

SUSTENTABILIDADE E EXPANSÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA BACIA DO BAIXO RIO GRANDE/MG

SUSTAINABILITY AND EXPANSION OF SUGARCANE IN THE LOWER RIVER GRANDE BASIN/MG

SOSTENIBILIDAD Y AMPLIACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN LA CUENCA BAJA DEL RÍO GRANDE/MG

Beatriz Vasconcelos Almeida¹

Rogério Gonçalves Lacerda de Gouveia²

Jhansley Ferreira da Mata³

Resumo: Este estudo teve como objetivo analisar a expansão da cultura da cana-de-açúcar na bacia do baixo rio Grande/MG entre os anos de 1990 e 2022. A pesquisa foi orientada pelo referencial teórico do modelo de compartimentação da paisagem física, conforme proposto por Bertrand (1972), que possibilita uma compreensão integrada das transformações espaciais. A metodologia envolveu o uso de dados de uso e cobertura das terras disponibilizadas pelo projeto MapBiomass – Coleção 8, nos formatos vetoriais shapefile. As análises cartográficas foram realizadas no software QGIS, utilizando técnicas de reclassificação temática, sobreposição de camadas, cálculo de áreas e análise multitemporal das mudanças. As principais classes de uso das terras analisadas foram: cana-de-açúcar, pastagens, vegetação nativa, áreas de represa e outros usos. Os resultados indicaram um crescimento significativo da cana-de-açúcar, cuja área aumentou de 1,84% em 1990 para 22,05% em 2022, enquanto as áreas de pastagem e vegetação nativa reduziram-se em 54,98% e 23,04%, respectivamente. Conclui-se que, apesar da relevância econômica da expansão canavieira, é fundamental adotar estratégias de manejo sustentável para mitigar os impactos ambientais, preservar os recursos hídricos e conservar a biodiversidade regional.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica. Uso da terra. Baixo Rio Grande. Cana-de-açúcar. Expansão.

¹ Graduada em Agronomia pela Universidade do Estado de Minas Gerais. Lattes iD: <http://lattes.cnpq.br/9116505769606249> E-mail: beatriz.almeida@uemg.br Orcid iD: <https://orcid.org/0009-0002-0963-642X>

² Doutor em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp). Professor da Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG). Frutal/MG. E-mail: rogerio.gouveia@uemg.br Lattes iD: <http://lattes.cnpq.br/6581693742442645> Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0002-8141-1869>

³ Graduado em Agronomia pela Universidade Federal do Tocantins. mestrado em Produção Vegetal pela Universidade Federal do Tocantins e doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp). Atualmente é professor efetivo da Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG e Coordenador do Mestrado em Ciências Ambientais. Lattes iD: <http://lattes.cnpq.br/1421305037766063> E-mail: jhansley.mata@uemg.br Orcid iD: <https://orcid.org/0000-0001-8452-7368>

Abstract: This study aimed to analyze the expansion of sugarcane cultivation in the Lower Rio Grande Basin (Minas Gerais, Brazil) between 1990 and 2022. The research was guided by the theoretical framework of the physical landscape compartmentalization model proposed by Bertrand (1972), which enables an integrated understanding of spatial transformations. The methodology involved the use of land use and land cover data provided by the MapBiomass Project – Collection 8, in shapefile vector format. Cartographic analyses were carried out using QGIS software, employing techniques such as thematic reclassification, layer overlay, area calculations, and multitemporal change analysis. The main land use classes analyzed were: sugarcane, pasture, native vegetation, reservoir areas, and other uses. The results showed a significant increase in sugarcane cultivation, rising from 1.84% in 1990 to 22.05% in 2022, while pasture and native vegetation areas decreased by 54.98% and 23.04%, respectively. It is concluded that, despite the economic relevance of sugarcane expansion, it is essential to implement sustainable management strategies to mitigate environmental impacts, preserve water resources, and conserve regional biodiversity.

Keywords: Hydrographic basin. Land use. Lower Rio Grande. Sugarcane. Expansion.

Resumen: Este estudio tuvo como objetivo analizar la expansión del cultivo de caña de azúcar en la cuenca del bajo río Grande (Minas Gerais, Brasil) entre los años 1990 y 2022. La investigación se basó en el marco teórico del modelo de compartimentación del paisaje físico propuesto por Bertrand (1972), que permite una comprensión integrada de las transformaciones espaciales. La metodología incluyó el uso de datos de uso y cobertura del suelo proporcionados por el Proyecto MapBiomass – Colección 8, en formato vectorial shapefile. Los análisis cartográficos se realizaron con el software QGIS, utilizando técnicas como reclasificación temática, superposición de capas, cálculos de áreas y análisis multitemporal de los cambios. Las principales clases de uso del suelo analizadas fueron: caña de azúcar, pastizales, vegetación nativa, áreas de represa y otros usos. Los resultados indicaron un crecimiento significativo del cultivo de caña de azúcar, que pasó del 1,84% en 1990 al 22,05% en 2022, mientras que las áreas de pastizales y vegetación nativa disminuyeron en un 54,98% y 23,04%, respectivamente. Se concluye que, a pesar de la relevancia económica de la expansión cañera, es fundamental adoptar estrategias de manejo sostenible para mitigar los impactos ambientales, preservar los recursos hídricos y conservar la biodiversidad regional.

Palabras clave: Cuenca hidrográfica. Uso de la tierra. Bajo Río Grande. Caña de azúcar. Expansión.

Introdução

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande relevância socioeconômica no Brasil, destacando-se pela produção de açúcar e etanol, além de subprodutos como bagaço, vinhaça e bioenergia. Sua importância está atrelada à história do desenvolvimento agrário e industrial do país, sendo um dos pilares da economia agrícola brasileira. O setor sucroenergético desempenha papel estratégico tanto no mercado interno quanto na exportação, contribuindo para a diversificação da matriz energética e geração de empregos (Carvalho; Marin, 2011).

Desde a implementação do Proálcool na década de 1970, a cultura da cana-de-açúcar experimentou expressiva expansão, especialmente em áreas com condições edafoclimáticas favoráveis. O Estado de Minas Gerais, por exemplo, desponta como um estado onde essa

cultura encontrou condições ideais para seu desenvolvimento. Fatores como solo fértil, topografia favorável, infraestrutura logística, e proximidade com mercados consumidores têm impulsionado a expansão dessa cultura no estado (Cortez; Leal; Nogueira, 2016).

A área da bacia do baixo rio Grande, situada no Triângulo Mineiro, é emblemática nesse contexto. Com características edáficas e climáticas que favorecem o cultivo, essa bacia tem sido palco de intensas transformações no uso da terra nas últimas décadas. O avanço da cana-de-açúcar nessa região ilustra o impacto do setor agrícola na paisagem e na dinâmica ambiental, social e econômica local (Gouveia; Barbosa, 2023).

Nesse sentido, compreender as mudanças no uso do solo e o avanço da cana-de-açúcar é essencial para promover o manejo sustentável dos recursos naturais da bacia. Acrescenta-se que, a análise do impacto dessas transformações contribui para a formulação de políticas públicas voltadas para o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e conservação ambiental (Cherubin et al., 2021).

Este estudo também destaca os desafios associados à expansão agrícola, como a pressão ambiental e a degradação do solo. Dessa forma, as informações apresentadas buscam fornecer subsídios para o planejamento de estratégias que conciliem produção agrícola com preservação ambiental e a sustentabilidade (Sousa; Esdras; Figueiredo, 2020; Vestena; Santos; Camargo Filho, 2024).

O objetivo deste estudo é analisar a expansão da cultura da cana-de-açúcar na bacia do baixo Rio Grande/ MG entre 1990 e 2022. Para isso, utilizou-se uma abordagem integrada, baseada em análises cartográficas e temporais de uso da terra, fornecendo uma visão abrangente sobre as transformações ocorridas e suas implicações.

A escolha da bacia do baixo rio Grande/ MG justifica-se pela sua relevância estratégica para o estado de Minas Gerais, tanto do ponto de vista ambiental quanto socioeconômico. A região apresenta solos predominantemente férteis, cobertura vegetal típica do bioma Cerrado e uma rica rede hídrica, fatores que garantem alta produtividade agrícola e sustentabilidade para o cultivo da cana.

