

Impactos do uso da terra nas emissões de GEE e estrutura da paisagem em Monte Carmelo, Minas Gerais

Impacts of Land Use on GHG Emissions and Landscape Structure in Monte Carmelo, Minas Gerais

Gabriel Fernandes Laverdi

Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

<https://orcid.org/0009-0008-2449-6801>

gabriel.laverdi@ufu.br

Vicente Toledo Machado de Morais Junior

Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

<https://orcid.org/0000-0001-5227-1951>

vicente.morais@ufu.br

Drausio Honorio Morais

Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

<https://orcid.org/0000-0002-9866-6008>

drausio@ufu.br

Edson Aparecido dos Santos

Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

<https://orcid.org/0000-0003-2316-4502>

edsonsantos@ufu.br

Amanda Maria Martins de Souza

Engenharia Florestal, Instituto de Ciências Agrárias,

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

<https://orcid.org/0009-0008-8701-884X>

amanda.martins@ufu.br

Pedro Emídio Gonçalves Vaz

Engenharia Florestal, Instituto de Ciências Agrárias,

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

<https://orcid.org/0000-0002-7186-2359>

pedro777@ufu.br

Railma Aparecida Santos

Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal,

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

<https://orcid.org/0000-0002-3464-6163>

railma.santos@ufvjm.edu.br

Danielle Piuzana Mucida

Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (PPGCF),
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM)

<https://orcid.org/0000-0002-5756-8081>

danielle.piuzana@ufvjm.edu.br

Luciano Cavalcante de Jesus França

Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e
Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (UFVJM)

<https://orcid.org/0000-0002-8885-972X>

luciano.franca@ufu.br

Resumo

A conservação de ecossistemas naturais é um dos grandes desafios deste século. Abordagens que integrem a dinâmica do uso e cobertura da terra, estrutura e composição da paisagem são essenciais para conciliar a expansão agrícola, a mitigação de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e a proteção de ecossistemas frágeis, rumo à bioeconomia. Este estudo investigou como as mudanças no uso e cobertura da terra afetaram a estrutura da paisagem e as emissões de GEE ao longo de cerca de quatro décadas em Monte Carmelo (MG), município agropecuário do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. Utilizaram-se dados do MapBiomas, métricas de ecologia da paisagem e emissões do SEEG para entender a dinâmica temporal das alterações e estimar as emissões anuais. Os resultados revelaram redução nas áreas de formações florestais (-5,66%) e savânicas (-52,72%) com aumento da fragmentação. Cafeicultura, sojicultura, silvicultura e outras lavouras temporárias expandiram-se, sobretudo sobre antigas pastagens. As emissões de GEE aumentaram 31,25%, com destaque para mudanças no uso da terra e agropecuária. As métricas indicaram fragmentação e simplificação das manchas vegetais. Essas alterações representam desafios à conservação e mitigação climática, evidenciando a urgência de políticas e manejo sustentável integrados a dados geoespaciais e inteligência territorial.

Palavras-chave: Ecologia de Paisagens; Mudança do Clima; GEE; Fragmentação Florestal; Uso da Terra.

Abstract

The conservation of natural ecosystems stands as one of the major challenges of this century. Approaches that integrate land use and land cover dynamics, as well as landscape structure and composition, are essential to reconcile agricultural expansion, mitigation of greenhouse gas (GHG) emissions, and the protection of fragile ecosystems, in pursuit of a bioeconomy. This study investigated how changes in land use and cover have affected landscape structure and GHG emissions over approximately four decades in Monte Carmelo (Minas Gerais), an agricultural municipality in the Triângulo Mineiro and Alto Paranaíba region. Data from the MapBiomas project, landscape ecology metrics, and GHG emissions from the SEEG system were used to analyze temporal dynamics and estimate annual emissions. The results revealed a reduction in forest formations (-5.66%) and savanna formations (-52.72%), accompanied by increased fragmentation. Coffee cultivation, soybean farming, silviculture, and other temporary crops expanded primarily over former pasturelands. GHG emissions increased by 31.25%, driven mainly by land use changes and agricultural activities. Landscape metrics indicated

increased fragmentation and simplification of vegetation patches. These changes pose significant challenges to biodiversity conservation and climate change mitigation, highlighting the urgent need for local policies and sustainable management practices supported by geospatial data and territorial intelligence.

Keywords: Landscape Ecology; Climate Change; GEE; Forest Fragmentation.

1. Introdução

O Cerrado brasileiro, reconhecido por sua rica biodiversidade e importância ecológica, tem sido severamente impactado pela fragmentação de seus ecossistemas, especialmente em regiões de intensa atividade agropecuária. As regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba se consolidaram como principais áreas no contexto do agronegócio no Cerrado (Ortega et al., 2014). A pecuária, em especial, permanece como um pilar fundamental para o desenvolvimento socioeconômico regional, ao lado da produção e exportação de commodities, estabelecendo-se como uma das principais fronteiras de expansão agrícola moderna e contribuindo de forma significativa para a produção agropecuária em Minas Gerais e no Brasil como um todo (Ortega et al., 2014; Santos, 2019).

Apesar disso, é evidente que as atividades agropecuárias têm exercido pressão sobre os recursos naturais, resultando em modificações na paisagem e redução de áreas naturais, o que compromete a conservação dos ecossistemas mais frágeis (Brum; Dalfovo; Benfica, 2011). A mudança na paisagem afeta a biodiversidade local, além de modificar a cobertura da terra, que, dependendo do manejo, pode potencializar a degradação do solo, aumento da erosão e até mesmo emissões que contribuem com o agravamento da mudança climática (Coelho et al., 2013).

Mapear o uso da terra, a configuração da paisagem rural e os métodos de manejo, visando uma reconversão produtiva, é essencial para o ordenamento territorial e ambiental em escalas locais, municipais e de bacias hidrográficas, especialmente em regiões de intensa atividade agropecuária e transformação do uso da terra. Neste sentido, a ecologia de paisagens é uma abordagem que tem sido utilizada para entender a dinâmica dos ecossistemas em grandes escalas espaciais e como as atividades humanas podem afetar a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos. A partir da compreensão dos padrões e processos que ocorrem nas paisagens, informações úteis para a gestão e conservação de ecossistemas podem ser obtidas (Metzger et al., 2001) para auxiliar em processos de tomadas de decisões ambientais espaciais. A compreensão da paisagem é um produto dinâmico das interações entre sociedade e natureza onde torna-se essencial para explicar sua estrutura e mudanças, demandando uma abordagem multidisciplinar (Pivello & Metzger, 2007).

O termo “Ecologia da Paisagem” (*Landschaftsökologie*) foi utilizado pela primeira vez em 1939 pelo biogeógrafo alemão Carl Troll, embasado nas tradições europeias da geografia regional. Ao observar uma fotografia aérea, Troll buscou entender as interações recíprocas entre a heterogeneidade espacial e os processos ecológicos. Tratava-se de uma nova perspectiva de análise, na tentativa de unificar conceitos de paisagem e de meio ambiente natural, bem como estreitar os campos de atuação entre a Geografia e a Ecologia (Metzger et al., 2001; França et al., 2020). A temática ainda se encontra relativamente escassa na literatura (Daloz et al., 2017), o que reforça a importância de novos estudos nesta linha de abordagem científica. Sobretudo, quando alinhado com a agenda de mudança do clima, uma contribuição central é a avaliação das estimativas de emissões de CO² resultantes da alteração do uso da terra, análise fundamental para desenvolver estratégias para implementar políticas de redução de gases de efeito estufa (GEE), conforme corroborado por Sousa et al. (2020).

A crescente preocupação com o manejo dos recursos naturais tem gerado demandas por investigações científicas relativas ao ordenamento territorial e gestão espacial desses recursos. Para isso, são utilizados diversos métodos e técnicas de análises métricas da paisagem, de modo a tornar compreensível a dinâmica de sua estrutura frente às mudanças impostas aos cenários (França et al., 2020). Algumas métricas de ecologia da paisagem têm sido comumente utilizadas, tais como métricas de área, borda, forma, número de fragmentos, tamanho de fragmento, distância média do vizinho mais próximo, índice de proximidade, diversidade de classes de cobertura da terra (McGarigal & Marks, 1995), dentre uma diversidade de outras métricas.

Além de toda a dimensão espacial, estudos que consigam integrar a mudança do uso da terra com as emissões de GEE tornam-se fundamentais para pesquisas que tragam contribuição relacionada à mitigação da mudança do clima. Minas Gerais é um estado que contribui ativamente para as emissões de GEE do Brasil, encontrando-se entre os estados que mais emitem GEE no país nos setores de "Mudança do Uso da Terra" e "Agropecuária" (Potenza et al., 2021).

Dessa forma, torna-se factível o uso da geotecnologia, índices de paisagens e dados públicos de emissões de GEE, em sua complexidade, para geração de conhecimento de base, com aplicação local, a fim de gerar princípios norteadores para uma gestão eficaz do uso da terra, seja em domínio público ou privado. As principais contribuições desta pesquisa estão relacionadas à necessidade iminente de avaliação do estado de conservação, configuração espaço-temporal e emissões decorrentes das mudanças no uso da terra de Monte Carmelo (MG) e o nível da qualidade ambiental, sobretudo da cobertura vegetal nativa local. O objetivo central deste estudo foi avaliar a dinâmica de cobertura e uso da terra e sua relação com as taxas de emissões no município de Monte Carmelo (MG).

