



Fatores ambientais determinantes para a produtividade de plantios florestais estabelecidos na região do Alto Jequitinhonha

Determinant environmental factors for the productivity of established forest Plantations in the Alto Jequitinhonha Region

Bruno Henrique Ribeiro Pereira¹; Maria Luiza de Azevedo²; Artur Ferro de Souza³; Nívea Maria Mafra Rodrigues⁴; Guilherme Barca Pereira⁵; Eric Bastos Gorgens⁶

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
bruno.pereira@ufvjm.edu.br

²Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
marialuiza.azevedo@ufvjm.edu.br

³Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
artur.ferro@ufvjm.edu.br

⁴Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
niveamafra11@gmail.com

⁵Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG
barca.guilherme@ufvjm.edu.br

⁶Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Diamantina/MG

Resumo: Este estudo objetivou identificar e hierarquizar os fatores ambientais que influenciam a produtividade de povoamentos florestais estabelecidos no Alto Jequitinhonha, MG. Utilizando dados de altura do dossel (GEDI) e 10 variáveis ambientais (climáticas, edáficas, atmosféricas), a análise foi focada em povoamentos com altura superior à mediana, a fim de representar as áreas mais estabelecidas. A importância de cada fator foi determinada pelo algoritmo de seleção de atributos Boruta. Os resultados revelaram que a radiação solar (CD) e variáveis hídricas (PW, AP) foram as mais influentes, enquanto as variáveis térmicas (AT, TM) mostraram baixa relevância. Conclui-se que a produtividade dos povoamentos em estágio avançado de crescimento na região é governada por uma forte co-limitação de energia e água, e não pela temperatura. Este achado é fundamental para o zoneamento de aptidão, indicando que o balanço entre radiação solar e recursos hídricos define o potencial para a silvicultura de alta produtividade.

Palavras-chaves: GEDI; Fatores Limitantes; Relação Sítio-Produção.

Abstract: This study aimed to identify and rank the environmental drivers influencing the productivity of established forest plantations in Alto Jequitinhonha, MG, Brazil. Using canopy height data (GEDI) and 10 environmental variables (climatic, edaphic, and atmospheric), the analysis focused on established stands by filtering for data above the median height. The importance of each factor was determined using the Boruta feature selection algorithm. Results revealed that solar radiation (CD) and water-related variables (PW, AP) were the most influential, whereas thermal variables (AT, TM) showed low relevance. We conclude that the productivity of established stands in the region is governed by a strong co-limitation of energy and water, rather than by temperature. This finding is critical for suitability zoning, indicating that the optimal balance between solar radiation and water resources defines the potential for high-productivity forestry.

Keywords: GEDI; Limiting Factors; Site-Production Relationship.



INTRODUÇÃO

A silvicultura representa um dos pilares da economia brasileira, sendo fundamental para a cadeia produtiva de setores como papel e celulose, siderurgia e energia (da Cunha et al., 2019). O estado de Minas Gerais se destaca como o maior produtor de madeira de florestas plantadas do país (Minas Gerais, 2025), e a identificação dos fatores que maximizam a produtividade é essencial para a manutenção e expansão da sua competitividade. Mais do que a simples expansão de área, a intensificação sustentável da silvicultura depende do conhecimento aprofundado dos fatores ambientais que governam o crescimento, permitindo um manejo sítio-específico e a maximização do potencial produtivo das florestas.

O Vale do Jequitinhonha, localizado no nordeste de Minas Gerais, é uma região que possui grande potencial para a expansão da atividade florestal (Chauvet et al., 2025). A heterogeneidade de suas condições ambientais, pode resultar em uma variação significativa do potencial produtivo ao longo de seu território (Freitas et al., 2020). A compreensão detalhada de como as árvores respondem a essa diversidade de ambientes é crucial para um zoneamento florestal eficaz.

A altura do dossel florestal é amplamente reconhecida como uma variável-chave, diretamente correlacionada com o volume, a biomassa e a produtividade de um povoamento (Wang et al., 2019). O advento de tecnologias de sensoriamento remoto, especialmente de sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*) a bordo de plataformas orbitais como o GEDI (*Global Ecosystem Dynamics Investigation*), representa uma revolução para o monitoramento florestal, permitindo a obtenção de estimativas precisas da estrutura vertical da vegetação em escala regional e global (Dubayah et al., 2020).

