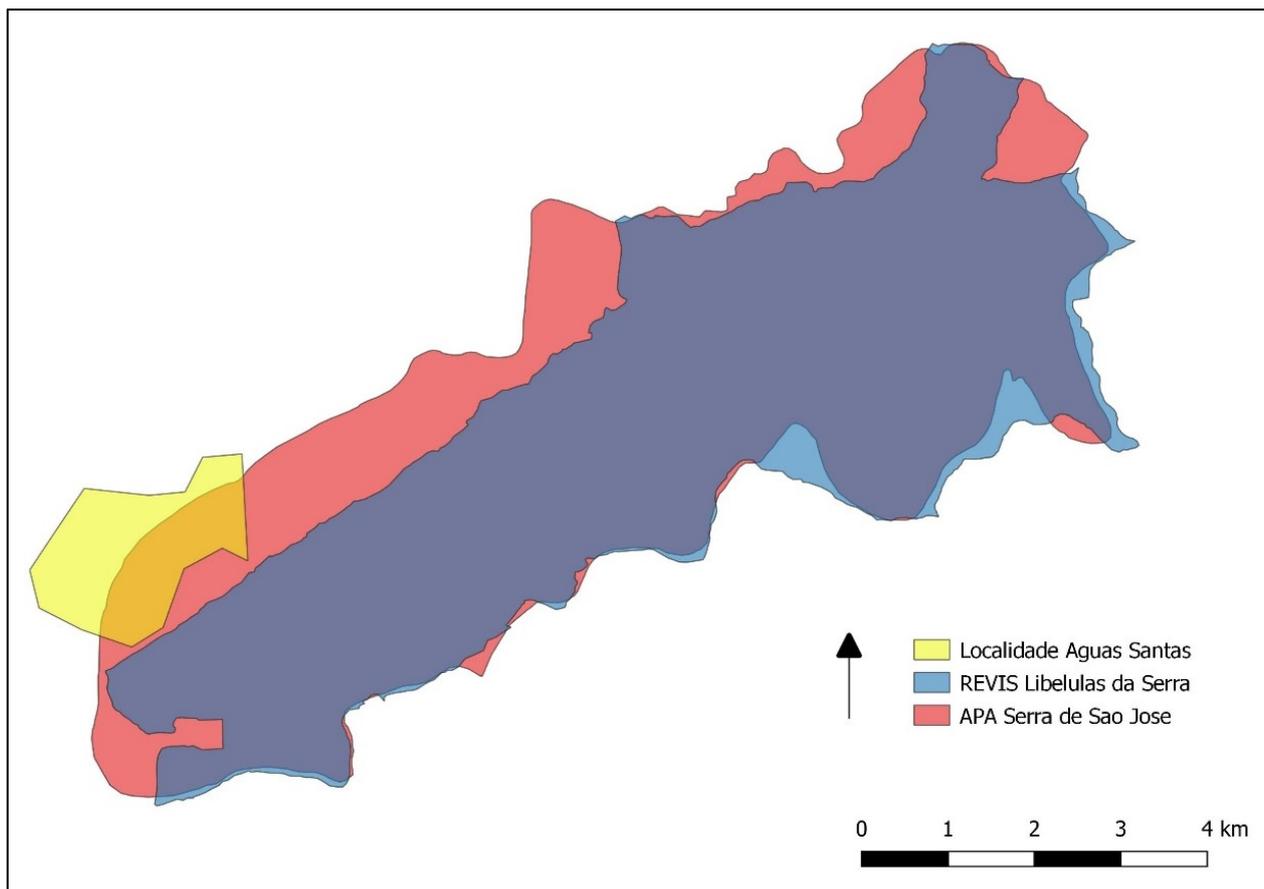


Figura 10 – Cruzamento das áreas referentes à APA Serra de São José, REVIS Libélulas da Serra de São José e à localidade de Águas Santas.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2021.