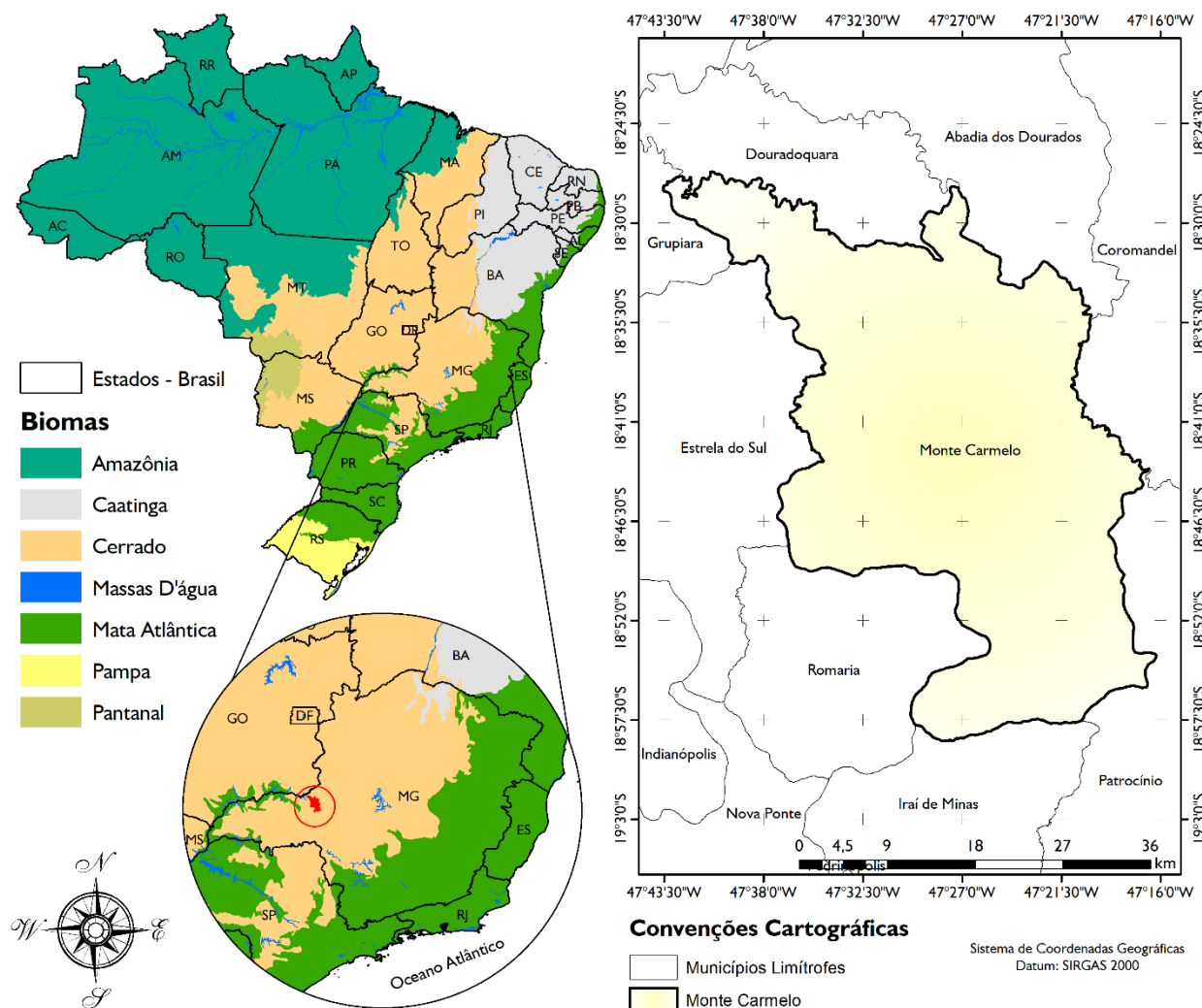
2. Materiais e métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

A área alvo considera o município de Monte Carmelo, localizado na mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba em Minas Gerais (latitude de 18° 43'31'' S e longitude de 47°29'55'' W). Segundo dados do IBGE (2022), a população era de aproximadamente 47.692 habitantes em uma área 1.343,035 km², resultando em uma densidade demográfica de cerca de 35,51 habitantes por quilômetro quadrado. Possui clima tropical, classificado como Aw segundo a Köppen e Geiger, temperatura média de 21,2 °C e com um valor de pluviosidade média anual por volta de 1444 mm e predomínio do bioma cerrado (IBGE, 2022).

A região de Monte Carmelo (Figura 1) é conhecida por apresentar solos com boas características físicas e boa fertilidade efetiva contribuindo para a aptidão agrícola, com destaque para as culturas de café, soja, milho, cana-de-açúcar, feijão, tomate, pimentão, frutas, eucalipto e seringueira. A produção de café recebe destaque especial, sendo reconhecida pela demarcação geográfica "Região do Cerrado Mineiro", que certifica a qualidade do café produzido, atribuída aos fatores locais de produção (Serato, 2007). A escolha da área justifica-se por ser considerada um importante *player* da agricultura brasileira e requer ser avaliada de modo a potencializar-se os modelos de desenvolvimento agrário que estejam acompanhados de plano de conservação robusto dos ecossistemas naturais locais.

Figura 1. Mapa de localização do município de Monte Carmelo, mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, Minas Gerais, Brasil.



2.2 Aquisição e processamento dos dados de cobertura e uso da terra

A principal fonte de dados a ser utilizada está disponível no portal do MapBiomas, uma organização responsável por analisar as transformações anuais na paisagem brasileira, utilizando imagens de satélite e categorizando-as em diversas classes, como áreas de floresta natural, centros urbanos, pastagens, dentre outros. A pesquisa deste trabalho baseia-se nas **coleções 4.1 de 1985 e 7.0 de 2022** da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil (MapBiomas, 2020). A base de dados foi obtida via armazenamento em nuvem do *Google Earth Engine*.

Na etapa seguinte, os dados foram convertidos do formato TIFF para polígonos e recortados e enquadrados para a sede urbana de Monte Carmelo (MG), permitindo a análise do uso da terra e das métricas para os anos de 1985 e 2022. Os elementos obtidos para estudo incluem diversas categorias de uso da terra, são elas: Formação Florestal, Formação Savânica, Silvicultura, Campo Alagado, Formação Campestre, Pastagens, Mosaico de Usos, Área Urbanizada, Áreas não vegetadas, Corpos D'água, Soja, Lavouras Temporárias, Café, Citrus, Lavouras Perenes.

Na análise do uso e ocupação da terra, foi calculada a diferença nas áreas de classes (em hectares) entre os anos estudados, a fim de verificar o aumento ou redução de uma determinada classe (Equação 01) em que A_i = área inicial; A_f = área final.

$$Mudança = A_f - A_i \quad (\text{Eq. 01})$$

Uma análise de fragmentação florestal também foi realizada neste estudo, de forma a dimensionar a perda de cobertura florestal de acordo com a densidade dos fragmentos. Os fragmentos florestais foram estratificados em 5 (cinco) classes de tamanhos: (i) 0 a 5 hectares; (ii) 5 a 20 ha; (iii) 20 a 50 ha; (iv) 50 a 100 ha e; (v) acima de 100 ha.

2.3 Análise métrica da estrutura da paisagem

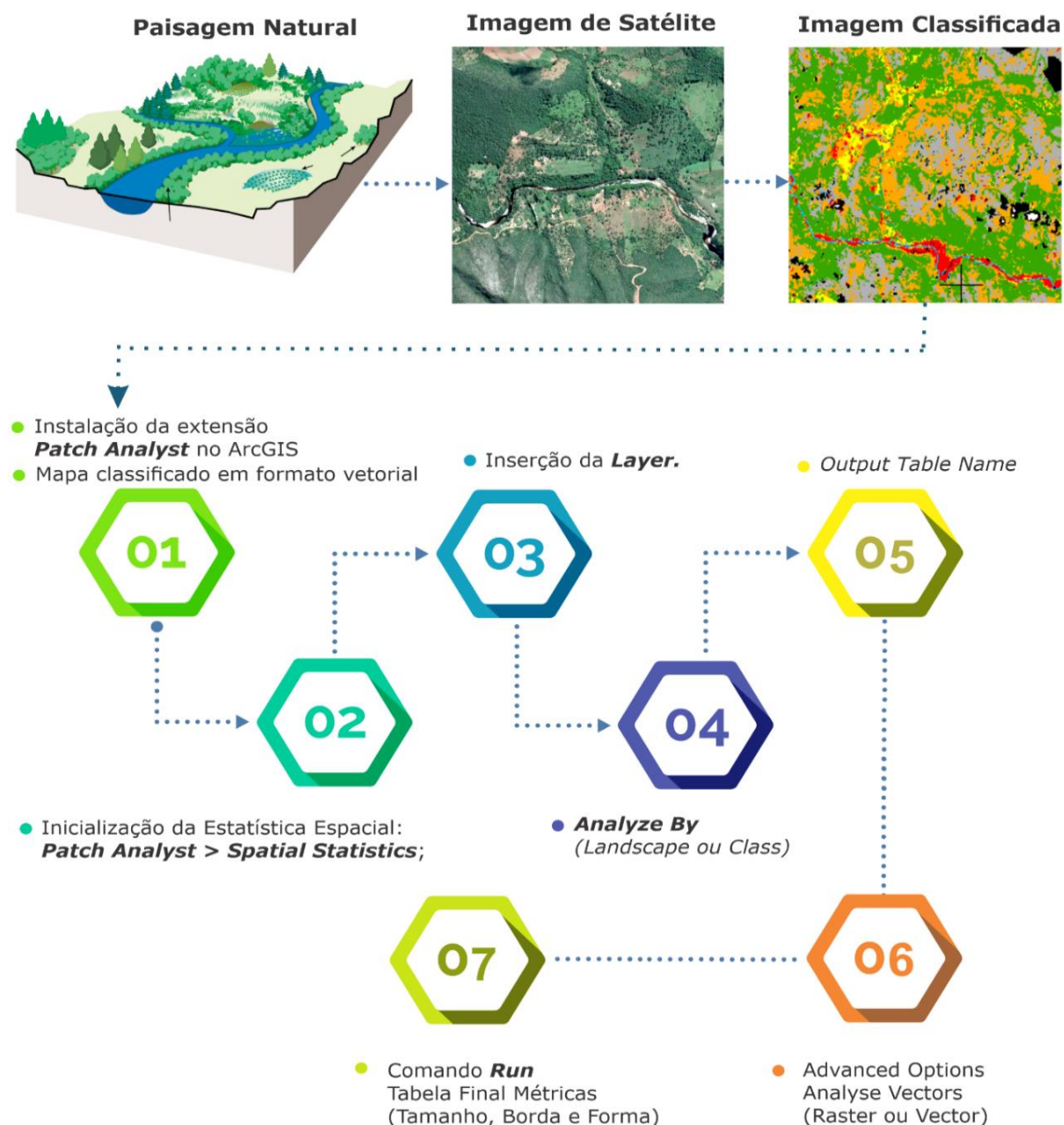
A descrição quantitativa da estrutura da paisagem do município foi realizada a partir da extensão do programa *Patch Analyst*, uma extensão da ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) implementada ao software ArcGIS 10.5. A extensão possibilita a condução de investigações e análises da paisagem, como a exploração de métricas na análise espacial de paisagem. Isso proporciona uma maneira ágil de compreender a dinâmica local por meio de diversas categorias de classificação. Utilizou-se como fundamentação teórica os passos metodológicos obtidos de França et al. (2019).

