



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Caracterização de Fitofisionomias do Cerrado por meio de Imagens Ópticas obtidas com RPAS

Felipe Gomes Moreira¹, Maria Luiza de Azevedo¹, Fernando Coelho Eugenio¹, Bruno Lopes de Faria², Eric Bastos Gorgens¹ ¹ Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. MGC 367, Km 583, nº 5000, Alto da Jacuba, Diamantina, MG, Brasil. e-mails: felipe.gomes@ufvjm.edu.br (Autor Correspondente), marialuiza.azevedo@ufvjm.edu.br, fernando.eugenio@ufvjm.edu.br, eric.gorgens@ufvjm.edu.br ² Professor Efetivo, Campus Diamantina, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais. Fazenda Biribiri, s/n próximo ao Aeroporto, Diamantina, MG, Brasil. E-mail: blfaria@gmail.com.

Artigo recebido em 18/10/2024 e aceito em 19/02/2025

RESUMO

A combinação de técnicas fotogramétricas digitais avançadas, sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS) e algoritmos de análise tridimensional, como o *Structure-from-Motion* (SfM), tem transformado o monitoramento de ecossistemas. Este estudo avalia o potencial de imagens RGB acopladas a RPAS para caracterizar cinco fitofisionomias do Cerrado brasileiro: Campo Rupestre, Campo Sujo, Cerrado Sentido Restrito, Floresta Estacional Semidecidual e Pastagens. Por meio de métricas estruturais derivadas de nuvens de pontos 3D, foram identificados padrões distintos de altura, complexidade vertical e distribuição estatística da vegetação. Os resultados demonstraram a eficácia do método na discriminação das formações, destacando-se a capacidade de capturar a heterogeneidade de ambientes complexos, como a Floresta Estacional Semidecidual. Sensores RGB mostraram-se economicamente viáveis para monitoramento em larga escala, com implicações diretas para gestão de recursos naturais, planejamento territorial e conservação de biomas ameaçados. A metodologia proposta oferece um protocolo acessível para reduzir custos de monitoramento ambiental, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

Palavras-chave: Análise estrutural. Monitoramento ambiental. Sensoriamento remoto. Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas. Structure-from-Motion.

Characterization of Cerrado Vegetation Types Using Optical Images Acquired by RPAS

ABSTRACT

The integration of advanced digital photogrammetric techniques, Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS), and three-dimensional analysis algorithms such as Structure-from-Motion (SfM) has revolutionised ecosystem monitoring. This study evaluates the potential of RPAS-coupled RGB imagery to characterise five vegetation types within the Brazilian Cerrado: Rupestrian Grassland, Shrub Grassland, Strict Senu Cerrado, Semi-deciduous Seasonal Forest, and Pastures. Through structural metrics derived from 3D point clouds, distinct patterns of vegetation height, vertical complexity, and statistical distribution were identified. The findings demonstrated the method's efficacy in discriminating between vegetation formations, particularly its capacity to capture the heterogeneity of complex environments such as the Semi-deciduous Seasonal Forest. RGB sensors proved to be a cost-effective solution for large-scale monitoring, with direct implications for natural resource management, land-use planning, and the conservation of threatened biomes. The proposed methodology offers an accessible protocol to reduce environmental monitoring costs, aligning with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: Structural analysis. Environmental monitoring. Remote sensing. Remotely Piloted Aircraft Systems. Structure-from-Motion.

Introdução

A preservação da biodiversidade constitui um pilar central para a sustentabilidade global no século XXI, frente às mudanças ambientais

aceleradas por atividades humanas (Maxwell et al., 2020; Raven & Wackernagel, 2020). Essa pressão antrópica não apenas induz à degradação progressiva de habitats, mas também amplifica

taxas de extinção biológica em escalas sem precedentes, colocando em risco serviços ecossistêmicos vitais como a provisão de água potável, a polinização e a regulação do clima (Oguh et al., 2021; Sharafatmandrad & Khosravi Mashizi, 2021). Tais impactos reverberam diretamente sobre sistemas socioeconômicos, ameaçando a estabilidade alimentar, saúde pública e resiliência de economias dependentes do setor primário (Gomiero, 2016; Gupta, 2019; Zarei et al., 2021).

Em resposta a esse cenário, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU enfatizam a necessidade harmonizar proteção ecossistêmica com uso sustentável dos recursos naturais (United Nations, 2016), metas que se configuram como dualidades indissociáveis para a conservação da biodiversidade e adaptação humana às mudanças climáticas (Linhares et al., 2023).

O Brasil, como detentor de uma das maiores biodiversidades do planeta, ocupa uma posição estratégica na agenda global de conservação. Dentre seus biomas, o Cerrado destaca-se como um dos mais ameaçados e, simultaneamente, um dos mais relevantes para a estabilidade ecológica nacional (Vieira et al., 2022). Classificado como hotspot de biodiversidade, abrange desde campos abertos até florestas estacionais densas, com elevado endemismo e funcionalidade ecológica (Oliveira et al., 2019; Ellwanger et al., 2022). Este domínio fitogeográfico sustenta processos biogeoquímicos fundamentais como a ciclagem hídrica, estoque de carbono e a proteção de nascentes, essenciais para a estabilidade ambiental regional (Costa-Coutinho et al., 2019; Latrubesse et al., 2019; Siqueira et al., 2021). Contudo, pressões como a expansão agropecuária, à urbanização desregrada e à fragmentação de habitats, têm induzido alterações estruturais irreversíveis na integridade desse bioma, reduzindo sua capacidade de suporte ecológico e ameaçando sua funcionalidade como corredor biogeográfico (Lopes dos Santos et al., 2021; Slattery & Fenner, 2021; Rosan et al., 2022; Pompeu et al., 2024). Assim, o monitoramento e a avaliação da dinâmica da cobertura vegetal se tornam cruciais para a implementação de políticas de conservação eficazes.

Para reverter essas tendências, a avaliação quantitativa e qualitativa das fitofisionomias do Cerrado torna-se indispensável. No entanto, essa tarefa enfrenta desafios metodológicos multifatoriais. Métodos tradicionais baseados em

inventários de campo, apesar da precisão, enfrentam desafios logístico e limitações intrínsecas de escalabilidade temporal e espacial (Dettmann et al., 2022). Por outro lado, técnicas de sensoriamento remoto orbital, embora capazes de cobrir grandes extensões, não conseguem discriminar adequadamente estruturas vegetais devido às limitações de resolução espacial e às interferências atmosféricas (Araus et al., 2022). Essa dicotomia entre precisão e praticidade demanda abordagens alternativas que conciliem acurácia analítica com viabilidade operacional.

Diante desse cenário, a fotogrametria aérea digital surge como alternativa promissora, combinando inovação tecnológica e custo reduzido. Sistemas de aeronaves remotamente pilotadas (RPAS) equipados com câmeras ópticas RGB, têm demonstrado eficácia na geração de nuvens de pontos 3D de alta densidade, capturando detalhes estruturais da vegetação em resoluções centimétricas (Goodbody et al., 2019; Dainelli et al., 2021; Rábago & Portuguese-Castro, 2023). A aplicabilidade dessa técnica é particularmente valiosa em ecossistemas heterogêneos como o Cerrado, cuja complexidade fisionômica demanda ferramentas capazes de quantificar gradientes estruturais sutis.

