

## CAPÍTULO 10

# METODOLOGIA PARA ANÁLISE TEMPORAL DAS MUDANÇAS NA COBERTURA VEGETAL EM UM UNIDADE DE CONSERVAÇÃO DE USO SUSTENTÁVEL

**Ítalo Sousa de Sena**

Departamento de Geografia, Masaryk University, pesquisador de pós-doutorado

**Nicole Andrade da Rocha**

Arquitetura e Urbanismo, Faculdade Metodista Granbery, professora

**RESUMO:** O acesso livre a catálogos de imagens de satélite possibilita a análise exploratória das dinâmicas da paisagem ao longo de uma série histórica. Métodos de processamento digital de imagens e índices espectrais favorecem a obtenção de informações relevantes quanto aos aspectos gerais da superfície terrestre. Quando esses são associados aos conceitos de ecologia da paisagem permitem realizar análises de séries históricas de mudanças na paisagem e apoiar as tomadas de decisões. Assim, este estudo tem por objetivo apresentar uma abordagem de análise da dinâmica da cobertura vegetal, partindo de um estudo de caso para a APA Sul RMBH, que consiste em uma unidade de conservação de uso sustentável. Na abordagem proposta verifica-se a transformação da cobertura vegetal arbórea ao longo de 35 anos, buscando identificar como o desenvolvimento da região afetou a dinâmica das áreas verdes. Para tal foram utilizados recursos de processamento na nuvem a partir do Google Earth Engine e análises a partir do índice espectral NDVI e MSPA (*Morphological Spatial Pattern Analysis*). Por fim, o estudo apresenta e discute os resultados a partir de um diagnóstico quantitativo partindo dos conceitos da ecologia da paisagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ecologia da paisagem, vegetação, Google Earth Engine, MSPA

### INTRODUÇÃO

A criação de unidades de conservação no Brasil reguladas pela Lei no. 9.985, de 2000, estabeleceu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC). Este sistema classifica as unidades de conservação a partir de duas categorias de áreas protegidas: Proteção Integral (PI) que focam na preservação e uso mais restritivo; e as de Uso Sustentável (US) que tem por finalidade garantir o uso consciente dos sistemas naturais disponíveis no território.

Para ambos os casos, o monitoramento ambiental é parte fundamental da gestão dessas áreas protegidas. A disponibilidade de produtos de sensores remotos favorece a análise quantitativa e morfológica da paisagem, sendo objeto de diversos estudos científicos da área (MASCARENHAS *et al.*, 2009) (RAMALHO, 2002; MOURA, 2005; ECKHARDT *et al.*, 2007; FERREIRA *et al.*, 2008; MASCARENHAS *et al.*, 2009; ROCHA, 2019). Somado a isso, os estudos com séries históricas de imagens orbitais garantem análises das mudanças na paisagem, auxiliando diagnósticos ambientais espacializados e as tomadas de decisões a partir destes (JUNIOR *et al.*, 2016).

O acesso livre a catálogos de imagens de

satélite possibilita a análise exploratória das dinâmicas da paisagem por experimentação por índices espectrais e espaciais. Quando disponíveis na nuvem, permitem o acesso não só às imagens armazenadas em banco de dados, mas também às coleções atualizadas de vários satélites em operação, bem como a realização de processamento das imagens de interesse. Uma das plataformas disponíveis gratuitamente neste contexto é o Google Earth Engine (GEE). O sistema consiste em uma plataforma web em linguagem JavaScript que permite ao usuário executar análises geoespaciais usando a infraestrutura de processamento na nuvem do Google. A plataforma dispõe de várias coleções de imagens orbitais de vários satélites e sensores, atualizadas e ampliadas diariamente, além de uma série de algoritmos para processamentos específicos e visualização de dados (GORELICK *et al.*, 2017).

Dentre as coleções disponíveis no GEE estão as imagens da série de satélites Landsat. Este é um programa em conjunto da USGS e da NASA de observação da Terra com imagens que datam de 1972 até a atualidade, somando mais de 40 anos de registros, com um total de 9 satélites, 3 ainda em operação. Os satélites da missão Landsat fornecem informações em uma escala de 30 metros de resolução nas bandas do visível e infravermelho próximo, com atualizações a cada duas semanas, incluindo dados multiespectrais e térmicos que favorecem a análise espacial das dinâmicas na paisagem (USGS, 2021).

Uma forma de análise espacial das dinâmicas na paisagem, é através dos estudos do campo da ecologia da paisagem associada às métricas de paisagem. Estas visam identificar e caracterizar os fragmentos mais adequados para a conservação ambiental e compor os arranjos espaciais necessários para alcançar a biodiversidade, o equilíbrio de espécies e o de fluxo gênico (FORMAN e GORDAN, 1986).

Um artigo que corrobora nesse sentido é de Crouzilles *et al.* (2013), que em seus estudos encontraram uma relação positiva entre a presença de áreas núcleos e corredores ecológicos na manutenção e diversidade de espécies nas PI's e US's, destacando a importância de se identificar quais áreas devem ser protegidas e quais estão passando por transformações de forma a auxiliar os gestores nas tomadas de decisões. O estudo apontou ainda que, as áreas núcleos mais protegidos estão presentes nas PIs, enquanto os corredores ecológicos responsáveis pela ligação entre as áreas estão nas USs e RPPNs (Reserva Particular do Patrimônio Natural).

Há ainda uma vasta literatura científica sobre o tema de Ecologia da paisagem em conjunto com as métricas de paisagem aplicadas à cobertura vegetal e sensoriamento remoto (FORMAN, BAUDRY, 1984; FORMAN, GODRON, 1986; BORGES *et al.*, 2010; MOURA *et al.*, 2017; FONSECA *et al.*, 2015; ROCHA, *et al.*, 2016). Contudo, a presente proposta de análise se diferencia ao aplicar esses conceitos utilizando a obtenção e pré-processamento de imagens da nuvem em conjunto com recursos de GIS, a fim de

classificar, localizar e quantificar as mudanças na paisagem. Portanto, este estudo tem como objetivo uma análise temporal da qualidade e distribuição da cobertura vegetal, realizando um diagnóstico espaço-temporal a fim de subsidiar a gestão da unidade de conservação de uso sustentável.

A fim de dar suporte teórico à metodologia proposta, são apresentados os conceitos básicos da ecologia da paisagem, a aplicação das métricas da paisagem e a MSPA (*Morphological Spatial Pattern Analysis*) como ferramentas de suporte a análise do estudo de caso e na identificação dos impactos.

Para estudo de caso, iremos analisar a dinâmica da cobertura vegetal da APA Sul-RMBH e sua transformação aos longos de 35 anos, buscando identificar se os incentivos ao desenvolvimento da região favoreceram a regeneração e/ou estabilização de áreas verdes e os possíveis impactos na estrutura e distribuição dos remanescentes florestais. O estudo também discute as potencialidades de exploração dos dados resultantes da análise e desdobramentos para o planejamento e gestão da paisagem.