A Tabela 1 apresenta as métricas processadas no *Patch Analyst*, já que a maioria das métricas possuem resultados parecidos a serem medidos, diferenciando-se através de pequenos detalhes em fórmulas e unidades. Os grupos considerados foram: área, tamanho e forma. Para diagnosticar a heterogeneidade e diversidade da paisagem total da área de estudo, foi calculado o Índice de Diversidade de Shannon. No fluxograma da Figura 2 é apresentado o passo a passo metodológico para realização da análise métrica da estrutura da paisagem de Monte Carmelo (MG).

Tabela 1. Descrição e equações das métricas de paisagem analisadas para a área de estudo.

Grupo	Sigla	Métrica	Unidade	Descrição	Fórmula
Tamanho e Densidade	CA	Área da Classe	Hectare (ha)	Área total da classe, representa a soma de todas as manchas de determinada classe de uso do solo.	$CA = \sum_{i=1}^N a_{ij}$
	MPS	Tamanho Médio dos Fragmentos	Hectare (ha)	Tamanho médio das manchas, expressa o tamanho médio das manchas por tipo de classe de uso do solo.	$MPS = \frac{\sum_{j=1}^n A_{ij}}{ni}$
	NUMP	Número de Fragmentos	Adimensional	Número total de manchas, expressa o número total de manchas por tipo de classe de uso do solo.	$NumP = \sum_{i=1}^N ni$
	PSCoV	Coefficiente de Variação do Tamanho dos Fragmentos	Porcentagem (%)	Coefficiente de variação do tamanho da mancha, expressa o desvio padrão em porcentagem (%), ou seja, de quanto foi a variação em porcentagem para cada tipo de classe de uso do solo.	$PSCoV = \frac{PSSD}{MPS} \times 100$
Forma	MSI	Índice Médio de Forma	Adimensional	Indicador médio de forma, expressa o quanto a mancha é próxima de um círculo. Essa métrica efetua a soma do perímetro de todas as manchas e divide pelo quadrado da área da classe de uso. Basicamente expressa que quanto mais próximo de 1 for o valor, a forma da mancha é mais parecida com um círculo.	$MSI = \frac{\sum_{j=1}^n \left(\frac{P_{ij}}{2\sqrt{\pi A_{ij}}} \right)}{ni}$
	AWMSI	Índice Médio de Forma Ponderado pela Área	Adimensional	Indicador médio de forma ponderado pela área, expressa o quanto a mancha é próxima de um círculo. Essa métrica efetua a soma do perímetro de todas as manchas dividido pelo quadrado da área da classe de uso sendo o resultado dividido pelo número de manchas da classe. Basicamente expressa que quanto mais próximo de 1 for o valor, a forma da mancha é mais parecida com um círculo.	$AWMSI = \frac{\sum_{j=1}^n \left[\left(\frac{P_{ij}}{2\sqrt{\pi A_{ij}}} \right) \times \frac{A_{ij}}{\sum_{j=1}^n A_{ij}} \right]}{ni}$
	MPFD	Dimensão Fractal Média dos Fragmentos	Adimensional	Dimensão fractal média da mancha expressa a complexidade de forma da mancha, sendo que valores próximos de 1 representam perímetros simples e valores próximos de 2 indicam perímetros complexos, baseados na forma.	$MPFD = \frac{x}{ni}$
	ED	Densidade de Borda	m/ha	Densidade de borda, expressa a relação entre o perímetro (te) de cada classe pela área total da paisagem (tla).	$ED = \frac{TE}{TLA}$
	MPE	Borda Média dos Fragmentos	m	Média do perímetro (borda), expressa o comprimento médio do perímetro (te) das manchas para cada tipo de classe. É calculado com a divisão do valor total do perímetro da classe (te) pelo número total de manchas (numP).	$MPE = \frac{TE}{NumP}$

Figura 2. Fluxograma dos procedimentos metodológicos para calcular métricas de paisagens pelo Patch Analyst.



2.4 Levantamento das taxas de emissões do município

Os dados de emissões de gases de efeito estufa utilizados no estudo foram obtidos através do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), uma iniciativa do Observatório do Clima. O SEEG é responsável por produzir estimativas anuais das emissões de GEE no Brasil e disponibilizar esses dados através de uma plataforma digital. No estudo em questão, foram utilizados documentos analíticos que discutem a evolução das emissões ao longo do tempo, além da própria plataforma digital que contém os dados do sistema e sua metodologia (<https://seeg.eco.br/>) (SEEG, 2024).

A plataforma realiza estimativas de emissões de GEE para todos os municípios brasileiros, sendo inclusive determinadas para os diversos setores responsáveis pelas emissões, entre eles citam-se: a agropecuária, energia, mudança no uso da terra, processos industriais e resíduos. Os dados disponibilizados nas coleções do SEEG constituem uma série histórica que inicia em 1970 e vai até o ano anterior de cada lançamento de cada coleção, exceto para o setor de Mudança de Uso da Terra, cuja série é disponibilizada desde 1990. O SEEG considera todos os GEE contidos no Inventário Nacional, como CO₂, CH₄, N₂O e os HFCs, e os dados são apresentados também em gás carbônico equivalente, tanto na métrica GWP, como GTP. O Brasil utiliza diretrizes internacionais estabelecidas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC para quantificar suas emissões de GEE. Essas diretrizes são detalhadas nos inventários nacionais e foram validadas por estudos (Azevedo et al., 2018).

As estimativas de emissões e remoções de GEE são geradas segundo as diretrizes IPCC e com base na metodologia dos Inventários Brasileiros de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, elaborado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI (MCTI, 2015), e em dados obtidos junto a relatórios governamentais, institutos, centros de pesquisa, entidades setoriais e organização não governamentais, garantindo assim que as estimativas sejam robustas e confiáveis para monitoramento e tomada de decisões relacionadas às mudanças climáticas.

3. Resultados e discussão

3.1 Dinâmica do uso e cobertura da terra de Monte Carmelo

Para melhor compreensão dos resultados obtidos neste trabalho, é preciso observar que não é suficiente apenas o entendimento isolado da estrutura da paisagem, mas igualmente a complexa teia de interações que compõem a paisagem, sua composição, configuração e dinâmica de uso e cobertura da terra.

Com base na análise dos mapas temporais de uso e cobertura da terra no município de Monte Carmelo, ficou evidente as mudanças na paisagem rural e cobertura vegetal nativa local. Os valores de área ocupados por cada classe de uso para os anos 1985 e 2022 e suas respectivas taxas de mudança, nomeadamente a diferença absoluta (km²) entre os anos e a variação ou diferença percentual em relação ao ano inicial da avaliação, encontram-se apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Classes de uso e cobertura da terra para os anos avaliados e suas respectivas taxas de mudança na dinâmica espaço-temporal para Monte Carmelo (MG).

Classes	1985 (km²)	2022 (km²)	Mudança (km²)	Variação (%)
Formação Florestal	98,46	92,89	-5,58	-5,66%
Formação Savânica	43,38	20,51	-22,87	-52,72%
Silvicultura	0,01	14,75	14,73	147400%
Campo Alagado	24,34	18,15	-6,19	-25,43%
Formação Campestre	26,84	24,98	-1,86	-6,93%
Pastagens	752,53	496,92	-255,61	-33,97%
Mosaico de Usos	298,77	273,13	-25,64	-8,58%
Área Urbanizada	6,62	13,94	7,33	110,57%
Outras áreas não vegetadas	30,60	3,93	-26,67	-87,16%
Corpos D'água	14,32	9,18	-5,13	-35,89%
Soja	0,00	145,61	145,61	**
Outras Lavouras Temporárias	35,16	59,08	23,93	68,03%
Café	9,50	149,44	139,94	1473,05%
Citrus	2,65	11,31	8,65	326,79%
Outras Lavouras Perenes	1,01	10,37	9,36	926,73%

* Valor absoluto de aumento de 145,61 km² da área coberta por soja em relação à 1985, quando não havia nenhuma ocorrência desta classe de uso da terra.

No ano de 1985 verifica-se que a maior parte da paisagem já era constituída pela predominância de áreas de pastagens, com cerca de 752,53 km². Entretanto, devido às características locais mais favoráveis para a agricultura (Serato, 2017), no decorrer do tempo essas áreas foram sendo substituídas pelo cultivo de café, que apresentou um aumento de 139,94 km² no ano de 2022 em relação à 1985. A cultura da soja que apresentava nenhuma área quantificada em 1985, passou a contabilizar 145,61 km² em 2022, o equivalente a um aumento de 100% de área na classe e, a classe de outras culturas temporárias apresentou aumento de 59,08 km² em 2022 em relação a 1985.