A heterogeneidade intrínseca do Cerrado, com suas fitofisionomias distintas (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012), configura um cenário ideal para explorar essas técnicas. Pesquisas recentes evidenciam a aplicabilidade das nuvens de pontos na avaliação estrutural da vegetação em diferentes ecossistemas, destacando sua relevância em análises de complexidade e diversidade funcional (Castro et al., 2021; Müllerová et al., 2021). Essa abordagem representa uma oportunidade única para monitorar biomas sob pressão antrópica, como as fitofisionomias campestres, essenciais para a integridade biótica e políticas públicas de manejo sustentável.

Este estudo propõe preencher essa lacuna ao investigar a capacidade de sensores ópticos RGB acoplados a RPAS na discriminação de fitofisionomias do Cerrado com base em métricas estruturais derivadas de nuvens de pontos 3D. Parte-se da hipótese de que variações intrínsecas na arquitetura vegetal – como altura da vegetação, densidade e complexidade vertical – geram assinaturas estruturais únicas, detectáveis mesmo por sensores ópticos de baixo custo e constituem indicadores viáveis para monitoramento em larga escala. Essa proposição alinha-se aos avanços na

ecologia funcional, que reconhecem a estrutura vertical como indicador para diversidade biológica e resiliência ecossistêmica (Atkins et al., 2023; Moudry et al., 2023). A validação dessa técnica num contexto de alta complexidade fisionômica, não apenas preenche lacunas metodológicas, mas também contribuem para o desenvolvimento de um protocolo acessível para o monitoramento de áreas sob pressão antrópica crescente, alinhando-se

diretamente às metas do ODS 15.5 e subsidiando políticas públicas de conservação e restauração.

Material e métodos

A pesquisa foi conduzida em áreas das mesorregiões do Jequitinhonha e Central Mineira, no nordeste de Minas Gerais, Brasil, e abrangeu os municípios de Aricanduva, Capelinha, Curvelo, Diamantina, São Gonçalo do Rio Preto (FIG. 1).

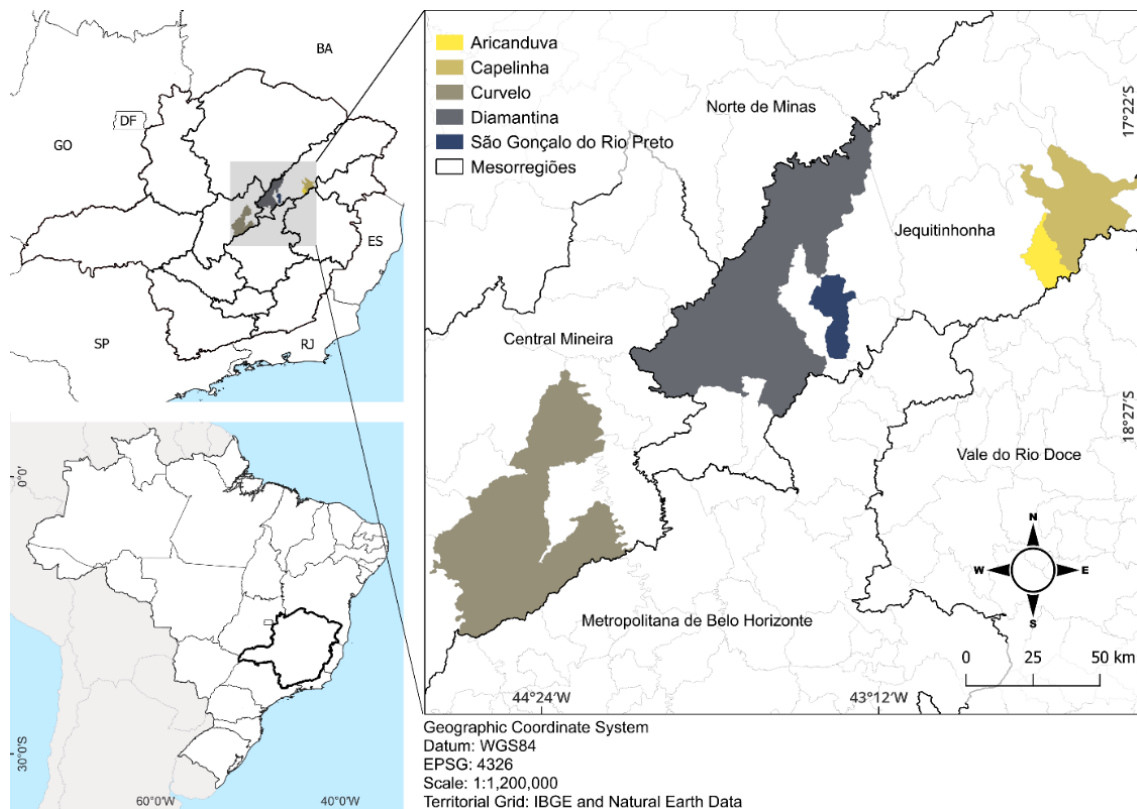


Figura 1. Mapa de Localização das Regiões de Coleta de Dados em Minas Gerais

Para a captura das imagens utilizou-se um RPAS multirotor, do modelo DJI Phantom 3 Standard, equipado com uma câmera RGB integrada modelo FC300C, com sensor CMOS Panasonic de 1/2,3 polegadas e resolução de 12 MP. Essa configuração foi selecionada devido à sua acessibilidade econômica e capacidade de gerar imagens de alta resolução espacial. Os planejamentos e as execuções dos voos foram realizados no aplicativo PIX4Dcapture, que permitiu um controle preciso dos parâmetros operacionais (TAB. 1 e FIG. 2). As sobreposições laterais e longitudinais definidas como 80% para garantir a precisão na reconstrução tridimensional por meio do algoritmo Strucutre-from-Motion (SfM), bem como assegurar a consistência e

precisão dos dados, minimizando distorções ou erros geométricos (Iglhaut et al., 2019).

Após as capturas, as imagens foram pré-processadas no software Agisoft Metashape® Professional 2.0.1 (Agisoft LLC, São Petersburgo, Rússia), conforme detalhamento das configurações (TAB. 2). Inicialmente, as imagens foram avaliadas em critérios de nitidez e contraste e aquelas com baixa qualidade (pontuação inferior a 0,7) foram descartadas, bem como as câmeras desalinhadas.

Em seguida, a partir das imagens válidas, realizou-se o alinhamento das imagens e a geração das nuvens de pontos esparsas, as quais foram filtradas para remoção de pontos discrepantes, ambíguos e com projeções imprecisas, aplicando-se três critérios: (I) erro de re-projeção; (II)

incerteza de reconstrução; e (III) precisão de projeção (todos com limite de 10%). Posteriormente, gerou-se as nuvens de pontos densificadas. Adotou-se a filtragem de profundidade agressiva, com a finalidade de

remover outliers (Agisoft, 2023). As nuvens foram recortadas em blocos de 100 x 100 metros para evitar distorções nas bordas e facilitar as análises localizadas.