## **ECOLOGIA DA PAISAGEM**

A Ecologia da Paisagem é uma ciência multidisciplinar que surgiu no século XX, com o primeiro trabalho sobre o tema escrito em inglês por Naveh e Lieberman (1990), utilizando o termo cunhado por Carl Troll em 1939. O termo se desenvolve a partir da busca em interligar os estudos da geografia e da ecologia com as questões relacionadas ao uso da terra, a partir do uso de fotografias aéreas e interpretação das paisagens, relacionando a sociedade humana e seu espaço de vida (NUCCI, 2007).

Segundo Nucci (2007), a Ecologia da Paisagem é vista na Europa como uma base científica para o planejamento, manejo, conservação, desenvolvimento e melhoria da paisagem e que apesar de suas pretensões holísticas sobre a paisagem, ainda avança nos estudos físico-espaciais e suas relações com as ciências sociais.

Os primeiros estudos relacionados a Ecologia da Paisagem, visavam a identificação da estrutura de mosaicos ou manchas da paisagem natural, modificada ou organizada, que podiam variar de tamanho, composição e escalas temporais de mudança. Estas estruturas servem como base para a representação espacial dos elementos que constituem a dinâmica da paisagem, tal como a formação de relevos, tipologias de vegetação e uso do solo, formando um agrupamento característico.

As ferramentas de representação espacial serviram de base para inúmeras abordagens de análise da paisagem, pois através do mapeamento desses padrões foi possível distinguir os elementos componentes da paisagem e estudar processos que resultam das interações humanas, ecológicas e físico-espaciais (FORMAN e GORDAN, 1986; MCGARIGAL, MARKS, 1995).

Neste contexto, a estrutura da paisagem está dividida em:

- Matriz, que consiste no elemento que tem o domínio da paisagem, de forma a ocupar uma área considerável, extensiva e conectada. O que o diferencia das manchas, é que além de ter uma área mais externa e com limites côncavos envolventes a outros elementos, tendo o controle preponderante de fluxos de energia. As medidas básicas de uma matriz são a porosidade e a conectividade;
- Manchas ou retalhos, que são fragmentos não lineares que diferem do seu entorno e variam em tamanho, forma, tipo, heterogeneidade e características de borda e podem conter ou não vida, isto é, sem a presença de fauna e flora como por exemplo composto por solo, rocha entre outros. Deve ser analisado nas manchas o tamanho, borda, margem, forma, número, densidade e configuração;
- Corredores, que são elementos de mesma classe, lineares de aparente homogeneidade, que enquanto corredores estabelecem um fator de conectividade, função da configuração de redes, que permitem o intercâmbio e movimentação entre animais e plantas, e enquanto barreiras inibem tais trocas. Deve ser observado nesse elemento a largura, conectividade, complexidade e estreitamento.

A presença de pelo menos dois desses três elementos estruturantes constitui o conceito de mosaico da paisagem (METZGER, 2001; FORMAN e GORDAN, 1986; FONSECA et. al., 2015; VASCONCELLOS, 2015). Quando relacionamos os estudos da Ecologia da Paisagem às métricas de paisagem, fomentamos os estudos que quantificam as dimensões e a distribuição espacial das manchas, avaliando tanto o fragmento individualmente, como sua estrutura geral e o papel de cada fragmento no conjunto, no que tange ao tamanho, densidade, isolamento, distância, conectividade e complexidade da forma, permitindo realizar análises sobre a área estudada (ROCHA et al., 2016; ROCHA, 2019).

Dentre as várias aplicações dos conceitos da ecologia da paisagem na análise espacial das matrizes, manchas e corredores, destacamos o método *Morphological Spatial Pattern Analysis* (MSPA). Esta abordagem foi proposta por Vogt et al. (2007) como um método para mapeamento de corredores ecológicos na Europa. A pesquisa faz parte de um projeto financiado pela Comissão Europeia para os estudos de florestas e áreas verdes, que consistiu no desenvolvimento e aplicação de técnicas de análise espacial para realização de um diagnóstico geral da cobertura florestal da Europa. Um dos produtos deste projeto foi o *Guidos ToolBox* e plug-ins para ArcGIS e QGIS para a análise morfológica da paisagem. Uma das análises possíveis a partir desta aplicação é o MSPA.

O MSPA conduz uma segmentação em uma imagem binária para detectar e localizar classes de características morfométricas mutuamente exclusivas que descrevem a forma,

conectividade e arranjo espacial de objetos de imagem em um mapa categórico (VOGT; RIITTERS, 2017). A classificação é baseada em conceitos geométricos que analisam uma sequência personalizada de operadores morfológicos e de conectividade dos componentes de uma imagem e aplicáveis em várias escalas diferentes.

Na Figura 1 são apresentados os elementos estruturais classificados pelo MSPA: o núcleo (interior excluindo o perímetro); a ilha (caracterizado por ser um elemento desarticulado ou pequeno demais para ser considerado um núcleo); o retorno (elemento conectado a mesma área do núcleo); a ponte (elemento conectado a diferentes áreas do núcleo); a perfuração (presença de perímetro interno); a borda (perímetro externo); e a ramificação (conectado a um final de borda, perfuração, ilha ou retorno) (VOGT; RIITTERS, 2017).

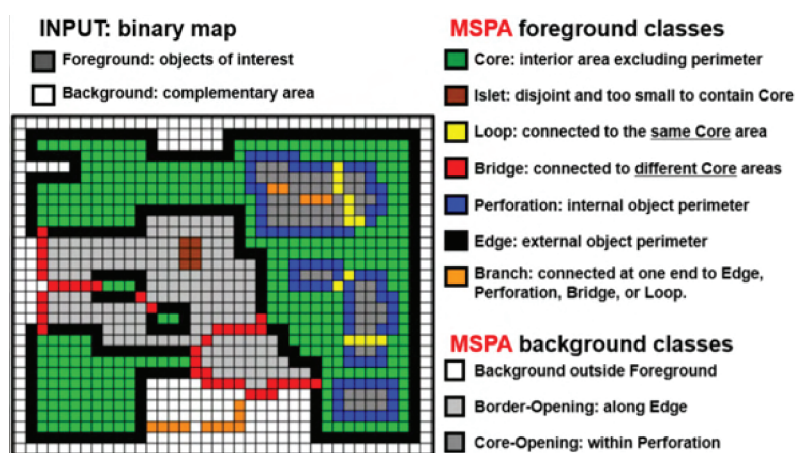


Figura 01: Classes de análise do MSPA.

Fonte: MSPA Guide.

O MSPA pode ser aplicado para a análise de qualquer estrutura da paisagem, seja ela relacionada aos componentes naturais ou componentes antrópicos. No entanto, a vegetação tem sido largamente utilizada como ponto de partida para a análise da fragmentação e conectividade da paisagem. Aplicações do MSPA são mais comuns para análises de corredores ecológicos e gestão de áreas naturais (LIN *et al.*, 2021; WICKHAM *et al.*, 2010).