A classe de formação florestal que abrangia uma área de 98,46 km² em 1985, reduziu para 92,89 km² em 2022, indicando uma diminuição de 5,66% ao longo do período analisado. Por outro lado, a formação savânica teve uma redução mais expressiva, passando de 43,38 km² em 1985 para 20,51 km² em 2022, equivalente a uma redução de 52,72% de área, sugerindo uma significativa perda de vegetação, o que pode ao longo do tempo e, em algum grau relevante, ter acarretado implicações significativas para a biodiversidade e para o equilíbrio ecossistêmico da região de Monte Carmelo.

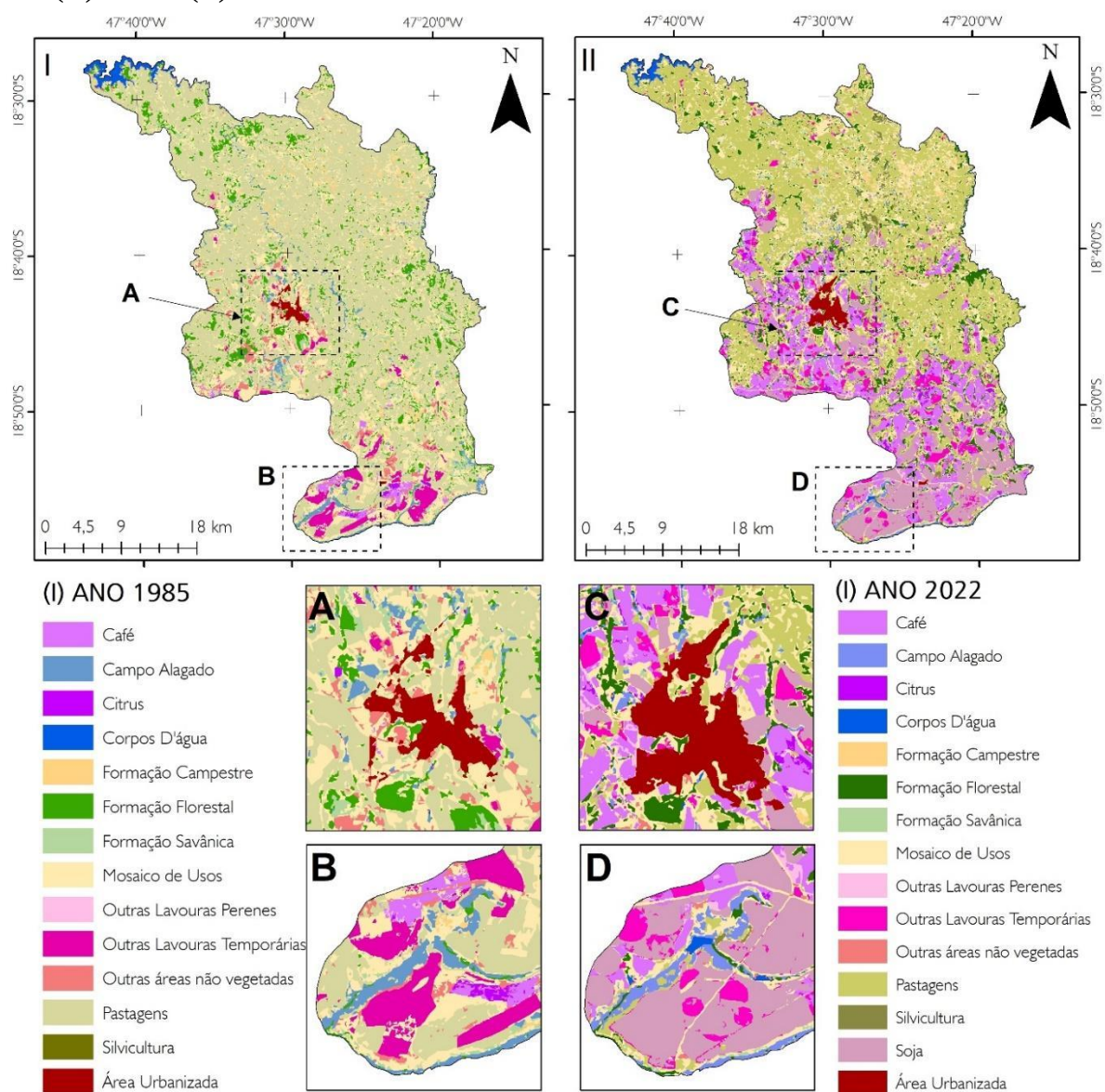
Não obstante, este estudo presta-se a um alerta sobre a gestão dos recursos hídricos e a perda da cobertura vegetal natural local, do estrato florestal em plena redução e, especialmente a relação de perda acelerada da formação savânica, nomeadamente o domínio fitogeográfico do Cerrado. O consumo agrícola é responsável pelo consumo da maior parte da água doce no mundo, devido ao processo de irrigação de acordo com dados expressados pela Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO) e Organização das Nações Unidas (ONU). A capacidade de recarga de água no solo e a redução dessa disponibilidade está diretamente relacionada à diminuição da infiltração de água no solo, aumentando o escoamento superficial direto e prejudicando o processo de recarga do lençol freático (Oliveira et al., 2020). A redução

da cobertura da terra por florestas e fisionomias do Cerrado tem relação direta com a menor capacidade da água em se infiltrar no solo.

Notavelmente, dá-se destaque também às áreas de silvicultura, representadas pela cor marrom no mapa de uso da terra (Figura 3), que apresentou um aumento considerável, saindo de 0,01 km² em 1985 para 14,75 km² em 2022, evidenciando um aumento na área destinada ao cultivo de árvores para fins comerciais, condizente com o desenvolvimento e chegada de novas empresas de base florestal que se instalaram na região. As áreas urbanizadas também mostraram um crescimento, passando de 6,62 km² para 13,94 km² no mesmo período (Figura 3 A-C).

No mapa de uso e cobertura da terra de Monte Carmelo (Figura 3 B-D), observa-se a partir da geovisualização, mudanças evidentes na configuração e composição espacial da região, notadamente para as classes referentes à cafeicultura, soja, culturas perenes e temporárias (tons de rosa), que dominaram as áreas ao sul e centro-oeste do município, ao longo do tempo. Essa distribuição espacial corrobora com as áreas de solos do tipo Latossolos e estão sobre a unidade de paisagem nomeada Superfícies Tabulares, zonas de elevada aptidão para a agricultura (Fernandes et al., 2013).

Figura 3. Mapa de uso e cobertura da terra para o município de Monte Carmelo, entre os anos 1985 (A) e 2022 (B).



3.2 A fragmentação florestal de Monte Carmelo (MG)

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos por meio da análise de fragmentação da paisagem florestal. Após análise da fragmentação para o ano de 2022, constatou-se que maior mudança ocorreu nas áreas que consideramos as grandes florestas, aquelas acima de 100 hectares (ha), sendo reduzidas em 75% da sua cobertura, ou seja, em 1985 havia 1.267,51 ha de fragmentos florestais com tamanhos acima de 100 ha, em 2022 a área total equivalia a apenas 386,29 ha.

A classe de fragmentos com tamanhos entre 50 e 100 ha teve perda de 20% comparando-se os anos avaliados. Por outro lado, constatou-se aumento de 49% para a classe de fragmentos florestais com tamanhos entre 20 e 50 ha indicando que possivelmente as grandes áreas florestais nativas foram fragmentadas para áreas menores, fora a perda por supressão legal ou desmatamento ilegal.

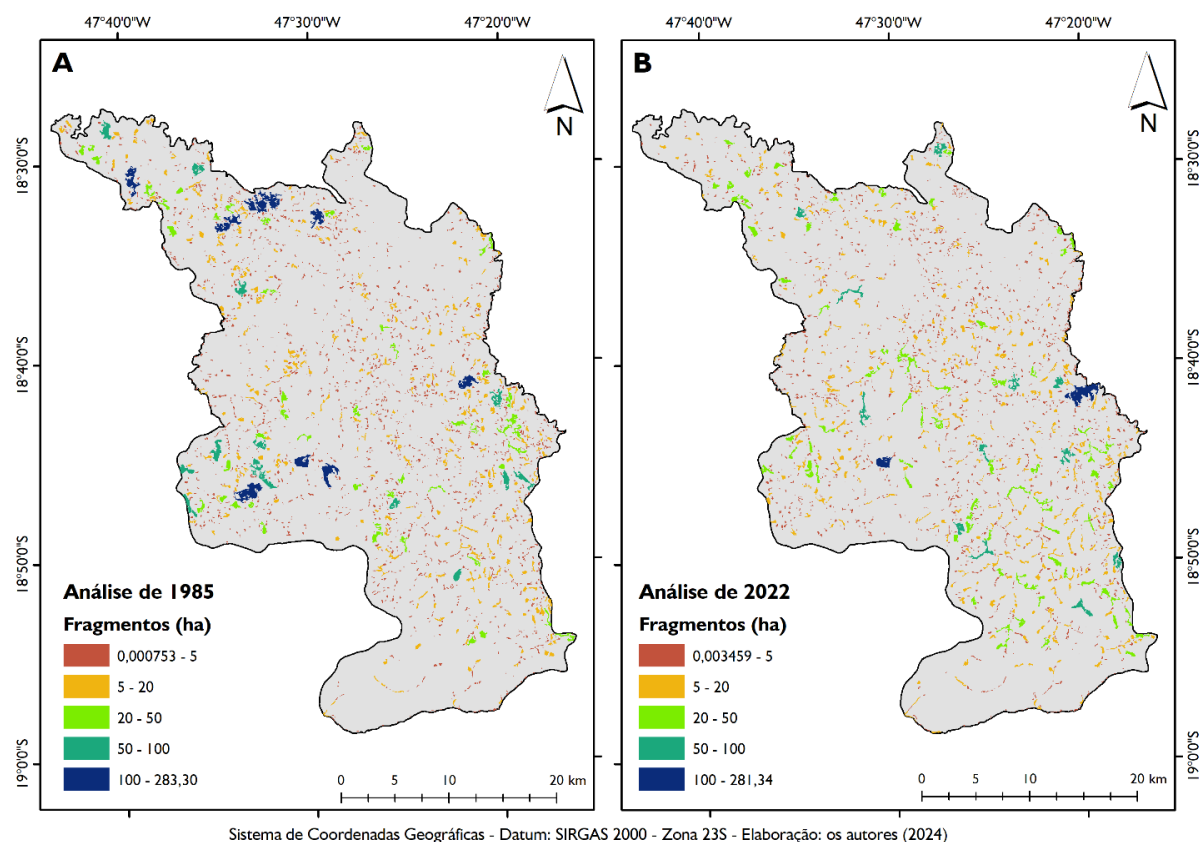
Tabela 3. Caracterização quantitativa da fragmentação florestal em Monte Carmelo (1985 – 2022).