Tabela 1. Parâmetros de sobrevoos para o aplicativo PIX4Dcapture

Parâmetro	Configuração
Grade	Simples
Ângulo da câmera	90° (nadir)
Sobreposição lateral e longitudinal	80%
Altura de sobrevoos	90 m
Velocidade média	8,4 m/s
Distância de amostragem do solo (GSD)	3,94 cm/px

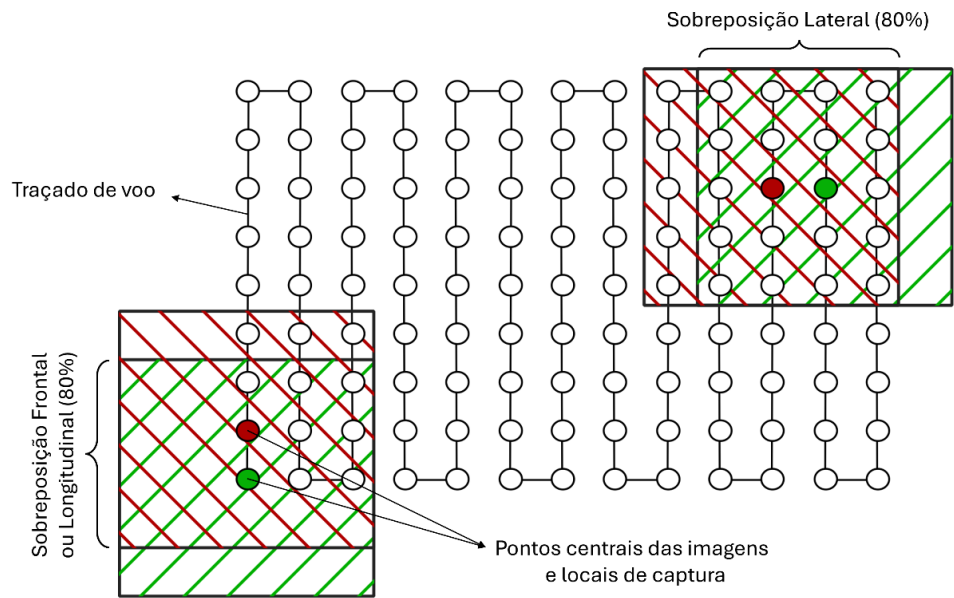


Figura 2. Grade de voo do tipo simples com sobreposições laterais e longitudinais de 80%

O processamento das nuvens de pontos foi realizado no software FUSION/LDV (Mcgaughey, 2023), seguindo um fluxo de trabalho estruturado: (I) classificação dos pontos das nuvens; (II) geração dos modelos digitais de terreno (MDT);

(III) normalização das elevações de cada nuvem; e (IV) extração das estatísticas descritivas (métricas estruturais) (TAB. 3).

Tabela 2. Parâmetros de pré-processamento no software Agisoft Metashape® Professional 2.0.1

Etapas	Parâmetros
Sistema de Referência de Coordenadas	SIRGAS2000/ UTM zona 23S (EPSG:31983)
Alinhamento das imagens	Acurácia = Alta
	Pré-seleção genérica = não
	Pré-seleção de referência = source
	Limite de pontos-chave = 40.000
	Limite do ponto de amarração = 4.000
1ª otimização do alinhamento da câmera	Ajuste adaptativo do modelo de câmera = sim
Filtragem por seleção gradual	Erro de re-projeção = 10%
	Incerteza de reconstrução = 10%
	Precisão de projeção = 10%
2ª otimização do alinhamento da câmera	Ajuste adaptativo do modelo de câmera = sim
Densificação da nuvem de pontos	Qualidade = Alta
	Reutilizar mapas de profundidade = sim
	Filtro de profundidade = agressivo
	Calcular cores dos pontos = sim
	Calcular confiança dos pontos = não
Importação do Shapefile para recorte	SRC = WGS84 – UTM zona 23S (EPSG:32723)
Formato de exportação dos resultados	SRC = SIRGAS2000 / UTM zona 23S (EPSG:31983)
	Nuvem de pontos densificada = .LAS

Parâmetros não especificados indicam que foram utilizadas as configurações padrão (default) do software.

Tabela 3. Parâmetros de processamento no software Fusion/LDV

Etapas	Função	Parâmetros
Classificação da nuvem	GroundFilter	Tamanho da grade = 20 x 20 m
Geração do MDT	GridSurfaceCreate	Tamanho da grade = 2 x 2 m
		Unidade das coordenadas = metros
		Sistema de coordenadas = 1 (UTM)
Normalização da nuvem de pontos	ClipData	Os limites das coordenadas (MinX, MinY, MaxX, MaxY) variam de acordo com a área mapeada
Extração das métricas de elevação e exportação dos resultados	CloudMetrics	Limite de altura acima do solo = 2 m
		Nuvem de pontos normalizada: .LAS
		Planilha de métricas: .CSV

Parâmetros não especificados indicam que foram utilizadas as configurações padrão (default) do software.

A análise estatística foi conduzida em ambiente R, onde, primeiramente, foram calculadas as médias das estatísticas descritivas obtidas para cada fitofisionomia.

Em seguida, foi realizada uma análise de agrupamentos hierárquico (método de Ward) para identificar correlações entre as métricas e selecionar os principais descritores da vegetação. A escolha desse método justifica-se pela sua capacidade de lidar com dados multivariados e agrupar informações com características semelhantes. Uma Análise de Componentes

Principais (PCA) também foi utilizada para reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar as variáveis que mais contribuíram para a diferenciação das fitofisionomias. A PCA foi escolhida por sua robustez em identificar padrões em conjuntos de dados multidimensionais e por facilitar a visualização gráfica das relações entre as variáveis e as fitofisionomias.

Por fim, foram gerados gráficos radar para comparar as principais métricas associadas a cada fitofisionomia, proporcionando uma interpretação

clara e intuitiva das características estruturais entre os grupos analisados.

A escolha desses métodos foi fundamentada na necessidade de compreender a variabilidade estrutural da vegetação do Cerrado de forma detalhada, utilizando ferramentas que equilibrassem precisão estatística e viabilidade computacional.

Resultados

As fitofisionomias encontradas nas áreas foram Campo Rupestre (CR), Campo Sujo (CS), Cerrado Sentido Restrito (CSR), Floresta Estacional Semidecidual (FES) e Pastagens (PA). A análise das nuvens de pontos no FUSION/LDV resultou em 45 métricas descritivas (TAB. 4).

Tabela 4. Resumo estatístico do processamento de dados para cada fitofisionomia (média)

Variáveis	Fitofisionomias				
	Campo Rupestre	Campo Sujo	Cerrado SR	FES	PA
Máx	6,037	5,010	9,152	14,825	2,640
Med	0,517	0,713	2,325	4,527	0,032
Mo	-0,053	-0,075	0,656	4,580	-0,027
SD	0,854	1,024	1,628	1,699	0,164
V	0,845	1,049	2,77	8,661	0,031
Cv	1,854	1,437	0,722	0,636	5,195
Iq	0,660	0,891	2,369	3,706	0,106
SK	2,414	1,785	0,527	0,649	4,510
K	10,391	5,548	3,432	4,193	41,407
AAD	0,588	0,758	1,323	2,150	0,093
MADmd	0,231	0,313	1,184	1,829	0,052
MADmo	0,257	0,378	1,879	1,800	0,053
L1	0,517	0,713	2,324	4,527	0,032
L2	0,389	0,496	0,911	1,508	0,068
L3	0,176	0,211	0,070	0,079	0,022
L4	0,101	0,103	0,073	0,157	0,023
L CV	0,843	0,696	0,402	0,352	2,193
L SK	0,437	0,426	0,085	0,083	0,317
L K	0,263	0,207	0,090	0,119	0,326
P01	-0,264	-0,259	-0,298	-0,326	-0,181
P05	-0,125	-0,118	-0,035	0,403	-0,120
P10	-0,075	-0,062	0,171	1,009	-0,090
P20	-0,018	0,012	0,827	2,013	-0,058
P25	0,007	0,048	1,051	2,531	-0,046
P30	0,035	0,086	1,274	3,006	-0,036
P40	0,101	0,178	1,768	3,813	-0,017
P60	0,330	0,460	2,697	5,102	0,021
P70	0,529	0,722	3,168	5,810	0,045
P75	0,667	0,939	3,420	6,237	0,060
P80	0,852	1,252	3,703	6,759	0,080
P90	1,569	2,333	4,455	8,060	0,158
P95	2,468	3,160	5,064	9,072	0,281
P99	3,892	4,136	6,583	11,135	0,699
CRR	0,230	0,274	0,352	0,381	0,251
CM	1,403	1,654	3,222	5,866	0,290
RA2 (%)	6,889	12,341	52,139	71,471	0,091
RA2	192,442	308,682	1.432.835	1.339.578	2,407
RAMe	30,704	30,271	47,790	47,587	35,591
RAMo	84,476	91,470	77,070	51,527	66,267
PA	12,496	16,602	33,914	37,392	6,984