## ESTUDO DE CASO

A Área de Proteção Ambiental sul da região Metropolitana de Belo Horizonte (APA Sul RMBH) foi criada em 2001, pela lei estadual nº 13.960 pelo Instituto Estadual de Florestas

(IEF) através do Decreto Estadual 35.624, de 8 de junho de 1994. Está situada entre a serra do espinhaço e o quadrilátero ferrífero, possui uma extensão de aproximadamente 1625,32 km<sup>2</sup>, enquadrada como unidade de conservação de uso sustentável (Figura 2).

A criação da APA Sul, teve como objetivo proteger e conservar os sistemas naturais essenciais à biodiversidade, especialmente os recursos hídricos necessários ao abastecimento da população da Região Metropolitana de Belo Horizonte e áreas adjacentes, com vista à melhoria da qualidade de vida da população local, à proteção dos ecossistemas e ao desenvolvimento sustentado (MINAS GERAIS, 2001).

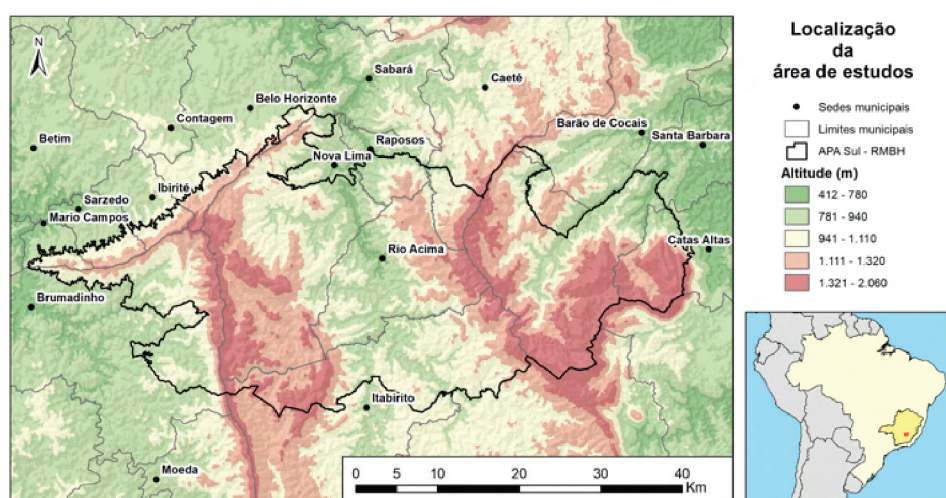


Figura 2: Localização da APA Sul RMBH.

Fonte: os autores.

Os impactos da atividade humana na dinâmica da paisagem constituinte da APA Sul RMBH remontam ao século XVIII, momento em que o Estado de Minas Gerais foi local da corrida do ouro no Brasil, o que contribuiu para a construção de uma economia pautada na exploração mineral. O período do ciclo do ouro foi responsável por grandes alterações nos ecossistemas da região, iniciado pelo estabelecimento de uma rede de vilas e cidades que atualmente tem a extração do minério de ferro como principal motor da economia.

Por se tratar de uma região com alto potencial de exploração mineral, a mesma possui duros conflitos territoriais e impactos ambientais de alta relevância, tais como os rompimentos de barragens de rejeitos de alçamento a montante em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que comprometeram importantes bacias hidrográficas e perdas de vidas humanas, trazendo para o debate a geoética, contribuindo para novas perspectivas sobre a responsabilidade no uso e função social dos recursos naturais (RUCHKYS,



ÚRSULA DE AZEVEDO *et al.*, 2020) using as examples the ruptures of the Fundão and the Córrego do Feijão dams, both located in the Quadrilátero Ferrífero (QF).

Ao mesmo tempo em que há interesse na exploração mineral, a região apresenta aspectos relevantes quanto aos recursos ambientais e culturais. Na APA SUL RMBH estão presentes duas grandes bacias hidrográficas, a do Rio São Francisco e a do Rio Doce, com grandes extensões de cobertura vegetal nativa contínua do Estado, caracterizada por vegetação de fundos de vale, campos de altitude e grandes formações rochosas. Detém paisagem notável, muito propícia para o desenvolvimento de turismo ambiental, apesar de atuar de forma incipiente para expansão do mercado na região, sendo motivo do baixo interesse dos usuários na exploração deste potencial, que se limitam a valorizar a paisagem existente já explorada (RUCHKYS *et al.*, 2018).

## METODOLOGIA

A fim de avaliar a dinâmica espaço-temporal da cobertura vegetal na APA Sul RMBH é proposta uma metodologia de análise exploratória de processamento digital de imagens de satélite associada a conceitos da ecologia da paisagem. O processo metodológico é dividido em 4 fases principais, iniciando pela coleta e pré-processamento na nuvem de imagens de satélite, seguido do pós-processamento e análise dos resultados, finalizando com uma discussão sobre as particularidades do estudo de caso e considerações sobre a metodologia proposta (Figura 3):

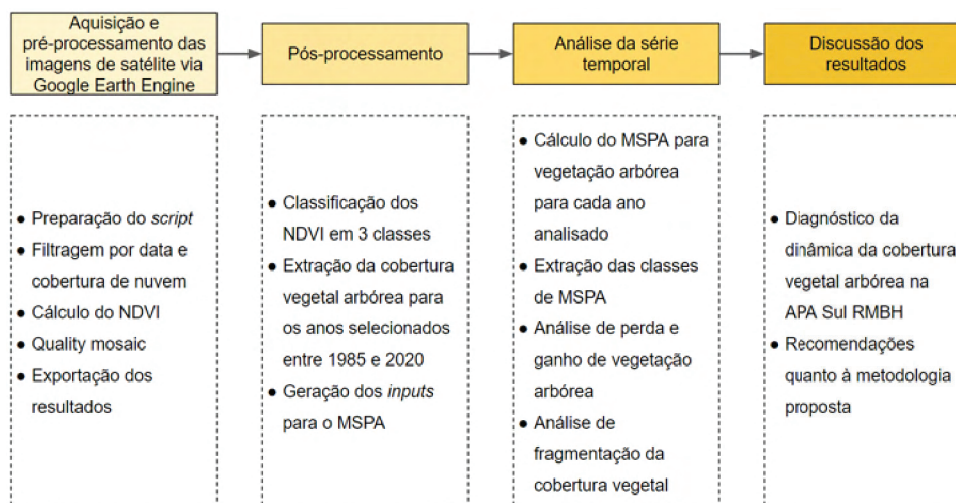


Figura 03: Etapas da proposta de análise.

