



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Uso e Cobertura da terra em Áreas de Preservação Permanente – Montes Claros, Norte do estado de Minas Gerais

Wallace Vinicius Martins Ruas¹, Lucas Augusto Pereira da Silva², Natielly Vitória Sales Durães³, Mariley Gonçalves Borges⁴, Cristiano Marcelo Pereira Souza⁵, Aldenice Barbosa Alves⁶, Marcos Esdras Leite⁷.

¹ Mestrando em Geografia pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), wallaceruas25@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-4822-5965> (autor correspondente); ² Dr. Prof. do Departamento de Geografia da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), lucasaugusto@ufu.br, <https://orcid.org/0000-0001-5504-9029>; ³ Graduanda em Geografia pela Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES), natiellyduraes@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6322-8406>; ⁴ Dra. Prof. do Departamento de Geociências da Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES), marileigoncalvesborges@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5845-1539>; ⁵ Dr. Prof. do Colegiado de Geologia da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), souzacristianomp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7692-1613>; ⁶ Doutoranda em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), aba@aluno.ifnmg.edu.br, <https://orcid.org/0009-0000-1487-6159>; ⁷ Dr. Prof. do Departamento de Geociências da Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES), marcos.leite@unimontes.br, <https://orcid.org/0000-0002-9020-6445>.

Artigo recebido em 11/03/2024 e aceito em 24/01/2025

RESUMO

As áreas de preservação permanente (APP) desempenham papel crucial na preservação dos cursos hídricos, estabilidade geomorfológica e manutenção dos níveis de biodiversidade. No entanto, ações antrópicas, principalmente expansão de sistemas de pastagens, agricultura e zonas urbanas vêm impulsionando a degradação desses ambientes, comprometendo sua função ecossistêmica. Portanto, esse estudo conduzido em Montes Claros, a sexta maior cidade de Minas Gerais, avaliou as condições de uso e cobertura da terra (LULC) nas APP's (margens de rios, nascentes e topo de morros). Utilizando técnicas de sensoriamento remoto e classificação por aprendizado de máquina auxiliado por covariáveis, foi possível gerar um mapeamento altamente preciso, com acurácia global de 99% e coeficiente Kappa de 0,99. Os resultados revelaram que, até 2021, todas as APPs estavam em desconformidade com o Código Florestal. Entre essas áreas, as zonas de recarga hídrica foram as mais antropizadas, com 20% de uso antrópico, seguidas pelas margens de rios (11%) e nascentes (8%). Os principais tipos de ocupação identificados foram pastagens, plantações de eucalipto, áreas urbanas e agricultura. A situação representa um desafio crítico para a integridade ambiental e para as atividades humanas na região. Este estudo fornece uma base científica robusta para mitigar esses impactos e orientar políticas públicas voltadas à gestão sustentável das APPs e recursos naturais.

Palavras-chave: Random Forest; Covariáveis Ambientais, Classificação Cerrado.

Land use and cover in Permanent Preservation Areas – Montes Claros, North of Minas Gerais

ABSTRACT

Permanent Preservation Areas (APPs) play a crucial role in conserving watercourses, ensuring geomorphological stability, and maintaining biodiversity levels. However, anthropogenic activities, particularly the expansion of pasture systems, agriculture, and urban zones, have accelerated the degradation of these environments, compromising their ecosystem functions. This study, conducted in Montes Claros, the sixth-largest city in Minas Gerais, evaluated land use and land cover (LULC) conditions in APPs, including riverbanks, springs, and hilltops. Using remote sensing techniques and machine learning classification supported by environmental covariates, a highly accurate map was generated, achieving a global accuracy of 99% and a Kappa coefficient of 0.99. The results showed that, by 2021, all APPs were in non-compliance with the Brazilian Forest Code. Among these areas, groundwater recharge zones were the most anthropized, with 20% of anthropogenic use, followed by riverbanks (11%) and springs (8%). The main types of occupation identified were pastures, eucalyptus plantations, urban areas, and agriculture. This scenario presents a critical challenge to environmental integrity and human activities in the region. The study provides a robust scientific foundation to mitigate these impacts and guide public policies aimed at the sustainable management of APPs and natural resources.

Keywords: Random Forest; Environmental Covariates; Cerrado Classification.

Introdução

O Cerrado brasileiro, ocupando cerca de 2 milhões de km², é a savana mais biodiversa do planeta e desempenha um papel ecossistêmico fundamental em escala global (Ratter et al., 1997; Becerra et al., 2009; Leite et al., 2018; Zanirato, 2021). Nas últimas décadas, entretanto, o bioma enfrenta ameaças crescentes, como a introdução de espécies invasoras, a degradação do solo e a fragmentação dos habitats, o que compromete sua sustentabilidade e resiliência (Roquette, 2018; Braz et al., 2019). Dados recentes indicam uma taxa de desmatamento de 11 mil km² no Cerrado em 2023, representando um aumento de 3% em relação ao ano anterior (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais [INPE], 2023). Parte desse desmatamento é ilegal e frequentemente não respeita o percentual mínimo de Reserva Legal para propriedades rurais (20% no Cerrado), agravando a situação e acelerando a perda de recursos naturais e biodiversidade, impulsionada principalmente pela expansão agrícola e urbana (Aquino et al., 2008; Sano et al., 2008; Lima et al., 2024).

Para mitigar os impactos sobre corpos hídricos e ecossistemas associados, o Novo Código Florestal (Lei Federal nº 12.651/2012) estabeleceu as Áreas de Preservação Permanente (APPs). Essas áreas têm a função de proteger recursos hídricos, conservar a paisagem e promover a biodiversidade, facilitando o fluxo gênico de fauna e flora e preservando o solo (Brasil, 2012; Nery et al., 2013). No entanto, a expansão de atividades antrópicas, como a pecuária, a agricultura e o crescimento urbano, tem impactado negativamente a estabilidade ecológica das APPs, comprometendo suas funções ambientais (Almeida et al., 2020; Martins et al., 2020; Gomes et al., 2022).

A intensificação das mudanças no uso e cobertura da terra (LULC) no Cerrado foi fortemente vinculada a incentivos políticos e econômicos, que impulsionam a conversão de áreas naturais para atividades produtivas (Polizel et al., 2021). Montes Claros, no norte de Minas Gerais, ilustra esse processo de maneira marcante. O desenvolvimento do município foi impulsionado pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), que, a partir da década de 1960, atraiu investimentos para consolidá-lo como um polo industrial e econômico (Leite & França, 2020). Pesquisas demonstram que, nas APPs da região, há uma significativa desconformidade com o Código Florestal, com intensa ocupação antrópica nas áreas ripárias (Almeida et al., 2020).

Embora estudos sobre APPs no Cerrado sejam frequentes, há lacunas no entendimento sobre o estado de conservação em diferentes tipos de APPs, além das áreas ripárias, como nascentes e topos de morro, que são essenciais para a regulação dos fluxos hídricos (Rocha & Güntzel, 2021). Além disso, o uso de técnicas aprimoradas de classificação de uso e cobertura da terra (sigla em inglês LULC) pode fornecer um retrato mais detalhado e preciso da situação dessas áreas.