3.3 Modelos de Detecção de Mudanças

O modelo de detecção de mudanças apresenta as células (dos arquivos matriciais utilizados como insumo) que sofreram alterações de classe no intervalo de análise. Apesar do Idrisi fornecer o mapa com todas as alterações entre classes (Figura 11), o foco é a indicação das transições que ocorreram entre a classe Cobertura Natural e as demais (Figuras 13 e 14).

Conforme fora dito anteriormente, o interior da APA tende a apresentar menores alterações por se tratar de áreas de relevo Serra de São José propriamente dita). A porção sul também tende a apresentar menores alterações em comparação com a porção norte por corresponder (a partir de 2004) à área de refúgio de vida silvestre, unidade de conservação mais restrita à ocupação humana, entretanto, a representação da Figura 11 indica uma transição mais acentuada na área correspondente à localidade de Águas Santas e, no que se refere às atividades agropecuárias, na vertente noroeste da Serra de São José (cujas áreas não estão totalmente inseridas na REVIS).

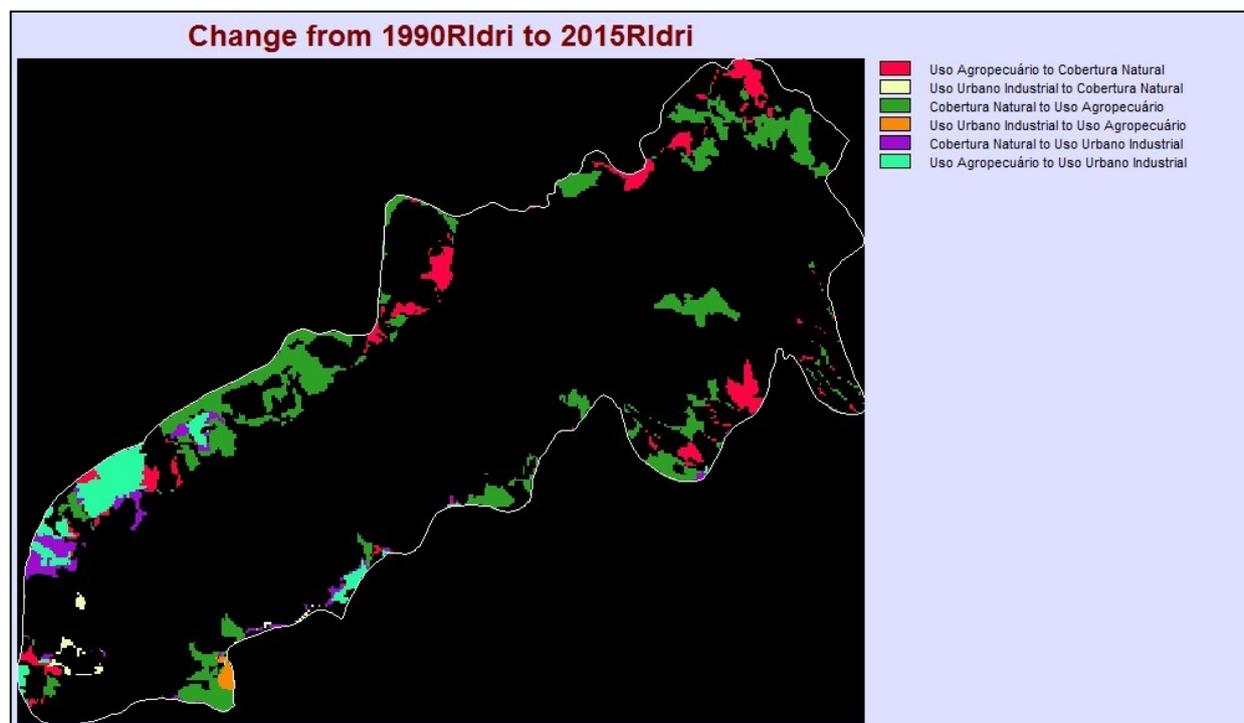


Figura 11 – Mapa com detecção de todas as áreas que sofreram mudanças de classe entre o período de 1990 a 2015 na APA Serra de São José. **Nota:** Figura extraída do *software* Idrisi. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2018.