Fonte: os autores

A cobertura vegetal da APA Sul RMBH foi analisada a partir do índice espectral *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Este índice é largamente aplicado em estudos de vegetação pois é baseado na assinatura espectral do alvo em relação ao processo de fotossíntese. Este processo absorve a radiação solar nos comprimentos de onda do vermelho e tem alta reflectância na banda do infravermelho próximo. A relação entre absorção e reflectância varia de acordo com as condições da cobertura vegetal. O índice apresenta uma escala quantitativa de -1 (sem vegetação) a +1 (vegetação saudável/robusta) (MYNENI, RANGA B. *et al.*, 1995)(ROUSE *et al.*, 1973; MYNENI *et al.*, 1995; RIBEIRO *et al.*, 2021). O cálculo do NDVI foi realizado a partir da seguinte fórmula:

$$NDVI = (pivp - pv) / (pivp + pv)$$

Onde pivp corresponde à banda do infravermelho próximo e pv corresponde à banda do vermelho.

Para a aquisição dos dados e cálculo do NDVI foi implementado um script<sup>1</sup> na plataforma Google Earth Engine que seleciona imagens disponíveis em coleções, filtra os resultados a partir da localização, data e cobertura de nuvens. Para o presente estudo foram utilizadas imagens de três sensores (TM, ETM+ e OLI) da série de satélites Landsat. No entanto, para este estudo, usamos como recorte temporal imagens de 1985 a 2020, considerando intervalos de 5 anos. Esse recorte temporal foi definido a partir da disponibilidade de imagens compatíveis para a análise, abrangendo 35 anos de registros.

Após a seleção das imagens das coleções dos satélites Landsat 5, 7 e 8, o script executa a função *Quality Mosaic*, que cria uma nova imagem a partir de uma composição de pixels com o maior valor de NDVI entre todas as imagens de um período de tempo específico, no caso deste estudo, por um ano inteiro (GORELICK *et al.*, 2017; JENKINS *et al.*, 2002; MONTANDON; SMALL, 2008; MYNENI, R. B. *et al.*, 1998; OFOSU ANIM *et al.*, 2013). Desta maneira é possível obter a informação da qualidade da vegetação analisada ao longo de um ano, reduzindo as variações nos valores de NDVI em função das variações sazonais. A partir desse script foi calculado a média dos valores de NDVI por ano para a APA Sul RMBH. Após o pré-processamento das imagens da série histórica, foram exportados os resultados referentes aos anos de 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2015 e 2020.

Os dados exportados do Google Earth Engine foram classificados em 3 classes de acordo com a tipologia de cobertura vegetal. A primeira classe (valores de NDVI entre -1 a 0) representa áreas sem ou com pouca cobertura vegetal, a segunda classe (valores de NDVI entre 0 e 0.6) representa áreas de vegetação campestre ou pastagens, e a terceira classe (valores de NDVI entre 0.6 a 1) representa cobertura vegetal arbórea. Essa classificação serviu de base para a quantificação da mudança na cobertura do solo para a APA Sul RMBH, bem como para obter as manchas de vegetação a serem analisadas a partir do MSPA. A definição dos intervalos das classes de NDVI foi realizada a partir do resultado

<sup>1</sup> <https://code.earthengine.google.com/4a6eb0d94a4aec0018bb7a134d5859e?authuser=0>



referente ao ano de 2020. A imagem foi classificada considerando feições espaciais da área de estudo conhecidas pelos pesquisadores, seguida da validação com base em uma composição colorida falsa cor do sensor OLI do satélite Landsat 8.

O MSPA foi realizado a partir de plug-in disponível para o software ArcGIS Desktop, que disponibiliza opções de variáveis a serem consideradas na análise. A primeira variável é a conectividade das manchas, que estima a disposição dos pixels adjacentes ao pixel analisado. O número de pixels avaliados são 4 ou 8. A segunda variável é a largura da borda das manchas, que varia de 1 a 4 em número de pixels na imagem e corresponde ao raio de um disco euclidiano. Os pixels do primeiro plano que estão dentro do raio desse disco são pixels limítrofes (borda e perfuração) e aqueles com uma distância mais do centro do disco euclidiano correspondem às áreas núcleo. A terceira variável é a transição, que são os pixels de uma borda ou de uma perfuração onde a área núcleo se cruza com um retorno (loop) ou uma ponte (bridge). A quarta e última variável corresponde à prevalência de uma classe sobre a outra, chamada no plug-in de Intext, permitindo separar recursos internos dos externos, onde os recursos internos são definidos como aqueles delimitados por uma perfuração. Para o presente estudo, devido à escala inicial dos dados produzidos, considerou-se a conectividade de todos os 8 pixels adjacentes e a delimitação da borda em 2 pixels, que correspondem a 60 m. Para as demais variáveis optou-se por não as considerarem no estudo, dado que a análise não pretende investigar relações específicas entre as manchas de vegetação.

A partir dos resultados do MSPA foi possível extrair alguns indicadores a partir da análise de densidade de ilhas (islets), média do perímetro das áreas core (core areas), quantificação de perfurações (perforations), diferença de quantidade de pontes (bridges) e galhos (branches). Estes resultados, por fim, foram interpretados a fim de identificar as principais mudanças na cobertura vegetal da APA Sul RMBH.

## RESULTADOS

A partir do processamento na nuvem foi possível gerar informações para diversas análises relativas à estrutura e distribuição da cobertura vegetal arbórea da APA Sul RMBH. No geral, os valores médios de NDVI por ano na unidade de conversação aumentaram ao longo das últimas três décadas (Figura 4). Nos anos de 1992 e 2003 houveram quedas bruscas na média de NDVI, o que pode estar relacionado a períodos de estiagem nos anos anteriores.

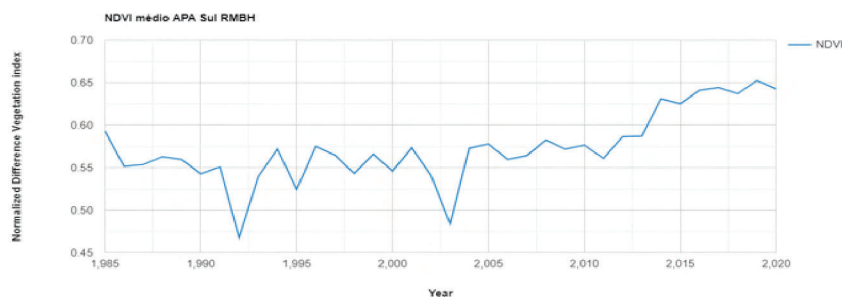


Figura 4: Série histórica anual de valores médios de NDVI para a APA Sul-RMBH.

Fonte: Google Earth Engine, elaborado pelos autores.

É possível perceber nos mapas de 1985 a 2020 (figura 5), as transformações da paisagem ao longo dos 35 anos e o impacto positivo na preservação de áreas verdes a partir do decreto de lei de 2001 que cria a APA Sul RMBH.