Max: máximo; Med: média; Mo: moda; SD: desvio-padrão; V: variância; Cv: coeficiente de variação; Iq: inter-quartil; SK: assimetria; K: curtose; AAD: desvio absoluto médio; MADmd: desvio absoluto mediano; MADmo: desvio absoluto da moda; L1: momento-L1; L2: momento-L2; L3: momento-L3; L4: momento-L4; L CV: momento L do Cv; L SK: momento L da assimetria; L K: momento L da curtose; Px: percentil x; CRR: cobertura do dossel; QM: média quadrática; CM: média cúbica; RA2 (%): porcentagem de pontos acima de 2 metros; RA2: quantidade de pontos acima de 2 metros; RAME (%): porcentagem de pontos acima da média; RAMo (%) porcentagem de pontos acima da moda; PA: área do perfil.

A análise de agrupamentos hierárquicos evidenciou alta correlação entre determinadas métricas estruturais, permitindo categorizar os dados em três grupos principais (TAB. 4), definidos pela métrica que mais contribuiu para explicar a variância capturada pelas componentes principais

PC1 (72,3%) e PC2 (24,6%) (TAB. 5). Essa organização simplifica a interpretação dos resultados ao associar diretamente cada grupo a características ecológicas distintas (altura, complexidade vertical e distribuição estatística).

Tabela 4. Agrupamento hierárquico de variáveis estruturais

Grupos	Métrica-chave	Variáveis correlacionadas
I - Altura da Vegetação	P80	SK AAD, CM, CRR, Iq, L1, L2, L4, MADmd, MADmo, Max, Med, P25, P30, P40, P50, P60, P70, P75, P80, P90, P95, P99, QM, RA2, RA2 (%), RAME (%), SD, V
II - Complexidade Vertical	L SK	L3, RAMo (%)
III - Distribuição Estatística	K	Cv, L Cv

Tabela 5. Valores médios das métricas-chave por fitofisionomia e contribuição na PCA

Variáveis	Fitofisionomias					Componentes	
	CR	CS	CSR	FES	PA	PC1 (%)	PC2 (%)
P80	0,852	1,252	3,703	6,759	0,080	38,38	6,95
L SK	0,437	0,426	0,085	0,083	0,317	34,01*	37,35
K	10,391	5,548	3,432	4,193	41,407	27,6*	55,70

* Correlação negativa. CR: Campo Rupestre; CS: Campo Sujo; CSR: Cerrado Sentido Restrito; FES: Floresta Estacional Semidecidual; PA: Pastagem.

A PCA confirmou a relevância dos grupos identificados, com PC1 e PC2 explicando, em conjunto, 96,9% da variância total (FIG. 3). A associação das componentes com as métricas-chave reforça os padrões ecológicos: PC1 destacou-se pela forte associação com o percentil 80 (P80) da altura da vegetação, atuando como um eixo discriminante entre formações florestais e ambientes campestres. Por sua vez, PC2 mostrou

sensibilidade ao momento-L da assimetria (L SK) e à curtose (K), refletindo a heterogeneidade estrutural, separando fitofisionomias verticalmente complexas e heterogêneas daquelas com padrão estrutural homogêneo

Esses resultados indicam que a variação estrutural entre as fitofisionomias está primariamente relacionada a diferenças na altura da vegetação e na complexidade vertical.

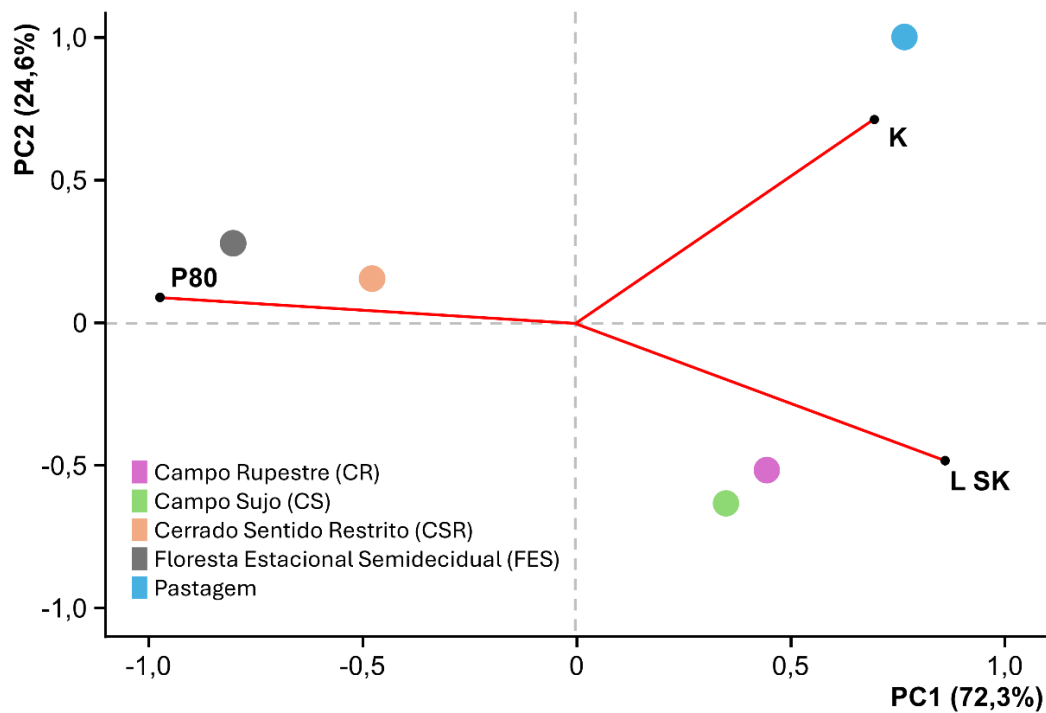


Figura 3. Espaço PCA (PC1 vs. PC2) das fitofisionomias: distribuição e influência das variáveis P80 (altura) e L_SK/K (complexidade vertical)

A PCA permitiu identificar padrões estruturais que diferenciam as fitofisionomias estudadas, com ênfase em dois eixos principais: altura da vegetação (PC1) e complexidade vertical (PC2). A PC1, distinguiu claramente formações florestais de ambientais campestres. Valores negativos nessa componente associaram-se a vegetações mais altas e densas, enquanto valores positivos corresponderam a formações de porte reduzido. Já a PC2, refletiu a heterogeneidade estrutural, com valores positivos indicando maior estratificação vertical e negativos sugerindo homogeneidade.