Na Figura 12, destaca-se a área com maior alteração entre as classes Uso Agropecuário para Uso Urbano Industrial, Cobertura Natural para Uso Urbano Industrial e Cobertura Natural para Uso Agropecuário na vertente noroeste da Serra de São José, no entorno da localidade de Águas Santas (que também corresponde à área mais modificada no período de análise). Já nas Figuras 13 e 14, destacam-se as alterações da categoria de Cobertura Natural para, respectivamente, a de Uso Agropecuário e a de Uso Urbano Industrial.

Ao analisar as Figuras 13 e 14, observa-se que as áreas de Cobertura Natural perderam mais área para o Uso Agropecuário que para o Uso Urbano Industrial, todavia, reitera-se que as áreas de Uso Urbano Industrial tendem a avançar sobre áreas de uso agropecuário (conforme visto nas Figura 11, 12 e nos gráficos de mudanças representados pelas figuras 5, 6 e 7). Dessa forma, a urbanização afeta, ainda que indiretamente, a perda da classe de Cobertura Natural (“empurrando” as áreas de Uso Agropecuário para áreas naturais).

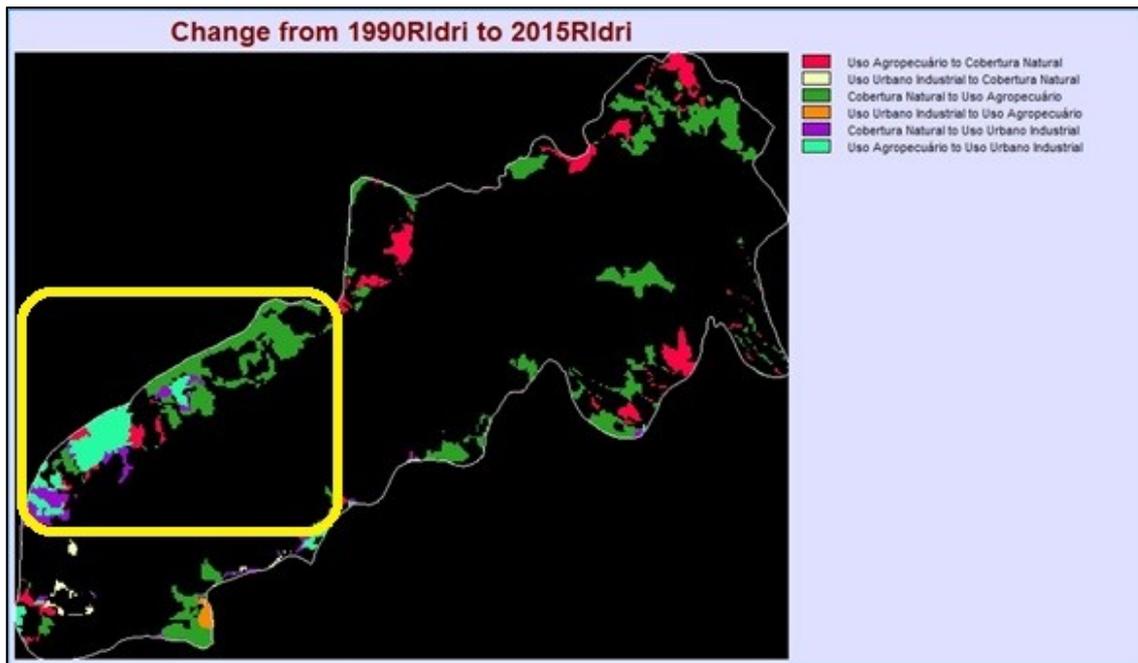


Figura 12 – Destaque para alterações no período 1990 – 2015 na área da APA Serra de São José que coincide com parte da localidade de Águas Santas na vertente noroeste da serra. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2021.

