

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Carolane Dias Xavier

**MODELAGEM DA APTIDÃO EDAFOCLIMÁTICA DO EUCALIPTO EM MINAS GERAIS
FRENTE AOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

São João Evangelista

2026

CAROLANE DIAS XAVIER

**MODELAGEM DA APTIDÃO EDAFOCLIMÁTICA DO EUCALIPTO EM MINAS GERAIS
FRENTE AOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Florestal do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Jonathan da Rocha Miranda

São João Evangelista

2026

X3m Xavier, Carolane Dias.
 Modelagem da aptidão edafoclimática do eucalipto em Minas Gerais frente aos cenários de mudanças climáticas / Carolane Dias Xavier – 2026.
 39f.: il.

 Orientador: Dr. Jonathan da Rocha Miranda.
 Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. Campus São João Evangelista, 2026.

 1. Google Earth Engine. 2. Mesorregiões. 3. Manejo florestal. I. Xavier, Carolane Dias. II. Instituto Federal de Minas Gerais Campus SJE. III. Título.

CDD 634.973

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

Carolane Dias Xavier

**MODELAGEM DA APTIDÃO EDAFOCLIMÁTICA DO EUCALIPTO EM MINAS GERAIS
FRENTE AOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

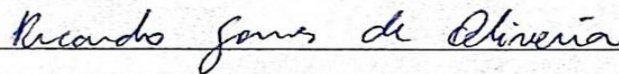
Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso Bacharelado em Engenharia Florestal do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Jonathan da Rocha Miranda

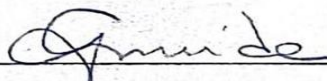
Aprovado em: 16/01/2016 pela banca examinadora:



Dr. Jonathan da Rocha Miranda – IFMG (Orientador)



Ms. Ricardo Gomes de Oliveira – IFMG (Membro)



Dra. Grazielle Wolf de Almeida Carvalho (Membro)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me sustentou, fortaleceu e guiou durante toda essa trajetória. Sem Sua presença, nada disso teria sido possível.

À minha família, deixo minha eterna gratidão. Ao meu pai Antônio Augusto Xavier, à minha mãe Dulciane Dias Xavier, à minha irmã Cárola Dias Xavier, à minha avó Zilda Zelia Dias e ao meu tio Roan Cristiano Dias, obrigada por cada palavra de incentivo, por cada gesto de apoio e por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidava. Vocês foram minha base e meu maior motivo para continuar.

Ao meu orientador, Jonathan da Rocha Miranda, meu sincero agradecimento por toda a dedicação, paciência e compromisso. Obrigada por cada orientação e por sempre me ajudar a enxergar caminhos possíveis.

Aos colegas da turma de Engenharia Florestal 211, agradeço pela parceria, pelas trocas e pelos momentos que tornaram essa jornada mais leve e significativa.

Por fim, agradeço a mim mesma pela perseverança e pela resiliência demonstradas em cada etapa deste percurso. Mesmo diante de momentos de profunda exaustão e de desafios que, por vezes, pareceram intransponíveis, não me permiti desistir. Sou grata por ter honrado meu próprio esforço e por ter acreditado em minha capacidade, persistindo com firmeza até a concretização deste objetivo.

RESUMO

Minas Gerais ocupa posição de liderança na produção florestal brasileira, com maciços de eucalipto que sustentam cadeias estratégicas de celulose e siderurgia. Este estudo teve como objetivo modelar o zoneamento edafoclimático para a cultura do eucalipto no estado, comparando a aptidão atual com projeções futuras (2080-2100) sob diferentes cenários de emissões do CMIP6/IPCC (SSP1-2.6 a SSP5-8.5). A metodologia utilizou a plataforma Google Earth Engine para processar e integrar bases de dados climáticas, topográficas e edáficas, aplicando técnicas de álgebra de mapas e ponderação de variáveis para a classificação territorial. Os resultados para o cenário atual indicam que, apesar das condições favoráveis de solo e relevo em grande parte do estado, a irregularidade pluviométrica constitui o principal fator limitante. As projeções climáticas revelam um cenário futuro de "dupla limitação", impulsionado pelo aumento das temperaturas e intensificação do déficit hídrico, resultando na retração severa das áreas aptas nas regiões Norte e Jequitinhonha. Observou-se uma nítida tendência de deslocamento da aptidão produtiva para o Sul de Minas e Campo das Vertentes, onde as maiores altitudes oferecem refúgios climáticos frente ao aquecimento global. Conclui-se que a sustentabilidade da silvicultura mineira dependerá da reconfiguração espacial dos plantios e da adoção de estratégias de adaptação genética e manejo para mitigar os riscos climáticos emergentes.

Palavras-chave: Google Earth Engine. Mesorregiões. Manejo Florestal.

ABSTRACT

Minas Gerais holds a leading position in Brazilian forest production, with extensive eucalyptus plantations that support strategic pulp and steelmaking supply chains. This study aimed to model the edaphoclimatic zoning for eucalyptus cultivation in the state, comparing current suitability with future projections (2080–2100) under different CMIP6/IPCC emission scenarios (SSP1-2.6 to SSP5-8.5). The methodology used the Google Earth Engine platform to process and integrate climatic, topographic, and soil datasets, applying map algebra techniques and variable weighting for territorial classification. Results for the current scenario indicate that, despite favorable soil and relief conditions across much of the state, rainfall irregularity is the main limiting factor. Climate projections reveal a future scenario of “dual limitation,” driven by rising temperatures and intensifying water deficits, resulting in a severe contraction of suitable areas in the Northern and Jequitinhonha regions. A clear trend of productive suitability shifting toward Southern Minas Gerais and Campo das Vertentes was observed, where higher elevations provide climatic refuges under global warming. It is concluded that the sustainability of forestry in Minas Gerais will depend on the spatial reconfiguration of plantations and the adoption of genetic adaptation and management strategies to mitigate emerging climate risks.

Keywords: Google Earth Engine. Mesoregions. Forest Management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação geográfica do Estado de Minas Gerais e suas mesorregiões	12
Figura 2 – Distribuição espacial das áreas de silvicultura em Minas Gerais	18
Figura 3 – Distribuição espacial dos atributos edáficos utilizados na modelagem da aptidão do eucalipto	20
Figura 4 – Distribuição percentual das classes de aptidão edáfica do eucalipto por mesorregião, considerando infiltração, profundidade, pH e declividade do solo	21
Figura 5 – Aptidão climática atual do eucalipto com base na temperatura média anual e na precipitação	23
Figura 6 – Alterações no regime pluviométrico e seus efeitos sobre a aptidão do eucalipto em Minas Gerais sob cenários climáticos futuros	25
Figura 7 – Intensificação do estresse térmico sobre a aptidão do eucalipto sob cenários climáticos futuros	26
Figura 8 – Reconfiguração espacial da aptidão do eucalipto em Minas Gerais do cenário atual aos cenários climáticos futuros	28
Figura 9 – Mudanças na composição das classes de aptidão do eucalipto nas mesorregiões do cenário atual aos cenários climáticos futuros	29
Figura 10 – Distribuição percentual das classes de aptidão por mesorregião de Minas Gerais no cenário atual e em cenários futuros	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas das bases de dados geoespaciais e variáveis climáticas	13
Tabela 2 – Matriz de critérios edafoclimáticos utilizados para o zoneamento de aptidão do eucalipto em Minas Gerais	14
Tabela 3 – Referências dos fatores edafoclimáticos para o zoneamento do eucalipto	14
Tabela 4 – Distribuição da área (ha) e proporção ocupada por mesorregião mineira	18

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. MATERIAL E MÉTODOS	12
2.2 Bases de Dados e Variáveis Ambientais	12
<i>2.2.1 Descrição dos dados</i>	<i>13</i>
2.3. Critérios de Classificação e Zoneamento	14
2.4. Processamento e Integração de Dados	14
2.5. Integração de Dados e Modelagem do Zoneamento	15
2.6. Integração com Cenários de Mudanças Climáticas (IPCC)	16
<i>2.6.1. Adaptação do Algoritmo de Zoneamento</i>	<i>16</i>
2.7. Mapeamento das Áreas de Cultivo (MapBiomias)	17
<i>2.7.1. Análise de Conformidade e Risco Climático</i>	<i>17</i>
2.8. Regionalização por Mesorregiões	17
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
3.1 Distribuição da atividade de silvicultura	18
3.2 Variáveis do solo para aptidão edáfica do eucalipto	19
3.3 Aptidão climática para o cultivo de eucalipto	23
3.4 Aptidão climática para o cultivo de eucalipto em diferentes cenários de mudanças climáticas	24
3.5 Zoneamento do eucalipto frente às mudanças climáticas	27
4 CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS	34

1. INTRODUÇÃO

A relevância econômica do eucalipto em Minas Gerais transcende sua simples presença física, caracterizando-se pela hegemonia absoluta na base florestal plantada do estado e por seu papel estruturante no abastecimento de cadeias industriais críticas, como a siderurgia a carvão vegetal e a celulose. Historicamente consolidado como o maior detentor de florestas plantadas do Brasil, o estado reafirma sua liderança com dados recentes: em 2023, contabilizava aproximadamente 2,23 milhões de hectares de árvores cultivadas, dos quais 2,20 milhões de hectares eram ocupados por maciços de eucalipto (ANUAL, 2016).

Nesse contexto de alta especialização produtiva, o zoneamento agroclimático emerge como um instrumento indispensável de planejamento e gestão territorial. Segundo Wollmann e Galvani (2013), essa metodologia permite a delimitação precisa da aptidão das regiões de cultivo frente às variáveis climáticas, otimizando a rentabilidade do capital investido e promovendo a conservação dos recursos naturais. Ao identificar áreas climaticamente homogêneas e compatíveis com as exigências ecofisiológicas das espécies, o zoneamento atua como um filtro técnico, segregando zonas aptas, marginais e inaptas, e minimizando, assim, os riscos de insucesso decorrentes de adversidades meteorológicas.

Sob a ótica das políticas públicas e da segurança econômica, o zoneamento assume centralidade como mecanismo de gestão de risco. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento utiliza o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para quantificar, através de funções matemáticas e estatísticas, a probabilidade de perda das lavouras com base em séries históricas, com ênfase na ocorrência de secas (WOLLMANN E GALVANI, 2013). Essa ferramenta é o alicerce para a operacionalização do crédito rural e de programas de seguro agrícola, como o Proagro, pois direciona recursos públicos para empreendimentos tecnicamente viáveis e induz a adoção de tecnologias adequadas, reduzindo gastos governamentais com indenizações por sinistros climáticos (ROSSETTI, 2001).

Além da viabilidade econômica, o zoneamento desempenha um papel crucial no ordenamento ambiental do uso do solo. Ele permite harmonizar a exploração econômica com a capacidade de suporte dos ecossistemas, evitando a expansão desordenada da fronteira agrícola para regiões de alta fragilidade. Almeida, Calijuri e Pinto (2013) ressaltam que a delimitação de regiões homogêneas estabelece indicadores biofísicos essenciais para o planejamento racional de recursos como solo e água. Na silvicultura, historicamente, o zoneamento (como os estudos pioneiros de Golfari *et al.*, 1978) tem sido utilizado para garantir a introdução de espécies exóticas em nichos bioclimáticos análogos aos de sua

origem, maximizando a produtividade e mitigando a pressão sobre as florestas nativas (NAPPO; NAPPO; PAIVA, 2005).