A Floresta Estacional Semidecidual (FES) destacou-se com PC1 fortemente negativo, caracterizando-a como a formação de maior porte, combinada com PC2 moderadamente positivo, que revelou uma estrutura vertical relativamente complexa, com estratos bem definidos, como sub-bosque denso e dossel fechado. Em contraste, o Cerrado Sentido Restrito (CSR), com PC1 negativo, apresentou vegetação de porte médio, típica de cerradões, e PC2 positivo, indicando heterogeneidade moderada, com alguma diferenciação entre os estratos de vegetação.

Entre as formações campestres, a Pastagem (PA) chamou atenção por seu PC2 elevado, que sugere complexidade estrutural incomum para ambientes dominados por gramíneas. Apesar do PC1 positivo, que confirma a predominância de

vegetação rasteira (< 1m), a presença de árvores isoladas e arbustos residuais introduziu microestruturas verticais, explicando a heterogeneidade observada. O Campo Rupestre (CR), por sua vez, exibiu PC1 positivo, refletindo vegetação herbácea e arbustiva de baixo porte (<1 m), e PC2 negativo, que denota homogeneidade estrutural, sem estratificação vertical. Por fim, o Campo Sujo (CS), com PC1 levemente positivo, mostrou arbustos e árvores esparsas de porte ligeiramente superior ao CR, mas manteve PC2 negativo, indicando baixa complexidade vertical, semelhante ao CR. Um resumo descritivo das fitofisionomias é apresentado na tabela 6.

As métricas derivadas das nuvens de pontos (P80, L SK e K) oferecem perspectivas complementares sobre a estrutura da vegetação. O percentil 80 da altura (P80) atua como indicador de tendência central vertical, representando a altura acima da qual 80% dos pontos estão concentrados. Valores elevados refletem vegetação de maior porte, típica de formações florestais. O momento-L da assimetria (L SK) quantifica a simetria da distribuição vertical. Valores próximos a zero indicam distribuição uniforme, enquanto assimetrias acentuadas sugerem estratificação ou irregularidade na altura.

A curtose (K) mede a concentração de pontos em torno da média. Curtose elevada indica dominância de um estrato único, enquanto valores

baixos refletem dispersão multicamadas (Heumann et al., 2022). Essas métricas, em conjunto, permitiram diferenciar eficientemente as fitofisionomias, evidenciado sua utilidade na

caracterização de ecossistemas complexos (FIG. 4).

Tabela 6. Principais características das fitofisionomias

Fitofisionomia	Altura (PC1)	Complexidade (PC2)	Descrição
Campo Rupestre	Muito baixa	Homogênea	Herbáceas dominantes, sem estratificação
Campo Sujo	Baixa	Homogênea	Arbustos isolados sobre vegetação rasteira
Cerrado Sentido Restrito	Moderada	Moderada	Dossel aberto, estratos herbáceo e arbustivo
Floresta Estacional Semidecidual	Alta	Heterogênea	Dossel fechado, estratificação acentuada
Pastagens	Baixa	Heterogênea	Gramíneas com árvores residuais

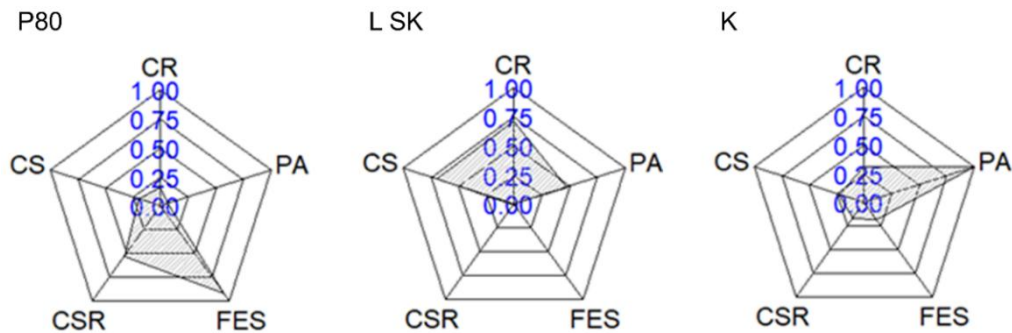


Figura 4. Perfil estrutural comparativo das fitofisionomias em gráfico radar: P80 (percentil 80 da altura), L-SK (momento-L da assimetria) e K (curtose)

Discussão

As coletas de dados ocorreram com sucesso em todas as áreas de estudo, os planejamentos detalhados dos voos garantiram coberturas consistentes das fitofisionomias e a integração de análises estatísticas com dados tridimensionais gerados por RPAS demonstrou ser uma abordagem eficaz e acessível, com grande potencial para estudos em ecossistemas biodiversos e heterogêneos como o Cerrado. Embora a diferenciação entre fitofisionomias campestres tenha sido mais desafiadora – uma dificuldade também relatada por outros pesquisadores (Boucher et al., 2023; Torresani et al., 2024) - a utilização de sensores RGB acoplados ao RPAS mostrou-se adequado para capturar variações estruturais da vegetação.

As métricas estruturais derivadas das nuvens de pontos demonstraram capacidade robusta para diferenciar as fitofisionomias do

Cerrado. Valores elevados de altura máxima e percentis superiores (P80, P90) destacaram formações florestais, como a Floresta Estacional Semidecidual, enquanto métricas como coeficiente de variação (Cv) e curtose (K) refletiram a homogeneidade vertical em ambientes campestres. As pastagens (PA), apesar da baixa altura média, apresentaram valores atípicos em K, indicando a presença de elementos verticais que introduziram heterogeneidade localizada. Esses resultados corroboram a hipótese inicial de que variações na arquitetura vertical geram assinaturas estruturais únicas, detectáveis mesmo por sensores RGB de baixo custo.

A PCA mostrou-se eficaz em diferenciar a vegetação do Cerrado, com base na altura (PC1), na complexidade vertical e na distribuição estatística (PC2). Esses resultados são consistentes com estudos que vinculam altura e estratificação vertical à variabilidade estrutural em ecossistemas

terrestres (Müllerová et al., 2021; Walter et al., 2021).

As diferenças estruturais observadas entre as fitofisionomias, refletidas nas métricas derivadas das nuvens de pontos, são atribuídas a uma combinação de fatores ambientais, históricos de uso da terra e regimes de distúrbio (Bueno et al., 2018; Terra et al., 2018; Schmidt & Eloy, 2020).

As Florestas Estacionais Semidecíduais foram classificadas como vegetação de médio a grande porte com estrutura vertical complexa. Essa complexidade é típica de ecossistemas florestais maduros, associadas a solos férteis, maior disponibilidade hídrica, alta diversidade e riqueza de espécies (Silva et al., 2022). Os Cerrados Sentido Restrito (CSR), por sua vez, apresentaram vegetação de porte intermediário com estrutura vertical moderadamente complexa, refletindo a transição entre ambientes florestais e savânicos (Bueno et al., 2018).

Em contraste, as fitofisionomias campestres, que normalmente ocorrem em solos rasos e pedregosos, sob condições de maior estresse hídrico e nutricional (Caminha-Paiva et al., 2022; Rodrigues Cunha Silva et al., 2023), foram caracterizados por vegetação rasteira e estrutura vertical homogênea. No entanto, estes se mostraram distintos em termos de altura média, sendo que os Campos Sujos apresentaram arbustos e árvores esparsas de porte ligeiramente mais elevado. Nota-se que, os Campos Rupestres são típicos de ambientes com alta exposição ao estresse ambiental, onde a vegetação adapta-se a condições edáficas e climáticas extremas (Camargo et al., 2019; Colli-Silva et al., 2019). Embora apresentem uma simplicidade estrutural em termos da altura da vegetação, isso não reflete a complexidade ecológica e a riqueza biológica desses habitats, destacando-se como locais de importância crítica para a conservação (Alves et al., 2014; Rapini et al., 2021; Silveira et al., 2016).