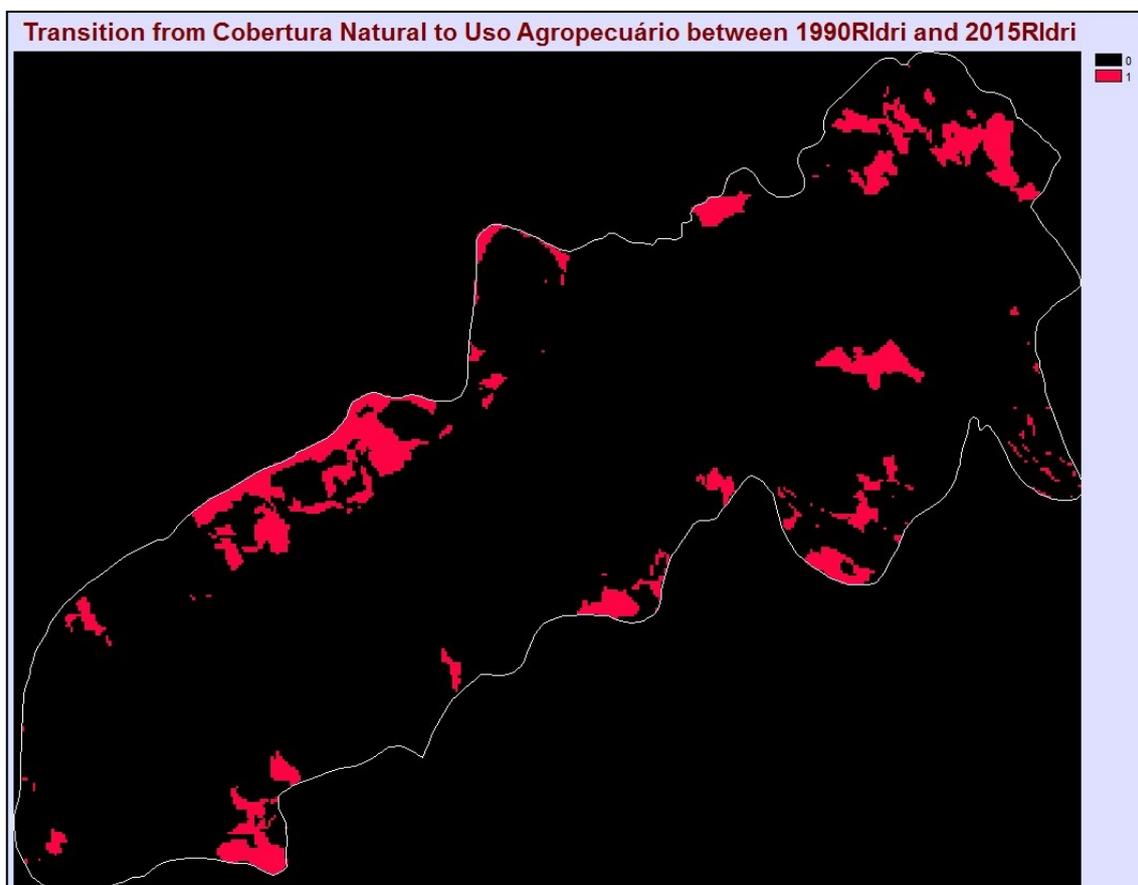


Figura 13 – Áreas de Cobertura Natural alteradas para Uso Agropecuário. **Nota:** Figura extraída do software Idrisi. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2018.