Class e	Fragmentação Florestal - 1985			Fragmentação Florestal - 2022			Mudanç a (%)
	Amplitud e de Tamanho (ha)	Área (ha)	Quant. Polígono s	Amplitud e de Tamanho (ha)	Área (ha)	Quant. Polígono s	
I	0 a 5	3.152,25	2144	0 a 5	2.796,60	1961	-8,54
II	5 a 20	3.008,23	315	5 a 20	3.119,95	336	6,67
III	20 a 50	1.508,78	51	20 a 50	2.255,91	76	49,02
IV	50 a 100	1.092,68	15	50 a 100	809,92	12	-20,00
V	100 a 283,30	1.267,51	8	100 a 283,30	386,29	2	-75,00
Total	-	10.029,44	2.533	-	9.368,67	2.387	-

Na análise visual do mapa de fragmentos florestais (Figura 4 A-B), é possível observar a redução de 8 para 2 polígonos da classe V (Tabela 3), aqueles com amplitude maior que 100 ha de área contínua, representados no mapa pela cor azul, seguido pelo aumento significativo das classes medianas, representadas pelas cores verde e amarelo. Também é importante enfatizar a perda de 146 polígonos de todas as categorias, totalizando 660,77 (ha) de área de floresta perdida, o que impacta diretamente na qualidade do ecossistema e nas condições de sobrevivência de espécies da fauna e flora local.

A fragmentação cada vez maior da paisagem acarreta consequências negativas para a biodiversidade e para os serviços ecossistêmicos, tais como a degradação dos corredores ecológicos, a diminuição da dispersão de sementes, da polinização e da ciclagem de nutrientes, perdas de conexão entre áreas vegetadas e limitações no deslocamento da fauna (Morais, 2019).

Figura 4. Mapa de fragmentação florestal para os anos 1985 (A) e 2022 (B) para o município de Monte Carmelo (MG).



3.3 Análise métrica da estrutura da paisagem de Monte Carmelo

A análise dos índices métricos ao nível de toda a paisagem do município de Monte Carmelo revelou evidentes mudanças na distribuição das classes entre os anos de 1985 e 2022, sendo encontrado um total de 14 classes de cobertura e uso da terra para 1985 e 15 classes para o ano de 2022. Conforme descrito por Valente e Vettorazzi (2002), a análise em nível de paisagem é fundamental para entender as funções e as transformações que ocorrem em uma área, por esse motivo foi gerado Índice de Diversidade de Shannon (SDI) de 1,42 para 1985 e 1,92 para 2022, sendo que esses valores apontam a diversidade dos usos na área analisada. O aumento observado no valor do índice pode ser explicado pelo surgimento da soja como uma nova classe de uso, sendo mais abrangente no sul do município (Figura 3), devido a características de solo favoráveis da região, assim como é citado por (Serato, 2017). Essa constatação não necessariamente reflete em aspectos positivos para a diversidade e dinâmica ecológica local, já que a prática de atividades agrícolas tem ligações com supressão de vegetação nativa e mudanças nas características naturais da área.

A forma dos fragmentos também influencia o grau do impacto do efeito de borda, incluindo os fluxos bióticos e abióticos (Cachoeira et al., 2020). Neste sentido, as métricas de forma AWMSI e o MSI (Tabela 4) indicam a média dos índices espectrais para cada classe, onde valores mais próximos de 1 (um) (adimensional) indicam que a forma das manchas é mais semelhante a um círculo. Fragmentos florestais com índice próximos a 1 são mais arredondados e quanto maior o índice, mais alongados são estes fragmentos (Bezerra et al., 2011). Este conjunto de índices também é fundamental para saber como ocorre a dispersão dos animais e

plantas na paisagem. Formas isodiamétricas (círculo perfeito) têm uma relação maior de espécies de interior do que aquelas que tendem ao retângulo, que podem chegar ao extremo de possuírem somente espécies de borda (Bezerra et al., 2011). Mas também é importante ressaltar que, por outro lado, pensando em conservação de área central, ou seja, de espécies que se encontram mais no interior de fragmentos, é mais favorável ter uma área de fragmento com formato irregular (não-circular) e de maior extensão do que um fragmento de formato circular e menor, pois este último estaria mais suscetível aos efeitos negativos da borda, sendo pior com relação a características ambientais (Pirovani et al., 2015), ou seja, os fragmentos maiores têm o efeito de borda compensado.

Observa-se que para a formação florestal o AWMSI apresentou uma leve diminuição nessas métricas em 2022 em comparação com 1985, com mudança de 2,11 para 2,08, respectivamente, indicando que tais florestas estão um pouco mais circulares, o que se analisado isoladamente seria algo esperado. Observa-se na que o valor de AWMSI para a classe de pastagem (Tabela 4) é muito elevado, corroborando que, manchas com maior área tem forma mais irregular que a média, conforme preconizado em McGarigal e Marks (1995). Por outro lado o MSI apresentou aumento (1,48 em 1985 para 1,52 em 2022), demonstrando mais complexidade e irregularidade (valor mais distante de 1), o que não seria ruim se os fragmentos florestais apresentassem grandes dimensões de área, afinal, paisagens naturais exibem formas complexas e irregulares, entretanto este resultado pode estar sugerindo fragmentos muito recortados em função da maior proporção de bordas, com alta razão perímetro/área, portanto, mais susceptíveis ao efeito de borda, quando é preferível é que os fragmentos apresentem menor razão (Oliveira, 2011), ou também indicando que mais alongados estão os fragmentos, o que também não é uma premissa esperada. Bordas retas não são padrões ideais para florestas nativas (Cachoeira et al., 2020).

Nota-se que para a formação savânica, tanto MSI quanto AWMSI apresentaram reduções, o que indica formas mais regulares, ou seja, maior proximidade à forma de uma circunferência, o que teoricamente indicaria que tal classe estaria mais conservada. Porém, neste caso, não significa necessariamente melhoria no estado de conservação, uma vez que houve elevado grau de perda de cobertura. A formação savânica teve uma das mais drásticas reduções em área, com uma perda de 52,72% da área original comparado ao observado em 1985, logo, por essa classe apresenta área mais reduzida, é uma classe de cobertura ainda mais susceptível a efeitos negativos provocados pela proximidade com área de borda. Desta forma, mesmo a formação savânica apresentando forma (MSI e AWMSI) mais regulares em 2022, a referida classe natural foi a que mais perdeu área, logo não representa melhores condições de conservação. Se a área da mancha é pequena, toda a mancha estará sob efeito de borda (Silva et al., 2020).

Já o MPFD expressa a complexidade de forma da mancha, sendo que valores próximos de 1 representam perímetros simples e valores próximos de 2 indicam perímetros mais complexos. Nota-se que, para todas as classes de uso do solo essa métrica não apresentou intensa alteração, variando de 1,34 a 1,41 conforme a Tabela 4. Isso significa então que de forma geral, nestes quase 40 anos a complexidade das formas das manchas de todas elas apresentam perímetro simples, ou seja, distante da complexidade que se espera por exemplo de florestas nativas e mais próximo de áreas antropizadas.

Tabela 4. Métricas de forma para o município de Monte Carmelo (MG) (1985 - 2022).

Classes	Forma					
	MSI		AWMSI		MPFD	
	1985	2022	1985	2022	1985	2022
Formação Florestal	1,48	1,52	2,11	2,08	1,34	1,35
Formação Savânica	1,44	1,39	2,06	1,69	1,35	1,34
Silvicultura	1,50	1,40	1,50	1,82	1,35	1,36
Campos Alagados	1,39	1,43	2,89	2,24	1,37	1,36
Formação Campestre	1,44	1,47	1,78	2,02	1,34	1,34
Pastagem	1,44	1,43	39,51	18,10	1,36	1,36
Mosaicos de Usos	1,40	1,40	3,05	3,07	1,38	1,38
Área Urbanizada	1,40	1,83	3,05	3,73	1,35	1,41
Outras Áreas Não Vegetadas	1,51	1,40	2,22	1,55	1,37	1,35
Corpos D'água	1,36	1,33	5,45	5,15	1,40	1,40
Soja	-	1,45	-	3,11	-	1,37
Outras Lavouras Temporárias	1,40	1,35	2,19	1,89	1,40	1,38
Café	1,39	1,44	3,51	2,95	1,40	1,38
Citrus	1,40	1,35	2,33	1,97	1,40	1,39
Outras Lavouras Perenes	1,38	1,34	1,87	1,87	1,41	1,39

Observa-se uma redução no (TE) e (ED) (Tabela 5) para ambas as classes de vegetação nativa em 2022, entretanto, mantendo altos valores de índices de borda, afinal as classes de vegetação nativa no município são muito fragmentadas em áreas pequenas, o que potencializa os efeitos borda. Essa diminuição de bordas para as classes de floresta e savana está também possivelmente associada ao desaparecimento de manchas de ambas as classes, enquanto, por exemplo, para a classe de cafeicultura houve um aumento significativo da densidade de bordas, notadamente um maior surgimento de novas manchas. O aumento da densidade de bordas está associado ao aumento do número de manchas da classe (Pereira et al., 2001), o que não ocorreu necessariamente para a classe floresta, que, apesar das grandes manchas terem sido fragmentadas, mas, por outro lado não houve aumento significativo de manchas de fragmentação, pelo contrário, houve a perda de centenas de pequenos fragmentos florestais, suprimidos para outras formas de uso da terra.