Metodologia e caracterização da área de estudo

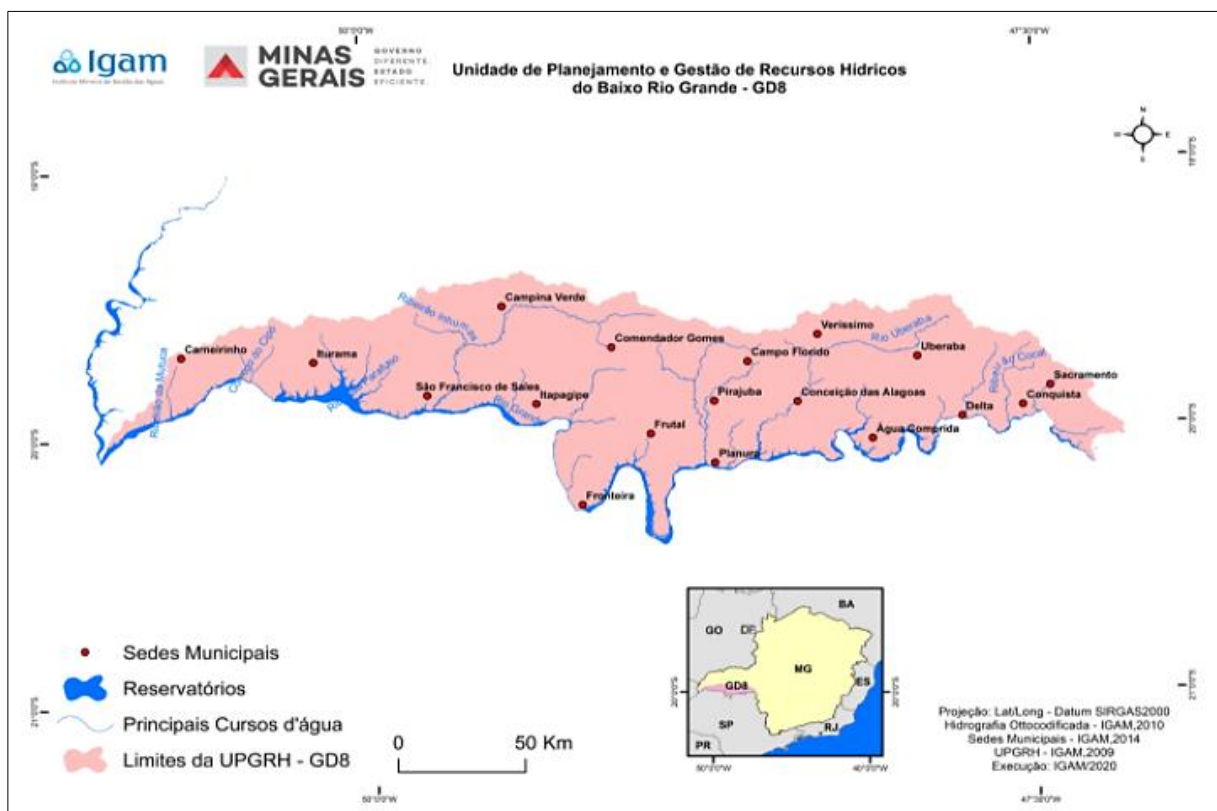
O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do baixo rio Grande (BBRG), localizada no Estado de Minas Gerais (Figura 1), entre as latitudes de 20.040 S e 21.3258 S e longitudes 50.980 W e 43.5862 W, com área total de 1.893.784,78 km².

O clima, segundo a classificação de Koppen, é do tipo tropical de savana (Aw), com chuvas médias de 1.472 mm anuais e dividido em duas estações bem definidas a seca e a chuvosa (Nascimento; Berbert; Ribeiro, 2018).

O arcabouço geológico do Triângulo Mineiro pode ser dividido em duas classificações, sendo a leste rochas sedimentares e vulcânicas que se assentam sobre rochas metassedimentares neoproterozóicas, e a oeste rochas magmáticas e sedimentares fanerozóicas (Hasui; Haralyi, 1991).

A bacia hidrográfica do baixo rio Grande/ MG apresenta uma rica diversidade de vegetação, composta por áreas de cerrado e remanescentes de mata atlântica. A vegetação de cerrado, com suas características adaptativas, e a mata atlântica, com sua alta taxa de endemismo, desempenham papéis essenciais na dinâmica ecológica da região (IBGE, 2024).

Figura 1 - Local da bacia hidrográfica do baixo rio Grande/ MG.



Fonte: Instituto Mineiros de Águas (Igam, 2024).

Organização: Autores (2024).

Fonte de dados

Para a delimitação da bacia do Baixo Rio Grande, localizada em Minas Gerais, foi utilizada uma base cartográfica digital de alta precisão, obtida a partir dos dados espaciais disponibilizados pelo Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema, 2022). A base, no formato shapefile, passou por revisão topológica e checagem de consistência espacial no software QGIS 3.34, garantindo a correção de sobreposições e lacunas entre feições. A utilização desses dados permitiu uma análise detalhada e acurada da bacia, assegurando que os aspectos geográficos e ambientais fossem representados de forma fidedigna.

As informações referentes às classes de solo, incluindo Ordem, Subordem e Grande Grupo, foram obtidas com base no levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro, fornecido pela Embrapa (2024), na escala de 1:500.000. O conjunto de dados foi convertido para o mesmo sistema de referência cartográfica da bacia (SIRGAS 2000), e analisado em ambiente SIG, permitindo a interseção com as unidades de paisagem da área de estudo.

Para a análise da série temporal do uso da terra na bacia do Baixo Rio Grande, foram utilizados mapas de cobertura e uso do solo dos anos de 1990 e 2022, obtidos por meio do Projeto MapBiomias (Coleção 8, 2023). As classes foram extraídas a partir de imagens Landsat processadas com técnicas de classificação automática via aprendizado de máquina, com posterior validação baseada em pontos de controle e dados auxiliares. As classes consideradas neste estudo foram: Floresta, Silvicultura, Vegetação Herbácea e Arbustiva, Agropecuária, Área não Vegetada e Recursos Hídricos.

A validação dos dados foi realizada por meio da verificação cruzada com imagens de alta resolução do Google Earth, com pontos amostrais distribuídos aleatoriamente em cada classe. Embora os dados do MapBiomias apresentem elevada acurácia global, reconhece-se que limitações podem estar associadas à resolução espacial das imagens e à similaridade espectral entre determinadas classes, especialmente em áreas de transição.