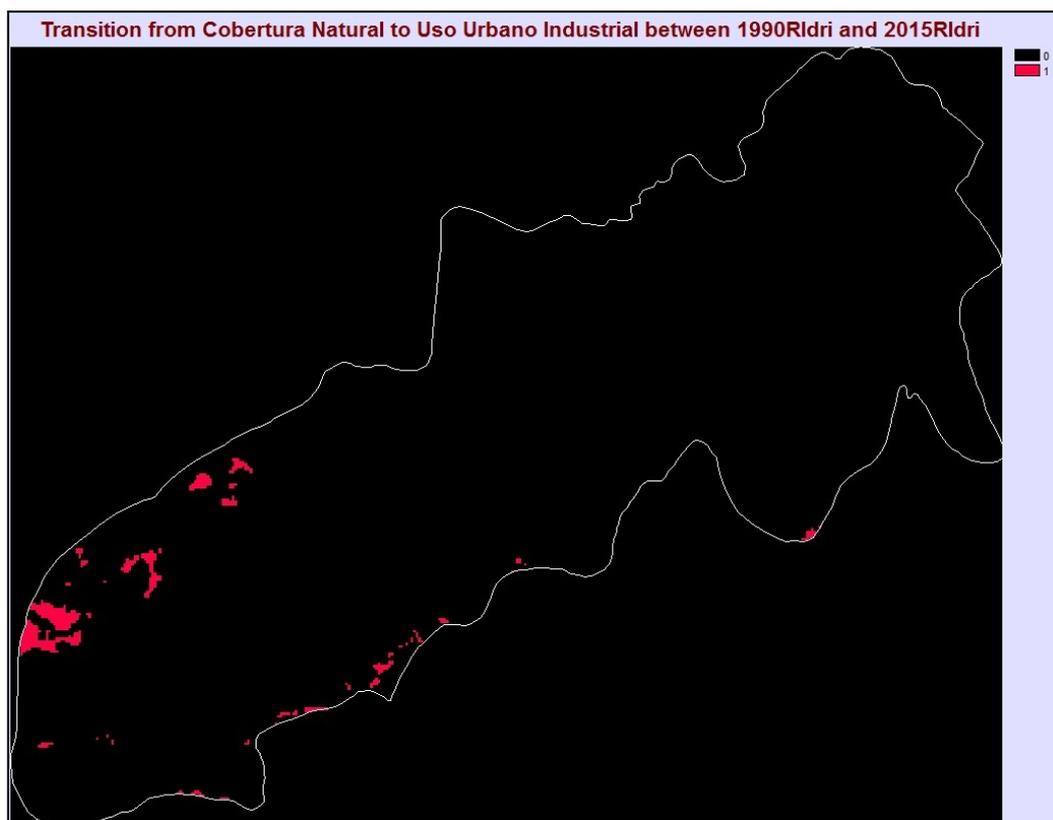


Figura 14 – Áreas de Cobertura Natural alteradas para Uso Urbano Industrial. **Nota:** Figura extraída do *software* Idrisi. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2018.

3.4. Tabela de Previsão de Mudanças

O Idrisi possibilita a geração, utilizando as Cadeias de Markov, de uma tabela com as probabilidades de alterações futuras a partir de uma data indicada no módulo LCM (T3). Uma vez que o estudo buscou um intervalo de 25 anos (de 1990 a 2015), gerou-se uma tabela com previsões para 25 anos após 2015 (marcando o ano de 2040). A partir das alterações no uso e ocupação do solo observadas entre 1990 e 2015 o *software* faz uma previsão sobre a possibilidade destas alterações – a chance de uma classe permanecer na mesma classificação ou alterar para uma outra categoria – ocorrerem no período requerido (no caso, 2040). Os resultados podem ser vistos na Figura 15.

Given :	Probability of changing to :		
	Cobertura Natural	Uso Agropecuário	Uso Urbano Industrial
Cobertura Natural	0.8913	0.0957	0.0130
Uso Agropecuário	0.1792	0.6804	0.1404
Uso Urbano Industrial	0.2315	0.1654	0.6031

Figura 15 – Tabela com probabilidades de mudanças para 2040 na área de estudo. **Nota:** Figura extraída do *software* Idrisi. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2018.

Apesar do caráter conservador (no que se refere a permanência das áreas de Cobertura Natural) obtido nos resultados pelas Cadeias de Markov – possivelmente pelo aspecto de difícil ocupação na área correspondente à Serra de São José propriamente dita: de afloramentos rochosos e relevo acidentado – deve-se levar em consideração que a tabela é uma previsão de possibilidades. Ainda que indique uma baixa probabilidade de alteração de áreas de cobertura pode afetar de formas drásticas estas previsões.