Tabela 5. Métricas de borda para o município de Monte Carmelo (MG) (1985 - 2022).

Classes	Borda					
	TE		ED		MPE	
	1985	2022	1985	2022	1985	2022
Formação Florestal	2289688,90	2273258,21	17,03	16,91	905,37	951,95
Formação Savânica	1157288,31	643996,23	8,61	4,79	787,81	654,47
Silvicultura	605,66	332441,12	0,00	2,47	605,66	755,55
Campos Alagados	626594,04	561419,16	4,66	4,18	653,38	627,28
Formação Campestre	770093,99	694736,64	5,73	5,17	782,62	831,02
Pastagem	5583864,14	5078863,65	41,54	37,78	4246,28	1992,49
Mosaicos de Usos	7560741,86	8041142,51	56,25	59,82	651,84	631,12
Área Urbanizada	50562,67	55050,05	0,38	0,41	1685,42	9175,01
Outras Áreas Não Vegetadas	715138,01	139207,61	5,32	1,04	853,39	582,46
Corpos D'água	273383,33	152691,53	2,03	1,14	447,44	490,97
Soja	-	1043486,44	-	7,76	-	1625,37
Outras Lavouras Temporárias	334378,80	1192964,98	2,49	8,87	768,69	535,92
Café	209714,45	1661717,57	1,56	12,36	589,09	1290,15
Citrus	60511,00	348788,79	0,45	2,59	587,49	436,53
Outras Lavouras Perenes	47005,31	428497,37	0,35	3,19	364,38	378,20

É importante observar a necessidade de se reformar os fragmentos florestais para uma formação de áreas mais densas e mais irregulares, onde o efeito de borda é menor, a partir da restauração da vegetação no entorno desses fragmentos espalhados ao longo do município. A proposição de mosaicos funcionalmente interligados entre pequenos fragmentos e aumento de conectividade por meio da formação de corredores ecológicos entre os grandes fragmentos, são duas premissas recomendadas neste estudo.

Nota-se que as análises aqui foram realizadas a nível de paisagem, mas possivelmente, os fragmentos florestais muito pequenos podem, se analisados isoladamente, ou mesmo com vistorias de campo, estarem completamente sob efeito de borda, tal como corroborado em (Pirovani et al., 2015). Salienta-se que a classe formação florestal já apresentava em 1985 alto valor de densidade de borda, quando comparada às demais classes e, apesar de ter tido uma leve redução, manteve ainda assim um alto valor de ED.

Moreira e Monteiro (2016) destacam a dificuldade em esclarecer completamente as relações de causa e efeito do processo de fragmentação florestal associado à dinâmica de borda. Segundo os autores, é necessário inferir sobre a estrutura comunitária das florestas avaliadas, considerando a mensuração da riqueza e da abundância de espécies nos fragmentos. Isso permite evidenciar impactos como a diminuição do tamanho do fragmento, observada através da taxa de mortalidade e da abundância das espécies nessas áreas.

A métrica de MPE (Tabela 5) indica o tamanho médio das bordas para cada tipo de classe. Para a classe formação florestal houve um pequeno aumento em 2022, enquanto para a savânica diminuiu. Isso se deu possivelmente a já referida perda de fragmentos de maiores dimensões e redução no número de fragmentos. Mostrando maiores alterações nas classes de

pastagem e áreas destinadas a cultivos agrícolas como a soja e o café, onde geralmente as demarcações de área são menos complexas.

O número de manchas (NumP) e o tamanho médio das manchas (MPS) também revelam mudanças na distribuição espacial da vegetação. Nota-se uma redução no número de manchas para ambas as classes de floresta em 2022 (6), indicando uma maior agregação e concentração da vegetação em áreas menores. Já o tamanho médio das manchas as maiores alterações foram sobre as classes de área urbanizada, café e soja com ganhos de 210,34 (ha), 8,93 (ha), 22,68 (ha) respectivamente e pastagem com redução de 37,73 (ha). Por fim, o PSCoV que avalia o quanto foi a variação em porcentagem para cada tipo de classe de uso do solo.

Observa-se uma redução na complexidade da forma das manchas e na variabilidade do tamanho para quase todas as classes em 2022, o que sugere uma homogeneização e simplificação da paisagem vegetada ao longo do tempo. Se tratando de valores expressados pela análise da métrica Área de classe (CA), que expressa a soma das áreas de todas as manchas, foi constatado uma grande redução nas classes de cobertura vegetal natural, nomeadamente as formações florestais e formação savânica, 557 (ha) e 2.286 (ha) respectivamente, assim como para as classes de Campos Alagados, Formação Campestre e Outras Áreas não Vegetadas com perdas de 619 (ha), 185 (ha) 2667 (ha) respectivamente na Tabela 6. Já se tratando das áreas de Pastagem, onde houve as maiores perdas de áreas, 33,97%, cerca de 25.561 (ha) possivelmente foram convertidos em áreas de cultivo de café, soja, citros e outras lavouras temporárias.

Tabela 6. Métricas de tamanho e densidade para o município de Monte Carmelo (MG) (1985 - 2022).

Classes	Tamanho e Densidade							
	CA		MPS		NUMP		PSCoV	
	1985	2022	1985	2022	1985	2022	1985	2022
Formação Florestal	9846,45	9288,94	3,89	3,89	2529	2388	301,01	242,37
Formação Savânica	4337,89	2051,20	2,95	2,08	1469	984	252,98	168,63
Silvicultura	1,30	1474,76	1,30	3,35	1	440	0,00	238,89
Campos Alagados	2434,04	1815,02	2,54	2,03	959	895	521,02	362,78
Formação Campestre	2684,28	2498,48	2,73	2,99	984	836	157,33	219,86
Pastagem	75252,91	49691,59	57,23	19,49	1315	2549	3059,44	2128,20
Mosaicos de Usos	29877,08	27313,18	2,58	2,14	11599	12741	539,51	442,45
Área Urbanizada	661,75	1394,37	22,06	232,40	30	6	431,70	214,04
Outras Áreas Não Vegetadas	3060,32	393,20	3,65	1,65	838	239	304,97	129,46
Corpos D'água	1431,64	918,39	2,34	2,95	611	311	1922,01	1377,21
Soja	-	14560,91	-	22,68	-	642	-	536,86
Outras Lavouras Temporárias	3515,86	5908,48	8,08	2,65	435	2226	588,89	421,73
Café	950,36	14944,42	2,67	11,60	356	1288	632,78	384,20
Citrus	265,40	1130,57	2,58	1,41	103	799	351,47	333,54
Outras Lavouras Perenes	100,84	1036,62	0,78	0,91	129	1133	234,81	282,90

Cada vez mais é imprescindível que os poderes públicos atuem, seja no planejamento, na execução ou na fiscalização, balizados na ciência. A tomada de decisão, alicerçada em evidências científicas, tende a fornecer resultados muito mais promissores para toda a

sociedade, e dessa forma, a universidade, pode também, fazer seu papel de propulsora de um desenvolvimento mais sustentável, garantindo a produção agrícola, pecuária e silvícola e de seus derivados em quantidade e qualidade, aliado às melhorias na qualidade de vida da população e na preservação do ambiente, elemento essencial para manutenção da produção de serviços ambientais à população.

Recomenda-se que a partir desta pesquisa, investigações mais complexas e com novas métricas possam ser exploradas, a saber, os índices de proximidade, como por exemplo o MNN (Distância média do vizinho mais próximo) é uma métrica a ser analisada, uma vez que poderá auxiliar mais efetivamente na proposição de corredores de conectividade e redução de custos de criação destes corredores. Novas métricas de áreas centrais também poderão ajudar a esclarecer a questão do efeito de borda nas classes naturais. Aliás, uma análise métrica focada no nível comparativo entre tamanhos de fragmentos também poderá ajudar a explicar novas questões sobre a classe de formação florestal.

3.4 Implicações nas emissões de GEE do município

A partir do levantamento das emissões do município de Monte Carmelo de 1990 a 2022, foi possível constatar um aumento gradual nas emissões de GEE, impulsionado pelo crescimento populacional, mudanças nos padrões de consumo, expansão agrícola e industrial. Com isso, desde a década de 90 houve um aumento de 31,25% nas emissões totais de GEE do município, passando de 307.721 tCO₂eq em 1990 para 447.690 tCO₂eq ano de 2022 (Figura 4).

O setor da Agropecuária é a fonte mais significativa de emissões de GEE em Monte Carmelo, com destaque para o metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) derivados de atividade agrícolas e pecuárias. A aplicação de fertilizantes, o manejo de dejetos animais e práticas agrícolas intensivas são os principais contribuintes para essas emissões no estado (Morais Junior, 2021; Potenza et al., 2023). O setor supracitado foi o principal contribuidor no incremento nas emissões de GEE do município em todos os anos de 1990 até 2022, contribuindo em média com 49,70% das emissões, um total de 5.043.078 tCO₂eq no período de 32 anos (Tabela 7). Esse fato, é corroborado com as métricas da paisagem apresentadas anteriormente, na qual a fragmentação e a supressão da vegetação nativa abriram espaço para a expansão da agropecuária ao longo da sequência histórica avaliada, consequentemente isso foi confirmado pelo incremento das emissões de GEE para esse setor.