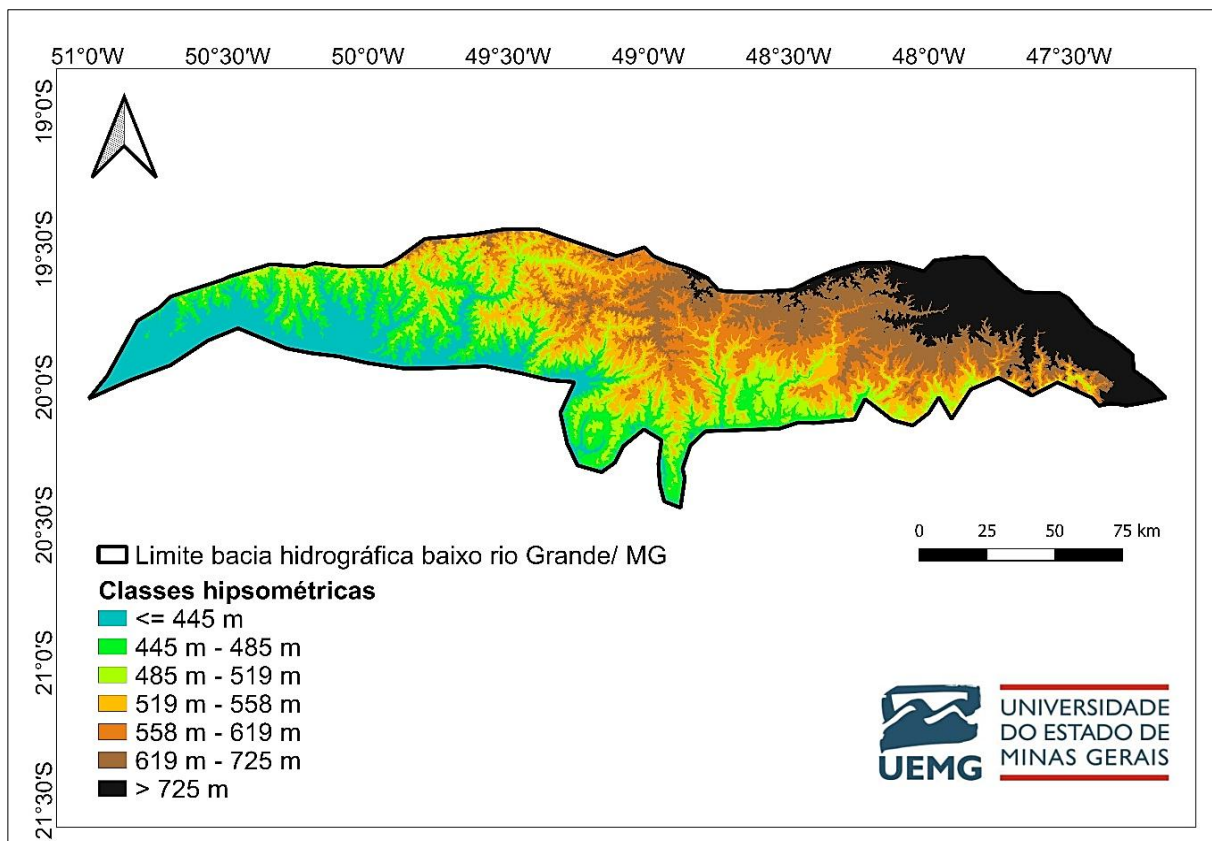
Resultados e discussão

Na Figura 2 mostra as classes hipsométricas presentes na BBRG, a altimetria variou entre 425 até 725 m na região central da bacia predomina a classe de 519 a 558 metros de altitude, que influenciará aspectos ambientais, biológicos e climatológicos. A altitude pode influenciar de forma positiva na produtividade da cana-de-açúcar em relação: na diminuição de

respiração fotossintética noturna ajudando no acúmulo de sacarose, menor incidência de pragas e doenças nas altitudes elevadas e solos com teores de matéria orgânicas elevadas auxiliando no desenvolvimento da cultura.

De acordo com Fritizons, Mantovani e Aguiar (2008) a temperatura do ar é influenciada pela altitude de certas regiões, que decresce conforme a elevação do local, podendo chegar a uma proporção de 1°C/100 m. Isto é, a taxa de arrefecimento ocorre quando uma massa de ar seco em elevação está sujeita a uma pressão cada vez menor, aumentando assim o volume e diminuindo a temperatura.

Figura 2 - Distribuição das classes hipsométricas na bacia do baixo rio Grande/ MG.

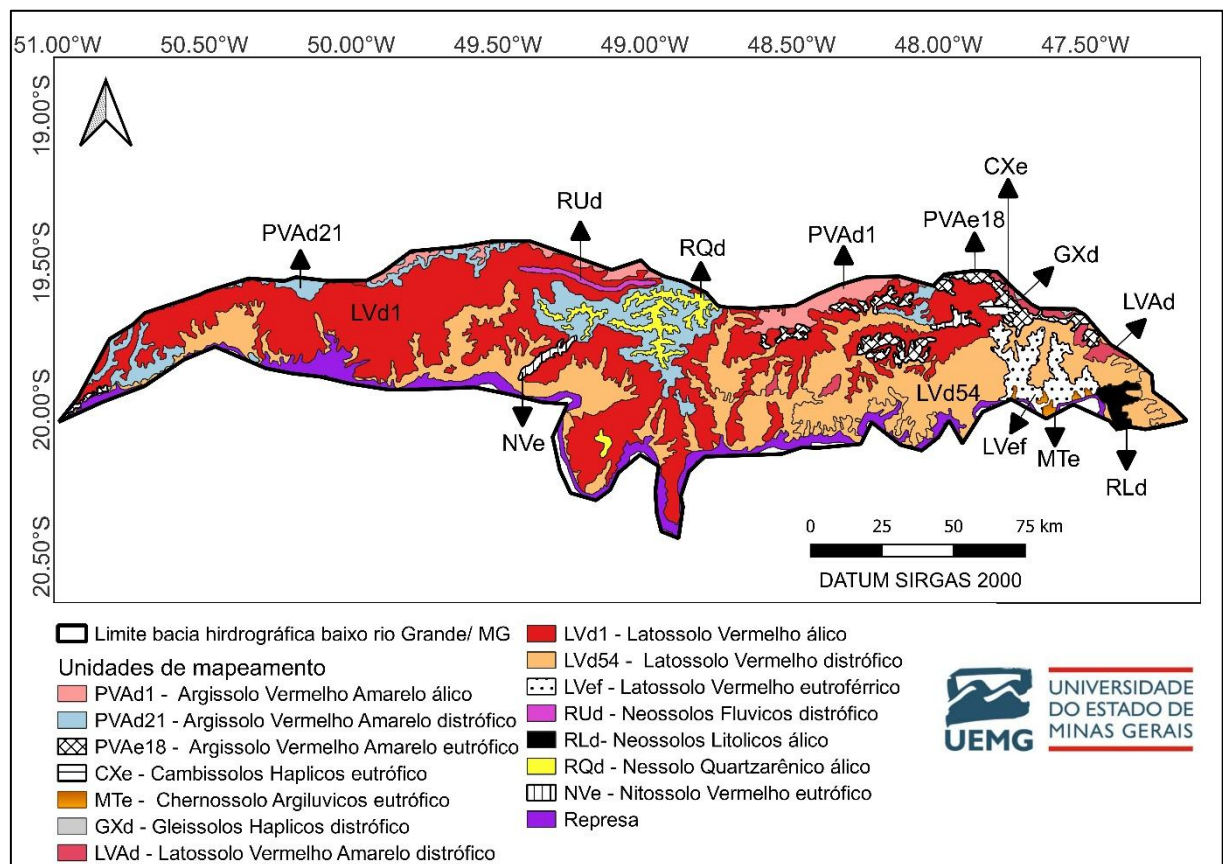


Fonte: Autores (2024).

Na Figura 3, na bacia do baixo rio Grande/MG temos os destaques das classes de solos presentes em toda extensão da bacia, foram encontradas sete ordens de solos (Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Gleissolos, Latossolos, Neossolos e Nitossolos). A maior área ocupada ocorre pelo Latossolo com fertilidade natural no horizonte B classificado como álico ou distrófico.

Os Latossolos caracterizam-se por serem solos profundos, bem drenados e com alta porosidade, o que proporciona condições ideais para o crescimento radicular em profundidade. Esses solos apresentam boa estrutura e são amplamente encontrados em regiões tropicais, sendo reconhecidos por sua estabilidade física e química. Soma-se a isso, quando eutróficos, possuem elevada fertilidade natural, com alta disponibilidade de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas. Essa característica os torna especialmente adequados para a agricultura, contribuindo para o cultivo de diversas culturas de maneira eficiente. Seu uso sustentável é crucial para manter a produtividade a longo prazo e preservar a qualidade ambiental da área (Ker, 1997).

Figura 3 - Classes de solo presente na bacia do baixo rio Grande/ MG.



Fonte: Autores (2024).

Na Tabela 1, observa-se a ordem das classes de solos presentes na bacia do baixo rio Grande/MG, representada pela quantidade de área ocupada por cada uma delas. O destaque para os Latossolos Vermelhos, que cobrem mais de 30% da área da bacia. Esses solos são

considerados de grande aptidão para a agricultura, com condições ideais para o cultivo de diversas culturas anuais de importância econômica para o Brasil. Para a cana-de-açúcar, os Latossolos Vermelhos são altamente favoráveis, pois sua boa drenagem, alta fertilidade e capacidade de retenção de água proporcionam um ambiente ideal para o desenvolvimento dessa cultura, favorecendo altos índices de produtividade (Ribeiro et al., 2019).

Os Argissolos são solos caracterizados pela presença de um horizonte B textural, o que os torna aptos para o cultivo de diversas culturas agrícolas, como a cana-de-açúcar, além de pastagens e silvicultura. Em áreas de relevo plano ou suavemente ondulado, podem ser utilizados para o cultivo da cana-de-açúcar e outras culturas, desde que sejam feitas as correções de acidez e a adubação adequada. No entanto, devido à sua alta suscetibilidade à erosão, esses solos exigem práticas de manejo conservacionista para evitar a degradação. Segundo Cunha et al. (2010), os Argissolos possuem profundidade média, são moderadamente drenados e apresentam horizonte B com coloração vermelho ou amarelo, baixa atividade de argila e alta saturação por bases.

O Cambissolo é caracterizado como um solo jovem, devido ao horizonte B incipiente, apresentando alto teor de silte em sua composição textural e estando em processo de formação. Por serem pouco desenvolvidos e conterem material originário (rocha), esses solos apresentam limitações em relevos declivosos, como dificuldades para mecanização, alta suscetibilidade à erosão e condições inadequadas para o desenvolvimento estrutural de culturas agrícolas, incluindo a cana-de-açúcar (Severiano et al., 2009).