O sensoriamento remoto tem se consolidado como ferramenta essencial para o mapeamento de LULC, especialmente devido à ampla disponibilidade de dados gratuitos de alta resolução temporal e espacial (Mascarenhas et al., 2009). A incorporação de algoritmos de aprendizado de máquina a essas análises marca um avanço significativo. Esses algoritmos são capazes de processar grandes volumes de dados e melhorar a acurácia na classificação de cobertura da terra, integrando dados de reflectância com variáveis ambientais adicionais (Wang et al., 2022).

O uso de algoritmos de aprendizado de máquina no mapeamento de uso e cobertura da terra (LULC) tem ganhado destaque pela alta acurácia e eficiência que proporcionam em análises complexas, especialmente em áreas de preservação ambiental (Zeferino et al., 2020). Estudos recentes demonstram que algoritmos como Random Forest (RF) e Support Vector Machine (SVM) são altamente eficazes na classificação de LULC, com taxas de acurácia superiores a métodos tradicionais. Estudos reportaram uma precisão global com algoritmos de aprendizado de máquina superam significativamente as abordagens convencionais (Adugna et al., 2022; Yan et al., 2023).

Esses algoritmos não apenas classificam a cobertura do solo com precisão, mas também incorporam variáveis ambientais adicionais, como dados climáticos, geomorfológicos e de textura do solo, que aumentam a robustez do modelo. Estudos como o de Sousa et al. (2010) mostraram que a inclusão de variáveis como índice de vegetação, elevação e características topográficas aumentou a acurácia do RF em até 10% na classificação de LULC. Zeferino et al. (2020) também demonstraram que, ao integrar dados pedológicos e litológicos em modelos de aprendizado de máquina, é possível diferenciar usos antrópicos e naturais com maior clareza, aprimorando o monitoramento de áreas protegidas e permitindo a detecção de alterações temporais com precisão.

Além disso, a flexibilidade de modelos como RF permite a utilização de técnicas de seleção de covariáveis por corte de correlação, evitando modelos preditivos superestimados (Breiman, 2001), que melhora a performance do modelo ao reduzir a redundância de dados e destacar variáveis mais relevantes. De todo modo, estudos destacam que a incorporação de covariáveis promovem melhoras nos resultados da classificação (Zeferino et al., 2020).

Este estudo adotou uma abordagem semelhante, integrando dados de reflectância com variáveis topográficas e ambientais no município de Montes Claros, visando aprimorar a precisão na classificação de LULC em APPs.

Materiais e métodos

Localização e caracterização ambiental

A área de estudo é o município de Montes Claros, no norte de Minas Gerais, com foco nas APPs ($-16^{\circ} 32'$ a $-16^{\circ} 51'$ S e $-43^{\circ} 44'$ a $-44^{\circ} 03'$ O) (Figura 1). A região destaca-se por sua elevada heterogeneidade físico-geográfica, inserida em terrenos Fanerozóicos da bacia São Franciscana. Suas paisagens são dominadas por superfícies aplainadas, como planaltos e depressões dissecadas, com altitudes variando entre 500 e 1090 metros (Leite & Brito, 2012).

As nascentes e zonas de recarga concentram-se nas cotas mais elevadas (900 a 1090 metros), enquanto os cursos d'água predominam em altitudes mais baixas, próximas de 500 metros. As APPs, por sua vez, localizam-se principalmente em superfícies planas a onduladas, áreas frequentemente ocupadas por sistemas de uso antrópico, como agricultura, pastagens e silvicultura (Neves et al., 2017; Souza et al., 2022).

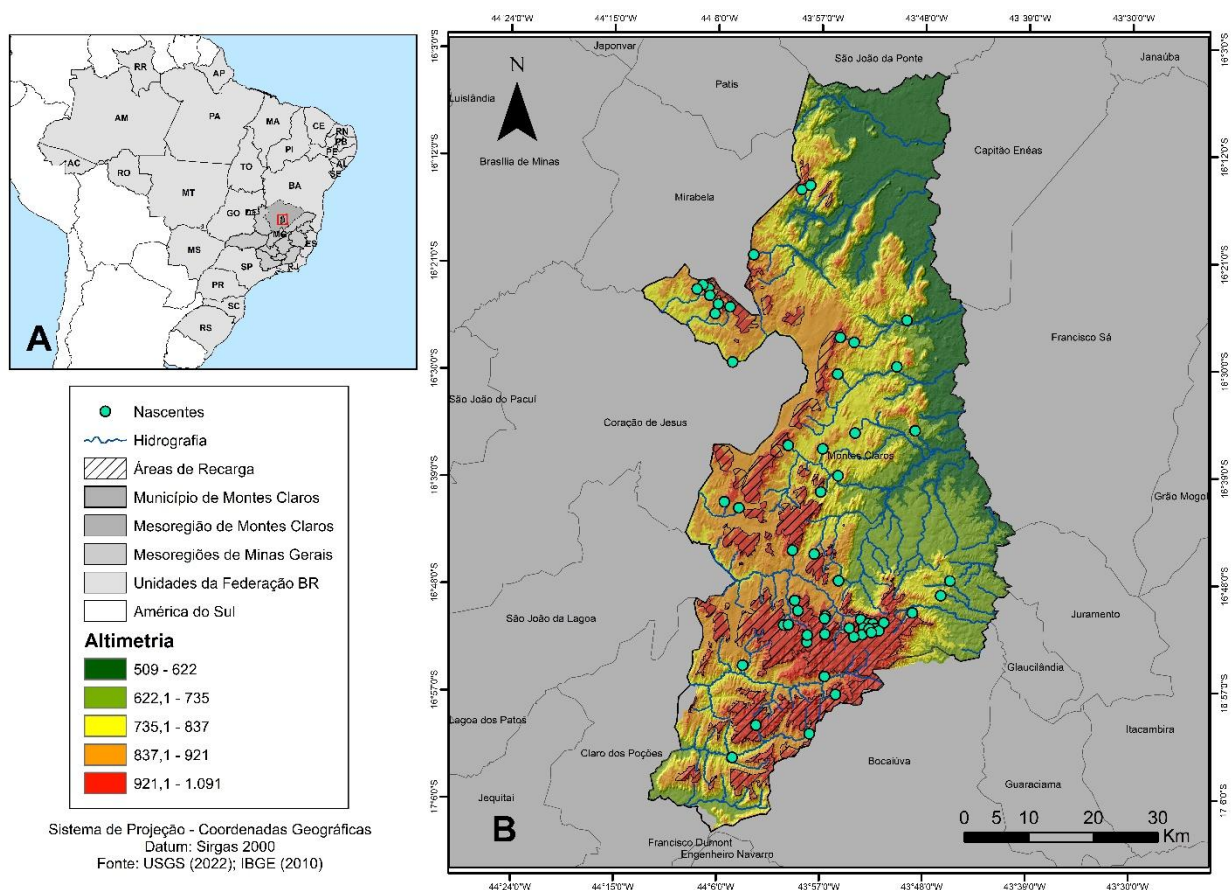


Figura 1: Localização da área de estudo, município de Montes Claros. **Fonte:** Os autores (2023).

Etapas Operacionais

Para elaboração do mapeamento de uso e cobertura da terra, as principais etapas metodológicas foram: I) coleta de amostras, II) organização de um banco de dados com

covariáveis auxiliares, III) treinamento do modelo de classificação supervisionada, IV) validação estatística do mapa de uso e cobertura da terra e V) criação de buffers considerando o código florestal para área de preservação permanente (Figura 2).