No mapa de 1985, é possível observar a predominância das áreas com vegetação arbórea nas porções centrais e nordeste e com incidência menor de áreas que apresentavam pouca ou nenhuma vegetação, localizadas principalmente nas porções leste, noroeste e sudoeste do mapa, próximas das áreas onde já tinham núcleos urbanos consolidados. Mas quando observamos os mapas de 1990 a 2000, percebemos que a vegetação arbórea passou a aparecer de forma mais esparsa e/ou com menor áreas foliar, indicando alguma interferência de solo, nas porções leste, noroeste e sudoeste, coincidindo com o principal eixo de crescimento urbano na região e também com o aumento da concentração de mineração nos topos de serra.

Esse cenário se transforma ao observarmos os mapas de 2005 a 2020, no qual podemos destacar dois fenômenos: o aumento das áreas de vegetação arbórea, indicando um reflexo da lei de proteção da APA sul RMBH de 2001, em conjunto com ações de recuperação da vegetação nos fundos de vale; e o crescimento das áreas sem vegetação (na cor vermelha no mapa).

Na análise do quantitativo da variação das áreas de cada classe de NDVI ao longo da série histórica é possível perceber um aumento pouco expressivo da área total de vegetação arbórea em 2020 em relação a 1985 (Figura 6). Para os anos de 1990, 1995 e 2000 os valores mostram um aumento na área sem vegetação e a redução das áreas das classes de vegetação arbórea e vegetação rasteira e arbustiva. Esse aspecto pode estar relacionado às variações na quantidade e distribuição das chuvas, alteração a reflectância geral dos alvos. Períodos de estiagem afetam o vigor da vegetação, o que interfere na resposta espectral das plantas.

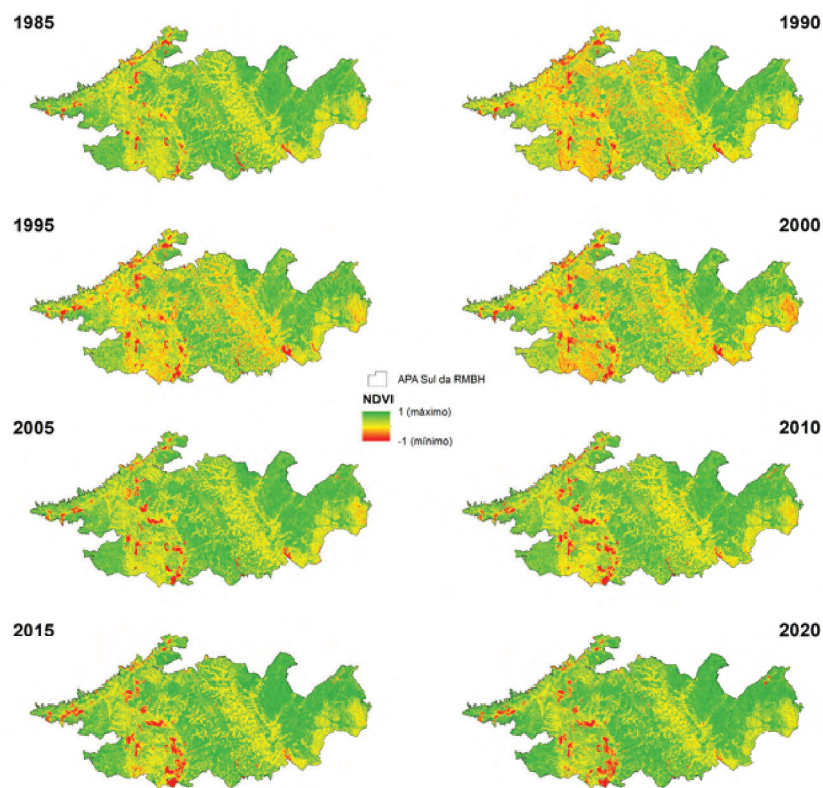


Figura 5: NDVI obtido a partir de *script* implementado no Google Earth Engine.  
Fonte: os autores.

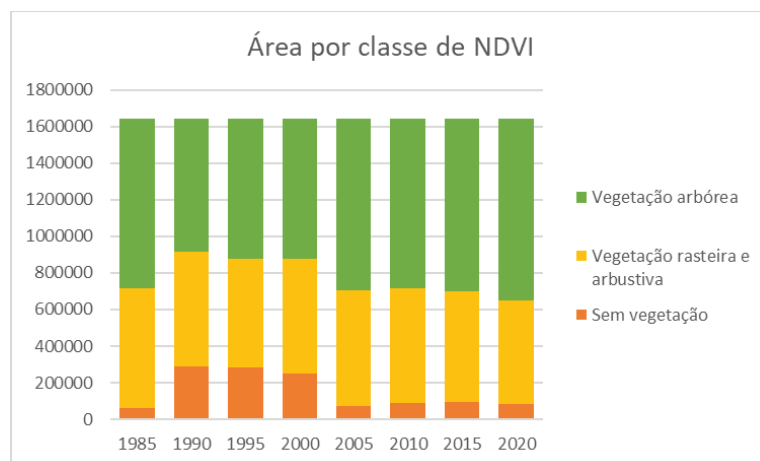


Figura 6: Variação do quantitativo de área por classe de NDVI.  
Fonte: os autores.

A partir do MSPA foi possível observar a distribuição espacial da cobertura vegetal arbórea e suas estruturas relacionadas. A análise da série histórica mostra um aumento das áreas núcleo e uma estabilidade nas demais classes ao longo dos 35 anos de dados. No entanto, a distribuição espacial das classes mostra ganho de vegetação arbórea em algumas áreas, porém fragmentação de áreas núcleos em outras. De maneira geral, é visualmente perceptível uma diferença na estrutura da cobertura vegetal arbórea entre os anos de 1985 e 2020 (Figura 7).

Porém a dinâmica de mudanças na cobertura vegetal acontece de forma particular a depender de outros componentes da paisagem. A fim de ilustrar essas particularidades, foram selecionados três recortes específicos que variam no contexto de uso do solo. No recorte A é possível perceber um acréscimo de corredores conectando uma série de áreas núcleos menores. O padrão de uso e ocupação desta área se desenvolveu a partir do estabelecimento dos distritos do município de Brumadinho. A região hoje é foco de empreendimentos imobiliários em um parcelamento do solo com terrenos com áreas superiores a 1000 m<sup>2</sup>. Este modelo de ocupação favoreceu o estabelecimento dos corredores, porém a abertura de novos lotes gerou novas perfurações e aumento do perímetro das áreas núcleo originais.

O recorte B compreende a região do sinclinal Moeda, onde concentram atividades de extração mineral. Na análise comparativa entre 1985 e 2020 percebe-se uma drástica redução e fragmentação das áreas núcleo e corredores (pontes, galhos e retornos). No entanto, a situação é diferente para o recorte C, que compreende uma região de mosaicos de unidades de conservação de proteção integral, como a RPPN Santuário do Caraça. Neste caso a área é constituída de uma grande área núcleo com uma série de perfurações. Na análise temporal nota-se a diminuição em tamanho e quantidade das perfurações.