As emissões de GEE relacionadas à Mudança do Uso da Terra e Florestas (MUTR) também possuem significativa contribuição para as emissões totais do município na série histórica avaliada. Entre os anos de 1990 até 2005 a média anual das emissões de GEE representou cerca de 40% das emissões de GEE de Monte Carmelo-MG (Tabela 7), esse fato demonstra a elevada contribuição dessa categoria para as emissões de GEE durante esse período. Após esse período, houve diminuição de cerca de 50% das emissões anuais de GEE desse setor, assim, as emissões de GEE provenientes da MUTR estiveram menores entre 2006 e 2021, no entanto, observou-se que no ano de 2022 esse setor teve um incremento de emissões de GEE considerável, indicando que pode haver uma tendência de aumento de emissões do MUTR (Figura 4). Como demonstrado nas análises da paisagem, o município de Monte Carmelo-MG perdeu uma elevada extensão de área com florestas ao longo das quatro décadas avaliadas, com essa perda acentuada principalmente entre os anos de 1990 e 2006 as emissões por desmatamento das florestas foram maiores para esse período, ao longo desses anos houve uma crescente pressão sobre as florestas para expansão agropecuária e uma legislação florestal e mecanismos de fiscalização menos efetivos. Após esse período, as emissões de GEE diminuíram para MUTR, essa diminuição foi devido a diminuição de áreas de florestas

passíveis para desmatamento e pelo advento de uma nova Legislação Florestal, o Novo Código Florestal – Lei.12.651/2012) que trouxe consigo um aumento dos mecanismos de controle e fiscalização ambiental (Brasil, 2012; Roitman et al., 2018).

O Setor de Energia começa a ter suas emissões de GEE quantificadas e consideradas a partir de 2007, sendo responsável em média por 33,55% por cento das emissões totais do município após esse ano, a média anual de emissões de GEE desse setor é 130.476 tCO₂ (Tabela 5). Atualmente, esse setor é representativo e possui a segunda maior contribuição para as emissões anuais de GEE do município. Esse fato demonstra a importância de ações locais que considerem um Plano de Mitigação das Emissões provenientes de Energia para o município.

As emissões de GEE em função dos resíduos sólidos, possui a menor contribuição para as emissões de GEE de Monte Carmelo, embora os dados demonstram que houve um crescimento absoluto considerável das emissões de GEE dessa fonte entre a sequência histórica avaliada (1990 – 8.319 tCO₂) e (2022 – 26.528 tCO₂).

Nesse sentido, pode-se concluir que as emissões de GEE pela “MUT” e pela “Agropecuária” foram as fontes emissoras mais significativas ao longo das quase quatro décadas avaliadas, esse cenário é esperado, uma vez que houve durante esse período uma grande degradação florestal (demonstrada pelas métricas da paisagem, cobertura e uso da terra) para abertura de novas áreas para implantação e manutenção da Agropecuária. Portanto, além da preocupação de estratégias relacionados à recuperação de áreas desmatadas no município, é notável também a importância climática dessas ações, esse fato torna-se fundamental diante dos compromissos assumidos pelo Brasil diante o Acordo de Paris (COP-15) na qual o Brasil se comprometeu a restaurar 12 Mha até 2030 como medida para ampliar os estoques naturais de carbono do país, além disso, Minas Gerais é signatário da campanha “Race to Zero” na qual o estado se propõe a zerar as emissões de GEE do estado até 2050, uma iniciativa inédita para o Brasil (UNFCCC, 2016; UNFCCC, 2017; Agência Minas, 2021; Campos, 2023).

Tabela 7. Emissões de Gases de Efeito Estufa do município de Monte Carmelo (1990 – 2022), em valores absolutos (tCO₂ equivalente) e Percentual de contribuição de cada fonte emissora para cada ano avaliado.

Categoria de Uso do Solo		Agropecuária (tCO ₂)/(%)		Energia (tCO ₂)/(%)		Mudança de Uso da Terra e Floresta (tCO ₂)/(%)		Resíduos (tCO ₂)/(%)		Total (tCO ₂)
Anos das emissões de GEE tCO ₂	1990	171.261	55,65%	0	0,00%	128.140	41,64%	8.319	2,70%	307.721
	1991	168.182	56,99%	0	0,00%	118.175	40,05%	8.736	2,96%	295.093
	1992	171.912	52,08%	0	0,00%	148.392	44,96%	9.772	2,96%	330.076
	1993	178.597	52,29%	0	0,00%	152.640	44,69%	10.319	3,02%	341.555
	1994	181.378	55,60%	0	0,00%	133.783	41,01%	11.056	3,39%	326.216
	1995	155.770	56,39%	0	0,00%	109.227	39,54%	11.235	4,07%	276.232
	1996	135.955	58,70%	0	0,00%	84.259	36,38%	11.393	4,92%	231.607
	1997	132.122	65,27%	0	0,00%	58.349	28,82%	11.954	5,91%	202.425
	1998	133.651	60,93%	0	0,00%	73.109	33,33%	12.598	5,74%	219.358
	1999	125.201	54,31%	0	0,00%	92.137	39,97%	13.172	5,71%	230.510
	2000	129.314	49,89%	0	0,00%	116.073	44,78%	13.817	5,33%	259.204
	2001	131.028	57,33%	0	0,00%	83.059	36,34%	14.470	6,33%	228.557
	2002	131.360	50,80%	0	0,00%	112.092	43,35%	15.149	5,86%	258.601
	2003	130.431	51,40%	0	0,00%	107.544	42,38%	15.785	6,22%	253.760
	2004	138.817	55,63%	0	0,00%	93.990	37,67%	16.726	6,70%	249.533
	2005	137.094	52,30%	0	0,00%	107.261	40,92%	17.758	6,77%	262.112
	2006	144.551	58,75%	0	0,00%	82.971	33,72%	18.526	7,53%	246.048
	2007	146.587	46,18%	90.142	28,40%	62.387	19,65%	18.303	5,77%	317.419
	2008	145.365	45,26%	99.184	30,88%	57.637	17,95%	18.990	5,91%	321.176
	2009	143.513	46,51%	105.149	34,07%	40.451	13,11%	19.475	6,31%	308.588
	2010	151.016	45,15%	120.474	36,02%	43.228	12,92%	19.787	5,92%	334.504
	2011	148.993	40,91%	141.281	38,79%	53.627	14,73%	20.278	5,57%	364.179
	2012	153.306	41,78%	142.474	38,83%	50.268	13,70%	20.848	5,68%	366.895
	2013	162.481	42,13%	149.417	38,74%	52.302	13,56%	21.487	5,57%	385.688
	2014	174.962	43,12%	142.786	35,19%	65.951	16,25%	22.076	5,44%	405.775
	2015	190.547	46,77%	131.162	32,19%	63.823	15,66%	21.924	5,38%	407.455
	2016	191.565	48,44%	131.918	33,36%	51.184	12,94%	20.812	5,26%	395.479
	2017	146.843	41,92%	132.966	37,96%	48.376	13,81%	22.096	6,31%	350.282
	2018	144.553	41,73%	133.029	38,40%	46.841	13,52%	21.994	6,35%	346.417
	2019	152.951	42,32%	130.753	36,18%	54.533	15,09%	23.156	6,41%	361.393
	2020	167.755	43,98%	132.174	34,65%	56.936	14,93%	24.578	6,44%	381.443
	2021	162.079	43,05%	148.003	39,31%	40.485	10,75%	25.943	6,89%	376.511
	2022	163.937	36,62%	156.707	35,00%	100.518	22,45%	26.528	5,93%	447.690
	Total (1990 - 2022)	5.043.078	49,70%	2.087.619	17,21%	2.689.748	27,59%	569.059	5,49%	10.389.504

Portanto, os resultados demonstrados nesse estudo, confirmam que Monte Carmelo-MG passou por uma grande dinâmica de uso do solo ao longo das últimas quatro décadas, a alteração da paisagem para o aumento de áreas com agricultura e pecuária e urbanizadas culminou na elevação das emissões de GEE. Esse fato, indica a necessidade de ações e estratégias em nível

municipal para a conservação e recuperação ambiental com vistas a contribuir para a manutenção das florestas, biodiversidade e do clima. Além de sensibilizações ambientais para os diversos atores sociais sobre a importância das florestas e da recuperação de áreas desmatadas.

É importante destacar que, a partir da promulgação do Novo Código Florestal (Lei nº 12.651/2012), instrumentos como o Cadastro Ambiental Rural (CAR) e os Programas de Regularização Ambiental (PRA) foram estabelecidos para garantir a manutenção e a recuperação das Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reservas Legais. O uso efetivo desses instrumentos no município de Monte Carmelo pode reduzir significativamente as emissões de GEE associadas à mudança no uso do solo e controlar a fragmentação da vegetação nativa.

4. Considerações finais

Este estudo auxiliou na compreensão da alteração da cobertura e uso da terra de Monte Carmelo (MG), ao longo de quase 4 décadas, sendo esta, a primeira pesquisa local sobre a dinâmica, estrutura e composição da paisagem e sua conexão com as taxas de emissões de GEE. Este estudo não esgota a investigação da pesquisa local sobre ordenamento de paisagens e gestão de ecossistemas, pelo contrário, novas perguntas podem ser estabelecidas a partir das constatações obtidas.

Apesar de as métricas da paisagem de Monte Carmelo (MG) indicarem a evolução da paisagem, como elas não são espacialmente explícitas, recomenda-se cautela ao utilizá-las como medida de degradação da paisagem. Neste sentido, os resultados obtidos através da análise das métricas das classes de vegetação em Monte Carmelo entre 1985 e 2022 revelam um cenário de mudanças significativas na paisagem vegetal ao longo desse período. Observou-se uma tendência geral de fragmentação e simplificação da vegetação, refletida em diversas métricas que avaliam a saúde, a estrutura e a distribuição das formações florestais e savânicas.