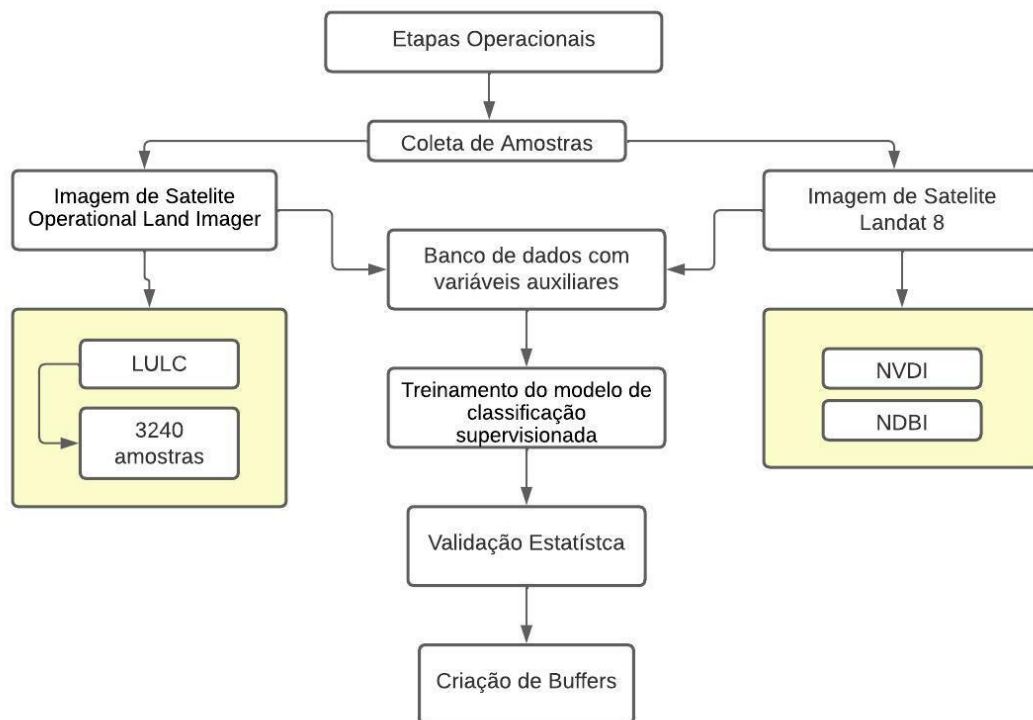


Figura 2: Fluxograma Operacional. LULC: *Land user and land cover* (uso e cobertura da terra). NDVI: índice de vegetação pela diferença normalizada. NDBI: índice de área construída pela diferença normalizada. **Fonte:** Os autores (2023).

Base de dados e Classificação

A partir do processo de fotointerpretação conduzido no software QGIS, sob imagens do sensor *Operational Land Imager* (OLI), foram coletadas amostras rotulando as classes de LULC no município de Montes Claros.

No processo de amostragem obteve-se um conjunto de 12 pixels com proximidade de 30 metros por classe, sobretudo com intuito de obter comportamentos espectrais homogêneos dos LULC. As classes selecionadas e o número de amostras foram: água (300), agricultura (240), eucalipto (300), cerrado (420), floresta tropical seca (420), influência urbana (300), mata ciliar (420), pastagem (540) e solo exposto (300). No total, foram coletadas 3240 amostras espaçadas no município de Montes Claros.

A classificação supervisionada por meio de aprendizagem de máquina permite a entrada de covariáveis para auxiliar na discriminação das classes de LULC. Portanto, para esse estudo, elaborou-se uma base de dados contemplando variáveis espectrais e topográficas. Foi utilizada uma imagem do satélite *Landsat 8* (sensor

OLI/TIRS) com resolução espacial de 30 metros referente ao mês de agosto de 2021. Sequencialmente, para compor a base de dados, foram selecionadas bandas do espectro visível (2, 3 e 4), infravermelho próximo (5) e infravermelho médio (6 e 7). Os índices espectrais derivados das bandas foram o índice de vegetação pela diferença normalizada (NDVI) (Rouse et al., 1974) e índice de área construída pela diferença normalizada (NDBI) (Zha et al., 2003). As variáveis do contexto topográfico foram obtidas a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE – SRTM, 30 metros de resolução), sendo: altitude, declividade, curvatura, curvatura plana, fluxo de direção, largura de fluxo e área de captação específica, profundidade de vale, orientação do relevo e índice de umidade topográfica. Todas covariáveis foram geradas no software QGIS.

Antes do processo de classificação, é necessário obter uma base de dados com covariáveis sem multicolinearidade entre si, para obter um modelo simples e parcimonioso. Portanto, no software R (R Core Team, 2022), com pacote Caret (Kuhn, 2017), aplicou-se a função

findcorrelation, ferramenta configurada com o método de Pearson (r) com limiar de 0.90. Dessa forma, os pares de covariáveis acima de 90% de correlação, são removidos da base de dados. As bandas 3 e 7 apresentaram r acima de 0.90, portanto, foram retiradas da base.

Com um conjunto de dados que possibilita a melhor interpretação do modelo de classificação, isto é, sem multicolinearidade, criou-se uma matriz associando as classes de LULC e as variáveis auxiliares. A matriz foi separada em treinamento e validação por meio da função *split*, no pacote Caret. Foram selecionadas 75% das amostras para treino (2430) e 25% para validação estatística (810). O algoritmo de classificação utilizado foi o *Random Forest* (RF), o qual tem mostrado elevada performance em mapeamentos de LULC (Gislason et al., 2006; Rodriguez-Galiano et al., 2012).

O RF é um classificador que utiliza árvore de decisão e votos aleatórios para a classificação supervisionada (Breiman, 2001). Este classificador é baseado no método *bootstrap*, isto é, o conjunto de treinamento é dividido em diversos grupos, que formam árvores de decisão descorrelacionadas, o que impede o sobreajuste do modelo (BOLFE et al., 2023). Cada árvore construída, é treinada e fornece uma predição das classes de LULC mapeadas. A classificação final é dada para as classes que receberam maior número de votos entre as árvores geradas (Liaw et al., 2002).

O treinamento e ajustes dos hiperparâmetros do RF foi realizado por meio de validação cruzada, com cinco grupos de separação das amostras e 10 repetições. Ainda na fase de treinamento, com a função *VarImp* foram selecionadas as variáveis mais explicativas para o mapeamento. Na sequência, foi realizada a validação estatística do algoritmo a partir dos 25% das amostras não usadas no treinamento. Os índices estatísticos usados na validação foram Acurácia global e Kappa (Equações 1 e 2).

$$\text{Acurácia Global} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

Onde: TP = número de verdadeiros positivos, ou seja, o número de amostras classificadas corretamente como positivas; TN = número de verdadeiros negativos, o número de amostras classificadas corretamente como negativas; FP = número de falsos positivos, o número de amostras classificadas incorretamente

como positivas; e FN = número de falsos negativos, isto é, o número de amostras classificadas incorretamente como negativas.

$$\text{Kappa} = \frac{Po-Pe}{1-Pe} \quad (2)$$

Onde: Po = proporção de concordância observada, que é a proporção de instâncias em que o modelo e as classificações de referência (verdadeiras) concordam; Pe = proporção de concordância esperada, que é a proporção de instâncias que se espera que concordem apenas por acaso. Também foram considerados os erros de omissão (amostras não classificadas de acordo com as classes de referência) e comissão (amostras classificadas erroneamente, pertencente a outras classes).