Na BBRG, o Chernossolo eutrófico, com argila do tipo 2:1, se destaca pela alta fertilidade natural e pela elevada capacidade de armazenamento de água, características que favorecem a alta produtividade de diversas culturas agrícolas (Reatto et al., 2004). Para o cultivo de cana-de-açúcar, o Chernossolo eutrófico é altamente recomendado, pois suas propriedades físico-químicas proporcionam condições ideais para o desenvolvimento radicular e o crescimento vigoroso da cultura, resultando em elevados índices de produtividade.

O Gleissolo, caracterizado por sua coloração cinza, indica problemas de drenagem, com o lençol freático elevado em parte do ano, o que limita a disponibilidade de oxigênio para as raízes das plantas. Por essas condições, o Gleissolo não é ideal para o cultivo de cana-de-açúcar, a menos que sejam implementadas práticas de manejo específicas, como drenagem adequada, que permitam reduzir a saturação hídrica do solo. Lemos et al. (2013) sugerem que, como alternativa, o Gleissolo seja mais adequado para espécies adaptadas à restrição de oxigênio, como o arroz e o capim *Brachiaria humidicola*.

A presença de Neossolo Quartzarênico na BBRG indica um solo jovem ainda em formação, sem o horizonte B, conhecido como “caixa de água do solo”, o que reflete sua baixa capacidade de armazenamento hídrico. Esse tipo de solo ocorre em relevo plano ou suavemente ondulado, não apresentando limitações físicas para o aprofundamento do sistema radicular. No entanto, devido ao caráter álico ou distrófico, o desenvolvimento radicular é limitado, e a quantidade de água disponível para as plantas é reduzida, o que pode ser um desafio para o cultivo de culturas como a cana-de-açúcar.

O Neossolo Litólico, por ser caracterizado como um solo raso, com camada menor que cinquenta centímetros, apresenta baixa aptidão para o cultivo de cana-de-açúcar, devido às limitações relacionadas à profundidade reduzida, presença de rochas e declives acentuados. Essas condições elevam o risco de erosão e restringem o desenvolvimento adequado do sistema radicular da cultura. De acordo com Lepsch et al. (2015), o Neossolo Litólico é mais indicado para culturas perenes, caso a rocha matriz seja fragmentada, ou para áreas de reserva legal, caso a rocha matriz seja maciça.

O Nitossolo encontrado na BBRG, por ser eutrófico e apresentar alta fertilidade natural, elevado teor de cálcio, magnésio e potássio, baixa acidez e grande capacidade de armazenamento de água, é altamente favorável para o cultivo de cana-de-açúcar. Conforme Prado et al. (2022), a estrutura do Nitossolo, com formato em bloco e consistência dura, oferece suporte adequado para o desenvolvimento radicular da cultura, além de garantir boa disponibilidade hídrica, graças aos microporos presentes nos horizontes A e B, que retêm água de forma eficiente.

Tabela 1 - Ordem, Subordem e Grande Grupo dos solos da bacia do baixo rio Grande/ MG.

Ordem e Subordem	Grande Grupo	Área (ha)	(%)
Argissolo Vermelho Amarelo (PVA)	Eutrófico	59.534,76	3,14
Argissolo Vermelho Amarelo (PVA)	Distrófico	159.138,04	8,40
Argissolo Vermelho Amarelo (PVA)	Álico	61.798,59	3,26
Cambissolo Háplico (CX)	Eutrófico	5.041,67	0,27
Cambissolo Háplico (CX)	Álico	33,93	0,01
Chernossolo Argilúvico (MT)	Eutrófico	4.418,79	0,22
Gleissolo Háplico (GX)	Distrófico	1.291,18	0,07
Latossolos Vermelho Amarelos (LVA)	Distrófico	23.592,41	1,25
Latossolos Vermelhos (LV)	Distrófico	615.994,21	32,53
Latossolos Vermelhos (LV)	Álico	745.556,09	39,37

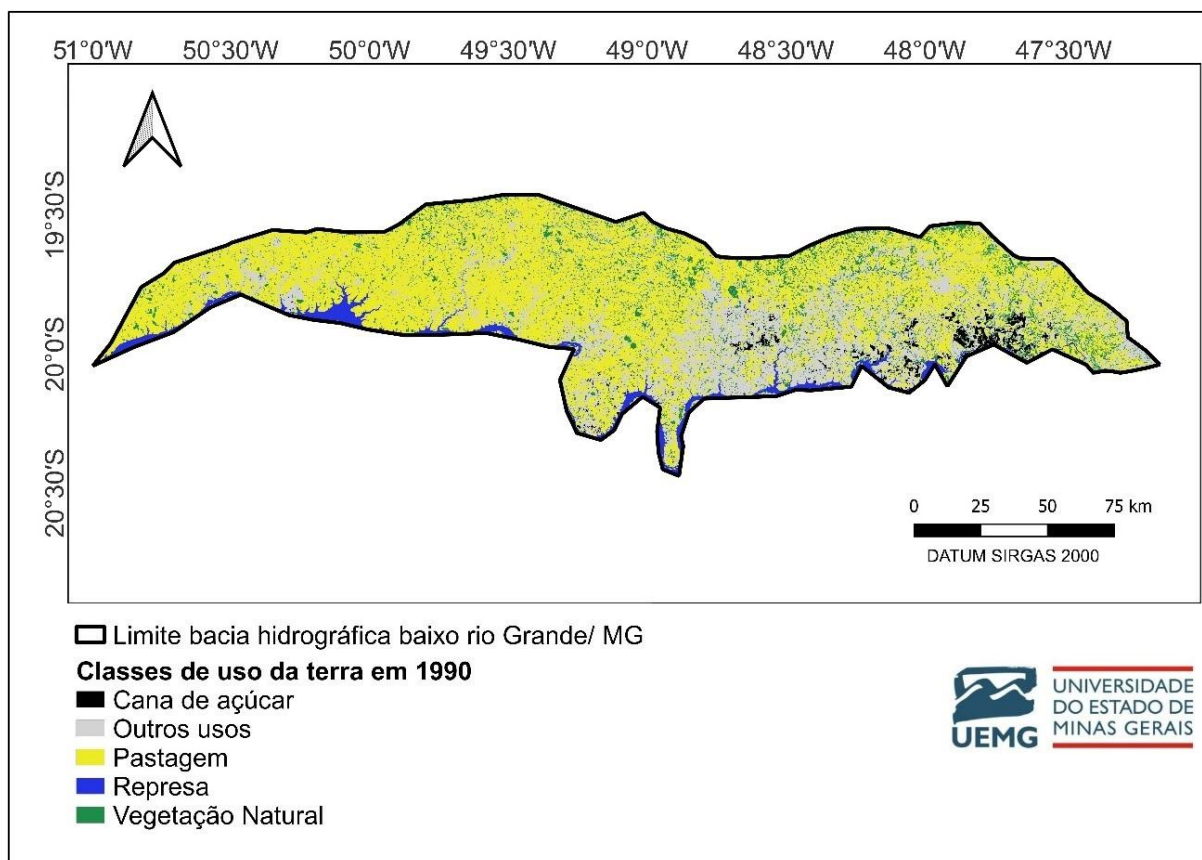
Neossolo Flúvico (RU)	Distrófico	9.333,45	0,49
Neossolo Litólico (RL)	Álico	14.717,83	0,78
Neossolo Quartzarênico (RQ)	Álico	42.837,31	2,26
Nitossolo Vermelhos (NV)	Eutrófico	12.350,45	0,65
Não classificado (represa, rios e outros)	-	138.109,66	7,29
Total		1.893.748,37	100,00

Fonte: Autores (2024).

A Figura 4 apresenta a cobertura vegetal e o uso da terra na bacia do baixo rio Grande/MG no ano de 1990. Nesse período, observa-se que as pastagens predominavam em praticamente toda a extensão da bacia, estando distribuídas em todas as direções e ocupando a maior parte da área. O uso do solo por pastagens pode provocar impactos ambientais significativos nas bacias hidrográficas, especialmente devido à ocorrência de erosão laminar e formação de sulcos. Esses processos tendem a se intensificar com o tempo, em grande parte por causa das altas pressões exercidas sobre o solo pelo pisoteio dos animais, o que compromete a sustentabilidade ambiental da bacia (Imhoff; Silva; Tormenna, 2000).