A partir da classificação da cobertura vegetal arbórea a partir do MSPA foi possível quantificar a dinâmica de alteração na estrutura de manchas de vegetação ao longo dos 35 anos. É perceptível a diminuição do tamanho das áreas núcleo entre os anos de 1990 e 2005, seguindo um aumento constante das áreas núcleo sem alterações significativas nas demais classes (Figura 8).

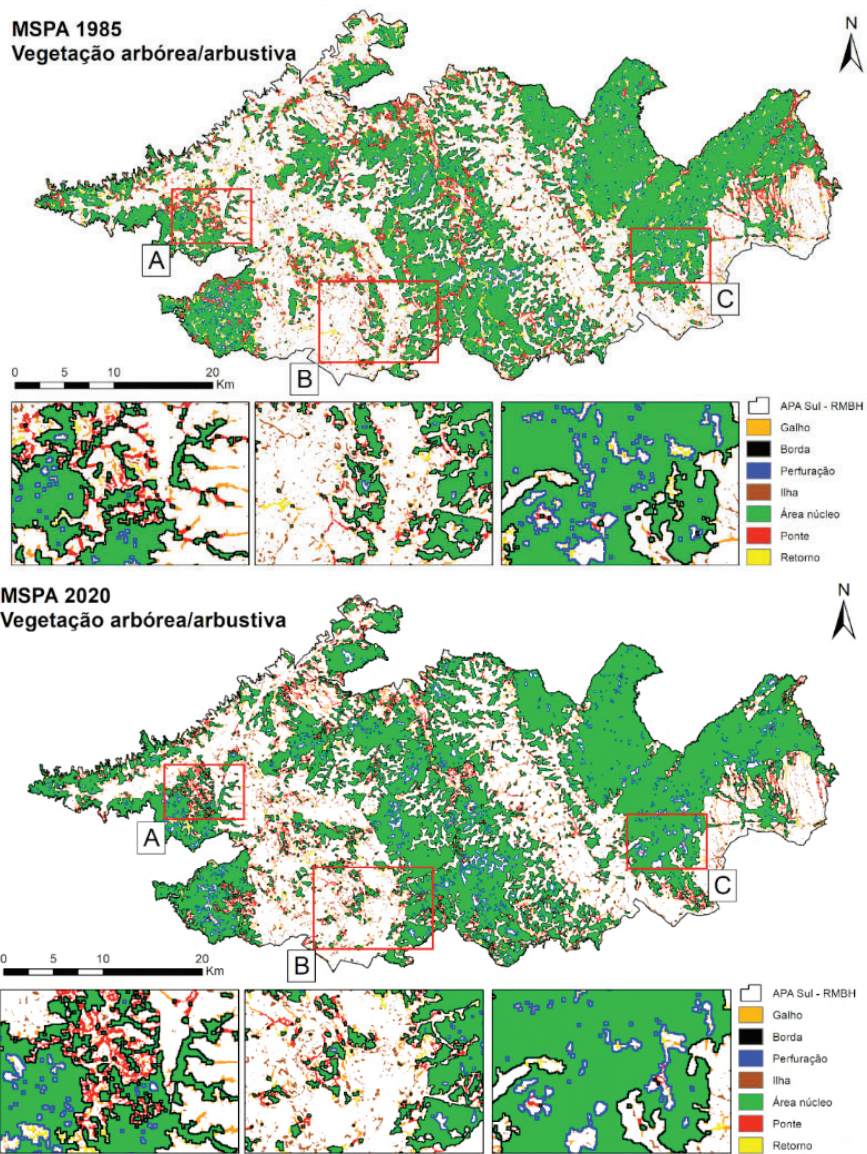


Figura 7: MSPA do ano inicial (1985) e ano final (2020) da série histórica analisada.

Fonte: os autores.

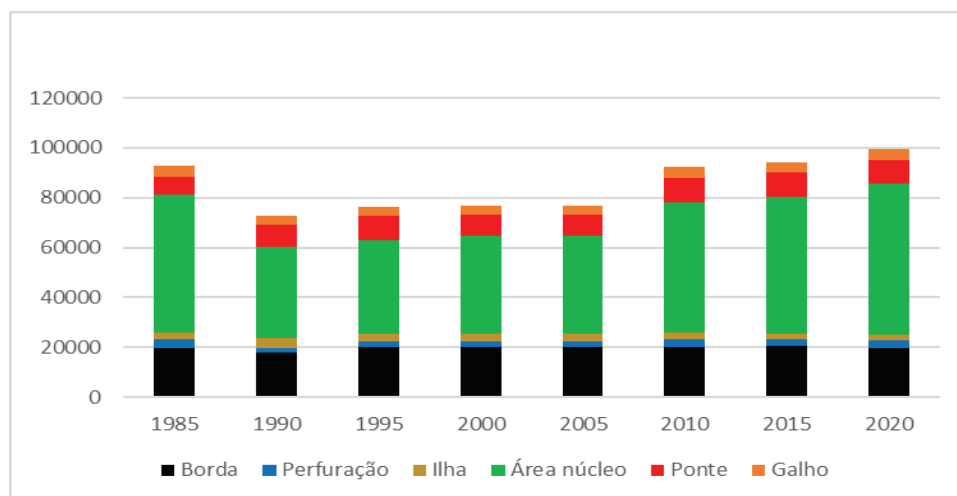


Figura 8: Quantitativo de área por classe de MSPA em hectares.

Fonte: os autores.

Na Tabela 1 estão apresentados alguns índices quantitativos de fragmentação da cobertura vegetal para cada ano analisado na série histórica. Ao longo das duas décadas iniciais da série histórica (1985 até 2005) há uma diminuição do perímetro das áreas núcleo, que pode estar relacionado tanto à perda ou fragmentação das mesmas quanto ao aumento expressivo de áreas núcleo novas. No entanto, em 2010 houve um aumento significativo no perímetro total das áreas núcleos, com pouca diminuição nos anos seguintes. Em termos de quantidade de perfurações, apesar de oscilações relevantes, como entre 1985 e 1990, os quantitativos entre o ano inicial e final da análise não mostraram mudanças expressivas. Com relação ao número de ilhas houve diminuição constante a partir de 1990, o que pode representar a supressão desses fragmentos de cobertura vegetal, assim como pode indicar a transformação destes em classes de conectividade (ponte, galho, retorno).

A variação espacial dos fragmentos de cobertura vegetal arbórea da classe ilha está representada na Figura 9, onde estão representadas as densidades de pixels referentes a esta classe. É possível associar que as ilhas estão concentradas principalmente nos alinhamentos das serras quartzíticas que constituem a paisagem do Quadrilátero Ferrífero. No entanto, é importante notar que existe uma variação na distribuição espacial dos pontos de concentração. Há uma diminuição da densidade de ilhas no alinhamento do sinclinal moeda à oeste, enquanto à leste a distribuição das ilhas passa a se concentrar nas regiões mais altas do conjunto de elevação da Serra do Caraça.