Contudo, a correlação entre as mudanças climáticas e o zoneamento agroclimático impõe novos paradigmas. O aquecimento global e a alteração nos regimes pluviométricos transformam o zoneamento de uma ferramenta estática, baseada em médias climatológicas históricas, para um instrumento dinâmico de gestão de risco, forçando a contínua reconfiguração espacial das fronteiras produtivas. Wollmann e Galvani (2013) alertam que a instabilidade climática introduzida pelos cenários de emissões de gases de efeito estufa exige uma reavaliação constante dos limites de aptidão, visto que as condições que definiam uma região como "apta" no passado podem não se sustentar no futuro.

O principal vetor dessa dinâmica de transformação é a alteração na disponibilidade hídrica, governada pelo aumento da temperatura do ar e da demanda evapotranspiratória. Como destacam Assad, Monteiro e Pugliero (2021), a elevação térmica aumenta a evapotranspiração potencial, exacerbando a deficiência hídrica no solo mesmo em cenários de precipitação constante. Dado que a produtividade do eucalipto responde linearmente à disponibilidade de água, o zoneamento tende a reclassificar áreas anteriormente favoráveis como "restritas" ou "inaptas" à medida que o déficit hídrico ultrapassa os limites fisiológicos da cultura. Garcia *et al.* (2014) corroboram essa tendência, projetando uma retração significativa das áreas aptas para *Eucalyptus grandis* no Brasil em função das mudanças na precipitação dos meses mais secos.

Diante da vulnerabilidade dos maciços florestais mineiros frente às incertezas climáticas, este estudo parte da hipótese de que a alteração nos regimes pluviométricos e o aumento das médias térmicas, projetados pelos novos cenários de emissões do CMIP6, resultarão em uma retração significativa das áreas de aptidão plena (*Apta*) para o cultivo do eucalipto em Minas Gerais. Pressupõe-se que haverá uma migração geográfica das zonas favoráveis, com a inviabilização produtiva das atuais fronteiras florestais situadas nas regiões Norte e Jequitinhonha e o deslocamento do potencial produtivo para as mesorregiões de maior altitude e latitude (Sul do estado), configurando um novo desenho territorial para a silvicultura mineira até o final do século XXI.

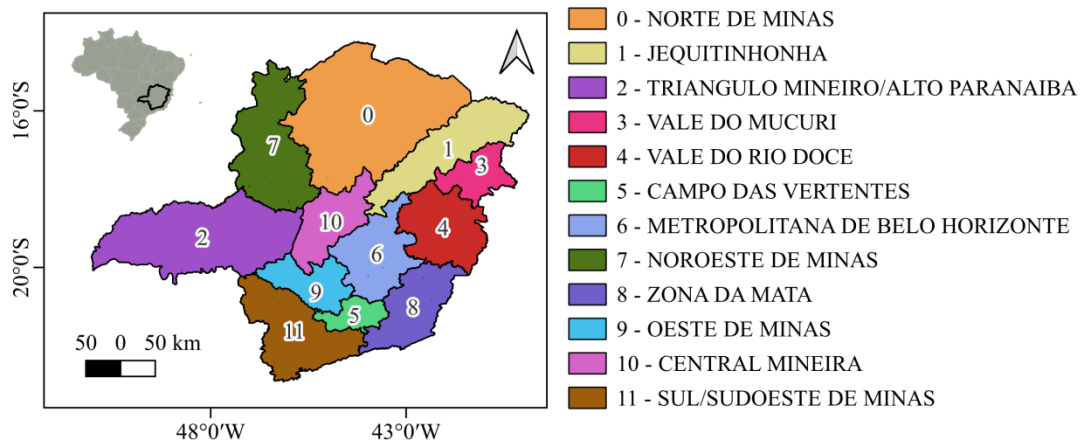
Nesse contexto, o objetivo geral deste trabalho foi modelar o zoneamento edafoclimático para a cultura do eucalipto no estado de Minas Gerais, comparando a aptidão atual com as projeções futuras sob diferentes cenários de mudanças climáticas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo compreende a extensão territorial do estado de Minas Gerais, situado na região Sudeste do Brasil, entre os paralelos 14°13'S e 22°56'S e os meridianos 39°51'W e 51°02'W (Figura 1). Com uma área aproximada de 586.522 km², o estado caracteriza-se por uma notável heterogeneidade ambiental, atuando como uma zona de transição (ecótono) entre três grandes biomas brasileiros: a Mata Atlântica (a leste e sul), o Cerrado (no centro e oeste) e a Caatinga (no extremo norte) (RODRIGUES *et al.*, 2024). Essa diversidade fisiográfica reflete-se em uma ampla variabilidade de tipos climáticos (segundo Köppen), relevo e classes de solo, configurando um mosaico edafoclimático complexo e representativo das condições tropicais (ALVARES *et al.*, 2013).

Figura 1 - Representação geográfica do Estado de Minas Gerais e suas mesorregiões.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

2.2 Bases de Dados e Variáveis Ambientais

Foram selecionadas coleções de dados globais disponíveis no catálogo do Google Earth Engine (GEE) (Tabela 1). O GEE trata-se de uma plataforma baseada em nuvem que integra um extenso catálogo de dados de sensoriamento remoto com uma infraestrutura de computação de alto desempenho (GORELICK *et al.*, 2017). A escolha destas bases priorizou a consistência temporal e a resolução espacial adequada para a escala regional do estado de Minas Gerais.

Tabela 1 - Especificações técnicas das bases de dados geoespaciais e variáveis climáticas.

Variável	Fonte de Dados	Resolução Espacial
Precipitação e Temperatura (atual)	TerraClimate	4,6 km
Declividade (Relevo)	NASADEM	30 m
pH do Solo	OpenLandMap	250 m
Infiltração e Profundidade	Embrapa	Vetor (Escala 1:650.000)
Limites Estaduais	IBGE	-
Precipitação e Temperatura (futuro)	World Clim	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Foi considerada a série histórica de 1993 a 2024, totalizando 31 anos de observações para compor a normal climatológica. Esta amplitude temporal foi adotada para mitigar a influência de anomalias climáticas sazonais (como *El Niño* ou *La Niña*).

2.2.1 Descrição dos dados

- Terraclimate (*Monthly Climate and Climatic Water Balance for Global Terrestrial Surfaces*): trata-se de um conjunto de dados gerado através da interpolação climática assistida por modelos de balanço hídrico, combinando a alta resolução espacial do WorldClim com a resolução temporal de reanálises (CRU Ts4.0 e JRA-55) (ABATZOGLOU *et al.*, 2018).
- NASADEM (*NASA NASADEM_HGT v001*). Este produto representa uma modernização dos dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), tendo passado por processos de reprocessamento para correção de vazios e melhoria da precisão vertical através da incorporação de dados auxiliares (como ASTER GDEM e ICESat) (FARR *et al.*, 2007).
- OpenLandMap (*Soil pH in H2O*). Esta base de dados utiliza técnicas de *Machine Learning* para prever propriedades do solo globalmente, baseando-se em perfis de solo de referência e covariáveis ambientais (HENGL; MACMILLAN, 2019).
- Atributos Físico-Hídricos do Solo (Embrapa): Para refinar a análise das condições edáficas, foram incorporados dados vetoriais de taxa de infiltração e profundidade efetiva do solo provenientes do levantamento de reconhecimento de solos realizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2004).

2.3. Critérios de Classificação e Zoneamento

A metodologia de zoneamento fundamentou-se na reclassificação das variáveis ambientais através de álgebra de mapas. Adotou-se um sistema de pontuação padronizado com quatro classes de aptidão para a cultura do Eucalipto: Apta (4), Moderada (3), Restrita (2) e Inapta (1).

A definição dos limites para cada classe baseou-se nas exigências ecofisiológicas da cultura, considerando a disponibilidade hídrica, térmica e as condições físicas e químicas do solo necessárias para o pleno desenvolvimento vegetal e mecanização silvicultural (GONÇALVES *et al.*, 2013; SPERANDIO *et al.*, 2010) (Tabela 2). Os critérios foram avaliados pela pesquisa na literatura de recomendação de plantio para eucalipto (Tabela 3) e na interpretação dos resultados frente a base de dado adquirida.

Tabela 2. Matriz de critérios edafoclimáticos utilizados para o zoneamento de aptidão do Eucalipto em Minas Gerais

Variáveis	Unidade	Apta (4)	Moderada (3)	Restrita (2)	Inapta (1)
Precipitação	mm	1.000 a 1.800	800 a 1.000	600 a 800 ou 2.000 a 2.500	< 600 ou > 2.500
Temperatura	°C	18 a 25	15 a 18 ou 25 a 28	12 a 15 ou 28 a 30	< 12 ou > 30
Declividade	%	0 a 8	8 a 20	20 a 45	> 45
pH do Solo	Adimensional	5,5 a 6,5	4,5 a 5,5	4,0 a 4,5 ou 7,5 a 8,5	< 4,0 ou > 9,0
Profundidade	Metros (m)	> 3,0	2,0 a 3,0	1,0 a 2,0	< 1,0
Infiltração	Catagórica	Muito Bem	Moderada	Mal	Imperfeitamente

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Tabela 3. Referencias dos fatores edafoclimaticos para o zoneamento do eucalipto

Variável	Fonte Bibliográfica (ABNT)
Precipitação	Ribeiro <i>et al</i> 2009
Temperatura	SPERANDIO, H. V. <i>et al.</i> 2010.
Declividade	SANTOS, H. G. 2006.5,6
pH do Solo	GONÇALVES, J. L. M.; SILVA, P. H. M. , 2005.7,8
Profundidade	SANTOS, H. G. dos. , 2006.9
Drenagem	SANTOS, H. G. , 2006.10

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

2.4. Processamento e Integração de Dados

O fluxo de processamento no Google Earth Engine seguiu três etapas principais:

1. Pré-processamento e Rasterização: As bases vetoriais da Embrapa (infiltração e profundidade) foram rasterizadas e reamostradas para compatibilização geométrica com as camadas climáticas e topográficas (Resolução 1000 m).
2. Reclassificação: Aplicaram-se algoritmos condicionais para transformar os valores contínuos (ex: mm de chuva, graus de declividade) e categóricos (classes de infiltração) nos códigos de aptidão (1 a 4) definidos na Tabela 2.
3. Exportação: Foram gerados mapas temáticos individuais para cada fator limitante, exportados em formato GeoTIFF, permitindo a análise isolada das restrições ambientais em todo o território mineiro.