Sob a perspectiva da Teoria Geral dos Sistemas, esse cenário revela um desequilíbrio entre os elementos naturais e as intervenções antrópicas, afetando diretamente a resiliência da bacia hidrográfica. A perda dessa capacidade de autorregulação pode comprometer a integridade dos ecossistemas e a oferta de serviços ambientais essenciais. Diante disso, torna-se imprescindível repensar o uso da terra a partir de práticas sustentáveis, que considerem os limites ecológicos da paisagem e assegurem a manutenção dos serviços ecossistêmicos ao longo do tempo (Bertrand, 1972).

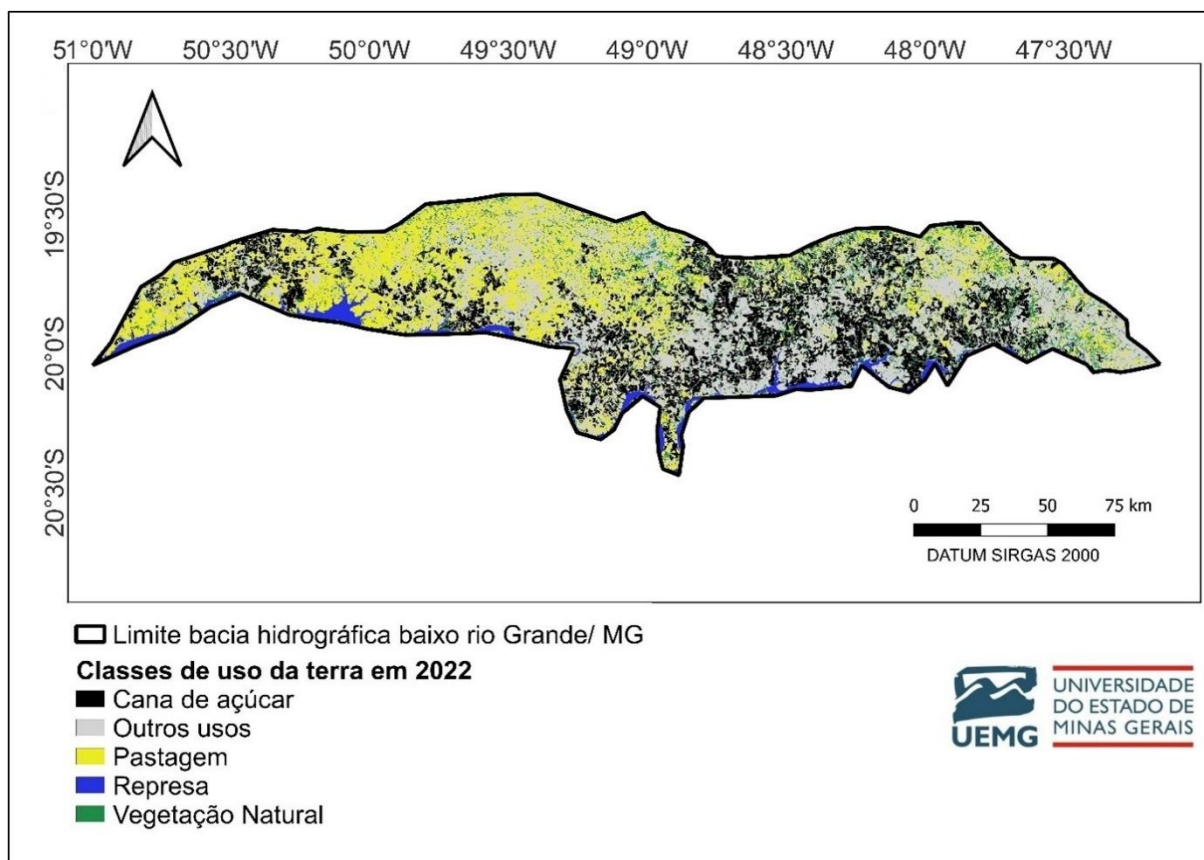
Figura 4 - Uso da terra na bacia do baixo rio Grande/ MG, no ano de 1990.



Fonte: Autores (2024).

A Figura 5 mostra a cobertura vegetal e uso da terra na bacia referente ao ano 2022. Em 2022 a cultura da cana-de-açúcar ampliou sua presença na bacia do baixo rio Grande/MG, destacando-se principalmente nas regiões centro-sul e centro-leste.

A expansão da cultura da cana-de-açúcar na bacia do baixo rio Grande/MG reflete uma tendência nacional, impulsionada pela crescente demanda por biocombustíveis e produtos derivados, como açúcar e etanol. Sob o ponto de vista econômico, essa expansão tem promovido importantes benefícios para as economias locais e regionais. Estudo realizado na região Centro-Oeste de Minas Gerais indicam que o avanço da cana impulsionou a criação e ampliação de serviços ligados às usinas, como transporte, manutenção de máquinas e logística. Ademais, o aumento do PIB per capita nos municípios está associado ao fortalecimento de serviços urbanos e comerciais, como saúde, educação e comércio local (Oliveira; Ferreira; Araújo, 2012).

Figura 5 - Uso da terra na bacia do baixo rio Grande/ MG, no ano de 2022.

Fonte: Autores (2024).

A Tabela 2 apresenta as mudanças nas classes de uso da terra na bacia do baixo rio Grande/MG entre 1990 e 2022. Em 1990, as pastagens predominavam, ocupando 50% da área total da bacia, seguidas por outros usos, vegetação nativa, represas e, em menor proporção, o cultivo de cana-de-açúcar. Com o passar dos anos, a produção de cana-de-açúcar cresceu de forma expressiva, alcançando 417.543 hectares em 2022, o que equivale a 22% da área total. Em contrapartida, a participação das pastagens reduziu para 25%, refletindo uma significativa conversão de uso da terra.

Esse avanço da cana-de-açúcar sobre áreas antes destinadas a pastagens acompanha também uma intensificação do setor sucroenergético em termos de produtividade. Com base nos dados obtidos pela aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA), verificou-se que as usinas e cana-de-açúcar apresentaram uma média geral de eficiência econômica de 57,1% no período de 2007 a 2016, com destaque para as unidades de grande porte, que demonstraram maior desempenho, evidenciando a ocorrência de economias de escala (Silva; Périco, 2022). Embora esse crescimento traga benefícios econômicos, ele também impõe importantes desafios

ambientais. A substituição de grandes áreas de pastagem e vegetação nativa pelo cultivo de cana-de-açúcar resulta na perda de biodiversidade, no aumento da erosão do solo e na redução da resiliência ecológica.

Além disso, estudos como os de Prado et al. (2021), Gouveia et al. (2022) e Toniolo et al. (2024) mostram que a intensificação agrícola pode comprometer a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos, sobretudo em bacias já submetidas a múltiplos usos da água.

Na bacia do baixo rio Grande/ MG, o avanço da cana-de-açúcar de 1,84% para 22,05% da área total no período analisado ocorreu, principalmente, às custas das áreas ocupadas pelas pastagens e vegetação nativa, evidenciando os impactos sobre os ecossistemas locais. A expansão da cana-de-açúcar na bacia do baixo rio Grande/MG, substituindo pastagens e vegetação nativa, reflete tendências observadas em outras regiões. Almeida, Calijuri e Pinto (2013) identificaram que a expansão da cana-de-açúcar em Minas Gerais ocorreu principalmente sobre áreas de pastagens e agricultura, corroborando com o padrão observado na bacia do baixo rio Grande/ MG.

Tabela 2 - Classe de uso da terra encontrada na bacia do baixo rio Grande/MG para o ano de 1990 e 2022.

Classes de uso da terra	Área (ha) - 1990	(%) - 1990	Área (ha) - 2022	(%) - 2022
Cana-de-açúcar	34.878,77	1,84	417.543,528	22,05
Outros Usos	501.133,25	26,46	760.105,13	40,14
Pastagem	1.054.923,19	55,70	474.923,443	25,08
Represa	81.795,12	4,32	71.079,675	3,75
Vegetação Nativa	221.054,45	11,67	170.133	8,98
Total	1.893.784,78	100,00	1.893.784,78	100,00

Fonte: Autores (2024).

A Figura 6 destaca a variação percentual e absoluta das áreas ocupadas por diferentes classes de uso da terra, incluindo cana-de-açúcar, pastagem, vegetação nativa, outros usos e represas para os anos de 1990 e 2022 na bacia do baixo rio Grande/MG.