Por outro lado, as pastagens apresentaram complexidade estrutural inesperada. Tal motivo se deu pela presença de árvores e arbustos isolados que introduziram variação vertical num ambiente predominantemente homogêneo. Essa complexidade sugere influência antrópica, como remanescentes de vegetação nativa em áreas convertidas (Tiang et al., 2021). Esse aspecto tem implicações significativas para a gestão sustentável de paisagens agrícolas, uma vez que, sugere que a presença e manutenção de elementos arbóreos remanescentes podem criar micro-habitats

importantes para a conservação da biodiversidade nessas áreas (Von Thaden et al., 2022).

A metodologia proposta tem aplicações diretas e multifacetadas para a tomada de decisões em políticas de conservação, oferecendo ferramentas quantitativas e escaláveis para ações estratégicas. Por exemplo, ao integrar métricas estruturais – como altura da vegetação e complexidade vertical de fitofisionomias estáveis – elas podem servir como indicadores-chave para monitorar a recuperação da estrutura e da funcionalidade de ecossistemas degradados. Isso viabiliza iniciativas de recuperação ecológica com base em critérios objetivos (ex.: recomposição da estratificação vegetal).

Além de embasar políticas reativas, a metodologia pode sustentar ações preventivas e fiscalizatórias. Em áreas protegidas, a título de exemplo, relatórios técnicos fundamentados nessas métricas estruturais oferecem subsídios para embargos ou autuações, otimizando respostas legais. A mesma lógica aplica-se a iniciativas como a Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação florestal (REDD+), já que a tradução de mudanças na cobertura vegetal em dados transparentes garantiria maior confiabilidade na verificação da degradação, potencializando o impacto das ações ligadas ao REDD+.

Em um contexto mais amplo, a versatilidade desses parâmetros estruturais intensifica-se ao integrá-los a plataformas de Inteligência Territorial. A análise da heterogeneidade estrutural (indicadora direta de biodiversidade) subsidia o ordenamento territorial suportando desde a delimitação de zonas de uso sustentável até a priorização de áreas para criação de corredores ecológicos e a identificação de hotspots de biodiversidade negligenciados por métodos tradicionais de sensoriamento remoto. Essa integração permite alocar recursos onde gerem maior impacto socioambiental, orientando investimentos de governos e ONGs para ações estratégicas, como a ampliação de unidades de conservação, a conexão de fragmentos florestais ou restauração de ecossistemas degradados. Ao harmonizar conservação da biodiversidade com decisões territorialmente precisas, a metodologia fomenta intervenções humanas que priorizem sinergias entre desenvolvimento socioeconômico e integridade ecológica.

Igualmente relevante, destaca-se o potencial de engajamento comunitário em programas de educação ambiental. Visualizações simplificadas da estrutura vegetal – como modelos

3D interpretáveis – podem ilustrar, por exemplo, os impactos das práticas de manejo na vegetação para agricultores e populações tradicionais, fortalecendo a conscientização prática.

No entanto, apesar dos resultados promissores, algumas limitações devem ser consideradas. A dependência de Modelos Digitais de Terreno (MDT) automáticos, derivado de pontos classificados, pode introduzir incertezas na normalização das alturas, especialmente em áreas com relevo acentuado, e subestimar a densidade vegetal. A substituição por MDTs de alta precisão, como os derivados de levantamentos a laser, pode melhorar a acurácia das métricas obtidas (Goodbody et al., 2019), entretanto, a elevação dos custos de aquisição e mão de obra qualificada devem ser considerados. Outra questão relevante é no tocante a utilização de filtros de profundidade durante a etapa de densificação das nuvens de pontos. Embora seja recomendado o filtro agressivo para remoção de outliers em levantamentos aéreos da vegetação (Agisoft, 2023), a redução drástica de pontos reduz também a quantidade de dados úteis e podem comprometer a representatividade da vegetação. Portanto, sugere-se testar outros filtros.

Além disso, destaca-se a versatilidade dos levantamentos por RPAS, que abrangem desde a escolha da aeronave e sensores até os algoritmos de processamento, permitindo sua adaptação a diferentes realidades (Müllerová et al., 2021). Esse fato o coloca como ferramenta acessível, pois facilita a aquisição de grandes volumes de dados visando aprimorar a capacidade de diferenciação das fitofisionomias com base em suas características estruturais.

Esta abordagem, oferece um protocolo acessível para monitorar ecossistemas sob pressão, com potencial para subsidiar políticas de conservação e gestão de recursos naturais, contribuindo para a identificação de áreas prioritárias para proteção, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

Conclusões

Os resultados deste estudo demonstraram a capacidade de imagens ópticas RGB acopladas a RPAS, processadas por técnicas fotogramétricas como o Structure-from-Motion, em diferenciar e caracterizar estruturalmente cinco fitofisionomias do Cerrado brasileiro: Campo Rupestre, Campo Sujo, Cerrado Sentido Restrito, Floresta Estacional Semidecidual e Pastagens.

Os resultados validaram a hipótese inicial de que variações na arquitetura vegetal, expressas por variáveis como altura da vegetação, complexidade estrutural e distribuição estatística da nuvem de pontos, geram assinaturas estruturais únicas para cada fitofisionomia, detectáveis mesmo por sensores ópticos de baixo custo, oferecendo uma alternativa viável para monitoramento em larga escala.

O método proposto se mostrou economicamente viável para o monitoramento ambiental em larga escala, oferecendo uma alternativa acessível para discriminação estrutural da vegetação sem a necessidade de sensores espectrais ou tecnologias de alto custo, como o LiDAR. No entanto, salienta-se que a integração desses dados pode aumentar a capacidade de diferenciação de fitofisionomias em relevos acidentados e em ambientes com gradientes estruturais sutis. Embora essa abordagem implique um aumento nos custos, ela também ampliaria a aplicabilidade da técnica para outros biomas, potencializando sua utilização em diferentes contextos ecológicos.

Por fim, o estudo reforça o potencial dos RPAS equipados com sensores ópticos como uma ferramenta estratégica no monitoramento e conservação de ecossistemas sob pressão antrópica, como o Cerrado. Investigações futuras devem testar a metodologia em outros domínios fitogeográficos, incorporando séries temporais e dados edafoclimáticos para generalizar os resultados aqui apresentados. A integração de inteligência artificial para análise automatizada de nuvens de pontos e o uso de sensores multiespectrais são caminhos promissores para ampliar a aplicabilidade da técnica em diferentes escalas espaciais e temporais.

Agradecimentos

Os autores expressam seu agradecimento aos revisores pelas contribuições valiosas e pelo criterioso trabalho de revisão, que enriqueceram significativamente este estudo. Agradecemos também à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) pelo suporte institucional.

Este trabalho contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de

Minas Gerais (FAPEMIG), aos quais agradecemos o auxílio financeiro.

MLA agradece ao CNPq (Processos 400904/2019-5 e 401053/2019-9) e à FAPEMIG (APQ-00943-21). EBG agradece à FAPEMIG (APQ-00943-21 e PCI 00009-20) e ao CNPq (Processo 306386/2022-4).