2.5. Integração de Dados e Modelagem do Zoneamento

O índice de aptidão global ($Z_{média}$) foi calculado por meio de uma média aritmética ponderada. Atribuiu-se peso 2 (dois) às variáveis climáticas determinantes (Precipitação e Temperatura) e peso 1 (um) às demais variáveis (Declividade, pH, Profundidade e Infiltração), reconhecendo a preponderância do clima na produtividade do Eucalipto. O resultado foi arredondado para o número inteiro mais próximo (Eq 1).

$$Z_{media} = \text{Arred} \left(\frac{2(S_{pr} + S_T) + S_D + S_{pH} + S_{prof} + S_{inf}}{8} \right) \quad (1),$$

em que, Z é a média ponderada dos pesos e S corresponde aos pesos das variáveis adotada.

A atribuição de peso diferenciado às variáveis climáticas na modelagem atual justifica-se pela necessidade de sensibilizar o zoneamento frente às forçantes radiativas previstas para as próximas décadas. Considerando que as variáveis edáficas e topográficas (solo e relevo) apresentam caráter estático em escalas de tempo humanas, a alteração da aptidão futura será governada primordialmente pelas anomalias climáticas (ALVARES *et al.*, 2013).

Aplicando o princípio do Fator Limitante (lei do mínimo), aplicou-se uma lógica baseada em álgebra booleana. Neste sentido, gerou-se uma máscara binária (M) (Eq 2) onde pixels com classificação igual a 1 em qualquer variável receberam valor 0, e os demais receberam valor 1:

$$M = \prod_{i=1}^n k_i \text{ em que } k_i = \begin{cases} 0 & \text{se } S_i = 1 \\ 1 & \text{se } S_i > 1 \end{cases} \quad (2),$$

O mapa final de zoneamento (Z_{final}) resultou da multiplicação do índice médio pela máscara de exclusão, seguida de uma reclassificação corretiva. A operação aritmética (Eq 3)

resultou em valores 0 para todas as áreas restritivas (Z_R). Posteriormente, estes valores nulos foram reclassificados para 1, restaurando a classe "Inapta" no mapa final (Eq 4).

$$Z_R = Z_{\text{media}} * M \quad (3),$$

$$Z_{\text{final}} = \begin{cases} 1 & \text{se } Z_{\text{temp}} = 0 \text{ (Inapta por Fator Limitante)} \\ Z_{\text{temp}} & \text{se } S_i > 0 \text{ (Mantém a Média Ponderada)} \end{cases} \quad (4),$$

2.6. Integração com Cenários de Mudanças Climáticas (IPCC)

Para a projeção dos cenários futuros, foram utilizados dados do Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), baseados nos modelos do CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*).

As simulações basearam-se nos *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), que representam diferentes narrativas de desenvolvimento global e emissões de gases de efeito estufa. Foram avaliados os seguintes cenários para o horizonte de tempo de 2080 a 2100:

- Cenário Otimista (SSP1-2.6): Considera um desenvolvimento sustentável com baixas emissões e mitigação rigorosa do aquecimento global (IPCC, 2021).
- Cenário Intermediário (SSP2-4.5): Representa um cenário "meio do caminho", mantendo as tendências atuais de emissões e desenvolvimento socioeconômico moderado (BOER *et al.*, 2016; O'NEILL *et al.*, 2016).
- Cenário de Rivalidade Regional (SSP3-7.0): Descreve um mundo fragmentado com baixa cooperação internacional, priorização de interesses nacionais e políticas ambientais ineficazes, levando a altas emissões de gases de efeito estufa (COOLEY *et al.*, 2022; O'NEILL *et al.*, 2016).
- Cenário Pessimista (SSP5-8.5): Assume um desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis, com altas emissões e ausência de políticas climáticas efetivas (COOLEY *et al.*, 2022; KWIATKOWSKI *et al.*, 2020).

2.6.1. Adaptação do Algoritmo de Zoneamento

A metodologia de classificação descrita na seção 2.5 foi replicada integralmente para os cenários futuros, alterando-se exclusivamente as matrizes de entrada climáticas. No entanto, realizou-se a substituição das camadas de climatologia histórica pelas projeções médias dos modelos climáticos globais para cada SSP.

2.7. Mapeamento das Áreas de Cultivo (MapBiomias)

Utilizou-se a Coleção 10 do MapBiomias, selecionando-se a Classe 9 (Silvicultura), referente ao ano de 2024 (PROJETO MAPBIOMAS, 2024). Esta classe mapeia as áreas de plantios florestais (predominantemente *Eucalyptus* e *Pinus*) no território nacional. Segundo o relatório anual IBÁ (2025), o estado de Minas Gerais possui uma área total de florestas plantadas de 2.234.562 hectares, dos quais 2.200.351 hectares são ocupados por eucalipto. Portanto, o eucalipto representa aproximadamente 98,5% da silvicultura no estado, enquanto o Pinus ocupa o restante, com 34.211 hectares.

2.7.1. Análise de Conformidade e Risco Climático

A análise consistiu em quantificar a porcentagem de áreas atualmente plantadas com silvicultura que se enquadram em cada classe de aptidão (Apta, Moderada, Restrita ou Inapta). Esta etapa teve dois objetivos:

1. **Cenário Atual:** Avaliar se a expansão da silvicultura em Minas Gerais tem respeitado as aptidões edafoclimáticas, identificando plantios estabelecidos em zonas de risco (Inaptas/Restritas).
2. **Cenários Futuros (2080-2100):** Avaliar a vulnerabilidade climática dos maciços florestais existentes. Ao cruzar a localização atual dos plantios com os zoneamentos futuros (SSP1-2.6, SSP2-4.5 e SSP5-8.5), identificaram-se as áreas que, embora atualmente aptas, poderão se tornar inaptas devido ao aquecimento global, indicando regiões prioritárias para adaptação ou migração da cultura.

2.8. Regionalização por Mesorregiões

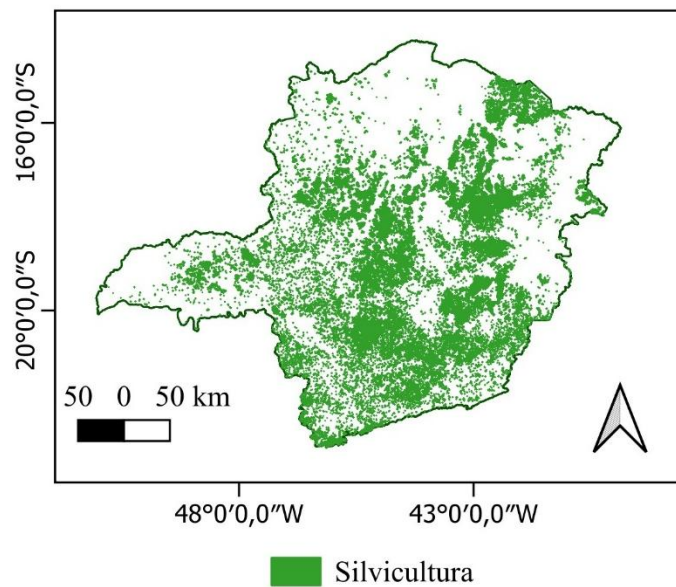
Para permitir uma compreensão espacial detalhada e apoiar o planejamento territorial, os dados estatísticos foram compilados e segregados em função das 12 Mesorregiões Geográficas de Minas Gerais (conforme divisão oficial do IBGE 1997).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Distribuição da atividade de silvicultura

A concentração expressiva de áreas na Central Mineira (8,66%) e no Norte de Minas (4,15%), em contraste com a menor ocupação na Zona da Mata (1,25%), reflete uma dinâmica econômica e edafoclimática complexa, historicamente influenciada por incentivos fiscais e pela demanda industrial siderúrgica (Figura 2 e Tabela 4).

Figura 2- Distribuição espacial das áreas de silvicultura em Minas Gerais



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Tabela 4 - Distribuição da área (ha) e proporção ocupada por mesorregião mineira.

Mesorregião	Área (há)	% Área ocupada
Norte de Minas	532.109	4,15%
Jequitinhonha	287.194	5,72%
Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba	160.771	1,78%
Vale do Mucuri	32.464	1,62%
Vale do Rio Doce	138.889	3,32%
Campo das Vertentes	37.219	2,96%
Metropolitana de Belo Horizonte	132.209	3,35%
Noroeste de Minas	221.930	3,55%
Zona da Mata	44.669	1,25%
Oeste de Minas	84.727	3,52%
Central Mineira	274.947	8,66%
Sul/Sudoeste de Minas	82.118	1,66%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

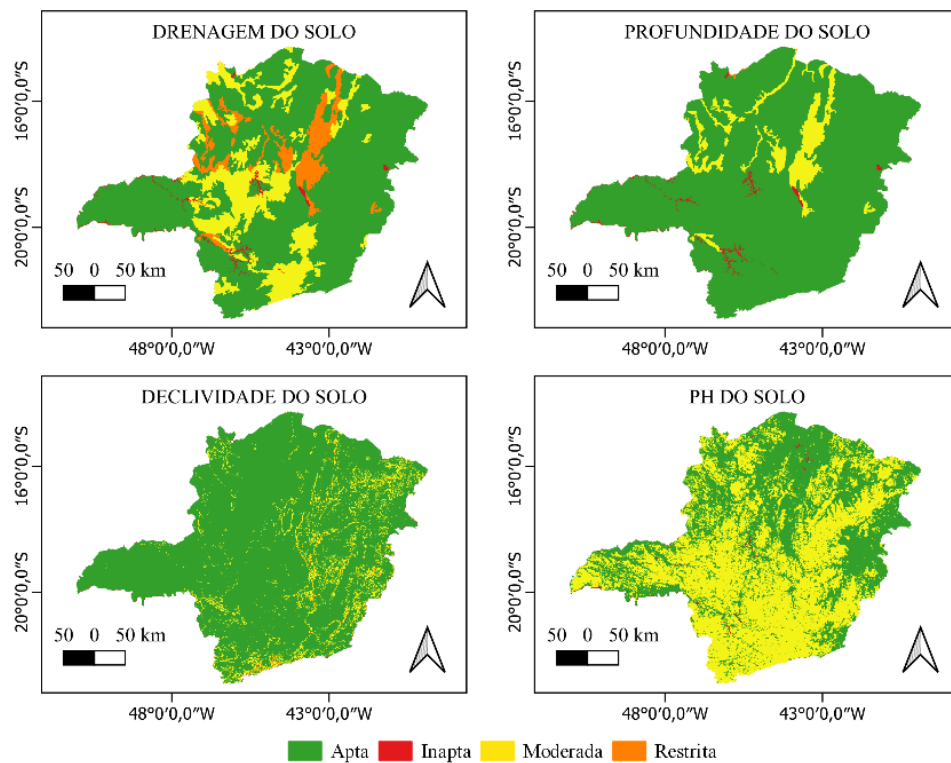
A predominância da silvicultura nas mesorregiões Central e Norte pode ser explicada pela vocação dessas áreas para o abastecimento da indústria siderúrgica a carvão vegetal. Projetos de reflorestamento com eucalipto visando à produção de carvão, especialmente aqueles apoiados por programas de fomento, têm demonstrado desempenho financeiro superior quando comparados a outras modalidades. A demanda por redutores renováveis é um motor essencial, visto que parte significativa do carvão vegetal consumido no país provém de florestas plantadas, sendo o setor siderúrgico o maior consumidor dessa biomassa (ABRAF, 2013). Além disso, incentivos fiscais históricos foram fundamentais para a criação dessa infraestrutura florestal em grande escala, permitindo a consolidação de segmentos industriais nessas regiões (LEITE, 2005).