Criação de Buffers para análises das APP's

O *buffer* (mapa de distância) das nascentes, rios e áreas de recarga foram gerados conforme as metragens especificadas pelo novo código florestal (Lei Federal nº 12.651/2012). Dessa forma, para as APP's de nascentes, o raio mínimo ocupa 50 metros. Em relação aos cursos hídricos, a metragem varia de acordo com sua largura, com ênfase na região estudada, na qual os rios não ultrapassam os 10 metros de uma margem a outra, as APP's ocupam no mínimo 30 metros de cada lado. O código florestal também determina a criação de APP's para áreas de topo de morros e bordas dos tabuleiros ou chapadas, até a linha de ruptura do relevo, em faixa nunca inferior a 100 metros em projeções horizontais. Tais áreas foram vetorizadas, a fim de representar as áreas de recarga hídrica.

Resultados

Performance de classificação

A classificação do LULC no município de Montes Claros foi realizada por meio do algoritmo RF, treinado com covariáveis espectrais e topográficas. A partir dessa estrutura metodológica, foram obtidas Acurácia e Kappa de 99% e 0.99, indicando alta performance do RF na distinção dos LULC (Tabela1).

As estatísticas específicas também reforçam o desempenho do RF. Os erros de omissão e comissão mostraram baixa variação, com valores entre 0.94 e 1.33%, isto é, confusão mínima na separabilidade das classes mapeadas (Tabela 1).

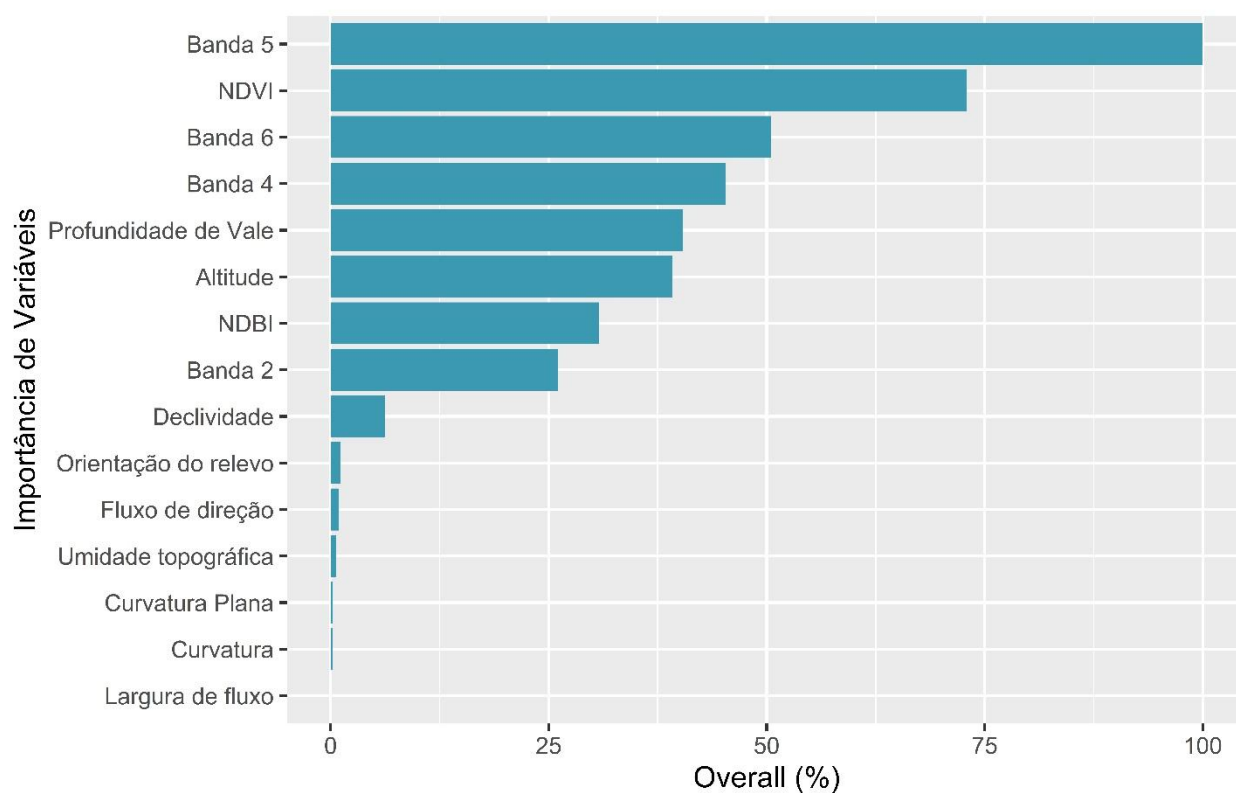
Tabela 1: Performance da classificação realizada com o algoritmo *Random Forest*.

Classes	TA	CE	EUC	MC	FTS	PA	SE	UB	AA	Total	EC (%)
Terras Agrícolas	58	0	0	0	0	0	0	0	0	58	0
Cerrado	0	105	0	1	0	0	0	0	0	106	0.94
Eucalipto	0	0	73	0	0	0	0	0	0	73	0
Mata Ciliar	0	0	0	103	0	0	0	0	0	103	0
Floresta Tropical Seca	0	0	0	0	105	0	0	0	1	106	0.94
Pastagem	0	0	0	0	0	135	0	0	0	135	0
Solo Exposto	0	0	0	0	0	0	75	0	0	75	0
Urbanização	0	0	0	0	0	0	0	75	0	75	0
Água	0	0	0	0	0	0	0	0	74	74	0
Total	58	105	73	104	105	135	75	75	75		
EO (%)	0	0	0	0.96	0	0	0	0	1.33		
Kappa	0.99										
Acurácia Global (%)	99										

Nota: TA = terras agrícolas; CE = Cerrado; EUC = Eucalipto; MC = Mata Ciliar; FTS: Floresta Tropical Seca; PA: pastagem; SE: solo exposto; UB = urbanização; AA = água. **Fonte:** Os autores (2023).

O RF forneceu um *ranking* indicando as covariáveis com maior potencial para explicar a distribuição do LULC na área de estudo (Figura 3). As variáveis mais importantes foram: Banda 5,

NDVI, Banda 6 e Banda 4. Portanto, os resultados sugerem que as características espectrais são as mais adequadas para a distinção das classes estabelecidas neste estudo.

**Figura 3** - Importância das variáveis selecionadas pelo modelo Random Forest (RF).

Fonte: Os autores (2023)

Análise do LULC nas APP's Conforme Código Florestal

Os resultados que indicaram até 2021, as APP's estavam em desconformidade com o código florestal. As áreas de recarga possuem extensão de 48,000 ha, com uma zona antropizada de 20%, ocupadas principalmente por pastagens e eucalipto

(Figura 4; Tabela 1). As nascentes mapeadas correspondem a uma área de 45 ha. Aproximadamente 8% dessas terras estão ocupadas ilegalmente por sistemas de pastagens, eucalipto e área urbana. De forma similar, as margens dos rios, que cobrem ~6355 ha, possuem 11% de suas terras ocupadas por usos antrópicos.