Diante do exposto, este estudo tem como objetivo identificar e hierarquizar os principais fatores ambientais que governam a produtividade em plantios florestais estabelecidos. A análise concentra-se em povoamentos de maior desenvolvimento, isolados por um filtro de altura, a fim de determinar quais variáveis climáticas e edáficas mais influenciam o crescimento na região do Alto Jequitinhonha.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na região do Alto Jequitinhonha, localizado no nordeste de Minas Gerais. A aquisição e o processamento de dados geoespaciais foram realizados na



plataforma de geoprocessamento em nuvem Google Earth Engine (GEE). Inicialmente, foi gerada uma máscara de silvicultura a partir da classificação de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomas (Coleção 9). Em seguida, os dados de altura do dossel foram extraídos do sensor GEDI (produto L4A), utilizando-se a métrica da altura relativa do percentil 98 (RH98).

Complementarmente, um conjunto de 10 variáveis ambientais foi obtido de diferentes acervos públicos para caracterizar as condições de crescimento. As variáveis climáticas, obtidas da coleção WorldClim (Fick; Hijmans, 2017) foram: Precipitação Anual (AP), Sazonalidade da Precipitação (PS), Precipitação do Mês Mais Chuvoso (PW), Precipitação do Mês Mais Seco (PD), Temperatura Média Anual (AT), Sazonalidade da Temperatura (TS) e Temperatura Máxima (TM). As variáveis edáficas da coleção OpenLandMap (Hengl, 2018; Hengl; Gupta, 2019) incluíram o Teor de Argila no Solo (CC) e o Conteúdo de Água no Solo (WC). Por fim, o Número Médio de Dias Claros (CD) foi calculado a partir de dados do sensor MODIS (2014-2018). Todas essas informações foram integradas em um único cubo de dados raster na plataforma de geoprocessamento em nuvem Google Earth Engine (GEE), de onde foram amostrados 200 pontos aleatórios dentro da classe de silvicultura.

Para focar a análise nos povoamentos com maior desenvolvimento, foi aplicado um filtro aos dados, selecionando apenas os pontos amostrais cuja altura do dossel (RH98) era superior à mediana calculada para a região, que foi de 15,54 metros de altura. A identificação das variáveis mais influentes neste conjunto de dados filtrado foi realizada por meio do algoritmo Boruta (Kursa; Kursa, 2018) um método de seleção de atributos baseado em Random Forest. O Boruta determina a relevância de cada variável ao compará-la interativamente com a importância de variáveis "sombra" (aleatorizadas). A elaboração do mapa temático final foi realizada no software QGIS (QGIS, 2016).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área de silvicultura ocupa uma porção significativa da paisagem do Alto Jequitinhonha. A área total da sub-região é de 2.139.281,2 ha, dos quais 242.037,33 ha são ocupados por plantios florestais, o que corresponde a 11,31% do território (Figura 1). Os fatores ambientais que mais influenciam a altura dos povoamentos florestais estabelecidos estão representados graficamente (Figura 2).