No que tange à mesorregião do Vale do Rio Doce, que figura com 3,32% de área ocupada, observa-se uma dinâmica particular de expansão baseada em contratos de fomento florestal. Souza *et al.* (2009) analisaram os determinantes desses contratos na região e identificaram que a confiança no sistema de medição da madeira e o tamanho da área contratada são fatores decisivos para a renovação e expansão dos plantios.

3.2 Variáveis do solo para aptidão edáfica do eucalipto

Os dados do levantamento indicam que a profundidade do solo não constitui um fator limitante severo em nenhuma das mesorregiões analisadas, visto que a classe de aptidão 4 (apto) predomina com valores superiores a 80% em todo o estado (Figura 3). Regiões de relevo historicamente mais acidentado, como a Zona da Mata e o Campo das Vertentes, apresentam, surpreendentemente, índices de aptidão para profundidade de 99,94% e 99,22%, respectivamente (Figura 4).

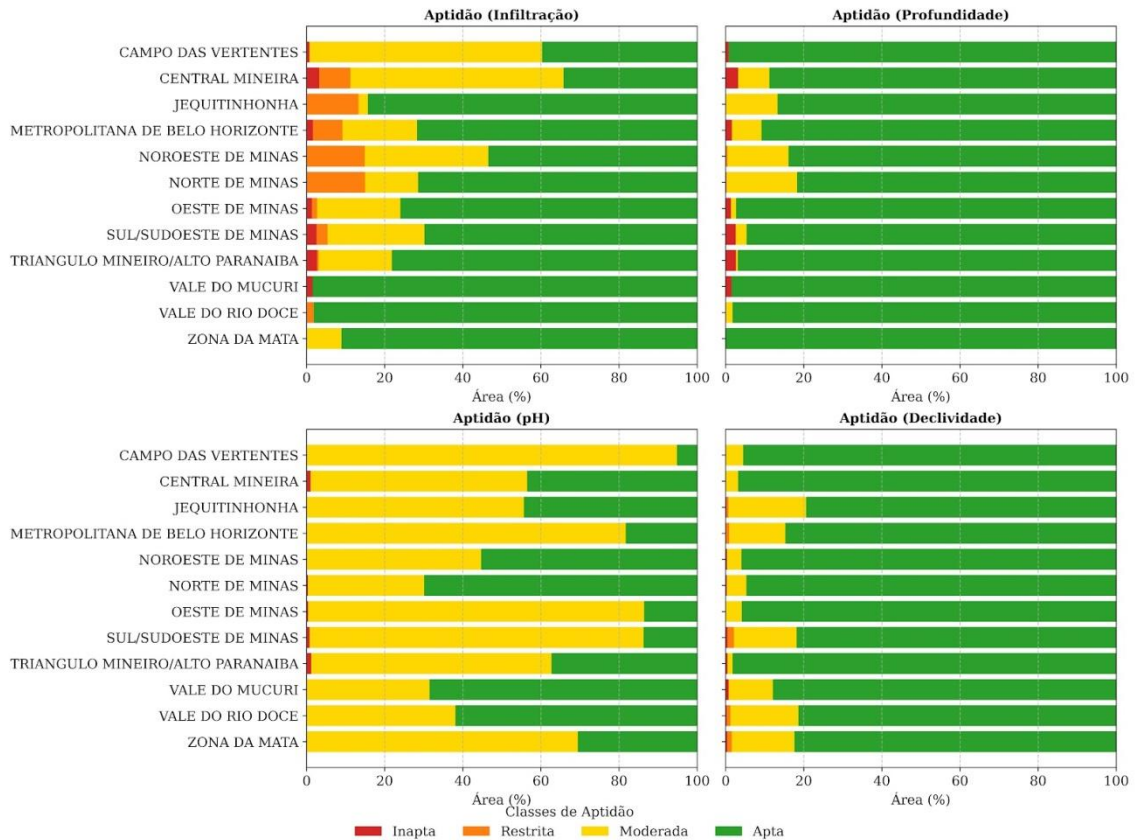
Figura 3 - Distribuição espacial dos atributos edáficos utilizados na modelagem da aptidão do eucalipto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Este cenário é extremamente favorável ao cultivo do eucalipto, pois, conforme destacam Flores, Garrastazu e Mattei (2009), a profundidade efetiva permite que as raízes penetrem sem impedimentos, proporcionando suporte físico e acesso a água e ar, fatores essenciais, uma vez que solos rasos têm menor capacidade de armazenamento hídrico e aumentam a suscetibilidade das plantas a períodos de estiagem. A região Norte de Minas, embora apresente a menor taxa na classe 4 (81,68%) e uma presença residual na classe 3 (18,07%), ainda mantém condições favoráveis para o enraizamento profundo, característica vital para a sobrevivência em áreas de maior déficit hídrico, permitindo que a planta acesse reservas de água em camadas mais profundas do perfil do solo (ALMEIDA; SOARES, 2003).

Figura 4 - Distribuição percentual das classes de aptidão edáfica do eucalipto por mesorregião, considerando infiltração, profundidade, pH e declividade do solo



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Por outro lado, a variável de infiltração/drenagem expõe uma dicotomia importante no estado. Mesorregiões como Vale do Mucuri (98,44%), Vale do Rio Doce (98,14%) e Zona da Mata (91,03%) apresentam condições de drenagem classificadas majoritariamente como aptas (classe 4). A boa drenagem é fundamental para a aeração do solo, pois a deficiência de oxigênio na respiração radicular, causada por solos mal drenados ou encharcados, pode levar ao acúmulo de compostos tóxicos como etanol e etileno, prejudicando o desenvolvimento das plantas (FLORES; GARRASTAZU; MATTEI, 2009). Além disso, a drenagem eficiente nessas regiões mitiga a ocorrência de doenças radiculares, visto que o excesso de umidade favorece patógenos do solo, como fungos dos gêneros *Phytophthora* e *Fusarium*, causadores de podridões de raízes e do "afogamento do colo" em mudas (SANTOS; AUER; GRIGOLETI JÚNIOR, 2014).

Em contrapartida, a Central Mineira e o Campo das Vertentes apresentam restrições consideráveis quanto à infiltração. A Central Mineira possui apenas 34,21% de sua área na classe 4, com a maioria (54,55%) classificada como moderada (classe 3) e uma parcela

significativa (8,02%) na classe 2. O Campo das Vertentes segue padrão similar, com 59,51% na classe 3. Essa condição impõe desafios ao manejo, pois a infiltração restrita pode resultar em escoamento superficial ou encharcamento temporário, limitando a produtividade. Solos com drenagem imperfeita ou moderada exigem a seleção criteriosa de materiais genéticos mais tolerantes ao encharcamento temporário e práticas de preparo de solo que favoreçam a aeração, como a subsolagem profunda, para evitar a perda de produtividade e a mortalidade de plantas (FLORES; GARRASTAZU; MATTEI, 2009). A produtividade do eucalipto responde linearmente à disponibilidade hídrica e à capacidade do solo em suprir essa demanda sem causar hipóxia radicular, o que reforça a necessidade de um balanço hídrico adequado, onde a drenagem desempenha papel regulador essencial (ALVES *et al.*, 2020).

Ao cruzar os dados de declividade com a literatura, observa-se que as mesorregiões do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Central Mineira e Noroeste de Minas apresentam condições de relevo excepcionais para a mecanização, com mais de 95% de suas áreas classificadas como aptas (classe 4). Essa característica é determinante para a viabilidade econômica de projetos industriais, uma vez que o relevo plano favorece a mecanização das operações de plantio e, sobretudo, de colheita, reduzindo significativamente os custos operacionais e aumentando a competitividade do setor em comparação com regiões de relevo acidentado (SANTOS; AUER; GRIGOLETI JÚNIOR, 2014).

Em contraste, mesorregiões como a Zona da Mata, Vale do Rio Doce e Jequitinhonha apresentam percentuais mais elevados na classe 3 de declividade (16,08%, 17,40% e 19,91%, respectivamente), o que indica um relevo mais movimentado. A presença de declividades mais acentuadas nestas regiões impõe restrições ao uso de máquinas pesadas, caracterizando o que a literatura denomina de "silvicultura de montanha", onde a exploração exige maior contingente de mão de obra e tecnologias adaptadas, encarecendo a produção final ou limitando a escala dos projetos (VITAL, 2007). Essa realidade topográfica corrobora a análise de Chauvet *et al.* (2024), que indicam que a expansão recente da silvicultura em Minas Gerais tem privilegiado terras planas, como as encontradas no Norte e Noroeste, em detrimento de áreas declivosas, buscando a maximização da eficiência operacional.

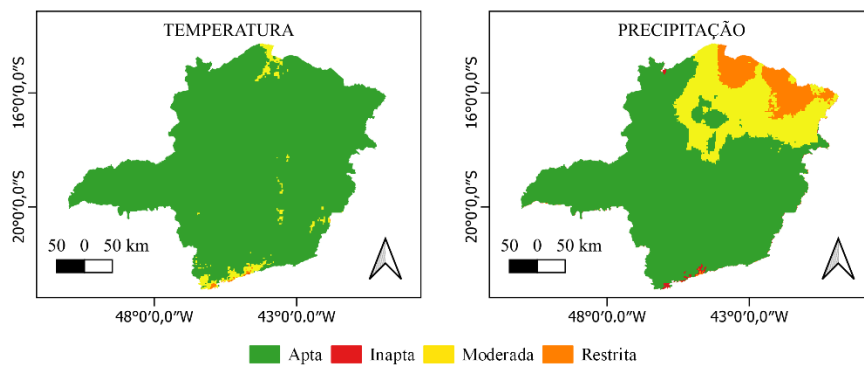
Com relação à aptidão química do solo (pH), os dados demonstram que o Norte de Minas e o Vale do Mucuri possuem as maiores áreas na classe 4 (69,89% e 68,50%, respectivamente), indicando condições de acidez mais favoráveis ou manejáveis naturalmente para a cultura. Já as regiões do Campo das Vertentes, Sul/Sudoeste e Oeste de Minas concentram-se massivamente na classe 3 (moderada), com valores acima de 85%. Embora o gênero *Eucalyptus* apresente considerável tolerância à acidez do solo, o manejo da fertilidade

através da calagem se faz necessário não apenas para correção do pH, mas principalmente para o fornecimento de Cálcio e Magnésio, nutrientes essenciais para a produtividade e qualidade da madeira (GONÇALVES, 2005).