Referências

- Agisoft. (2023). Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.0.
- Alves, R. J. V., Silva, N. G., Oliveira, J. A., & Medeiros, D. (2014). Circunscrevendo campo rupestre - Savanas montanas rochosas megadiversas do Brasil. *Brazilian Journal of Biology*, 74(2), 355–362. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.23212>
- Araus, J. L., Kefauver, S. C., Vergara-Díaz, O., Gracia-Romero, A., Rezzouk, F. Z., Segarra, J., Buchailot, M. L., Chang-Espino, M., Vatter, T., Sanchez-Bragado, R., Fernandez-Gallego, J. A., Serret, M. D., & Bort, J. (2022). Crop phenotyping in a context of global change: What to measure and how to do it. *Journal of Integrative Plant Biology*, 64(2), 592–618. <https://doi.org/10.1111/jipb.13191>
- Atkins, J. W., Bhatt, P., Carrasco, L., Francis, E., Garabedian, J. E., Hakkenberg, C. R., Hardiman, B. S., Jung, J., Koirala, A., LaRue, E. A., Oh, S., Shao, G., Shao, G., Shugart, H. H., Spiers, A., Stovall, A. E. L., Surasinghe, T. D., Tai, X., Zhai, L., ... Krause, K. (2023). Integrating forest structural diversity measurement into ecological research. *Ecosphere*, 14(9). <https://doi.org/10.1002/ecs2.4633>
- Boucher, P. B., Hockridge, E. G., Singh, J., & Davies, A. B. (2023). Flying high: Sampling savanna vegetation with <scp>UAV</scp> - lidar. *Methods in Ecology and Evolution*, 14(7), 1668–1686. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14081>
- Bueno, M. L., Dexter, K. G., Pennington, R. T., Pontara, V., Neves, D. M., Ratter, J. A., & de Oliveira-Filho, A. T. (2018). The environmental triangle of the Cerrado Domain: Ecological factors driving shifts in tree species composition between forests and savannas. *Journal of Ecology*, 106(5), 2109–2120. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12969>
- Camargo, A. P., de Souza, R. S. C., de Britto Costa, P., Gerhardt, I. R., Dante, R. A., Teodoro, G. S., Abrahão, A., Lambers, H., Carazzolle, M. F., Huntemann, M., Clum, A., Foster, B., Foster, B., Roux, S., Palaniappan, K., Varghese, N., Mukherjee, S., Reddy, T. B. K., Daum, C., ... Oliveira, R. S. (2019). Microbiomes of Velloziaceae from phosphorus-impooverished soils of the campos rupestres, a biodiversity hotspot. *Scientific Data*, 6(1), 140. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0141-3>
- Caminha-Paiva, D., Gomes, V. M., Cunha-Blum, J., Alves, M. J. P., Rosa, D. C. P., Santiago, J. C., Negreiros, D., & Fernandes, G. W. (2022). Floristic mosaics of the threatened Brazilian campo rupestre. *Nature Conservation Research*, 7(1). <https://doi.org/10.24189/ncr.2022.004>
- Castro, A., Shi, Y., Maja, J. M., & Peña, J. M. (2021). UAVs for vegetation monitoring: Overview and recent scientific contributions. *Remote Sensing*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/rs13112139>
- Colli-Silva, M., Vasconcelos, T. N. C., & Pirani, J. R. (2019). Outstanding plant endemism levels strongly support the recognition of campo rupestre provinces in mountaintops of eastern South America. *Journal of Biogeography*, 46(8), 1723–1733. <https://doi.org/10.1111/jbi.13585>
- Costa-Coutinho, J. M., Jardim, M. A. G., Castro, A. A. J. F., & Viana-Junior, A. B. (2019). Conexões biogeográficas de savanas brasileiras: partição da diversidade marginal e disjunta e conservação do trópico ecotonal setentrional em um hotspot de biodiversidade. *Revista Brasileira de Geografia Física*. Em *Revista Brasileira de Geografia Física v* (Vol. 12, Número 7).
- Dainelli, R., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., & Matese, A. (2021). Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles Forest Remote Sensing—A Systematic Review. Part II: Research Applications. *Forests*, 12(4), 397. <https://doi.org/10.3390/f12040397>
- Dettmann, G. T., Radtke, P. J., Coulston, J. W., Green, P. C., Wilson, B. T., & Moisen, G. G.

- (2022). Review and Synthesis of Estimation Strategies to Meet Small Area Needs in Forest Inventory. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.813569>
- Durigan, G., & Ratter, J. A. (2016). The need for a consistent fire policy for Cerrado conservation. *Journal of Applied Ecology*, 53(1), 11–15. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12559>
- Ellwanger, J. H., Nobre, C. A., & Chies, J. A. B. (2022). Brazilian Biodiversity as a Source of Power and Sustainable Development: A Neglected Opportunity. *Sustainability*, 15(1), 482. <https://doi.org/10.3390/su15010482>
- Gomiero, T. (2016). Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. *Em Sustainability (Switzerland)* (Vol. 8, Número 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su8030281>
- Goodbody, T. R. H., Coops, N. C., & White, J. C. (2019). Digital Aerial Photogrammetry for Updating Area-Based Forest Inventories: A Review of Opportunities, Challenges, and Future Directions. *Current Forestry Reports*, 5(2), 55–75. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00087-2>
- Gupta, G. S. (2019). Land Degradation and Challenges of Food Security. *Review of European Studies*, 11(1), 63. <https://doi.org/10.5539/res.v11n1p63>
- Heumann, C., Schomaker, M., & Shalabh. (2022). Measures of Central Tendency and Dispersion. *Em Introduction to Statistics and Data Analysis* (p. 37–67). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11833-3_3
- Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., O'Connor, J., & Rosette, J. (2019). Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. *Current Forestry Reports*, 5(3), 155–168. <https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2012). *Manual Técnico da Vegetação Brasileira*.
- Latrubesse, E. M., Arima, E., Ferreira, M. E., Nogueira, S. H., Wittmann, F., Dias, M. S., Dagosta, F. C. P., & Bayer, M. (2019). Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. *Conservation Science and Practice*, 1(9). <https://doi.org/10.1111/csp2.77>
- Linhares, Y., Kaganski, A., Agyare, C., Kurnaz, I. A., Neergheen, V., Kolodziejczyk, B., Kędra, M., Wahajuddin, M., El-Youssfi, L., dela Cruz, T. E., Baran, Y., Pešić, M., Shrestha, U., Bakiu, R., Allard, P.-M., Rybtsov, S., Pieri, M., Siciliano, V., & Flores Bueso, Y. (2023). Biodiversity: the overlooked source of human health. *Trends in Molecular Medicine*, 29(3), 173–187. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2022.12.002>
- Lopes dos Santos, G., Pereira, M. G., Delgado, R. C., Magistrali, I. C., Gomes da Silva, C., Magno Moreira de Oliveira, C., Pedro Bessa Larangeira, J., & Paula da Silva, T. (2021). Degradation of the Brazilian Cerrado: Interactions with human disturbance and environmental variables. *Forest Ecology and Management*, 482, 118875. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118875>
- Maxwell, S. L., Cazalis, V., Dudley, N., Hoffmann, M., Rodrigues, A. S. L., Stolton, S., Visconti, P., Woodley, S., Kingston, N., Lewis, E., Maron, M., Strassburg, B. B. N., Wenger, A., Jonas, H. D., Venter, O., & Watson, J. E. M. (2020). Area-based conservation in the twenty-first century. *Nature*, 586(7828), 217–227. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2773-z>
- Mcgaughey, R. J. (2023). *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*.
- Moudrý, V., Cord, A. F., Gábor, L., Laurin, G. V., Barták, V., Gdulová, K., Malavasi, M., Rocchini, D., Stereńczak, K., Prošek, J., Klápště, P., & Wild, J. (2023). Vegetation structure derived from airborne laser scanning to assess species distribution and habitat suitability: The way forward. *Diversity and Distributions*, 29(1), 39–50. <https://doi.org/10.1111/ddi.13644>
- Müllerová, J., Gago, X., Bučas, M., Company, J., Estrany, J., Fortesa, J., Manfreda, S., Michez, A., Mokroš, M., Paulus, G., Tiškus, E.,