O mapa de calor (Figura 6) compara as áreas de uso do solo entre 1990 e 2022, evidenciando variações significativas nas diferentes classes de uso da terra ao longo desse período. Observa-se um aumento expressivo na área ocupada pela cana-de-açúcar, que cresceu de 34.878,77 hectares em 1990 para 417.543,53 hectares em 2022, refletindo um impressionante crescimento de 1.097,13%. Esse padrão de expansão da cana-de-açúcar está alinhado com os resultados encontrados no estudo de Almeida e Gouveia (2024), analisaram o uso e a ocupação da terra na bacia hidrográfica do ribeirão Frutal/ MG. Ambos os estudos ressaltam o papel preponderante das culturas agrícolas, especialmente a cana-de-açúcar, como principal agente transformador das paisagens locais nas últimas décadas.

Enquanto isso, a classe Outros Usos registrou um aumento de 51,68%, ao passo que as áreas destinadas à Pastagem sofreram uma redução drástica de 54,98%, indicando uma forte conversão dessas áreas para outros fins.

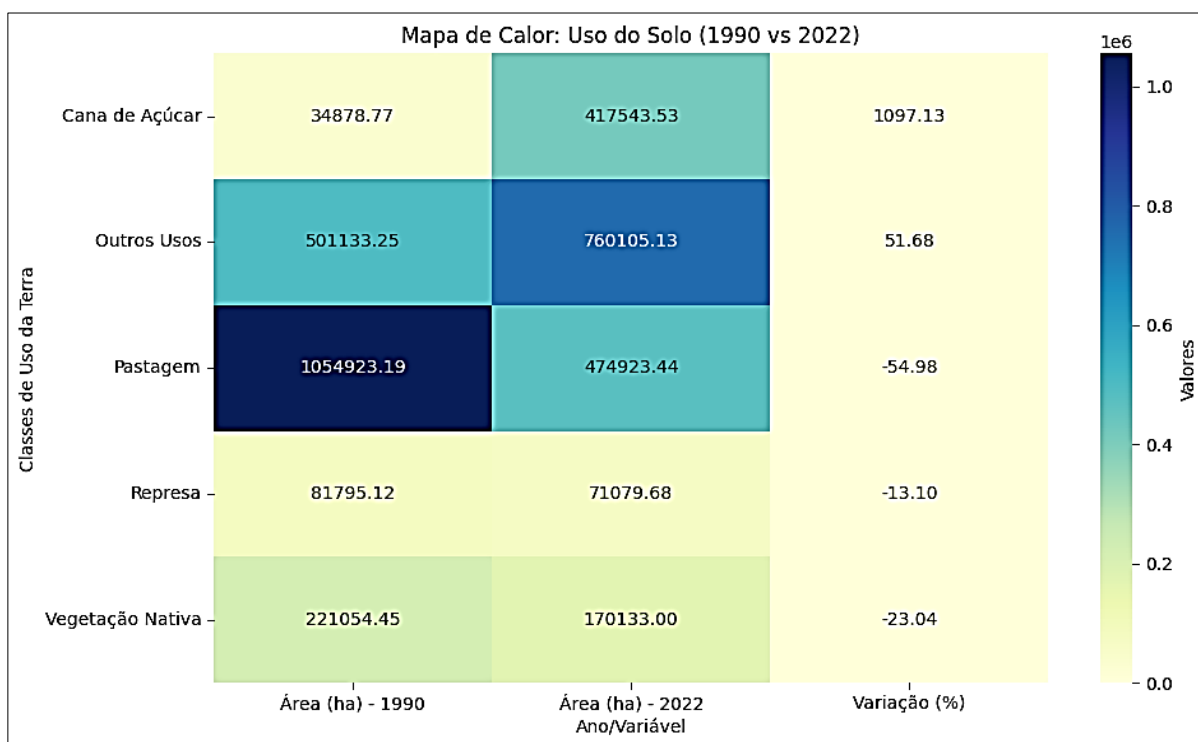
A Vegetação Nativa também apresentou uma perda substancial, passando de 221.054,45 hectares em 1990 para 170.133,00 hectares em 2022, uma redução de 23,04%.

Já, as áreas de Represas registraram uma diminuição leve, de 13,10%. Esses dados demonstram uma clara tendência de substituição de áreas naturais e pastagens por atividades agrícolas e outros tipos de ocupações, evidenciando mudanças nos padrões de uso do solo nas últimas três décadas.

A substituição de vegetação nativa e pastagens por monoculturas de cana-de-açúcar, embora economicamente vantajosa, impõe sérias ameaças à biodiversidade, à qualidade do solo e aos recursos hídricos. Para mitigar esses impactos, é urgente incorporar princípios de sustentabilidade à gestão territorial, priorizando práticas agroecológicas, restauração de áreas degradadas e preservação de remanescentes florestais (Embrapa, 2016).

Nesse contexto, sistemas de manejo da fertilidade, como a adubação mista, têm se destacado por melhorar os atributos microbiológicos do solo. Segundo Rambo et al. (2014), práticas que mantêm resíduos vegetais e preservam a vegetação nativa contribuem significativamente para o aumento de carbono e nitrogênio microbiano, elementos cruciais para a sustentabilidade agrícola. Esses dados reforçam a importância de estratégias que equilibrem produtividade e preservação ambiental, especialmente em regiões de uso intensivo da terra, como a bacia do baixo rio Grande/MG.

Figura 6 - Mapa de calor comparativo do uso do solo na bacia do baixo rio Grande/MG entre 1990 e 2022.



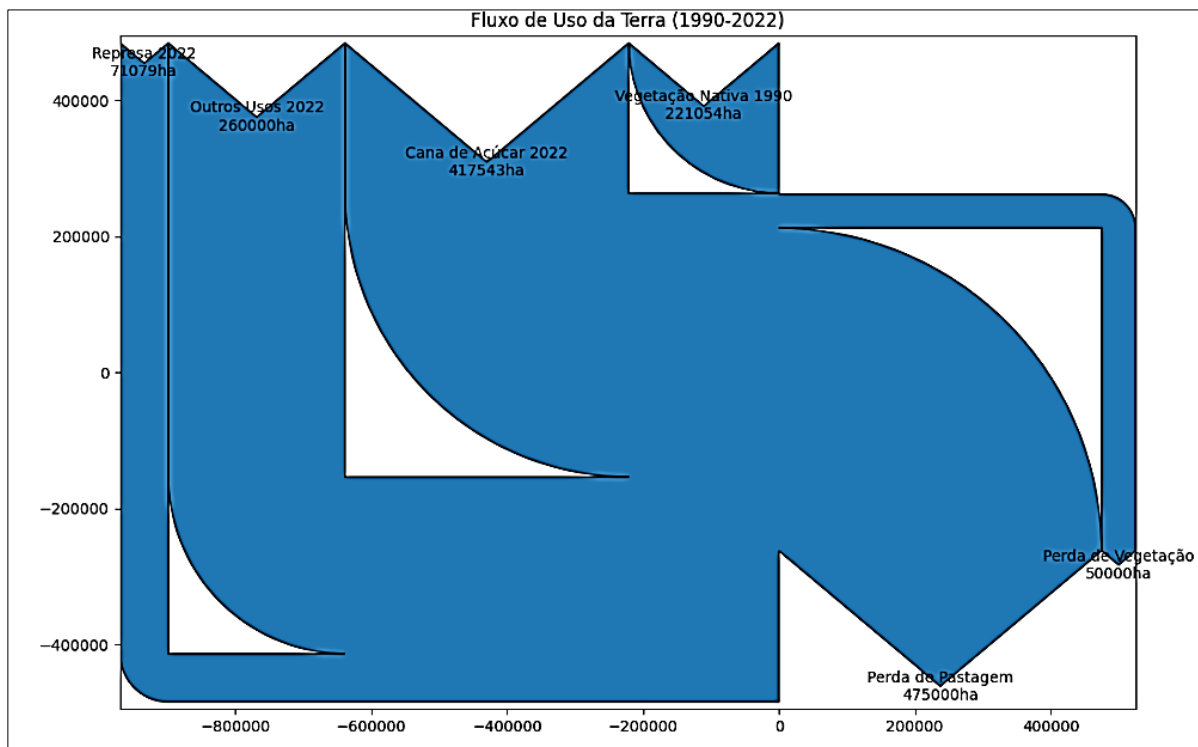
Fonte: Autores (2024).

A Figura 7 é um diagrama de Sankey, ilustra os fluxos de uso do solo entre diferentes categorias entre 1990 e 2022 da bacia do baixo rio Grande/MG.