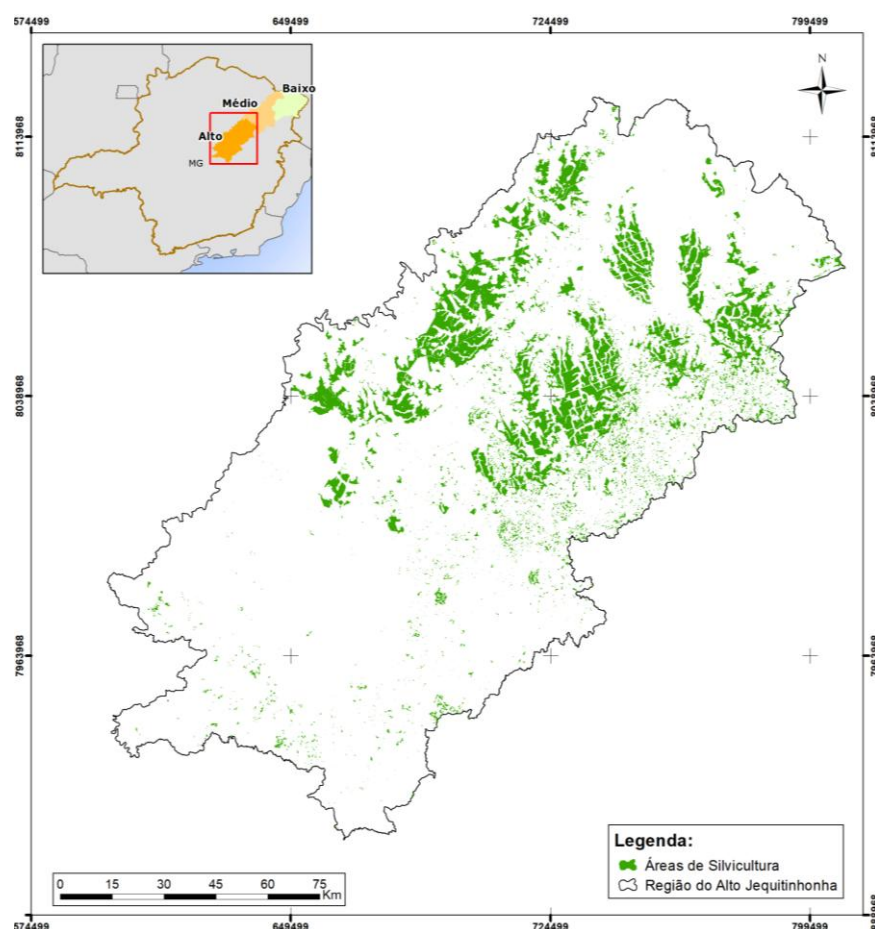


Figura 1: Mapa da distribuição dos povoamentos de silvicultura na sub-região do Alto Jequitinhonha (MG).

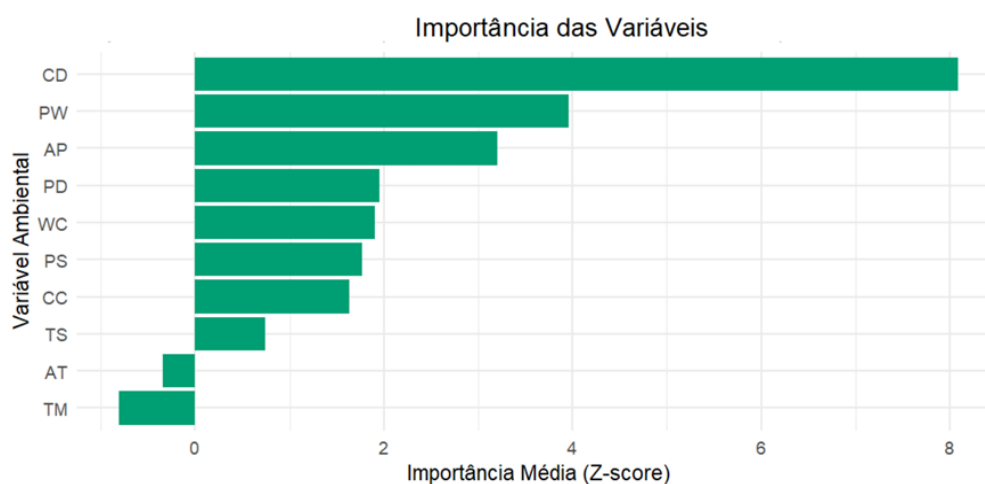


Figura 2: Importância das variáveis ambientais, ranqueadas pela média do Z-score, derivado da análise Boruta para os povoamentos acima da altura mediana.