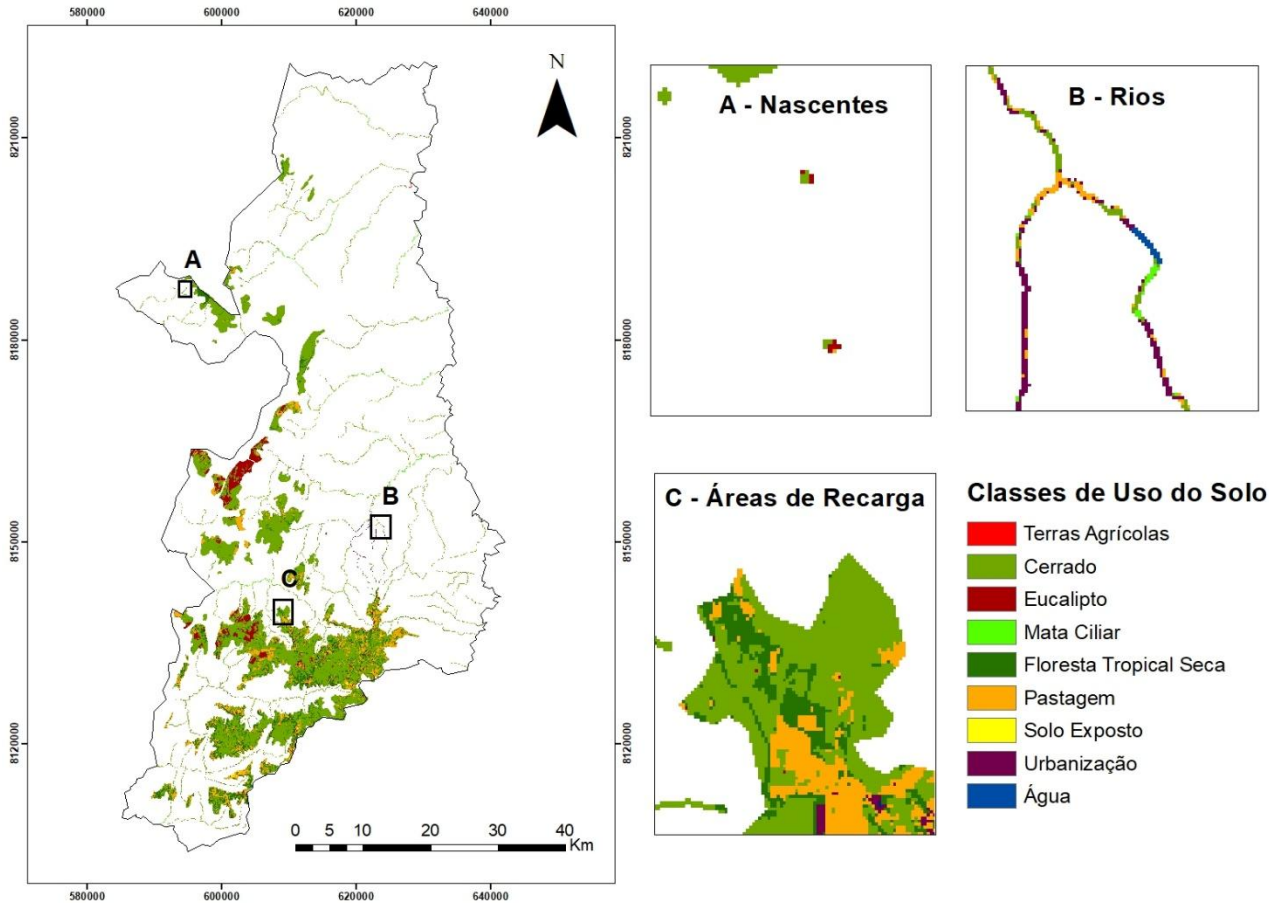


Figura 4 - Mapeamento de uso e cobertura da terra das áreas de preservação permanente analisadas. A) Nascentes; B) Rios; C) Áreas de recarga. Fonte: os autores (2023).

Tabela 2: Distribuição dos usos e coberturas da terra nas áreas de preservação permanente.

Tipo de Uso	Nascentes (ha)	Nascentes (%)	Rios (ha)	Rios (%)	Áreas de Recarga (ha)	Áreas de Recarga (%)
Terras Agrícolas	0,1	0,21	72,4	1,13	0	0
Cerrado	33,8	74,12	4371,6	68,52	32139,8	66
Eucalipto	1,1	2,41	39,4	0,61	2981,25	6,12
Mata Ciliar	1	2,19	896,2	14,04	94,5	0,19
Floresta Tropical Seca	6,8	14,91	393,5	6,16	6217,47	12,78
Pastagem	1,3	2,85	423,3	6,63	6520,23	13,4
Solo Exposto	0	0	3	0,04	161,64	0,33
Urbanização	1,3	2,85	156,4	2,45	516,78	1,06
Água	0,2	0,43	23,6	0,36	10,8	0,02

Fonte: Os autores (2023).

Discussão

Performance e importância das variáveis

O algoritmo RF mostrou alta performance para discriminação das classes de usos na área de estudo (Tabela 1). As métricas desse estudo são semelhantes às encontrados em trabalhos anteriores, confirmando a robustez do RF para classificação de LULC (Reynolds et al., 2016; Souza Jr et al., 2020).

As variáveis espectrais demonstraram alto potencial para a classificação de LULC na área de estudo (Figura 3). As bandas 4 (vermelho), 5 (infravermelho próximo) e o NDVI destacam-se por expressar o vigor vegetativo (Rouse et al., 1974). A análise foi realizada na estação seca (agosto), período em que variáveis associadas ao estágio da vegetação capturam com eficiência os contrastes espectrais entre fitofisionomias sazonais e usos da terra.

Nesse período, classes como mata seca, Cerrado e pastagens apresentam redução significativa no nível de verde (Ferreira et al., 2003). Em contrapartida, matas ciliares, próximas aos cursos d'água, áreas agrícolas com irrigação e plantações de eucalipto, que mantêm consumo hídrico constante, preservam o vigor vegetativo (Ferreira et al., 2003; Silva et al., 2020). Estudos reforçam a eficácia das bandas do vermelho, infravermelho próximo e do NDVI no mapeamento de LULC (Rajendran et al., 2016; Bolfe et al., 2023).

A banda 6 compreende ao infravermelho médio, faixa espectral responsável pela detecção na variação do conteúdo de umidade na superfície. Essa faixa tem se mostrado essencial para discriminação de corpos hídricos, pois a água absorve praticamente toda radiação incidente nesse espectro, sendo facilmente identificada e classificada nos mapeamentos (Du et al., 2014). Adicionalmente, áreas urbanas também podem ser separadas em classificações a partir da banda 6, pois ambientes urbanizados possuem baixos teores de umidade, apresentando contraste com altos valores de reflectância para o infravermelho médio (Bouzekri et al., 2015).

Dinâmica de Uso e Cobertura da Terra em APP's

Até 2021, aproximadamente 20% das APP's do município de Montes Claros estavam em desconformidade com a legislação ambiental. O mapeamento mostrou inserção de usos antrópicos nas extensões das APP's, cenário que segue a

tendência nacional, pois trabalhos anteriores mostraram que áreas prioritárias para preservação no Brasil são ocupadas por usos antrópicos (Almeira et al., 2020; Garcia et al., 2020; Gomes et al., 2022).

A pastagem é o principal uso da terra nas áreas de APP's (6944 ha). Em geral, os sistemas de pastagens inseridos nesses ambientes prioritários podem colocar em risco os níveis de biodiversidade e qualidade ambiental (MMA, 2011). Os pastos possuem baixa densidade de cobertura vegetal e geralmente são degradados, fator que impulsiona a perda de solos por erosão hídrica (Dias et al., 2017; Sampaio & Fernandes, 2021; Silva et al., 2024).