3.3 Aptidão climática para o cultivo de eucalipto

Observa-se que as condições térmicas de Minas Gerais são, em geral, propícias ao desenvolvimento das principais espécies comerciais (Figura 5). Segundo Flores *et al.* (2016), a faixa de temperatura média anual ideal para espécies como *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* situa-se entre 18°C e 25°C, condições estas que predominam em grande parte do território mineiro. A temperatura regula processos fisiológicos fundamentais, como a fotossíntese, que possui uma temperatura ótima em torno de 25°C para o *E. grandis* (ALMEIDA; LANDSBERG; SANDS, 2004). Contudo, é necessário observar os extremos térmicos; em regiões de maior altitude ou mais ao sul, o risco de geadas pode inviabilizar o cultivo de espécies tropicais como o *E. urophylla*, exigindo a substituição por espécies mais tolerantes ao frio, como *Eucalyptus dunnii* ou *Eucalyptus benthamii*, que suportam temperaturas letais inferiores a -3°C (FLORIANI *et al.*, 2013; WREGGE *et al.*, 2009). Por outro lado, em regiões como o Norte de Minas, as temperaturas médias elevadas favorecem o metabolismo da planta, desde que não ultrapassem os limites biológicos que causam o fechamento estomático e a interrupção da fotossíntese (ASSAD; MONTEIRO; PUGLIERO, 2021).

Figura 5 - Aptidão climática atual do eucalipto com base na temperatura média anual e na precipitação



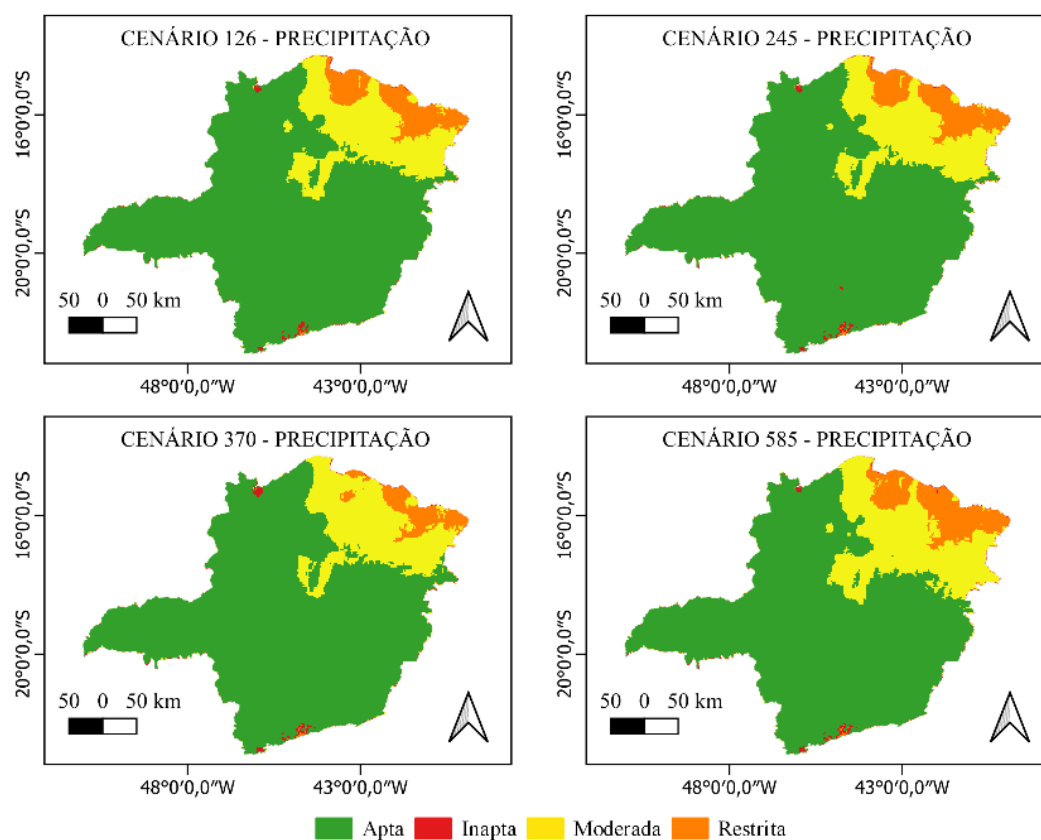
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A precipitação, entretanto, emerge como a variável crítica para o zoneamento e a produtividade florestal em Minas Gerais. A produtividade do eucalipto responde linearmente à disponibilidade de água no solo, sendo que déficits hídricos anuais superiores a 200 mm são considerados restritivos para a produção comercial (ASSAD; MONTEIRO; PUGLIERO, 2021). Estudos realizados na região Centro-Leste de Minas Gerais demonstram que a produtividade volumétrica e de biomassa é significativamente incrementada com o aumento da disponibilidade hídrica, evidenciando que a precipitação natural muitas vezes não é suficiente para atingir o potencial máximo da cultura, o que pode justificar o uso de irrigação em viveiros ou em fases iniciais de plantio (ALVES *et al.*, 2020). Além do volume total, a distribuição sazonal das chuvas é determinante; Garcia *et al.* (2014) identificaram que a precipitação do mês mais seco é a variável de maior contribuição para a modelagem da aptidão climática do *Eucalyptus grandis*, indicando que a sobrevivência e o crescimento são severamente afetados pela seca estacional, comum em áreas de Cerrado e na transição para o semiárido mineiro.

3.4 Aptidão climática para o cultivo de eucalipto em diferentes cenários de mudanças climáticas

Nos cenários de menor impacto climático, as condições de precipitação permanecem amplamente favoráveis em grande parte do estado, indicando uma boa disponibilidade hídrica e uma distribuição de chuvas adequada para o crescimento da espécie (Figura 6). Entretanto, observa-se que as regiões norte e nordeste de Minas Gerais já apresentam sinais de restrição, refletindo sua vulnerabilidade histórica a períodos de estiagem mais intensos e prolongados. Essa limitação inicial tende a se intensificar à medida que os cenários se tornam mais severos.

Figura 6 - Alterações no regime pluviométrico e seus efeitos sobre a aptidão do eucalipto em Minas Gerais sob cenários climáticos futuros



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

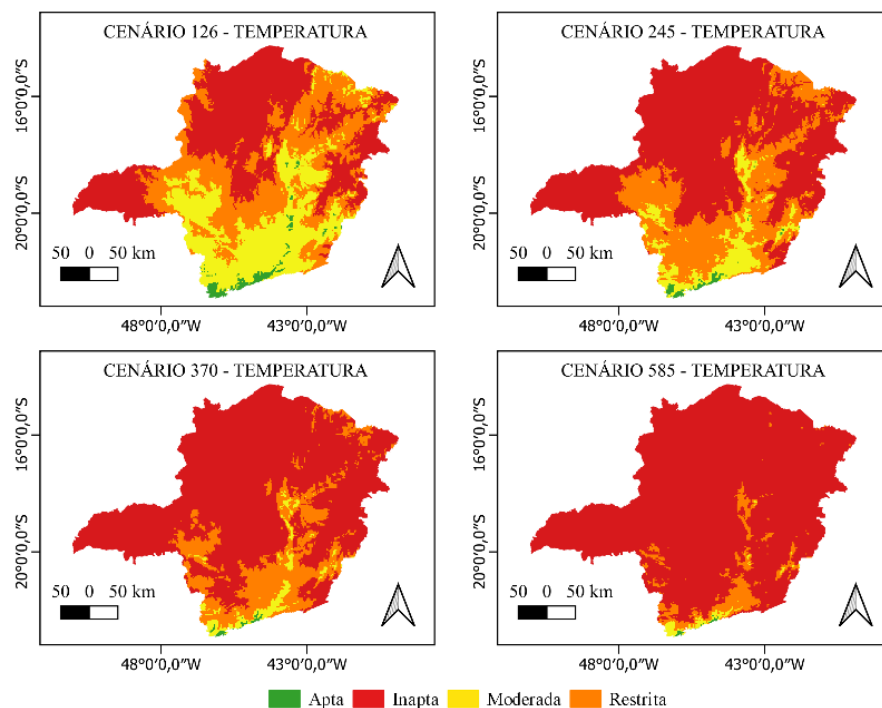
Nos cenários intermediários e críticos, correspondentes ao RCP 3.70 e 5.85, há uma clara expansão das áreas com restrição hídrica, avançando do norte em direção ao centro do estado (Figuras 6). Essa tendência indica um deslocamento das condições mais favoráveis de precipitação para as porções centrais e meridionais, onde o regime de chuvas permanece relativamente mais estável. Assim, a progressão dos cenários mostra uma redução contínua da disponibilidade de áreas com balanço hídrico adequado para o cultivo florestal, com a diminuição das zonas de alta aptidão e o aumento das regiões de limitação climática.

A discussão acerca dos impactos das mudanças climáticas sobre a aptidão do gênero *Eucalyptus* em Minas Gerais e no Brasil revela um cenário de transformação significativa na geografia florestal, impulsionada por alterações nos regimes termopluviométricos. A literatura científica aponta que a elevação da temperatura média global e a alteração na distribuição das chuvas, conforme projetado pelos modelos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), impõem severas restrições fisiológicas às plantações, exigindo uma reavaliação das áreas de cultivo tradicionais e das fronteiras de expansão.

A disponibilidade hídrica consolida-se como o fator preponderante para a produtividade do eucalipto, visto que o incremento de biomassa responde linearmente ao suprimento de água e à eficiência do seu uso. Estudos de modelagem ecofisiológica indicam que o déficit hídrico atua como o principal estresse abiótico limitante, afetando diretamente a taxa fotossintética e o transporte de nutrientes. Em regiões de transição ou com histórico de sazonalidade marcante, como o Norte de Minas Gerais, a intensificação dos períodos de estiagem, exacerbada pelo aumento da demanda evapotranspiratória atmosférica, tende a comprometer a viabilidade econômica dos plantios, transformando áreas anteriormente aptas ou marginais em zonas de alto risco climático (ALVES *et al.*, 2020; STAPE *et al.*, 2010).

Paralelamente à restrição hídrica, o aumento da temperatura do ar desempenha um papel crítico na reconfiguração do zoneamento florestal (Figura 7). Embora o eucalipto apresente plasticidade, existem faixas térmicas ótimas para a fotossíntese, geralmente situadas entre 18°C e 25°C para espécies como *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. As projeções de aquecimento global, especialmente nos cenários de maiores emissões de gases de efeito estufa (como o RCP 8.5), indicam que grandes extensões territoriais, atualmente produtivas, poderão ultrapassar esses limiares térmicos biológicos.

Figura 7 - Intensificação do estresse térmico sobre a aptidão do eucalipto sob cenários climáticos futuros



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

O estresse térmico não apenas reduz a eficiência do uso da água, mas também pode inibir o crescimento e aumentar a mortalidade, forçando um deslocamento da aptidão climática para regiões de latitudes mais altas ou de maior altitude, onde as temperaturas permanecem mais amenas (FLORES *et al.*, 2016; ASSAD; MONTEIRO; PUGLIERO, 2021).