A redução nas métricas AWMSI e MSI sugeriram uma possível diminuição na densidade e na saúde da vegetação ao longo do tempo, enquanto a diminuição dos valores da métrica MPFD indicam uma simplificação na estrutura das formações florestais, possivelmente devido a processos de degradação e pressões ambientais. A diminuição no tamanho médio das manchas vegetadas, juntamente com a redução na dispersão e na complexidade das formas, sugere uma perda de habitat e uma maior concentração da vegetação em áreas menores e mais homogêneas. Isso pode resultar em impactos negativos para a fauna e a flora locais, comprometendo a resiliência dos ecossistemas frente a perturbações ambientais.

As emissões de GEE de Monte Carmelo aumentaram consideravelmente nas últimas quatro décadas. De maneira geral, os problemas da mudança climática embora sejam causados por ações locais, os seus efeitos são globais. Por esse fato, reforça-se a necessidade de fortalecer as estratégias de conservação e restauração florestal e, ao mesmo tempo, criar estratégias e ações que considerem o fortalecimento dos estoques naturais de carbono e plano de mitigação de mudança climática no município.

Logo, os resultados apontam para uma transformação preocupante na paisagem natural de Monte Carmelo (MG), apesar de uma paisagem rural mais diversa quanto aos novos elementos na cobertura e uso do território, mas com evidências de degradação, perda de biodiversidade e relação direta com aumento das taxas de emissão de GEE ao longo das últimas décadas. Essas considerações finais destacam a importância de políticas e práticas de conservação ambiental, gestão do uso e ocupação da terra que visem aumento de produção agrossilvipastoril por ganho de produtividade que estejam compatíveis com a proteção e

mitigação da mudança do clima, conservação e a restauração dos ecossistemas locais, visando garantir a sustentabilidade e a resiliência dos sistemas naturais para as gerações futuras.

Referências

Agência Minas. (2021, 26 de outubro). *Minas Gerais formaliza adesão à campanha mundial Race to Zero para zerar emissões de carbono*. Agência Minas. URL: <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/minas-gerais-formaliza-adesao-a-campanha-mundial-race-to-zero-para-zerar-emissoes-de-carbono>.

Bezerra, C. G.; Santos, A. R.; Pirovani, D. B.; Pimentel, L. B.; Eugenio, F. C. (2011). Estudo da fragmentação florestal e ecologia da paisagem na sub-bacia hidrográfica do Córrego Horizonte, Alegre, ES. *Espaço & Geografia*, 14(2).

Brasil. (2012). *Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012: Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa*. Presidência da República. URL: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/12651.htm

Brum, A. L.; Dalfovo, W. T.; Benfica, V. C. A. (2011). Relação entre o desmatamento e o crescimento das culturas de grãos no município de Sinop-MT. *Desenvolvimento em Questão*, 9(17). Unijuí.

Cachoeira, J. N.; Silva, A. D. P.; Batista, A. C., Biondi, D., Giongo, M.; Neto, E. G. (2020). Dinâmica espacial da paisagem do Parque Estadual do Jalapão (TO) de 2000 a 2015. *Ciência Florestal*, 30(3), 755–766. URL: <https://doi.org/10.5902/1980509837750>[(<https://doi.org/10.5902/1980509837750>).

Campos, L. C. (2023). *A atuação de Minas Gerais na agenda de mudança do clima*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Alfenas. Repositório UFAL.

Coelho, V. H. R. et al. (2013). Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(1), 64–72. URL: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000100009>

Convention on Climate Change. (2016). *Relatório de síntese sobre o efeito agregado das contribuições previstas a nível nacional: Uma atualização*. UNFCCC. URL: <http://unfccc.int/resource/docs/2016/cop22/esp/02.pdf>.

Dalloz, M. F., Crouzeilles, R., Almeida, G. M., Papi, B., & Prevedello, J. A. (2017). Incorporating landscape ecology metrics into environmental impact assessment in the

Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15(3), 216–220. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.07.005>

De Azevedo, T. R.; Costa Junior, C., Brandão Junior, A.; Cremer, M. D. S.; Piatto, M.; Tsai, D. S.; ... Kishinami, R. (2018). SEEG initiative estimates of Brazilian greenhouse gas emissions from 1970 to 2015. *Scientific Data*, 5(1), 1–43. URL: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.45>

Fernandes, M. et al. (2017). Ecologia da paisagem de uma bacia hidrográfica dos tabuleiros costeiros do Brasil. *Floresta e Ambiente*, 24, e00025015. URL: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.025015>

Fernandes, M. R., et al. (2013). *Minas Gerais: Caracterização de unidades de paisagem*. EMATER-MG.

França, L. C. J.; Menezes, E. S.; Silva, M. D.; Mucida, D. P. (2020). Análise estatística espacial de métricas da paisagem utilizando o patch analyst. In C. A. Felsemburg (Ed.), *A produção do conhecimento na Engenharia Florestal*. Atena Editora. URL: <https://doi.org/10.22533/at.ed.568202405>

França, L. C. J.; Morandi, D. T.; Menezes, E. S.; Mucida D. P.; Silva, M. D.; Lisboa, G. S. (2019). Ecologia de paisagens aplicada ao ordenamento territorial e gestão florestal: Procedimentos metodológicos. *Revista Nativa*, 7(5), 613–620. URL: <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i5.7756>

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl>

Labuhn, B.; Mazur, E. (2021). *Evaluating Brazil's progress in implementing Environmental Performance Review recommendations and promoting its alignment with OECD core acquis on the environment*. OECD. URL: <https://doi.org/10.1787/6a3b9e40-en>

McGarigal, K.; Marks, B. J. (1995). *FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure* (General Technical Report PNW-351). USDA Forest Service. URL: https://www.fs.usda.gov/pnw/pubs/pnw_gtr351.pdf

Metzger, J. P. (2001). O que é ecologia de paisagens? *Biota Neotropica*, 1(1), 1–9. URL: <https://doi.org/10.1590/S1676-06032001000100006>

Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. (2015). *Emissões de gases de efeito estufa pela queima de resíduos agrícolas*. Relatórios de Referência: Agricultura. URL: <http://sirene.mcti.gov.br/publicacoes>

Morais Junior, V. T. M. (2021). *Restauração florestal e neutralização de emissões de gases de efeito estufa: Programa Carbono Zero (UFV) e adequação ambiental de propriedades rurais em Minas Gerais*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa. Repositório UFV.

Morais, P. P. (2019). *Fragmentação da paisagem e corredores ecológicos na região do MATOPIBA*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Brasília. Repositório UnB.

Moreira, T. R. (2016). *Análise espacial dos remanescentes do bioma Mata Atlântica no município de Conceição da Barra, Espírito Santo, Brasil*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Espírito Santo. Repositório UFES.

Oliveira, A. S.; Silva, A. M.; Mello, C. R. (2020). Dinâmica da água em áreas de recarga de nascentes em dois ambientes na região Alto Rio Grande, Minas Gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 25(1), 59–67. URL: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020148177>

Oliveira, L. T. (2011). *Caracterização da fragmentação florestal para produção de sementes no entorno capixaba do Parque Nacional do Caparaó*. Monografia de graduação, UFES.

Ortega, A. C., Silva, G. C. Martins, H. E. P.. (2014). Transformações recentes da produção agropecuária no Cerrado: Uma análise da Região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. *Ensaios FEE*, 35(2), 555–584. URL: <https://revistas.planejamento.rs.gov.br/index.php/ensaios/article/view/2813>

Pereira, J. L. G.; Batista, G. T.; Thalês, M. C., Roberts, D. A.; Venturieri, A. (2001). Métricas da paisagem na caracterização da evolução da ocupação da Amazônia. *Geografia*, 26(1), 59–90. URL: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/1907/5272>

Pirovani, D. B.; Gomes da Silva, A.; Rosa dos Santos, A. (2015). Análise da paisagem e mudanças no uso da terra no entorno da RPPN Cafundó, ES. *Cerne*, 21(1), 27–35. URL: <https://doi.org/10.1590/01047760201521012006>

Pivello, V. R.; Metzger, J. P. (2007). Diagnóstico da pesquisa em ecologia de paisagens no Brasil (2000–2005). *Biota Neotropica*, 7(3). URL: <https://doi.org/10.1590/S1676-06032007000300002>

Roitman, I., et al. (2018). Rural environmental registry: An innovative model for land-use and environmental policies. *Land Use Policy*, 76, 95–102. URL:

<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.037>

Santos, H. F. (2019). Modernização da agricultura e dinâmica do agronegócio globalizado no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. *Geografia em Questão*, 12(1), 9–36. URL:

<https://doi.org/10.48075/geog.v12i1.18330>

Serato, D. S. (2017). *Análise da fertilidade dos solos no município de Monte Carmelo – MG* Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia. Repositório UFU.

Silva, L. S.; Moreau, M. S.; Daltro, U. S. (2020). Uso do geoprocessamento para mapeamento do uso e ocupação do solo com ênfase em métricas da paisagem: Um estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Água Branca. *Acta Ambiental Catarinense*, 17(1). URL:

<https://doi.org/10.24021/raac.v17i1.5035>

Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa - SEEG (2021). *Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970–2020*. URL: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/03/SEEG-10-anos-v4.pdf>

Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa – SEEG. (2024) *Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970–2023*. URL: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>

Sousa, J. A. P.; Lopes, E. R. N., Souza; J. C.; Lourenço, R. W. (2020). Mudanças de uso da terra e estimativas de emissões antrópicas de CO₂ em bacia hidrográfica. *Sociedade & Natureza*, 32, 262–278. URL:

<https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/44054>

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2017). *Acordo de Paris – Status da ratificação*. UNFCCC. URL: [http://unfccc.int/paris\ agreement/items/9444.php](http://unfccc.int/paris\%20agreement/items/9444.php)

Valente, R. O. A.; Vettorazzi, C. A. (2002). Análise da estrutura da paisagem na Bacia do Rio Corumbataí, SP. *Scientia Forestalis*, 62, 114–129. URL:

<https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr62/cap10.pdf>