A susceptibilidade à erosão é ainda maior em áreas dominadas por materiais inconsolidados e arenitos, características comuns em regiões semiáridas. Esse processo resulta em graves impactos ambientais, incluindo o assoreamento de cursos d'água, o que reduz tanto a quantidade quanto a qualidade da água disponível (Lima et al., 2014; Costa et al., 2023; Guerrero et al., 2023). Estudos indicam que práticas inadequadas de manejo em áreas de APPs potencializam esses efeitos, prejudicando os serviços ecossistêmicos associados à regulação hídrica e à proteção do solo (Passos et al., 2021).

As áreas urbanizadas também se mostram proeminentes nas APP's da região de estudo (Figura 4). O município de Montes Claros passou por um intenso processo de expansão urbana nos últimos anos (Souza et al., 2020; Leite & França, 2022), o qual foi responsável por impactos na configuração ambiental da cidade. O mapeamento elaborado mostrou que o rio Vieira possui extensas faixas urbanizadas, corroborando com os resultados de Almeida et al. (2020). A falta de vegetação nativa em APP's urbanas é um dos principais problemas ambientais da atualidade nas cidades, sobretudo em função das recorrentes inundações (Pelegriini, 2021). Montes Claros é um exemplo, pois modelagens espaciais indicaram vários pontos de inundação na cidade (Leite & Rocha 2016; Leite et al., 2024).

O mapeamento também indicou a presença do eucalipto em APP's de topo de morros, ambientes considerados como áreas de recarga hídrica para aquíferos. No entanto, a presença do eucalipto nessas zonas deve implicar em sérios problemas ambientais (Guerino et al., 2022). Silva et al. (2020) em estudo no norte de Minas Gerais, constataram que os cultivos de eucalipto apresentam altas taxas de evapotranspiração anual em comparação com outras classes de uso da terra. Portanto, essas condições de maior consumo hídrico dos eucaliptos podem afetar negativamente

a dinâmica da água, reduzindo a quantidade de água subterrânea.

No caso de Montes Claros, que apresenta alta dependência de água subterrânea para abastecimento público, os impactos são ainda mais sensíveis. Nos últimos anos, o município enfrentou severos períodos de escassez hídrica, evidenciando a vulnerabilidade dos seus recursos hídricos frente a usos inadequados do solo e vegetação (Almeida et al., 2020). A redução da recarga dos aquíferos não só ameaça o abastecimento local, mas também coloca em risco a segurança hídrica regional, exigindo ações urgentes de manejo sustentável.

Conclusões

O mapeamento de Uso e Cobertura da Terra do município de Montes Claros, utilizando o algoritmo Random Forest, apresentou alta precisão (99% de acurácia), confirmando a eficácia de variáveis espectrais para a separação de classes de uso do solo e cobertura vegetal.

Foi constatada uma ocupação irregular nas Áreas de Preservação Permanente (APPs), desrespeitando o Código Florestal de 2012. Essas áreas, prioritárias para a conservação ambiental, sofrem pressão significativa de atividades antrópicas, como pastagens, cultivos de eucalipto, urbanização e agricultura.

As áreas de recarga hídrica foram identificadas como as mais vulneráveis. A ocupação indevida nessas zonas compromete a recarga dos aquíferos, reduzindo o lençol freático e as vazões dos rios.

O comprometimento dos serviços ambientais, como a regulação hídrica e a preservação dos ecossistemas aquáticos, é uma consequência direta das intervenções antrópicas identificadas. A cartografia gerada por este estudo é uma ferramenta essencial para o planejamento e monitoramento ambiental.

A integração de tecnologias de sensoriamento remoto e algoritmos de aprendizado de máquina, como demonstrado neste estudo, é fundamental para a gestão territorial.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos órgãos de fomento CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelas bolsas de pesquisa disponibilizadas.

Referências

- Adugna, T.; Xu, W.; Fan, J. (2022). Comparison of random forest and support vector machine classifiers for regional land cover mapping using coarse resolution FY-3C images. *Remote Sensing*, 14(3), 574. [10.3390/rs14030574](https://doi.org/10.3390/rs14030574)
- Almeida, M. I. S.; Filho, R. M.; Laurentino, C. M. M.; Silva, L. A. P. (2020). Análise ambiental nas margens fluviais da bacia hidrográfica do rio Vieira-município de Montes Claros/MG. *Revista Geonorte*, 11(37), 195-209. <https://doi.org/10.21170/geonorte.2020.V.11.N.37.195.209>
- Aquino, F. G.; Aguiar, L.; Camargo, A. J. A. de; Duboc, E.; Oliveira-Filho E. C.; Parron, L. M. (2008). Sustentabilidade no bioma Cerrado: visão geral e desafios. In L. M. Parron; L. M. S. Aguiar; E. Duboc; E. C. Oliveira-Filho; A. J. A. de Camargo; F. G. Aquino. (Orgs.) *Cerrado: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável*. (32ª ed., pp. 23-29). Brasília: Embrapa. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/570979>
- Barros, K. O.; Marcatti, G. E.; Costa, F. R.; Oliveira, J. C. de; Ribeiro, C. A. A. S.; Soares, V. P.; Silva, E. (2013). Análise temporal das classes de uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio Vieira, Montes Claros, Minas Gerais. *Revista Agrogeoambiental*, 5(2), 43-54. <https://doi.org/10.18406/2316-1817v5n22013441>
- Barros, K. O.; Ribeiro, C. A. A. S.; Marcatti, G. E.; Silva, E.; Soares, V. P. (2016). Evolução do uso da terra na bacia hidrográfica do Rio Vieira, Montes Claros, MG. *Revista de Geografia*, 33(1), 68-83. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/revistageografia/article/view/229175>
- Becerra, J. A. B.; Shimabukuro, Y. E.; Alvalá, R. C. S. (2009). Relação do padrão sazonal da vegetação com a precipitação na região de Cerrado da Amazônia Legal, usando índices espectrais de vegetação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24(2), 125-134. <https://www.scielo.br/rbmet/a/8vw3vVpSXR3tgBsp6Yxgcvt/?format=pdf&lang=pt>
- Bolfe, É. L.; Parreiras, T. C.; Silva, L. A. P. D.; Sano, E. E.; Bettiol, G. M.; Victoria, D. D. C.; Sanches, I. D. & Vicente, L. E. (2023). Mapping Agricultural Intensification in the Brazilian Savanna: A Machine Learning Approach Using Harmonized Data from Landsat Sentinel-2. *ISPRS International Journal of Geo-*