A tabela também não explicita as alterações “em cadeia” vinculadas a outro evento ou alteração, a exemplo da probabilidade de áreas que podem vir a mudar da classe Cobertura Natural para Uso Agropecuário por conta da alteração ocorrida em outra área (no caso envolvendo a alteração da classe Uso Agropecuário para a classe Uso Urbano Industrial).

Um ponto positivo refere-se a certa eficácia da APA como instrumento de conservação da Serra de São José. Além dos indicadores na tabela que preveem maior probabilidade de manutenção das áreas de Cobertura Natural, observou-se nos mapas que as áreas correspondentes à formação geomorfológica da Serra de São José (o que seria o “coração da serra”) não sofreu modificações intensas no uso e cobertura do solo. Dessa forma, todo o aspecto paisagístico, histórico e cultural que envolve a Serra de São José foi majoritariamente preservado entre os períodos de 1990 e 2015.

Um outro exemplo que correlaciona a unidade de conservação como um instrumento eficaz de proteção ambiental na Serra de São José é demonstrado em estudo de Faria *et al.* (2016), que verificaram (também por análise de imagens de satélite) uma diminuição da área de extração mineral no território da APA no período de 1985 a 2015. Segundo os autores, entre os intervalos avaliados ocorreu uma diminuição de aproximadamente 57,14% da área de extração explorada pela empresa Ômega.

4. DISCUSSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da validade deste estudo pela aplicabilidade metodológica e análise da evolução da cobertura da área de estudo ao longo de um período de tempo, ele apresenta algumas limitações referentes: (1) a qualidade e baixa resolução das imagens obtidas (em especial a referente ao período de 1990), que impacta na classificação tanto no momento de criação da assinatura (pela dificuldade em identificar o uso da terra) quanto no momento em que o *software* atribui as classes aos *pixels* (principalmente na diferenciação entre classes que possuem resposta espectral semelhante); (2) a ausência de verificação em campo (a análise foi realizada exclusivamente por sensoriamento remoto) para confirmação da classificação e (3) a proposta generalista da análise, que busca avaliar as

transformações de forma mais ampla e superficial que de forma pontual e detalhada. . Dessa forma, algumas inconsistências não identificadas na classificação das imagens para geração dos insumos para o LCM/Idrisi podem ter causado leves distorções no produto elaborado no estudo.

De uma forma geral, observa-se que a APA Serra de São José consiste em um instrumento razoavelmente eficaz para preservação da Serra, todavia, a região ainda convive com inúmeros conflitos e degradações ambientais. Além de Cirino e Lima (2008) que indicaram os principais impactos ambientais presentes na Serra, Costa-Cardoso *et al.* (2015) apontam para criação de gado como um fator negativo na conservação ambiental. Para os autores, “a criação de gado no interior da APA tem sido um grande problema nos últimos anos, atividade que vem comprometendo a existência de uma grande variedade de ambientes com flora e fauna muito ricas (...)” (COSTA-CARDOSO *et al.*, 2015, p. 319).

Apesar da existência de um zoneamento ecológico econômico para a APA, Januário (2008) aponta que este fora constituído com ênfase para aspectos prioritariamente socioeconômicos. Além da pouca ênfase aos aspectos bióticos e naturais, o zoneamento estabelece áreas com possibilidade de uso urbano (quase 4% da área) e uso agropecuário (quase 38% da área).

Uma boa solução para diminuir os danos ambientais e estabelecer uma política mais eficaz de preservação da Serra seria a criação – de forma participativa com a população e setores envolvidos – de planos de manejo tanto para APA quanto para o refúgio de vida silvestre, onde fossem estabelecidos critérios para recuperação das áreas degradadas e políticas de fiscalização no território das unidades de conservação.

Para conter a expansão urbana, deve-se pensar em compatibilização dos planos diretores municipais com os planos de manejo das unidades de conservação envolvidas e pensar na possibilidade de programas de pagamento por serviços ambientais (PSA) como forma de mitigar os conflitos entre as atividades agropecuárias e a necessidade de preservação ambiental.