- Tsiafouli, M. A., & Kent, R. (2021). Characterizing vegetation complexity with unmanned aerial systems (UAS) – A framework and synthesis. *Ecological Indicators*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108156>
- Oguh, C. E., Obiwulu, E. N. O., Umezina, O. J., Ameh, S. E., Ugwu, C. V., & Sheshi, I. M. (2021). Ecosystem and Ecological Services; Need for Biodiversity Conservation-A Critical Review. *Asian Journal of Biology*, 1–14. <https://doi.org/10.9734/ajob/2021/v11i430146>
- Oliveira, U., Soares-Filho, B. S., Santos, A. J., Paglia, A. P., Brescovit, A. D., de Carvalho, C. J. B., Silva, D. P., Rezende, D. T., Leite, F. S. F., Batista, J. A. N., Barbosa, J. P. P. P., Stehmann, J. R., Ascher, J. S., Vasconcelos, M. F., Marco, P. De, Löwenberg-Neto, P., & Ferro, V. G. (2019). Modelling Highly Biodiverse Areas in Brazil. *Scientific Reports*, 9(1), 6355. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42881-9>
- Pompeu, J., Assis, T. O., & Ometto, J. P. (2024). Landscape changes in the Cerrado: Challenges of land clearing, fragmentation and land tenure for biological conservation. *Science of the Total Environment*, 906. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167581>
- Rábago, J., & Portuguese-Castro, M. (2023). Use of Drone Photogrammetry as An Innovative, Competency-Based Architecture Teaching Process. *Drones*, 7(3), 187. <https://doi.org/10.3390/drones7030187>
- Rapini, A., Bitencourt, C., Luebert, F., & Cardoso, D. (2021). An escape-to-radiate model for explaining the high plant diversity and endemism in campos rupestres †. *Biological Journal of the Linnean Society*, 133, 481–498. <https://academic.oup.com/biolinlean/article/133/2/481/6040694>
- Raven, P., & Wackernagel, M. (2020). Maintaining biodiversity will define our long-term success. *Plant Diversity*, 42(4), 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2020.06.002>
- Rodrigues Cunha Silva, G., Do Couto de Miranda, S., Simão de Carvalho, P., De Souza, J. C., Junior Pereira, M., & Silva-Neto, C. de M. e. (2023). ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO E FITOSSOCIOLOGIA DA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL - APA SERRA DO GIGANTE DE ITAPURANGA, GOIÁS, BRASIL. *Nativa*, 11(4), 454–465. <https://doi.org/10.31413/nat.v11i4.15841>
- Rosan, T. M., Sitch, S., Mercado, L. M., Heinrich, V., Friedlingstein, P., & Aragão, L. E. O. C. (2022). Fragmentation-Driven Divergent Trends in Burned Area in Amazonia and Cerrado. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.801408>
- Schmidt, I. B., & Eloy, L. (2020). Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management. *Flora*, 268, 151613. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151613>
- Sharafatmandrad, M., & Khosravi Mashizi, A. (2021). Linking Ecosystem Services to Social Well-Being: An Approach to Assess Land Degradation. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.654560>
- Silva, L., Soares, C., Santos, W., & Machado, E. (2022). Diversidade de espécies arbóreas entre fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual, Minas Gerais, Brasil. *Diversitas Journal*, 7(1), 0052–0070. <https://doi.org/10.48017/dj.v7i1.1967>
- Silveira, F. A. O., Negreiros, D., Barbosa, N. P. U., Buisson, E., Carmo, F. F., Carstensen, D. W., Conceição, A. A., Cornelissen, T. G., Echternacht, L., Fernandes, G. W., Garcia, Q. S., Guerra, T. J., Jacobi, C. M., Lemos-Filho, J. P., Le Stradic, S., Morellato, L. P. C., Neves, F. S., Oliveira, R. S., Schaefer, C. E., ... Lambers, H. (2016). Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. *Plant and Soil*, 403(1–2), 129–152. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2637-8>
- Siqueira, L. N., Radic, L. F., & Radic, L. F. (2021). A Degradação do Cerrado e a Questão Hídrica Sul-Americana: Possíveis Implicações Jurídicas. 8(1), 2359–0106. <https://doi.org/10.20873/uft.2359-0106.2020.v7n2.p470-490>
- Slattery, Z., & Fenner, R. (2021). Spatial Analysis of the Drivers, Characteristics, and Effects of

- Forest Fragmentation. *Sustainability*, 13(6), 3246. <https://doi.org/10.3390/su13063246>
- Terra, M. de C. N. S., Santos, R. M. dos, Prado Júnior, J. A. do, de Mello, J. M., Scolforo, J. R. S., Fontes, M. A. L., Schiavini, I., dos Reis, A. A., Bueno, I. T., Magnago, L. F. S., & ter Steege, H. (2018). Water availability drives gradients of tree diversity, structure and functional traits in the Atlantic–Cerrado–Caatinga transition, Brazil. *Journal of Plant Ecology*, 11(6), 803–814. <https://doi.org/10.1093/jpe/rty017>
- Tiang, D. C. F., Morris, A., Bell, M., Gibbins, C. N., Azhar, B., & Lechner, A. M. (2021). Ecological connectivity in fragmented agricultural landscapes and the importance of scattered trees and small patches. *Ecological Processes*, 10(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00284-7>
- Torresani, M., Rocchini, D., Ceola, G., de Vries, J. P. R., Feilhauer, H., Moudrý, V., Bartholomeus, H., Perrone, M., Anderle, M., Gamper, H. A., Chieffallo, L., Guatelli, E., Gatti, R. C., & Kleijn, D. (2024). Grassland vertical height heterogeneity predicts flower and bee diversity: an UAV photogrammetric approach. *Scientific Reports*, 14(1), 809. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50308-9>
- United Nations. (2016). The Sustainable Development Goals Report.
- Vieira, L. T. A., Azevedo, T. N., Castro, A. A. J. F., & Martins, F. R. (2022). Reviewing the Cerrado's limits, flora distribution patterns, and conservation status for policy decisions. *Land Use Policy*, 115, 106038. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106038>
- Von Thaden, J., Salazar-Arteaga, H., Laborde, J., Estrada-Contreras, I., & Romero-Urbe, H. (2022). Arboreal elements of the agricultural matrix as structural connecting devices in fragmented landscapes – A case study in the Los Tuxtlas Biosphere Reserve. *Ecological Engineering*, 179, 106633. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106633>
- Walter, J. A., Stovall, A. E. L., & Atkins, J. W. (2021). Vegetation structural complexity and biodiversity in the Great Smoky Mountains. *Ecosphere*, 12(3). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3390>
- Zarei, S., Bozorg-Haddad, O., Kheirinejad, S., & Loáiciga, H. A. (2021). Environmental sustainability: a review of the water–energy–food nexus. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 70(2), 138–154. <https://doi.org/10.2166/aqua.2020.058>