O gráfico Sankey (Figura 7) destaca transformações marcantes no uso da terra na bacia do baixo rio Grande/MG entre 1990 e 2022. Durante esse período, houve uma redução de 475.000 hectares de áreas de pastagem e 50.000 hectares de vegetação nativa, grande parte convertida para o cultivo de cana-de-açúcar, que alcançou 417.543 hectares, e para outros usos, com um aumento de 260.000 hectares. Essas alterações refletem uma intensa expansão agrícola e urbanização, enquanto as áreas de represas sofreram apenas uma leve redução, atingindo 71.079 hectares.

O principal fluxo identificado foi a conversão de pastagens em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, evidenciando a necessidade de políticas de gestão sustentável que conciliem o uso do solo com a preservação ambiental. Novaes et al. (2023) examinaram as mudanças no uso das terras associadas à expansão da cana-de-açúcar no Brasil e descobriram que essa conversão teve efeitos variados nos estoques de carbono do solo, dependendo da textura e da fertilidade natural do solo.

Figura 7 - Diagrama de Sankey do fluxo de uso do solo na bacia do baixo rio Grande/MG entre 1990 e 2022.



Fonte: Autores (2024).

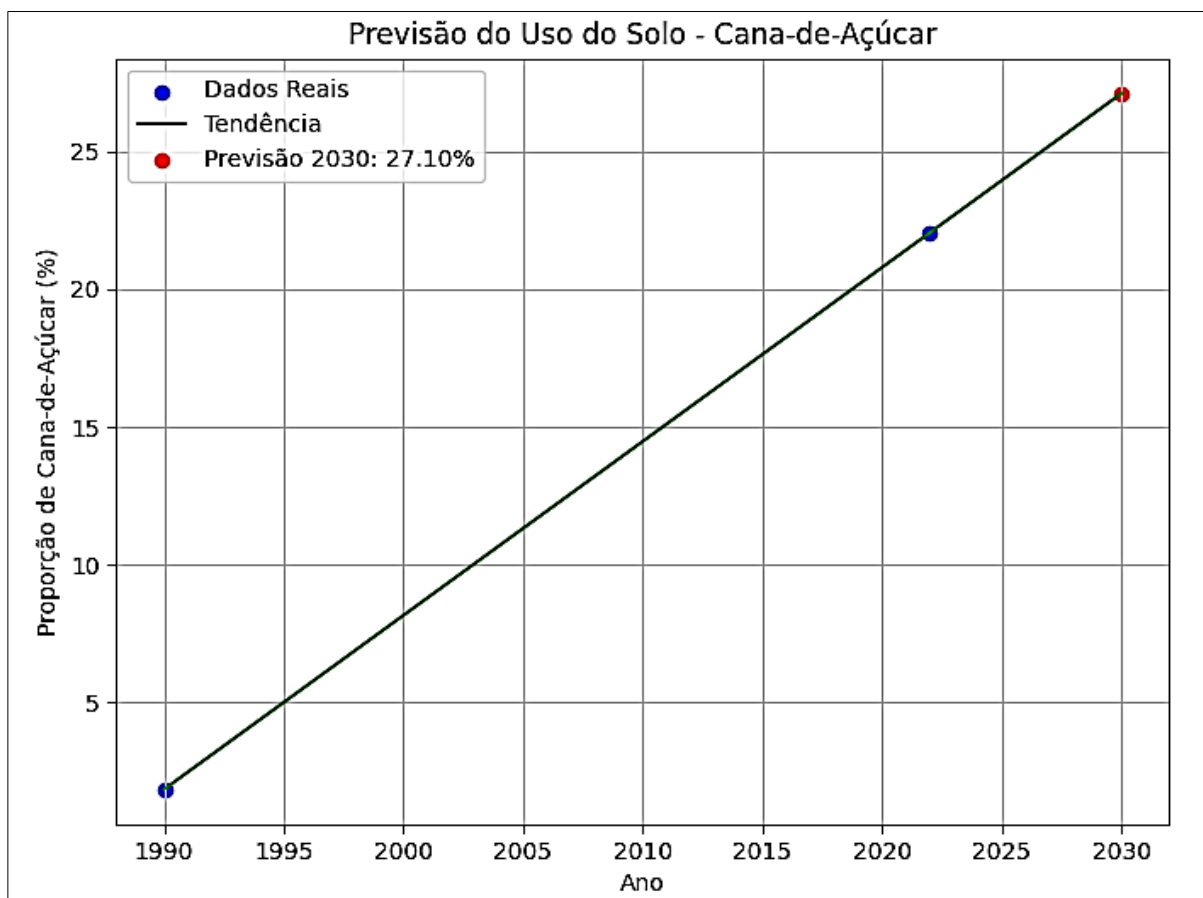
A Figura 8 mostra a tendência do aumento da área de uso do solo pela cana-de-açúcar na bacia do baixo rio Grande/MG.

Os resultados mostram que a área ocupada pela cana-de-açúcar na bacia do baixo rio Grande/MG aumentou de cerca de 2,0% em 1990 para aproximadamente 22% em 2022, indicando um crescimento expressivo no uso da terra. Projeta-se que essa ocupação atinja 27,1% da área total da bacia até 2030 (Figura 8).

A expansão da cana-de-açúcar na bacia do baixo rio Grande/MG, substituindo pastagens e vegetação nativa, reflete uma tendência observada em outras regiões do Brasil. Essa expansão traz benefícios econômicos, mas também gera preocupações ambientais significativas. A substituição de áreas de vegetação nativa por monoculturas de cana pode levar à perda de biodiversidade e alterações nos ecossistemas locais. Além disso, a conversão de pastagens em canaviais pode resultar no deslocamento da atividade pecuária para outras áreas, potencialmente aumentando a pressão sobre remanescentes de vegetação nativa.

Adami et al. (2020) projetaram que, para atender à crescente demanda por biocombustíveis, a produção brasileira de etanol deve aumentar dos atuais 34 bilhões de litros por ano para 54 bilhões até 2030. Esse aumento na produção implicará a abertura de pelo menos 35 mil km² de novas lavouras de cana-de-açúcar, exercendo pressão significativa sobre os biomas. O cerrado será a região mais ameaçada por essa expansão, com estimativas apontando que, até 2030, cerca de 19 mil km² do bioma sofrerão uma drástica redução na diversidade de espécies de mamíferos. Diante desse cenário, torna-se evidente que a sustentabilidade não pode se limitar a ações técnicas ou medidas ambientais pontuais; ela deve ser compreendida como um processo político e transformador, capaz de reconfigurar as relações entre sociedade, natureza e economia, de modo a promover o equilíbrio necessário entre desenvolvimento e conservação ambiental (Santos, 2009).

Figura 8 - Previsão do uso do solo pela cultura da cana-de-açúcar na bacia do baixo rio Grande/MG para o ano de 2030.



Fonte: Autores (2024).

Considerações Finais

Os resultados evidenciam a significativa expansão da cana-de-açúcar na bacia do baixo rio Grande/ MG entre 1990 e 2022, com crescimento de mais de 1.097%. Essa expansão ocorreu, sobretudo, em áreas anteriormente ocupadas por pastagens e vegetação nativa, implicando alterações relevantes nos padrões de uso do solo.

Embora a cultura da cana-de-açúcar seja economicamente relevante, a rápida conversão de áreas naturais demanda estratégias robustas de manejo sustentável para mitigar os impactos ambientais, como a perda de biodiversidade e o comprometimento dos recursos hídricos.

Recomenda-se o monitoramento contínuo da região, aliado a políticas públicas que equilibrem o desenvolvimento agrícola e a preservação ambiental.

Este estudo ressalta a importância de iniciativas que promovam a sustentabilidade, assegurando a resiliência da bacia hidrográfica frente as pressões do avanço agrícola e garantindo a qualidade ambiental para as gerações futuras.

Referências

- ADAMI, M.; MIRANDA, E. E.; AGUIAR, D. A.; GARAGORRY, F. L. Potential impact of sugarcane expansion on mammalian biodiversity in Brazil. **Land**, v. 9, n. 12, p. 506, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9120506>. Acesso em: 31 set. 2024.
- ALMEIDA, T. S.; CALIJURI, M. L.; PINTO, L. B. Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar para o estado de Minas Gerais com base em regressões múltiplas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 352-355, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300011>. Acesso em: 21 dez. 2024.
- ALMEIDA, B. V. de; GOUVEIA, R. G. L. de. Uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do ribeirão Frutal de 1990 até 2020. **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 22, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.30681/rcaa.v2 2i1.12364>. Acesso em: 31 dez. 2024.
- BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: Esboço metodológico. **Caderno de Ciências da Terra**, n.13, p.1-51, 1972.
- CARVALHO, S. P.; MARIN, J. O. B. Agricultura familiar e agroindústria canavieira: impasses sociais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, v. 49, n. 3, p. 681-707, 2011.
- CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, D. M. S.; FEIGL, B. J.; PIMENTEL, L. G.; LISBOA, I. P.; GMACH, M. R.; VARANDA, L. L.; MORAIS, M. C.; SATIRO, L. S.; POPIN, G. V.; PAIVA, S. R.; SANTOS, A. K. B.; VASCONCELOS, A. L. S.; MELO, P. L. A.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 78, n. 1, e20190100, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0049>. Acesso em: 7 nov. 2024.