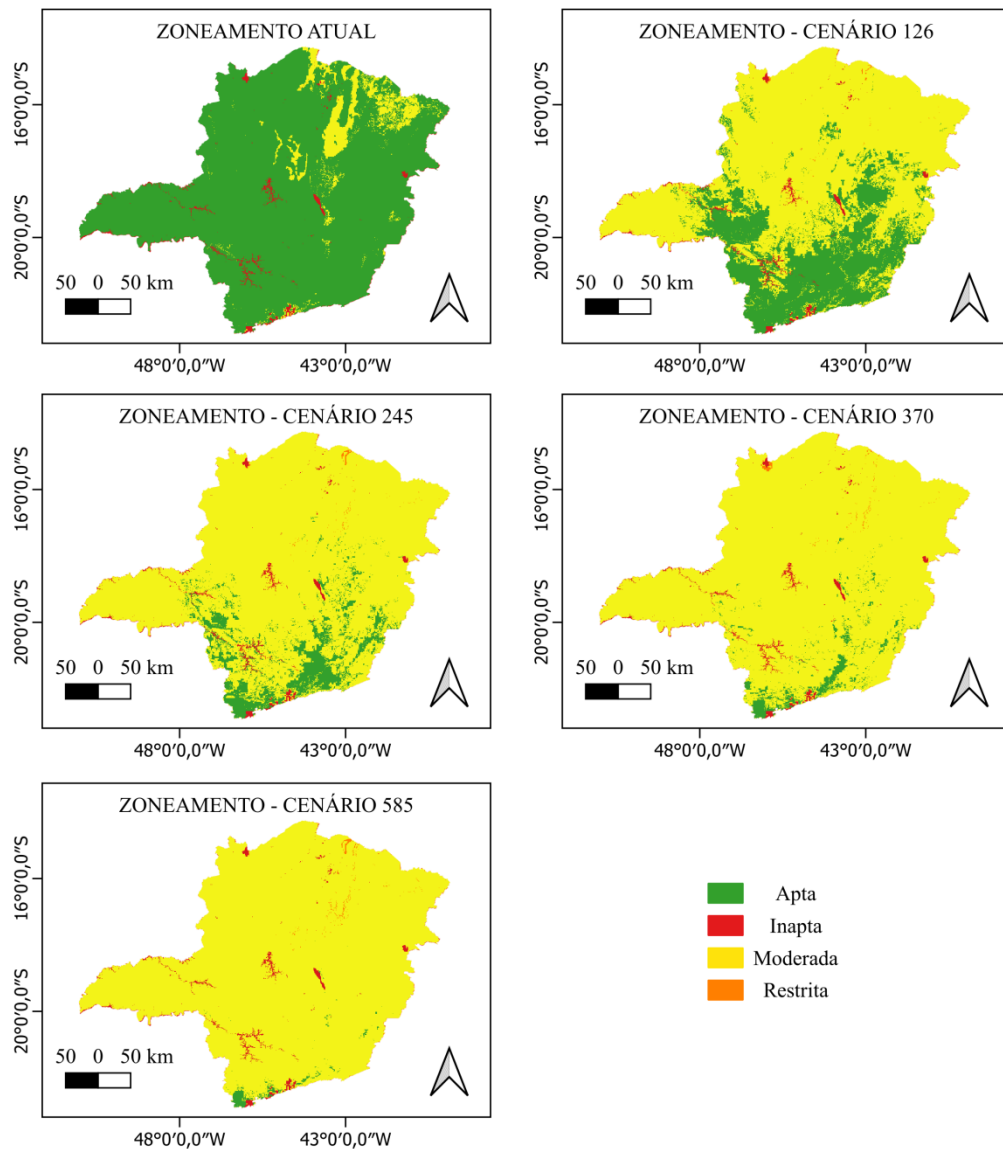
A interação entre o aumento da temperatura e a irregularidade pluviométrica resulta em um cenário de "dupla limitação", que tende a reduzir a área total apta para espécies comercialmente importantes no Brasil. Garcia *et al.* (2014), ao modelarem a distribuição de *Eucalyptus grandis* frente a cenários futuros, observaram uma tendência de redução das áreas favoráveis nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, com um deslocamento das zonas de maior aptidão em direção à região Sul do país. Esse fenômeno sugere que áreas de relevo mais elevado em Minas Gerais, como as serras do Sul e Sudeste do estado, poderão atuar como refúgios climáticos para a silvicultura, enquanto as terras baixas do Norte e do Centro se tornarão progressivamente mais restritivas (GARCIA *et al.*, 2014; WREGGE *et al.*, 2009).

Além dos efeitos diretos sobre a fisiologia vegetal, as mudanças climáticas também alteram a dinâmica de estresses bióticos, favorecendo a ocorrência de pragas e doenças em áreas onde as árvores já se encontram debilitadas pelo estresse ambiental. O aumento da temperatura pode acelerar o ciclo de vida de insetos herbívoros e expandir a área de atuação de patógenos, adicionando uma camada de complexidade ao manejo florestal (NETHERER; SCHOPF, 2010; GHINI; HAMADA; BETTIOL, 2008). Diante desse panorama, a sustentabilidade do setor florestal dependerá intrinsecamente da adoção de estratégias de adaptação, que incluem o melhoramento genético focado em tolerância à seca e ao calor, bem como a migração planejada para novas fronteiras climáticas identificadas pelos modelos de zoneamento (GONÇALVES *et al.*, 2013).

3.5 Zoneamento do eucalipto frente às mudanças climáticas

A análise das projeções climáticas para o cultivo do gênero *Eucalyptus* em Minas Gerais, sob diferentes cenários de concentração de gases de efeito estufa (RCPs), revela uma tendência de reconfiguração espacial da aptidão florestal, impulsionada por alterações críticas nos regimes hídricos e térmicos (Figura 8). A literatura científica corrobora a premissa de que a estabilidade produtiva atual será desafiada, uma vez que a produtividade do eucalipto responde linearmente à disponibilidade de água e à eficiência do uso desse recurso, tornando o balanço hídrico um determinante fundamental para a viabilidade dos plantios (ALVES *et al.*, 2020; STAPE *et al.*, 2010).

Figura 8 - Reconfiguração espacial da aptidão do eucalipto em Minas Gerais do cenário atual aos cenários climáticos futuros

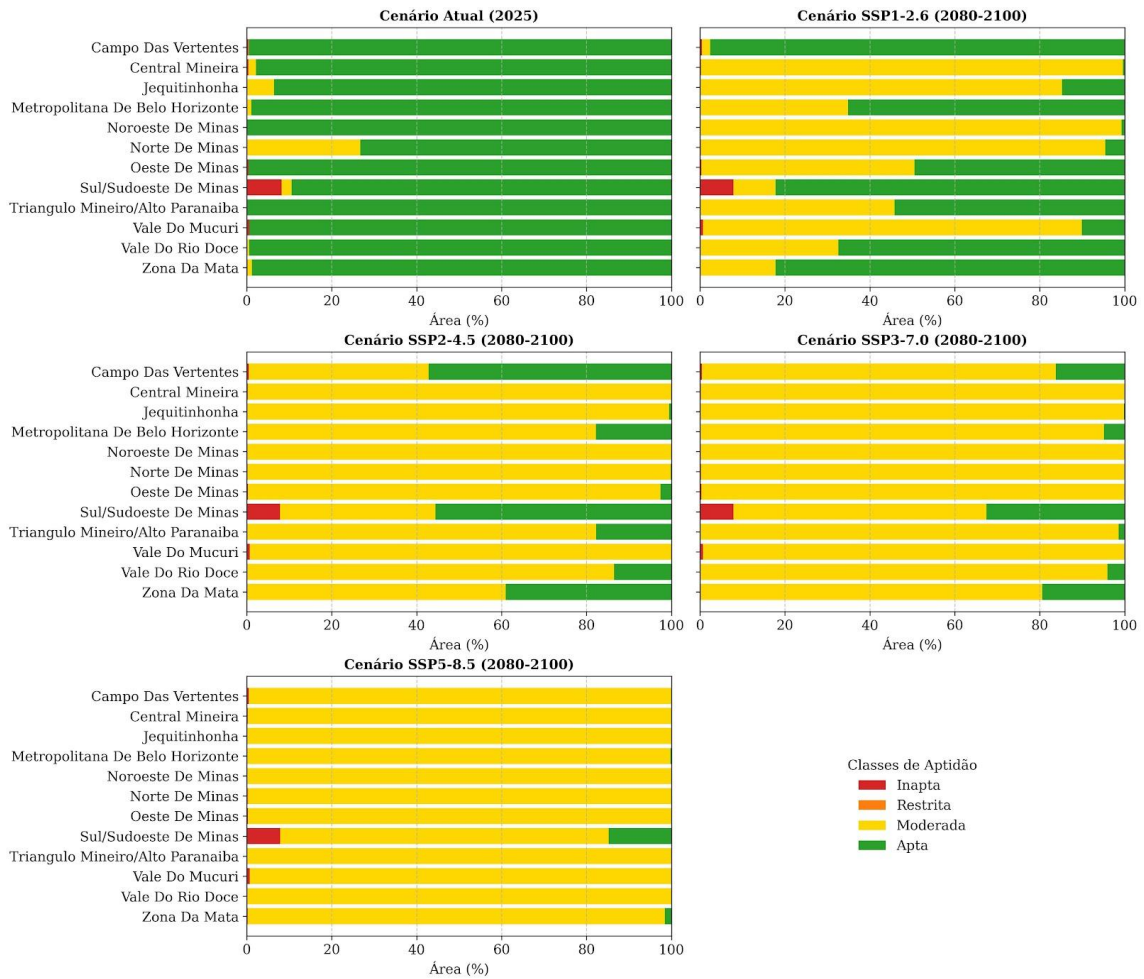


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

No que tange à precipitação, observa-se que, mesmo em cenários de menor impacto, as regiões Norte e Nordeste de Minas Gerais já manifestam restrições que refletem uma vulnerabilidade histórica a períodos de estiagem. Essa condição é agravada nos cenários mais críticos (RCP 3.70 e 5.85), onde a restrição hídrica tende a avançar em direção ao centro do estado (Figura 9). Esse fenômeno é consistente com estudos que indicam que a precipitação do mês mais seco é a variável de maior contribuição para a modelagem da aptidão de espécies como *Eucalyptus grandis*, sugerindo que a intensificação da sazonalidade das chuvas comprometerá a sobrevivência e o incremento volumétrico em áreas de transição (GARCIA *et*

al., 2014). A expansão da silvicultura para essas regiões, historicamente baseada em tecnologias de adaptação e terras de menor custo, enfrentará riscos crescentes de mortalidade e queda de rendimento caso o déficit hídrico ultrapasse a capacidade de regulação fisiológica das plantas (CHAUVET *et al.*, 2024).