Ano	Perímetro das áreas núcleo (km)	Número de perfurações (pixel)	Número de ilhas (pixel)
1985	4317,48	37391	30875
1990	3416,76	21275	41472
1995	3961,26	25818	34091
2000	3782,16	25498	34293
2005	3782,16	37486	29259
2010	4477,5	35614	29389
2015	4303,86	29795	27435
2020	4295,22	35112	26626

Tabela 1: Quantificação da fragmentação da cobertura vegetal arbórea da APA Sul RMBH.

Fonte: os autores.



Figura 9: Espacialização da densidade de ilhas de vegetação arbórea para os anos de 1985 e 2020.

Fonte: os autores.

## DISCUSSÕES

A partir dos resultados, podemos apontar que a lei de criação da APA RMBH teve um impacto positivo na manutenção e preservação da paisagem da unidade de conservação de uso sustentável. Além disso, a metodologia proposta se mostra útil na elaboração de diagnóstico e na construção da série histórica do estudo de caso.

Destacamos como positivo a utilização de dados públicos com resolução de 30 metros como os fornecidos pela Landsat, no auxílio das tomadas de decisão e gestão das paisagens de uso sustentável. O uso do GEE na análise de séries históricas ajuda a traçar um panorama de transformações do lugar e podem servir de parâmetros para direcionar políticas territoriais de recuperação de áreas degradadas. A possibilidade de realização de processamento na nuvem favorece a exploração dos dados adquiridos sem o custo do

processamento local, o que dá opções de extração de informações para o entendimento da dinâmica da paisagem, tal como análise de médias gerais ou cálculos de área. Estas informações podem ser exportadas através de gráficos, como apresentado na Figura 4, ou em forma de tabelas. A disponibilidade de coleções de vários satélites e sensores contempla uma grande área da superfície do planeta, além da possibilidade de se trabalhar com diferentes bandas e índices espectrais.

No entanto, cabe salientar que a escolha dos produtos remotos a serem utilizados na análise acarretam em algumas limitações provenientes do próprio dado disponível. A disponibilidade de imagens sem cobertura de nuvens, de modo a possibilitar a identificação dos alvos na superfície, deve ser considerada a depender da região do planeta a ser analisada. Em regiões tropicais, com o ciclo de chuvas, e em regiões temperadas e polares, com ciclo de inverno com cobertura de neve, a oferta de imagens passíveis de utilização diminui tendo em conta a época do ano. Neste sentido, a aplicação do algoritmo *Quality Mosaic* permitiu a obtenção da informação síntese para cada ano analisado, não havendo a necessidade de trabalhar com imagens de datas específicas para cada ano.

Apesar das coleções utilizadas neste estudo serem calibradas a partir da reflectância de topo da atmosfera, o uso de imagens de sensores diferentes pode acarretar em diferenças radiométricas. É possível, no entanto, realizar o pré-processamento para correção radiométrica das imagens utilizando o Google Earth Engine, já que este disponibiliza inúmeras funções para execução de rotinas de correção. Necessidade de correção radiométrica das imagens para equalização dos dados ao longo da série histórica.

A escala espacial permitida pelos dados das missões Landsat garante análises contextualizadas a nível regional. Para o presente estudo de caso, por se tratar de uma unidade de conversação de grande proporção, a resolução de 30 m proporcionou uma análise satisfatória da cobertura vegetal arbórea, sendo capaz de representar feições como ilhas e demais classes de fragmentação. Isso permitiu interpretar de forma conjunta como a conformação das estruturas componentes da paisagem estudada foram alteradas ao longo das décadas.

Os resultados obtidos mostram que, apesar de não haver mudanças drásticas nos quantitativos das classes de fragmentação, a APA Sul RMBH teve um aumento de 5564,6 hectares de áreas núcleo entre 1985 e 2020. Neste sentido, é possível considerar que a criação da unidade foi capaz de mobilizar e efetivar programas e políticas locais para a conservação da cobertura vegetal. No entanto, é importante ressaltar que o presente estudo optou por explorar a dinâmica temporal da cobertura vegetal arbórea, o que restringe o diagnóstico da ecologia da paisagem da APA Sul RMBH. Os resultados mostram que há um acréscimo significativo de áreas sem vegetação nos topos de serra, como é apresentado na Figura 5. Esta concentração está diretamente relacionada às atividades de extração mineral. A rigidez locacional do minério de ferro faz com que a indústria estabeleça suas

atividades no local onde ocorrem as rochas das quais se extraem o minério. Isso implica em impactos nas tipologias de vegetação de campo, que ocorrem principalmente acima das altitudes de 1200 m. Os campos rupestres que constituem os topos quartzíticos presentes na área de estudo são formados por espécies endêmicas que estão sujeitas aos impactos gerados pelo aumento das áreas de mineração e suas infraestruturas relacionadas (barragens, pilhas de estéril, etc.).

O aumento da cobertura vegetal arbórea também pode ser explorado de forma mais detalhada a considerar a qualidade da vegetação. A associação de dados de uso e cobertura podem auxiliar na identificação das áreas de vegetação nativa, bem como as áreas de silvicultura e agricultura perene.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Justifica-se o uso de geoprocessamento na modelagem de processos ambientais, uma vez que são espaços que estão em constantes modificações e o uso dessa ferramenta pode auxiliar nas análises de longo prazo e entender vocações e tendências sofridas pelas intervenções antrópicas e quando somados a plataforma de web é possível realizar uma análise histórica do local estudo e entender as dinâmicas de transformação que ocorreram e tomar decisões pautadas na realidade local.

Neste contexto, a utilização de dados de sensores remotos, aliado às aplicações de processamento digital de imagem, sejam eles desktop ou web, favorecem os estudos da ecologia da paisagem. A acessibilidade à séries históricas de imagens de satélite permite a investigação contextualizada da dinâmica da paisagem, uma vez que são espaços que estão em constantes modificações, auxiliando nas análises de longo prazo e na identificação das vocações e tendências sofridas pelas intervenções antrópicas.

O presente estudo demonstrou que tais técnicas são de fácil acesso e com possibilidades para a quantificação de vários aspectos da estrutura da paisagem. A abordagem de análise proposta neste trabalho foi capaz de evidenciar as alterações na cobertura vegetal arbórea na APA Sul RMBH. O estudo constata também que a unidade de conservação está em processo de recuperação de áreas verdes, porém é preocupante as alterações nas porções não contempladas pelo estudo, o que abre espaço para investigações complementares da qualidade e distribuição da cobertura vegetal como um todo.

## REFERÊNCIAS

BORGES, J., CARVALHO, G., MOURA, A.C.M. Estudo da conformação da paisagem de Sabará-MG para compreensão das métricas do Fragstats em padrões de uso do solo. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 24. 2010, Aracaju. Anais... XXIV Congresso Brasileiro de Cartografia. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Cartografia, 2010. p. 1473 -1481.