CORTEZ, L. A. B.; LEAL, M. R. L. V.; NOGUEIRA, L. A. H. 40 Years of the Brazilian Ethanol Program (Proálcool): relevant public policies and events throughout its trajectory. **Bioenergy Research**, New York, v. 9, n. 1, p. 1-13, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9665-5>. Acesso em: 16 out. 2024.

CUNHA, T. J. F.; PETRERE, V. G.; SILVA, D. J.; MENDES, A. M. S.; MELO, R. F.; OLIVEIRA, M. B. N.; ALVAREZ, I. A. **Principais solos do semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo**. Embrapa, 2010.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro**. Embrapa: GeoInfo, 2024. Disponível em: <https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/uuid/2a771bb5-6156-4a60-ae9c-c4cba269f315>. Acesso em: 31 dez. 2024.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Recuperação e manejo de áreas degradadas**. Brasília, DF: Embrapa, 2016. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/13054/1/CNPM_ADOC.13983598.pdf. Acesso em: 2 jan. 2025.

FRITZSONS, E.; MANTOVANI, L. E.; AGUIAR, A. V. Relação entre altitude e temperatura: uma contribuição ao zoneamento climático no estado do Paraná. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 10, n. 1, p. 49-64, 2008.

GOUVEIA, R. G. L.; PEREIRA, G. T.; PISSARRA, T. C. T.; MARTINS FILHO, M. V.; SILVA, M. M. A. P. M.; VALLE JUNIOR, R. F. Influência do uso e cobertura da terra na qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Uberabinha (MG). **Revista Geonorte**, v. 13, n.41,p.167–190,2022. DOI: [10.21170/geonorte.2022.V.13.N.41.167.190](https://doi.org/10.21170/geonorte.2022.V.13.N.41.167.190)

GOUVEIA, R. G. L.; BARBOSA, G. R. Análise temporal do uso da terra na bacia do Rio Grande no estado de Minas Gerais. **Geofronter**, v. 9, 2023. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/GEOF/article/view/7732>. Acesso em: 31 dez. 2024.

HASUI, Y.; HARALYI, N. L. E. Aspecto lito-estruturais e geofísicos Soerguimento do Alto Paranaíba. **Geociências**, São Paulo, Editora UNESP, v. 10, p. 57-77, 1991.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Banco de Informações Ambientais. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/23382-banco-de-informacoes-ambientais.htm> 1. Acesso em: 2 jan. 2024.

IDE-SISEMA. **Infraestrutura de dados espaciais do sistema estadual de meio ambiente e recursos hídricos**. Belo Horizonte: IDE-Sisema, 2022. Disponível em: <https://idesi.sema.meioambiente.mg.gov.br/webgis> Acesso em: 3 jan. 2024.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENNA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1493-1500, 2000.

KER, J. C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Revista Geonomos**, v. 5, n. 1, p. 17-40, 1997. Disponível em: https://periodicos.ufmg.br/index.php/re_vistageonomos/article/view/11493/8231. Acesso em: 3 jan. 2024.

LEMOS, J. O.; SILVA, C. M. S.; MACHADO, P. L. O.; PEREIRA, M. G.; SILVA, J. O. P. Características químicas de um Gleissolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 6, p. 123-134, 2013. Disponível em: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-02/0100_68_983.pdf. Acesso em: 3 jan. 2024.

LEPSCH, I. F.; ESPINDOLA, C. R.; VISCHI FILHO, O. J.; HERNANI, L. C.; SIQUEIRA, D. S. **Manual para levantamento utilitário e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 170p.

MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomass–Coleção 6.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura/>. Acesso em: 01 out. 2023.

NASCIMENTO, D. C.; BERBERT, C. P.; RIBEIRO, B. T. Electrochemical attributes of water from Cerrado wetlands (Veredas), Triângulo Mineiro region, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 1, p. 11-21, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180002>.

NOVAES, R. M. L.; LA SCALA, N.; CERRI, C. C.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P. Land use change and soil carbon stocks in the expansion of sugarcane cultivation in Brazil. **Land Use Policy**, v. 120, p. 106431, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106431>.

OLIVEIRA, E. G.; FERREIRA, M. E.; ARAÚJO, F. M. Diagnóstico do uso da terra na região Centro-Oeste de Minas Gerais, Brasil: a renovação da paisagem pela cana-de-açúcar e seus impactos socioambientais. **Sociedade & Natureza**, v. 24, n. 3, p. 545–555, 2012.

PRADO, J. R. S.; FIGUEIREDO, D. M.; DORES, E. F. G.; HONGYU, K.; DELFINO, A. J. G.; RODRIGUES, D. V. B. Variação da qualidade da água em relação à sazonalidade e ao uso da terra no sul da região amazônica. **Caderno Prudentino de Geografia**, n. 43, v. 2, p. 159-184, 2021. Disponível em: <https://revista.fct.unesp.br/index.php/cpg/article/view/7676>

PRADO, M. F.; BORGES, A. R.; OLIVEIRA, M. F. de; MARTINS, L. F. B.; MAGALHÃES, V. H. S. **Os efeitos da compactação do solo nas taxas fotossintéticas e taxa respiratórias do milho, braquiara e colômbio**. CICURV-Congresso de Iniciação Científica da Universidade de Rio Verde, 2022.

RAMBO, J. R.; GOUVEIA, R. G. L.; BEN, A. K. A. N.; BAYER, C.; TOMAZI, M. Atributos microbiológicos do solo sob distintos sistemas de manejo de fertilidade. **Cadernos de Agroecologia**, v. 9, n. 4, p. 1-12, 2014.

REATTO, A.; MARTINS, E. S.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, A. V.; CARVALHO JR., O. A. **Mapa Pedológico digital – SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 31p.

RIBEIRO, J. M.; FRAZÃO, L. A.; FERNANDES, L. A.; SAMPAIO, R. A.; CARDOSO, P. H. S.; OLIVEIRA, A. L. G. Fertilidade do solo e estoques de carbono e nitrogênio sob sistemas agroflorestais no Cerrado Mineiro. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 913-923, 2019.

SANTOS, M. **A natureza do espaço: técnica e tempo, razão e emoção**. 4. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2009.

SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; DIAS JÚNIOR, M. Potencial de uso e qualidade estrutural de dois solos cultivados com cana-de-açúcar em Goianésia (GO). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 159–168, jan. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100017>

SILVA, G. M. C. D.; PÉRICO, A. E. Eficiência e sustentabilidade: uma análise econômica, social, ambiental e sustentável das usinas paulistas de cana-de-açúcar. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 60, n. 3, p. e238512, 2022. DOI: [10.1590/1806-9479.2021.238512](https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.238512).

SOUSA, S. L.; ESDRAS, M. L.; FIGUEIREDO, L. V. R. N. A ascensão da agropecuária e seus reflexos sobre as estruturas socioespaciais de povos e comunidades tradicionais no Médio São Francisco Mineiro. **Geosul**, Florianópolis, v. 35, n. 74, p. 333-356, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/geosul/article/download/1982-5153.2020v35n74p333/42969/255585>. Acesso em: 31 dez. 2024.

TONIOLO, B. P.; SIMONETTI, V. C.; LOURENÇO, R. W.; CUNHA E SILVA, D. C. Análise da interferência antrópica na qualidade das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Cotia (SP). **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – GeAS**, São Paulo, v. 13, n. 1, p. 1–35, 2024. DOI: [10.5585/2024.23004](https://doi.org/10.5585/2024.23004).

VESTENA, L. R.; SANTOS, R. A. A.; CAMARGO FILHO, M. Dinâmica temporo-espacial da cobertura da terra na área de manancial de Guarapuava, Paraná. **Geosul**, Florianópolis, v. 39, n. 90, p. 67-90, mai./ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2024.e79237>. Acesso em: 2 jan. 2025.

Recebido em 18 de março de 2025.

Aceito em 18 julho de 2025.

Publicado em 25 de agosto de 2025.