A análise revelou que a produtividade dos povoamentos é governada por uma forte sinergia entre energia (radiação solar) e água (Figura 3). A variável CD (Número de Dias Claros), um proxy para a radiação solar, emergiu como o fator de maior poder explicativo. Este resultado sugere que, para povoamentos estabelecidos, a energia luminosa disponível para a fotossíntese é o principal fator para maximizar o crescimento. Logo em seguida, variáveis hídricas como a PW (Precipitação do Mês Mais Chuvoso) e a AP (Precipitação Anual) foram confirmadas como fatores de alta importância. A relevância da PW, em particular, indica que um pico de chuvas concentrado na estação de maior crescimento é fundamental para que os povoamentos capitalizem a alta disponibilidade de luz e a convertam em biomassa.

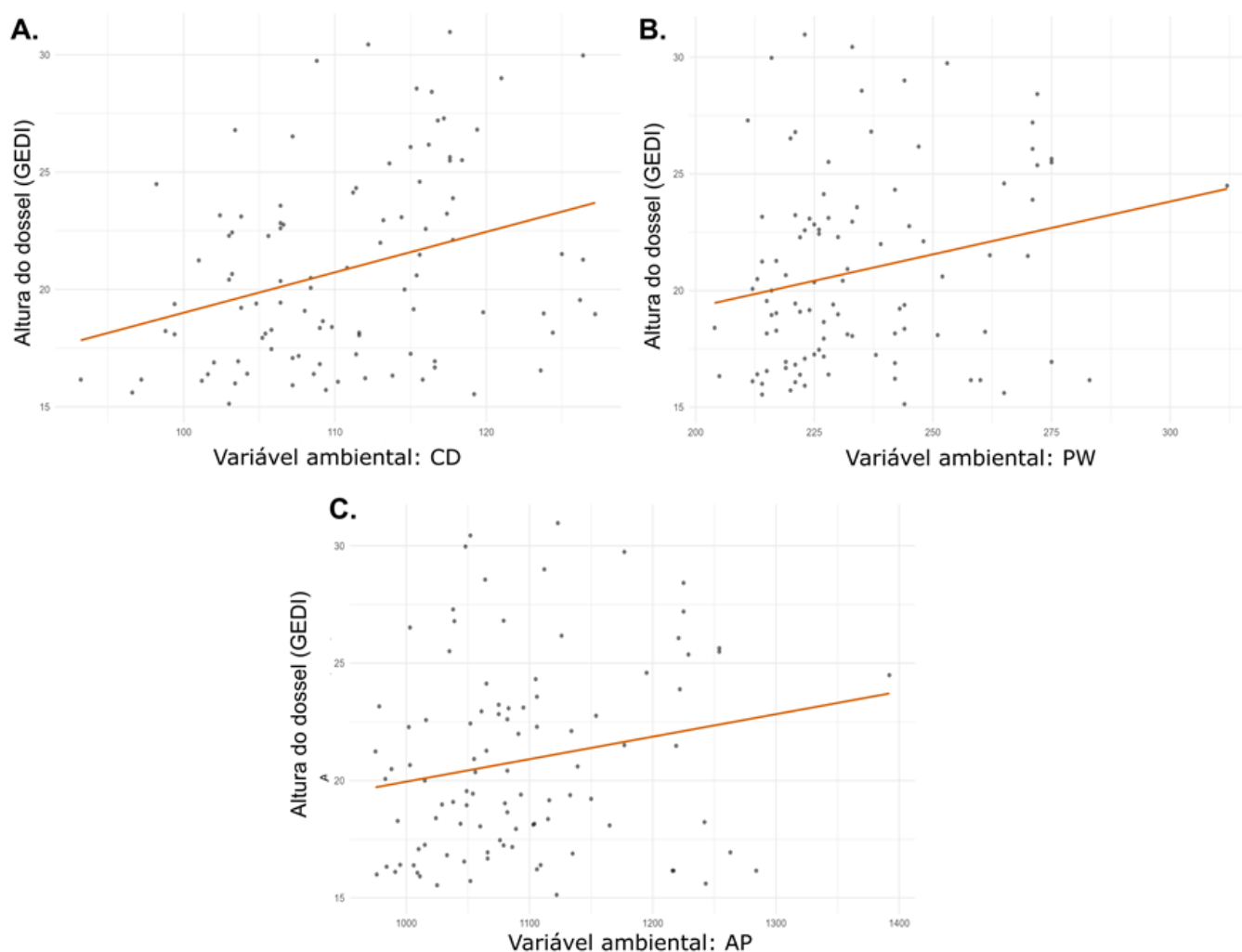


Figura 3: Relação entre a altura do dossel (dados GEDI) e as variáveis ambientais mais relevantes, com tendência linear ajustada (linha vermelha). A) Número de dias claros (CD). B) Precipitação no mês mais chuvoso (PW). C) Precipitação anual (AP).