REFERÊNCIAS

BEDÊ, L. C.; MACHADO, A. B. M.; PIPER, W.; SOUZA, M. M. Odonata of the Serra de São José – Brazil's first Wildlife Reserve aimed at the conservation of dragonflies. **Notulae Odonatologicae** Wolnzach, v. 8, n. 5, p. 117-155, 2015. Disponível em: https://www.ifs.ifsuldeminas.edu.br/images/publicacoes/artigos/Bede_et_al_2015_Odonata_Serra_de_S%C3%A3o_Jos%C3%A9.pdf. Acesso em 27 jul. 2018.

COSTA-CARDOSO, R.; FRANCO-JÚNIOR, R.; SILVA-TEXEIRA, R.; COSTA-CARDOSO, A. Considerações sobre cavernas em quartzito na 'Serra Nova' e a Lapa do Jair, localizados na APA da Serra de São José, município de Prados, MG. CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015, Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE, 2015. p. 315-319. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_315-319.pdf. Acesso em 27 jul. 2018.

CIRINO, J. F.; LIMA, J. E. Valoração contingente da Área de Proteção Ambiental (APA) São José – MG: um estudo de caso. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 46, n. 6, p-647-672, 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032008000300004. Acesso em 27 jul. 2018.

EASTMAN, J. R. **Idrisi Selva: manual version 17**. Worcester, MA: Clark University, 2012.

ESRI. **ARCGIS Desktop: release 10.8**. 2020. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/image-classification/interactive-supervised-classification-tool.htm>. Acesso em 30 ago. 2021.

FARIA, B. C.; COSTA, J. C; SILVA, R. L. S.; SILVA, V. V.; PEREIRA, G. Análise da expansão da área de mineração na área de proteção ambiental da Serra de São José – MG. Jornada Científica da Geografia UNIFAL – MG, 4, 2016, Alfenas. **Anais...** Alfenas: 2016, p. 93-98. Disponível em: http://www.unifal-mg.edu.br/4jornadageo/system/files/anexos/bruna93_98.pdf. Acesso em 27 jul. 2018.

FUNDAÇÃO ALEXANDER BRANDT - FABRANDT. **Zoneamento Ecológico-Econômico da Área de Proteção Ambiental (APA) São José, MG**. Belo Horizonte: Convênio FNMA/FABRANDT (008/98), 2000. 117 p.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS (IEF). **Base de dados georreferenciados**. Minas Gerais, Brasil, 2018. Disponível em: <http://www.meioambiente.mg.gov.br/ief>. Acesso em 27 jul. 2018.

JANUÁRIO, M. V. C. **Turismo em Área de Proteção Ambiental: o caso da serra de São José em Tiradentes – Minas Gerais**. 2008. 108f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa Regional de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Ilhéus, 2008. Disponível em: <http://www.biblioteca.uesc.br/biblioteca/bdtd/200560091D.pdf>. Acesso em 27 jul. 2018.

MARTELI, A. N.; LOLLO, J. A. Análise temporal do uso da terra na microbacia hidrográfica do córrego caçula, município de Ilha Solteira - SP, Brasil. Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, 12, 2015, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: 2015, p. 1-8. Disponível em: <http://www.meioambientepocos.com.br/anais/index.php>. Acesso em: 27 jul. 2018.

MINAS GERAIS. **Decreto 21.308 de 19 de maio de 1981**. Belo Horizonte: 1981. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=1100>. Acesso em 27 jul. 2018.

MINAS GERAIS. **Decreto 30.934 de 16 de fevereiro de 1990**. Belo Horizonte: 1990. Disponível em: <https://sogi8.sogi.com.br/Arquivo/Modulo113.MRID109/Registro26832/documento%201.pdf>. Acesso em 27 jul. 2018.

MINAS GERAIS. **Decreto 43.908 de 5 de novembro de 2004**. Belo Horizonte: 2004. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2057>. Acesso em 27 jul. 2018.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Earth Explorer**. United States, 2018. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em 27 jul. 2018.

Recebido: 20.06.2022

Aceito: 09.08.2022