- Information, 12(7), 263.
<https://doi.org/10.3390/ijgi12070263>
- Bouzekri, S; Lasbet, A. A; Lachehab, A. (2015). A new spectral index for extraction of built-up area using Landsat-8 data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 43, 867-873.
<https://doi.org/10.1007/s12524-015-0460-6>
- Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. (2012). Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Presidência da República.
https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/12651.htm
- Braz, A. M.; Oliveira, I. J.; Cavalcanti, L. C. S. (2019). Mapeamento do uso e cobertura da terra no município de Mineiros (GO): uma representação a partir das fitofisionomias do Cerrado. *Revista Ambiente*, 15(3), 675-694.
https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiente/article/view/5917/pdf_1
- Breiman, L. Random forests. (2001) *Machine learning*, 45, 5-32.
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Brito, J. L.; Leite, M. R.; Ferreira, E. J.; Leite, M. E. (2013). Evolução Geográfica do uso/cobertura da terra na bacia do Rio Vieira no Norte de Minas Gerais. *Revista do Departamento de Geografia*, 26, 169-194.
<https://doi.org/10.7154/RDG.2013.0026.0009>
- Centurion, J.F.; Demattê, J.L.I. Sistemas de preparo de solos de cerrado: Efeitos nas propriedades físicas e na cultura do milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 27, n. 2, p. 315-324, 1992.
- Costa, L. R. F da; Souza, J. P. S. S.; Hernando, B. F.; Cavalcanti, J. A. D.; Leite, M. R. (2023). Geomorfologia da Mesorregião Norte de Minas Gerais–Brasil. *Revista da ANPEGE*, 19(40).
<https://doi.org/10.5418/ra2023.v19i40.17870>
- Dias, L. C. C.; Moschini, L. E.; Trevisan, D. (2017). A influência das atividades antrópicas na paisagem da Área de Proteção Ambiental estadual do Rio Pandeiros, MG-Brasil. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, 6(2), 85-105.
- Du, Z.; Li, W.; Zhou, D.; Tian, L.; Ling, F.; Wang, H.; & Sun, B. (2014). Analysis of Landsat-8 OLI imagery for land surface water mapping. *Remote sensing letters*, 5(7), 672-681.
<https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.960606>
- Dupin, M. G.; Espírito-Santo, M. M.; Leite, M. E.; Silva, J. O.; Rocha, A. M.; Barbosa, R. S.; Anaya, F. C. (2018). Land use policies and deforestation in Brazilian tropical dry forests between 2000 and 2015. *Environmental Research Letters*, 13(3), 035008.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aaadea/pdf>
- Espírito-Santo, M. M. D.; Rocha, A. M.; Leite, M. E.; Silva, J. O.; Silva, L. A. P.; Sanchez-Azofeifa, G. A. (2020). Biophysical and socioeconomic factors associated to deforestation and forest recovery in Brazilian tropical dry forests. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 569184.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.569184>
- Ferreira, L. G.; Yoshioka, H.; Huete, A.; Sano, E. E. (2003). Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). *Remote Sensing of Environment*, 87(4), 534-550.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2002.09.003>
- Garcia, J. M; Mantovani, P; GOMES, R. C; Longo, R. M; Demanboro, A. C; Bettine, S. D. C. (2020). Degradação ambiental e qualidade da água em nascentes de rios urbanos. *Sociedade & Natureza*, 30, 228-254.
<https://doi.org/10.14393/SN-v30n1-2018-10>
- Garner, G.; Malcolm, I. A.; Sadler, J. P.; Hannah, D. M. (2017). The role of riparian vegetation density, channel orientation and water velocity in determining river temperature dynamics. *Journal of Hydrology*, 553, 47-485,
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.024>

- Gislason, P. O.; Benediktsson, J. A.; Sveinsson, J. R. (2006). Random forests for land cover classification. *Pattern recognition letters*, 27(4), p. 294-300. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.08.011>
- Grecchi, R. C.; Bertani, G.; Trabaquini, K.; Shimabukuro, Y. E.; Formaggio, A. R. (2016). Análise espaço-temporal da conversão do cerrado em áreas agrícolas na região de sapezal, Mato Grosso, entre os anos de 1981 e 2011. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(1), 91-107. <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44473/23546>
- Gomes, M. C.; Sousa, A. C. R. C.; Bayer, M.; Faria, K. M. S. (2022). Degradação da vegetação nativa e implicações sobre o Regime hidrológico na bacia hidrográfica do Rio Claro, Sub-bacia do rio Araguaia (GO). *Geociências*, 41(3), 559-568. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i03.15579>
- Guerrero, J. V. R.; Matavelli, G. A. V.; Lorandi, R.; Lollo, J. A.; Gomes, A.; Chaves, M.; Moschini, L. E.; Nunes, F. G. (2023). Mapping potential erosive zones in a Brazilian watershed: towards sustainable territorial planning. *Revista do departamento de Geografia*, 43, 12. [10.11606/ISSN.2236-2878.rdg.2023.204576](https://doi.org/10.11606/ISSN.2236-2878.rdg.2023.204576)
- Guerino, R. M. G.; Morais, I. L.; Santos, A. B. S.; Campos, R. M. (2022). Expansion and socio-environmental impacts of the culture of Eucalyptus Spp. (Myrtaceae) in Brazil: a literature panorama. *Research, Society and Development*, 11(3).
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. (2023). <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/default/forestation/biomes/cerrado/increments>
- Kuhn, M. (2023). caret: Classification and regression training (version R package version 6.0-76).
- Leite, M. E.; Santos, I. S.; Almeida, J. W. L. (2011). Mudança de uso do solo na bacia do rio Vieira, em Montes Claros/MG. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 4, 779-792.
- Leite, M. R.; Brito, J. L. S. (2012). Mapeamento morfoestrutural e morfoescultural na região de cerrado no Norte de Minas Gerais. *Sociedade & Natureza*, 24, 115-125. <https://doi.org/10.1590/S1982-45132012000100010>
- Leite, M. E.; Rocha, A. M. (2016). Mapeamento da susceptibilidade à inundação em áreas urbanas: o caso da cidade de Montes Claros/MG. *Geosul*, 31(62), 125-150. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2016v31n62p125>
- Leite, M. E.; Leite, M. R. R.; Borges, M. G.; Rodrigues, H. L. A. (2018). Mapeamento Das Fitofisionomias Do Cerrado No Norte De Minas Gerais. *Revista de Geografia-PPGEO-UFJF, Juiz de Fora*, 8(1), 85-98.
- Leite, M. E.; França, I. S. (2022). Spatial dynamics and urban morphology in a medium-sized brazilian city. *Research, Society and Development*, 11 (8), Artigo e32311831052. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.31052>
- Leite, M. E.; Dias, F. T.; Almeida, J. W. L.; Santos-Neto, N. F. dos. (2024). Land use and environmental impacts: Flood model in a medium-sized Brazilian city as a tool for urban sustainability. *Environmental Science & Policy*, 151, Artigo 103613. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.103613>
- Liaw, A.; Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. *R news*, 2(3), 18-22.
- Lima, G. C.; Silva, M. L.; Oliveira, M. S. D.; Curi, N.; Silva, M. A. D.; Oliveira, A. H. (2014). Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 517-526. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000500008>
- Lima, Karlla Karem Silva et al. (2024). Dinâmica espaço temporal do uso e cobertura do solo na região do MATOPIBA. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 7(1), 281-296. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p281-296>
- Martins, A. P.; Galvani, E. (2020). Relação entre uso e cobertura da terra e parâmetros biofísicos no Cerrado Brasileiro. *Revista do Departamento de Geografia*, 40, 148-162.