CROUZEILLES, Renato; LORINI, Maria Lucia; GRELLE, Carlos Eduardo Viveiros. The importance of using sustainable use protected areas for functional connectivity. *Biological Conservation*, v. 159, p. 450–457, mar. 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006320712004430>>.

ECKHARDT, R. R., REMPEL, C., SALDANHA, D. L., GUERRA, T., PORTO, M. L., TALLINI, U. U. R. A., & POSTAL, B. U. C. (2007). Análise e diagnóstico ambiental do Vale do Taquari-RS-Brasil, utilizando sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 13, 5191-5.

FONSECA, B. M., RIBAS, R. P., MOURA A. C. M. Applying Ecological Landscape Concepts and Metrics in Urban Landscape Management. In: *Changing Cities: Spatial, Design*,

FORMAN R.T.; BAUDRY J. Hedgerows and hedgerow networks in landscape ecology. *Environmental Management*, n. 8, p.499–510, 1984.

FORMAN, R.T.T, GODRON, M. *Landscape Ecology*. New York: John Wiley& Sons, 1986.

GORELICK, Noel et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18–27, dez. 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425717302900>>.

JENKINS, J. P. et al. Detecting and predicting spatial and interannual patterns of temperate forest spring-time phenology in the eastern U.S. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 24, p. 54-1-54-4, dez. 2002. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2001GL014008>>.

JUNIOR, J. J. Bertucini, CENTENO, J.A.S.Registro de série de imagens Landsat usando correlação e análise de relação espacial. *Bol. Ciênc. Geod.*, sec. Artigos, Curitiba, v. 22, no4, p.685-702, out - dez, 2016.

LIN, Jinyao et al. An assessment framework for improving protected areas based on morphological spatial pattern analysis and graph-based indicators. *Ecological Indicators*, v. 130, p. 108138, nov. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108138>>.

MASCARENHAS, Luciane Martins de Araújo, FERREIRA, Manuel Eduardo e FERREIRA, Laerte Guimarães. Sensoriamento remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: análise da cobertura vegetal remanescente na Bacia do Rio Araguaia. *Sociedade & Natureza* [online]. 2009, v. 21, n. 1 [Acessado 10 Janeiro 2022] , pp. 5-18.

MCGARIGAL, K., MARKS, B.J..Fragstats: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. *Gen.Tech. Report PNW-GTR- 351*. Portland, U.S. Department of Agriculture, Forest services, Pacific Northwest research station, 1995, 122p.

METZGER, J. P. O que é Ecologia de Paisagens?. *Biota Neotrópica*. n.1, p. 1-9, 2001.

MINAS GERAIS. Lei nº 13960, de 26 de julho de 2001. Disponível em: <https://acervo.socioambiental.org/sites/default/files/documents/A0D00272.pdf>, acessado em: 9 de fevereiro de 2022.

MONTANDON, L; SMALL, E. The impact of soil reflectance on the quantification of the green vegetation fraction from NDVI. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 4, p. 1835–1845, 15 abr. 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425707004245>>.

MOURA, A. C. M., ROCHA, N. A., SENA, I. S., KECHAGIOGLOU. The role of vegetation cover indexes in urban areas: a contribution based on landscape ecology using sentinel-2 satellite images. *XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia*, Rio de Janeiro, 2017.

MOURA, Ana Clara Mourão. *Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano*. 2ªed. Belo Horizonte. Ed. da autora, 2005.

MYNENI, R. B. et al. Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 103, n. D6, p. 6145–6160, 27 mar. 1998. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/97JD03603>>.

MYNENI, Ranga B. et al. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 33, n. 2, p. 481–486, mar. 1995. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8746029/>>.

NAVEH, Zev; LIEBERMAN, Arthur S. *Landscape Ecology*. New York, NY: Springer New York, 1990. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-4082-0>>. (Springer Series on Environmental Management).

NUCCI, João Carlos. Origem e desenvolvimento da Ecologia e da Ecologia da Paisagem. *Revista Eletrônica Geografar*, Curitiba, v. 2, n. 1, p.77-99, jan./jun. 2007. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/geografar/article/view/7722/5896>>. Acessado em: 10/01/2022.

OFOSU ANIM, Desmond et al. Evaluation of NDVI Using SPOT-5 Satellite Data for Northern Ghana. *Environmental Management and Sustainable Development*, v. 2, n. 1, 16 maio 2013. Disponível em: <<http://www.macrothink.org/journal/index.php/emsd/article/view/3709>>.

RAMALHO, M.F.J.L. a aplicação do sensoriamento remoto e geoprocessamento na análise ambiental - Vale do Pitimbu/RN. *Anais - I Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto Aracaju/SE*, 17 e 18 de outubro de 2002. Disponível em: <<http://www.cpatc.embrapa.br/labgeo/srgsr1/pdfs/poster15.PDF>>. Acessado em: 10/01/2022.

ROCHA, Nicole Andrade da, BORGES, Júnia Lúcio de C., MOURA, Ana Clara M. Conflitos das dinâmicas de transformação urbana e ambiental à luz da ecologia da paisagem. *PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção*, Campinas, SP, v. 7, n. 1, 2016.

ROCHA, Nicole Andrade da. *Geoprocessamento na parametrização de áreas verdes urbanas: contribuições ao plano de Cobertura Vegetal e Arborização Urbana*. 2019. Tese de doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura. Belo Horizonte, 2019.

ROUSE, J.W. AND HAAS, R.H. AND SCHELL, J.A. AND DEERING, D.W. "Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS". Paper presented at Third Symposium of ERTS, Greenbelt, Maryland, USA. NASA SP-351, V1:309-317.

RUCHKYS, Úrsula Azevedo et al. Patrimônio em Geossistemas Ferruginosos: Potencial de Uso para o Geoturismo. *RELACult - Revista Latino-Americana de Estudos em Cultura e Sociedade*, v. 4, n. 2, p. 1–20, 2018.

RUCHKYS, Úrsula de Azevedo et al. Applying geoethics to the context of mining ferruginous geosystems: Case studies from the tailing dam breaks in Fundão and Córrego do Feijão, Minas Gerais - Brazil. *Episodes*, v. 43, n. 4, p. 1–10, 2020.

USGS. Landsat Satellite Missions. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

VASCONCELLOS, Andréa Araujo de. *Infraestrutura verde aplicada ao planejamento da ocupação urbana*. 1ed., Curitiba: Appris, 2015.

VOGT, Peter; RIITERS, Kurt. GuidosToolbox: universal digital image object analysis. *European Journal of Remote Sensing*, v. 50, n. 1, p. 352–361, 6 jan. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1330650>>.

WICKHAM, James D. et al. A national assessment of green infrastructure and change for the conterminous United States using morphological image processing. *Landscape and Urban Planning*, v. 94, n. 3–4, p. 186–195, 2010.