Já as variáveis TM (Temperatura Máxima) quanto a AT (Temperatura Média Anual) foram as variáveis de menor importância. Isso indica que, para os povoamentos estabelecidos na região do Alto Jequitinhonha, o regime de temperatura existente não atua como um fator limitante primário. As temperaturas locais provavelmente se encontram dentro de uma faixa ótima ou, no mínimo, tolerável para a espécie, não impondo um estresse fisiológico que restrinja o crescimento, em nítido contraste com a forte dependência da luz e da água. A análise focada neste estrato de maior desenvolvimento permitiu identificar que o potencial produtivo máximo é atingido em locais que combinam alta disponibilidade de energia solar com um regime de chuvas robusto, especialmente durante a estação chuvosa, que corresponde à estação de maior crescimento.

CONCLUSÃO

Este estudo mostrou que a produtividade dos povoamentos florestais no Alto Jequitinhonha é principalmente determinada pela disponibilidade de radiação solar e água. O número de dias claros e a precipitação no mês mais chuvoso foram as variáveis mais influentes, enquanto as temperaturas apresentaram baixa relevância. Esses resultados indicam que o crescimento máximo ocorre onde há sinergia entre alta luminosidade e chuvas concentradas na estação de maior crescimento. Nossa análise focada em múltiplas variáveis ambientais permitiu identificar áreas com maior potencial produtivo, a qual pode contribuir para um zoneamento mais eficiente e estratégias de manejo específicas para a região.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, CNPq (projetos 402513/2024-0 e 402513/2024-0), e FAPEMIG (projetos APQ-00943-21 e APQ-00185-22).

REFERÊNCIAS

CHAUVET, X. D. M.; DE JESUS FRANÇA, L. C.; MUCIDA, D. P. et al. Quatro Décadas do Setor Florestal em Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 18(02), 1308-1333, 2025.

DA CUNHA, G. T.; LEITE, I.; LOPES, R. M. O. et al. R. Panorama do setor florestal brasileiro com ênfase no estado de Minas Gerais. *Enciclopédia biosfera*, Goiânia, v.16, p. 1582, 2019.



DUBAYAH, R.; BLAIR, J. B.; GOETZ, S. et al. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of remote sensing*, 1, 100002, 2020.

FERREIRA, V. O. Unidades de Paisagem Da Bacia Do Rio Jequitinhonha, Em Minas Gerais: Subsídios Para a Gestão de Recursos Hídricos. *Caminhos Geografia*, 12, 239-257, 2011.

FREITAS, E. C. S.; DE PAIVA, H. N.; NEVES, J. C. L. et al. Modeling of eucalyptus productivity with artificial neural networks. *Industrial Crops and Products*, 146, 112149, 2020.

HENGL, T. Clay content in % (kg/kg) at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution (Version v0.2) [data set]. 2018.
<https://doi.org/10.5281/ZENODO.2525663>

HENGL, T.; GUPTA, S. Soil water content (volumetric %) for 33 kPa and 1500 kPa suctions predicted at 6 standard depths (0, 10, 30, 60, 100 and 200 cm) at 250 m resolution [data set]. 2019. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.2784001>

KURSA, M. B.; Rudnicki, W. R.; KURSA, M. M. B. Package 'Boruta'. *The R Journal*, 15, 2018.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano Estadual Agrícola para o Desenvolvimento Sustentável de Florestas Plantadas de Minas Gerais. Belo Horizonte: SEAPA, 2025.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project QGIS Association,, 2016. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>

WANG, Q.; NI-MEISTER, W.; NI, W. et al. The Potential of Forest Biomass Inversion Based on Canopy-Independent Structure Metrics Tested by Airborne LiDAR Data. In *IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 7354-7357, 2019.