- Mascarenhas, L. M. A.; Ferreira, M. E; Ferreira, L. G. (2009). Sensoriamento remoto como instrumento de controle e proteção ambiental: análise da cobertura vegetal remanescente na bacia do rio Araguaia. *Sociedade & natureza*, 21, 5-18, <https://doi.org/10.1590/S1982-45132009000100001>
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. (2011). Relatório de inspeção: Área atingida pela tragédia das chuvas região serrana do Rio de Janeiro. Brasília: MMA, 85p.
- Nery, C. V. M; Braga, F. L.; Moreira, A. A.; Fernandes, H. S. (2013). Aplicação do Novo Código Florestal na avaliação das Áreas de Preservação Permanente em topo de morro na sub-bacia do Rio Canoas no município de Montes Claros/MG. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6(6), 1673-1688. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20130048>
- Neves, G. D.; Sena-Souza, J. P.; Vasconcelos, V.; Martins, É. D. S.; JUNIOR, A. F. C. (2017). Dinâmica da cobertura da terra do Distrito Federal dentro de suas unidades geomorfológicas. *Sociedade & Natureza*, 29, 387-400. <https://doi.org/10.14393/SN-v29n3-2017-2>
- Passos, F. O; Silva, B. C; Silva, F. G. B. (2021). Avaliação de impactos de mudanças no uso e manejo do solo sobre as vazões da Bacia Hidrográfica do Ribeirão José Pereira, utilizando o modelo SWAT. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(02), 619-633. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p619-633>
- Pelegri, M. S. (2021). Áreas de preservação permanente urbanas e análise de Inundações no município de São Carlos - aplicação do código florestal brasileiro no córrego do Monjolinho. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 4(3), 3003-3017. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n3-019>
- Polizel, S. P; Vieira, R. M. D. S. P; Pompeu, J; Ferreira, Y. C; Sousa-Neto, E. R; Barbosa, A. A; Ometto, J. P. H. B. (2021). Analysing the dynamics of land use in the context of current conservation policies and land tenure in the Cerrado–MATOPIBA region (Brazil). *Land use policy*, 109, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105713>
- Rajendran, S; Al-Sayigh, A. R; Al-Awadhi, T. (2016). Vegetation analysis study in and around Sultan Qaboos University, Oman, using Geoeye-1 satellite data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 19(2), 297-311. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.03.005>
- Ratter, J. A; Ribeiro, J. F; Bridgewater, S. (1997). The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. *Annals of botany*, 80(3), 223-230. <https://doi.org/10.1006/anbo.1997.0469>
- Reis, M. G. D.; Ribeiro, A.; Baesso, R. C. E.; Souza, W. G. D.; Fonseca, S.; Loos, R. A. (2014). Balanço hídrico e de energia para plantios de eucalipto com cobertura parcial do solo. *Ciência Florestal*, Santa Maria, 24(1), 117-126. <https://doi.org/10.5902/1980509813329>
- Reynolds, J.; Wesson, K.; Desbiez, A. L.; Ochoa-Quintero, J. M.; Leimgruber, P. (2016). Using remote sensing and random forest to assess the conservation status of critical Cerrado habitats in Mato Grosso do Sul, Brazil. *Land*, 5(2), 12. <https://doi.org/10.3390/land5020012>
- Rocha, M. I. S.; Nascimento, D. T. F. Distribuição espaço-temporal das queimadas no bioma Cerrado (1999/2018) e sua ocorrência conforme os diferentes tipos de cobertura e uso do solo. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 14, n. 3, p. 1220-1235, 2021. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1220-1235>
- Rocha, Rodrigo; Güntzel, Adriana Maria. (2021). Ocupação da Terra e Conflitos de Uso com as Áreas de Preservação Permanente Nativa Remanescente de Cerrado na Sub-bacia do Córrego do Veado, Bacia do Alto Taquari, MS. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(6), 3437-3448. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.6.p3433-3444>
- Rodriguez-Galiano, V. F.; Ghimire, B.; Rogan, J.; Chica-Olmo, M.; Rigol-Sanchez, J. P. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 67, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>

- Roquette, J. G. (2018). Distribuição da biomassa no cerrado e a sua importância na armazenagem do carbono. *Ciência Florestal*, 28, 1350-1363. <https://doi.org/10.5902/1980509833354>
- Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, 351(1), 309.
- Sampaio, R. A.; Fernandes, L. A. (2021). Aspectos geológicos e pedológicos dos solos do município de Montes Claros – MG. *Caderno De Ciências Agrárias*, 13, 1-18. <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2021.33964>
- Sano, E. E.; Rosa, R.; Brito, J.L.S.; Ferreira, L. G. (2008). Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43, 153-156. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008000100020>
- Silva, L. A.; Souza, C. M. P.; Leite, M. E.; Filgueiras, R. (2020). Estimativa da Perda de Água Na APA do Rio Pandeiros, Minas Gerais. *Caderno de Geografia*, 30(62), 768-768. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2020v30n62p768>
- Silva, R. R; et al. (2024). Diagnóstico Ambiental e Caracterização da Área de Preservação Permanente do Igarapé Encrenca em Rolim de Moura, Rondônia, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. l.], 17(5), 3490-507. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.5.p3490-507>
- Sousa, B. F. S.; Teixeira, A. D. S.; Silva, F. D. A. T. F. D.; Andrade, E. M. D., Braga, A. P. D. S. (2010). Avaliação de classificadores basados em aprendizado de máquina para a classificação do uso e cobertura da terra no bioma caatinga.
- Souza Jr., C.; Zanin Shimbo, J.; Rosa, M.; Parente, L.; Alencar, A.; Rudorff, B.; Hasenack, H.; Matsumoto, M.; Ferreira, L.; Souza-Filho, P.; Oliveira, S.; Rocha, W.; Fonseca, A.; Balzani, C.; Diniz, C.; Costa, D.; Monteiro, D.; Rosa, E.; Vélez-Martin, E.; Azevedo, T. (2020). Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, 12(17), 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- Souza, C. M. P; Filho, R. M.; Passos, R. S; Leite, M. E; Veloso, G. V; França, I. S. (2020). Modelagem espaço-temporal de ilhas de calor urbana e correlação com variáveis-Montes Claros, MG, Brasil. *Geo UERJ*, 37, Artigo e42189-e42189. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2020.42189>
- Souza, J. P. S.; Crespo, T. V.; Soares, G. C. S; Costa, L. R. F.; Leite, M. R. (2022). Influência do relevo na dinâmica temporal do uso e cobertura da terra no norte de Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(05), 2475-2485.
- Talukdar, S., Singha, P., Mahato, S., Shahfahad, Pal, S., Liou, Y. -A., & Rahman, A. (2020). Land-use land-cover classification by machine learning classifiers for satellite observations — A review. *Remote Sensing*, 12(7), 1135. <https://doi.org/10.3390/rs12071135>
- Wang, J.; Bretz, M.; Dewan, M. A. A.; Delavar, M. A. (2022). Machine learning in modelling land-use and land cover-change (LULCC): Current status, challenges and prospects. *Science of the Total Environment*, 822, 153559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153559>
- Yan, X; Li, J; Smith, A. R; Yang, D; Ma, T; Su, Y. (2023). Rapid Land Cover Classification Using a 36-Year Time Series of Multi-Source Remote Sensing Data. *Land*, 12(12), 2149. <https://doi.org/10.3390/land12122149>
- Zanirato, S. H. (2021). O patrimônio mundial em território brasileiro: vulnerabilidades à conservação em um cenário de mudanças climáticas. *Revista Percursos*, 22(49), 95-123.
- Zeferino, L. B.; Souza, L. F. T.; Amaral, C. H. do; Filho, E. I. F.; Oliveira, T. S. de. (2020). Environmental data increase the accuracy of land use and land cover classification? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91, 102128. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102128>
- Zha, Y; Gao, J; Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International journal of remote sensing*, 24(3), 583-594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>