Figura 9 - Mudanças na composição das classes de aptidão do eucalipto nas mesorregiões do cenário atual aos cenários climáticos futuros



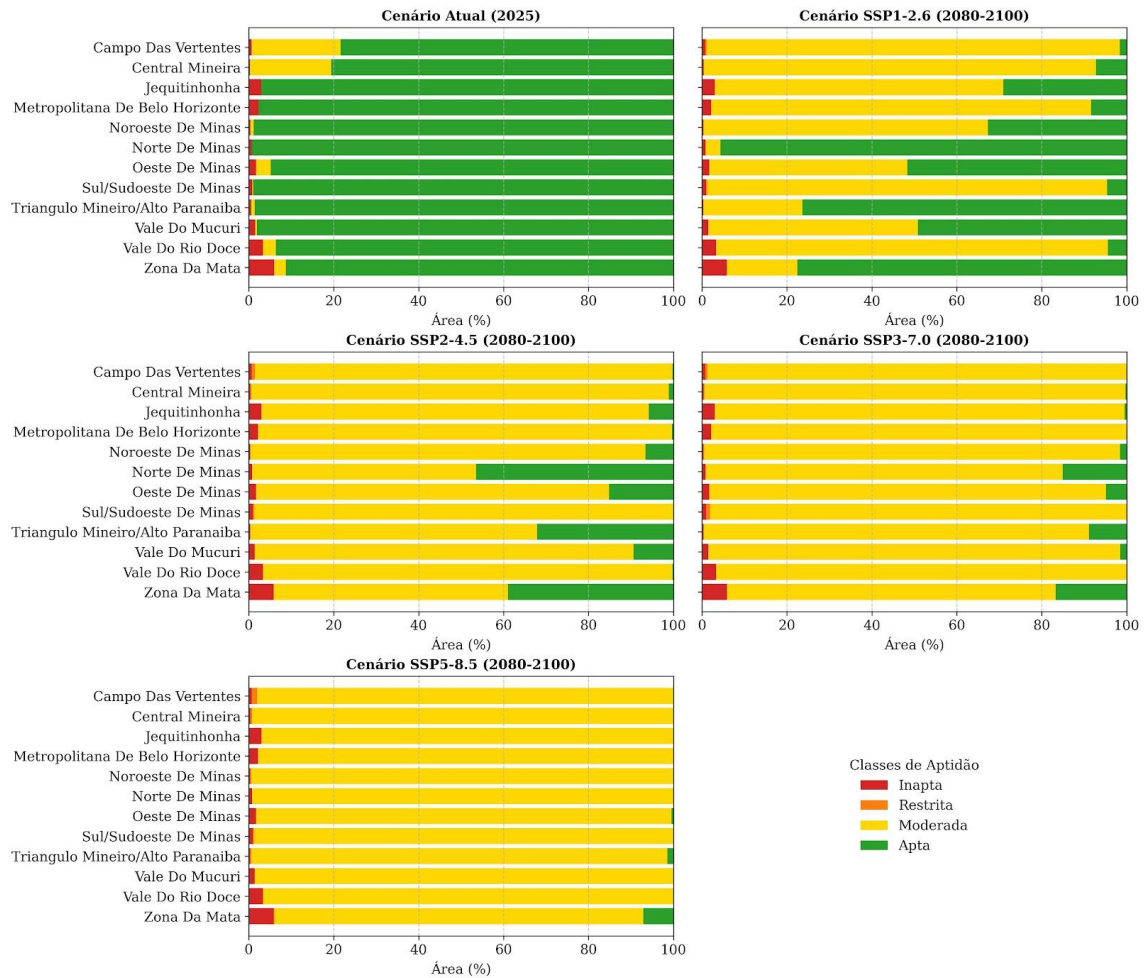
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Simultaneamente, o aumento generalizado das temperaturas médias anuais emerge como um fator limitante severo. A projeção de que áreas atualmente aptas se tornarão restritivas devido ao aquecimento está alinhada aos limites ecofisiológicos da cultura, cuja faixa térmica ótima situa-se geralmente entre 18°C e 25°C para as principais espécies comerciais (FLORES *et al.*, 2016). O aumento da temperatura não atua apenas isoladamente, mas exacerba a demanda evapotranspiratória da atmosfera, reduzindo o excedente hídrico no solo e intensificando o estresse sofrido pelas plantas (ASSAD; MONTEIRO; PUGLIERO,

2021). Esse cenário de "dupla limitação" climática força um deslocamento das zonas de aptidão em direção às regiões de relevo mais elevado, como as serras do Sul e Sudeste de Minas Gerais, que atuarão como refúgios climáticos devido às temperaturas mais amenas proporcionadas pela altitude.

A avaliação da aptidão edafoclimática em escala estadual para Minas Gerais oferece uma perspectiva macroestratégica fundamental sobre a capacidade de suporte do território para a atividade florestal, revelando uma dicotomia entre a vocação produtiva atual e as restrições impostas pelos cenários climáticos futuros (Figura 10). A literatura científica corrobora a existência de uma "reserva territorial" no cenário presente, especialmente em mesorregiões como o Triângulo Mineiro e a Central Mineira, onde a expansão da silvicultura tem ocorrido preferencialmente sobre áreas de pastagens com alta aptidão, evitando a competição direta com a agricultura intensiva e suprimindo vegetação nativa em menor escala nas décadas recentes (CHAUVET *et al.*, 2024).

Figura 10 - Distribuição percentual das classes de aptidão por mesorregião de Minas Gerais no cenário atual e em cenários futuros.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Contudo, a projeção de um "encolhimento climático" sob cenários de emissões intensificadas (como o SSP5-8.5) introduz um risco severo à continuidade da geografia econômica florestal vigente. O declínio da aptidão em regiões como o Norte de Minas, Noroeste e Jequitinhonha, impulsionado pelo aumento da temperatura e consequente elevação da demanda evapotranspiratória, tende a tornar inviáveis grandes maciços florestais que hoje sustentam polos siderúrgicos e de celulose. Garcia *et al.* (2014), ao modelarem a distribuição de *Eucalyptus grandis*, identificaram que a precipitação do mês mais seco e a precipitação anual são variáveis determinantes, prevendo uma retração das áreas favoráveis na região Sudeste e um deslocamento para zonas de clima mais ameno. Esse fenômeno é crítico, pois a produtividade do eucalipto responde linearmente à disponibilidade hídrica, e déficits hídricos acentuados nessas regiões de transição podem levar a perdas de incremento volumétrico e mortalidade (ALVES *et al.*, 2020; ASSAD; MONTEIRO; PUGLIERO, 2021).

A identificação do Sul/Sudoeste de Minas e do Campo das Vertentes como refúgios climáticos, devido às suas altitudes elevadas e temperaturas amenas, sugere uma reconfiguração espacial da silvicultura em direção a essas áreas. No entanto, essa migração impõe um paradoxo estratégico: embora climaticamente resilientes, essas regiões apresentam desafios operacionais e fundiários significativos. Diferentemente das vastas áreas planas do Norte, o relevo acidentado do Sul limita a mecanização plena da colheita e do plantio, encarecendo as operações, enquanto a estrutura fundiária mais fragmentada e valorizada, ocupada por cafeicultura e pecuária leiteira, acirra a disputa pelo uso da terra (RODRIGUES *et al.*, 2024).

Diante da impossibilidade de manter o modelo de expansão horizontal baseado em terras baratas e mecanização extensiva, o setor florestal mineiro será forçado a adotar uma intensificação tecnológica. A adaptação a esse novo cenário exigirá o desenvolvimento de genótipos mais tolerantes ao estresse hídrico para manter a viabilidade nas áreas marginais do Norte (GONÇALVES *et al.*, 2013) e, simultaneamente, a adoção de sistemas integrados, como a Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF), para viabilizar a inserção da silvicultura nas paisagens produtivas complexas do Sul e Campo das Vertentes. Essa abordagem permite diversificar a renda do produtor e otimizar o uso da terra, contornando a escassez de áreas disponíveis para monoculturas extensivas e mitigando riscos econômicos e climáticos (RODRIGUES *et al.*, 2024; ASSAD; MONTEIRO; PUGLIERO, 2021).

4 CONCLUSÃO

As projeções futuras revelam um cenário de "dupla limitação" climática, caracterizado pelo aumento de temperatura e déficit hídrico, resultando na drástica retração das áreas aptas nas regiões Norte e Jequitinhonha. Isso sinaliza riscos iminentes para a sustentabilidade das cadeias de carvão vegetal e celulose nessas localidades. Em contrapartida, identificou-se uma nítida migração da aptidão para o Sul de Minas e Campo das Vertentes, onde as maiores altitudes oferecem refúgios climáticos.

Contudo, essa mudança geográfica impõe um paradoxo estratégico: a migração para o Sul implica operar em relevos acidentados e terras valorizadas, dificultando a mecanização extensiva. Conclui-se que a manutenção da liderança florestal mineira dependerá de intensa inovação tecnológica, exigindo melhoramento genético focado na tolerância à seca e a adoção de sistemas integrados de produção para viabilizar a silvicultura nessas novas fronteiras.

REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T.; DOBROWSKI, S. Z.; PARKS, S. A.; HEGEWISCH, K. C. **TerraClimate**: a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, v. 5, n. 170191, 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/sdata2017191>. Acesso em: 20 nov. 2026.
- ALBA, J. M. F.; WREGE, M. S.; FLORES, C. A.; GARRASTAZU, M. C. O Zoneamento e os Sistemas de Informação Geográfica. In: FLORES, C. A.; ALBA, J. M. F.; WREGE, M. S. (Ed.). **Zoneamento Agroclimático do Eucalipto para o Estado do Rio Grande do Sul e Edafoclimático na Região do Corede Sul – RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. Cap. 2. Disponível em: https://www.academia.edu/download/43543306/Zoneamento_agroclimtico_do_eucalipto_par_20160309-7428-1t02jhw.pdf. Acesso em: 20 nov. 2026.
- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 179–195, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811270400057X>. Acesso em: 20 nov. 2026.
- ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 159–170, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/5VRjGZxXzSrgpKrV5pQH7Ky/>. Acesso em: 20 nov. 2026.
- ALMEIDA, T. S.; CALIJURI, M. L.; PINTO, L. B. Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar para o estado de Minas Gerais com base em regressões múltiplas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 352–355, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/s4CsMDFcpqDWTYNzbjq3G6B/>. Acesso em: 20 nov. 2026.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. Disponível em: http://143.107.18.37/material/mftandra2/ACA0225/Alvares_et_al_Koppen_climate_classBrazil_MeteoZei_2014.pdf. Acesso em: 16 nov. 2026.
- ALVARES, C. A. *et al.* Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 113, n. 3–4, p. 407–427, 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-012-0796-6>. Acesso em: 20 nov. 2026.
- ALVES, M. E. B. *et al.* Simulação da produtividade do eucalipto sob diferentes condições de disponibilidade hídrica na região Centro-Leste de Minas Gerais. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v. 26, n. 2, p. 327–336, 2020. Disponível em: <https://apct.sede.embrapa.br/agrometeoros/article/download/26416/14574>. Acesso em: 16 nov. 2026.
- ASSAD, E. D.; MONTEIRO, J. E. B. A.; PUGLIERO, V. S. Mudanças do clima e a cultura do eucalipto. In: **O eucalipto e a Embrapa**: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento. Brasília: Embrapa, 2021. Cap. 8. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-alice-doc-1131565>. Acesso em: 20 nov. 2026.

- BOER, G. J. *et al.* The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 10, p. 3751–3777, 2016. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/9/3751/2016/>. Acesso em: 20 nov. 2026.
- CHAUVET, X. D. M. *et al.* Quatro décadas do setor florestal em Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 1, 2024. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/389609655>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- COOLEY, S. *et al.* Oceans and coastal ecosystems and their services. In: PÖRTNER, H.-O. *et al.* (Ed.). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 379–550. Disponível em: <https://epic.awi.de/id/eprint/56137>. Acesso em: 16 nov. 2025.
- CORREIA, T. P. **Zoneamento edafoclimático de espécies de eucalipto no estado do Rio de Janeiro**. 2014. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2014. Disponível em: <http://rima110.im.ufrj.br:8080/jspui/handle/20.500.14407/2838>. Acesso em: 05 dez. 2025.
- EMBRAPA. Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2004. 95 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 63). Disponível em: https://www.lareferencia.info/vufind/Record/BR_346a2aaa240de34b8f64d8fcbe782d8c. Acesso em: 20 nov. 2025.
- EYRING, V. *et al.* Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 5, p. 1937–1958, 2016. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/9/1937/2016/gmd-9-1937-2016.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- FARR, T. G. *et al.* The shuttle radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, RG2004, 2007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2005RG000183>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- FLORES, C. A.; GARRASTAZU, M. C.; MATTEI, V. L. Critérios para o zoneamento edáfico do eucalipto. In: FLORES, C. A.; ALBA, J. M. F.; WREGE, M. S. (Ed.). **Zoneamento agroclimático do eucalipto para o estado do Rio Grande do Sul e edafoclimático na região do Corede Sul-RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. Cap. 6. Disponível em: https://www.academia.edu/download/43543306/Zoneamento_agroclimtico_do_eucalipto_par_20160309-7428-1t02jhw.pdf. Acesso em: 20 nov. 2025.
- FLORES, T. B. *et al.* **Eucalyptus no Brasil: zoneamento climático e guia para identificação**. Piracicaba: IPEF, 2016. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/guiaecalyptus/encarte-eucalyptus-2016-05setembro.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2025.
- FLORIANI, M. M. P. *et al.* Relação entre concentrações foliares de carboidratos solúveis totais e tolerância ao frio em diferentes espécies de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 165–174, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/dKgtmNgYnkdCwmkHPDv44sJ/>. Acesso em: 16 nov. 2025.
- GARCIA, L. G. *et al.* Modelagem da aptidão climática do *Eucalyptus grandis* frente aos cenários de mudanças climáticas no Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p.

503–511, dez. 2014. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/bitstreams/bf487a0f-3266-4b76-afa8-7703d4289910>. Acesso em: 20 nov. 2025.

GARRASTAZU, M. C.; FLORES, C. A.; MATTEI, V. L. Zoneamento edáfico para eucalipto na região do Corede Sul – RS. *In*: FLORES, C. A.; ALBA, J. M. F.; WREGGE, M. S. (Ed.). **Zoneamento Agroclimático do Eucalipto para o Estado do Rio Grande do Sul e Edafoclimático na Região do Corede Sul – RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2009. Cap. 8. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/747045>. Acesso em: 20 nov. 2025.

GHINI, R.; HAMADA, E.; BETTIOL, W. Climate change and plant diseases. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 98–107, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/QvW4Ly63BjJHSdPK99LG9ML>. Acesso em: 20 nov. 2025.

GOLFARI, L.; CASER, R. L.; MOURA, V. P. G. Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil: segunda aproximação. Brasília: **Centro de Pesquisa Florestal da Região do Cerrado**, 1978. 66 p. (Série técnica PRODEPEF, 11). Disponível em: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122621/records/6473967668b4c299a3fb5134>. Acesso em: 05 dez. 2025.

GONÇALVES, J. L. M. *et al.* Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037811271200761X>. Acesso em: 20 nov. 2025.

GONÇALVES, J. L. M.; SILVA, P. H. M. da. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies nativas. Piracicaba: **IPEF**, 2005. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/acervohistoricoexterno/DocumentosFlorestaisNumero15.pdf>. Acesso em: 06 set. 2025.

GORELICK, N. *et al.* Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/am/pii/S0034425717302900>. Acesso em: 06 dez. 2025.

HENGL, T.; MACMILLAN, R. A. Predictive Soil Mapping with R. **Wageningen: OpenGeoHub Foundation**, 2019. Disponível em: <https://soilmapper.org>. Acesso em: 06 dez. 2025.

IBÁ. **Relatório Anual 2025**. Brasília: Indústria Brasileira de Árvores, 2025. Disponível em: <https://iba.org/?publications=relatorio-anual-2025>. Acesso em: 20 nov. 2025.

IPCC. **Climate Change 2013: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. Disponível em: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1371413280484207233>. Acesso em: 20 nov. 2025.

IPCC. Summary for Policymakers. *In*: MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* (Ed.). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmef/v17n4/2448-6795-rmef-17-04-e794.pdf>. Acesso em: 05 set. 2025

KWIATKOWSKI, L. *et al.* Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model

projections. **Biogeosciences**, v. 17, n. 13, p. 3439–3470, 2020. Disponível em: <https://bg.copernicus.org/articles/17/3439/2020/bg-17-3439-2020.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.

MARCOLINI, M. de P. **Efeito das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático para a cultura do eucalipto (*Eucalyptus urograndis*) no estado do Tocantins**. 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia), Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2014. Disponível em: <http://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/565/1/Murilo%20de%20P%C3%A1dua%20Marcolini%20-%20Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2025.

MOSS, R. H. *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 11, p. 747–756, 2010. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature08823>. Acesso em: 16 nov. 2025.

NAPPO, M. E.; NAPPO, A. E.; PAIVA, H. N. Zoneamento ecológico de pequena escala para nove espécies arbóreas de interesse florestal no estado de Minas Gerais. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 5, 2005. Disponível em: http://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/INHWZ4p95SztMMM_2013-4-25-14-59-46.pdf. Acesso em: 05 dez. 2025.

NASA JPL. **NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001**. 2020. Distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Disponível em: https://doi.org/10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001. Acesso em: 05 dez. 2025.

NETHERER, S.; SCHOPF, A. Potential effects of climate change on insect herbivores in European forests—general aspects and the pine processionary moth as specific example. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 4, p. 831–838, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112709005015>. Acesso em: 05 set. 2025.

O'NEILL, B. C. *et al.* The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461–3482, 2016. Disponível em: <https://gmd.copernicus.org/articles/9/3461/2016/gmd-9-3461-2016.pdf>. Acesso em: 05 set. 2025.

PAYN, T. *et al.* Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 57–67, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112715003473>. Acesso em: 20 nov. 2025.

PETER, B. G.; MESSINA, J. P.; LIN, Z.; SNAPP, S. S. Crop climate suitability mapping on the cloud: a geovisualization application for sustainable agriculture. **Scientific Reports**, v. 10, 15487, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-72384-x.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.

PROJETO MAPBIOMAS. **Coleção 10 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil**. 2024. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 15 jun. 2024.

RIBEIRO, A. *et al.* Eucalipto. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília, DF: INMET, 2009. p. 409–423. Disponível em: <https://inmet.edu.br/kp-content/uploads/sites/222/2022/03/AGROMETEOROLOGIA>. Acesso em: 16 set. 2025.

- RODRIGUES, A. P.; VICENTE, M. R.; SANTOS, R. M. dos. Zoneamento edafoclimático para espécies florestais na microrregião de Salinas/MG. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales**, v. 13, n. 11, p. 1–24, 2024. Disponível em: <https://www.revistacaribena.com/ojs/index.php/rccs/article/download/4363/3057>. Acesso em: 05 dez. 2025.
- ROSSETTI, L. A. Zoneamento agrícola em aplicações de crédito e securidade rural no Brasil: aspectos atuariais e de política agrícola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 386–399, 2001. Disponível em: <http://trigo.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/pdf/revista/cap2.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- SANTOS, A. F.; AUER, C. G.; GRIGOLETI JÚNIOR, A. Doenças e outras desordens. In: SANTOS, P. E. T. dos (Ed.). **Cultivo do Eucalipto**. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1155567>. Acesso em: 20 dez. 2025.
- SANTOS, A. R. *et al.* GIS applied to agriclmatological zoning and agrototoxin residue monitoring in tomatoes: a case study in Espírito Santo state, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 166, p. 429–439, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479715303388>. Acesso em: 10 nov. 2025.
- SANTOS, H. G. dos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2006. 306 p. Disponível em: <http://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00053080.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- SANTOS, H. G. *et al.* Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: **Embrapa**, 2018. Disponível em: <http://livimagens.sct.embrapa.br/amostras/00053080.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- SOUZA, O. M. M. **Aptidão agroclimática e ambiental do *Eucalyptus urophylla* para a região do MATOPIBA**. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2017. Disponível em: <http://umbu.uft.edu.br/bitstream/11612/1967/1/OI%C3%ADria%20Morgana%20Menezes%20Souza%20-%20Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- SOUZA, O. M. M. *et al.* Agroclimatic aptitude of *Eucalyptus urophylla* for the Matopiba region. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 34, n. 2, e70219, p. 1–22, 2024. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/5jtRbp89dmVpbkKLkhY5sVN/>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- SOUZA, U. R. de *et al.* Determinantes dos novos contratos de fomento florestal na mesorregião do Vale do Rio Doce, Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 377–386, 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/Pcw4Pk6VqDGCTKXpZpQf93d/>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- SPERANDIO, H. V. *et al.* Zoneamento agroecológico para espécies de eucalipto no estado do Espírito Santo. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 11, n. 34, p. 203–216, 2010. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/download/15906/8976/59593>. Acesso em: 06 dez. 2025.
- STAPE, J. L. *et al.* The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1684–1694, 2010. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112710000186>. Acesso em: 20 nov. 2025.

UFV; CETEC; UFLA; FEAM. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1yirHhcxYIYD9O1F7FY8J6rBFbY244P2o/view>. Acesso em: 10 dez. 2025.

VITAL, M. H. F. Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 28, p. 235–276, 2007. Disponível em: <https://www.erambiental.com.br/var/userfiles/arquivos69/documentos/12845/ImpactosFlorestasEucalipto.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2025.

WOLLMANN, C. A.; GALVANI, E. Zoneamento agroclimático: linhas de pesquisa e caracterização teórica-conceitual. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 25, n. 1, p. 179–190, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/V7h5hJmsHSzNGkFS7cLrKfs/>. Acesso em: 10 dez. 2025.

WREGGE, M. S. *et al.* Zoneamento Agroclimático do Eucalipto para o Estado do Rio Grande do Sul e Edafoclimático na Região do Corede Sul – RS. Pelotas: **Embrapa Clima Temperado**, 2009. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/43543306/Zoneamento_agroclimtico_do_eucalipto_par20160309-7428-1t02jhw-libre.pdf. Acesso em: 20 nov. 2025.