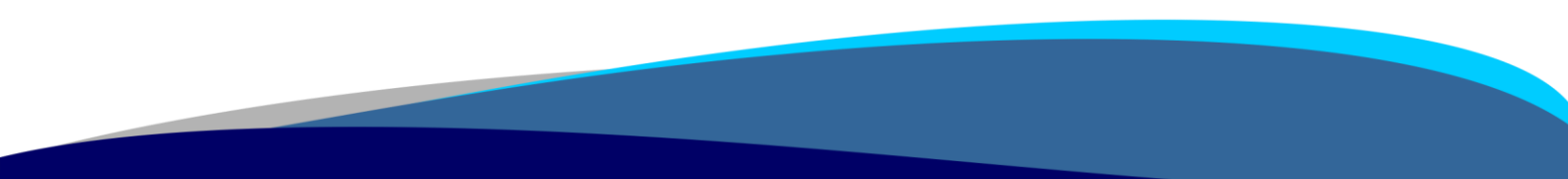


**Modelo integrado de inteligência territorial para
precificação e priorização de ativos florestais destinados à
geração de bioenergia renovável**

X Prêmio Serviço Florestal Brasileiro em Estudos de Economia e Mercado Florestal

Serviço Florestal Brasileiro (SFB)

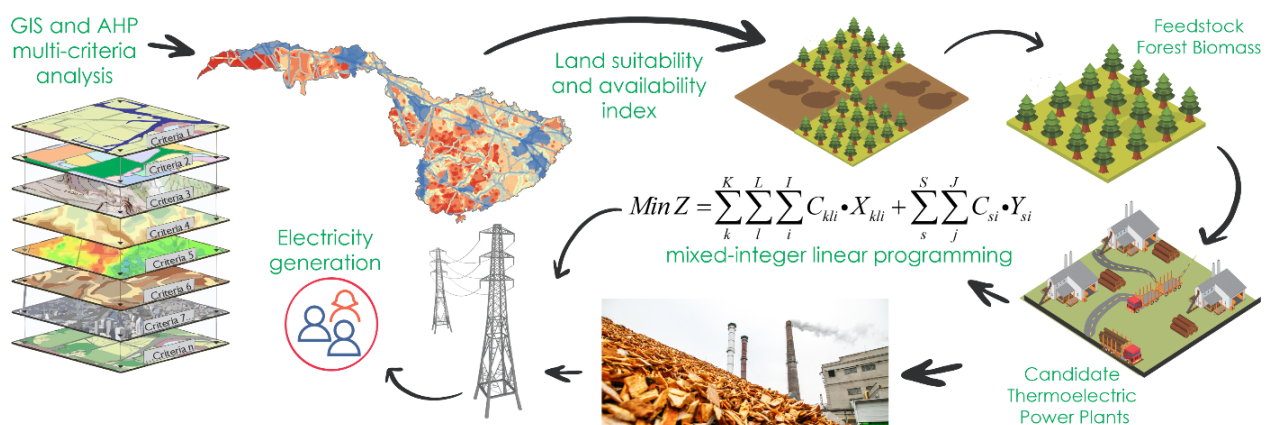


Modelo integrado de inteligência territorial para precificação e priorização de ativos florestais destinados à geração de bioenergia renovável

Resumo. A transição da matriz energética global para fontes renováveis tornou-se estratégica diante da emergência climática. Nesse contexto, a biomassa florestal destaca-se como alternativa para expansão da geração elétrica renovável, especialmente em sistemas baseados em resíduos e florestas energéticas. Entretanto, a implantação de usinas termelétricas requer a integração de fatores econômicos, ambientais e sociais relacionados à disponibilidade de biomassa e à aptidão territorial. Este estudo propõe um modelo integrado de inteligência territorial para priorização de áreas e otimização de investimentos destinados à geração de bioenergia florestal. A metodologia combinou modelagem multicritério em ambiente SIG, utilizando o método AHP para ponderação dos critérios, com um modelo de programação linear inteira mista voltado à minimização de custos do sistema produtivo. Foram incorporados custos de transporte, colheita, implantação florestal, aquisição e arrendamento de terras, fomento florestal e compra de madeira no mercado. Uma grande bacia hidrográfica do sudeste do Brasil foi utilizada como estudo de caso. Os resultados permitiram identificar áreas prioritárias e zonas restritivas para implantação de projetos bioenergéticos, além de reconhecer os melhores conjuntos de áreas de suprimento florestal para atendimento da demanda energética. A solução ótima indicou investimento aproximado de USD 103 milhões distribuídos em cerca de 27.234 hectares destinados à produção florestal energética. Mesmo diante da elevada complexidade espacial e do grande volume de dados processados, o modelo demonstrou potencial para apoiar políticas públicas e decisões estratégicas relacionadas à precificação territorial e ao planejamento de ativos florestais destinados à bioenergia renovável.

Palavras-chave: planejamento florestal; programação linear inteira mista; bioeconomia.

Resumo Ilustrado



1. Introdução

As emissões antropogênicas globais de CO₂ aumentaram para aproximadamente 30 Gt no período de 2019–2020 [1]. Cerca da metade desse total esteve significativamente associada à geração de energia e aos processos industriais [1]. As fontes não renováveis do setor elétrico responderam por 12,3 Gt de CO₂, correspondendo a 36% de todas as emissões relacionadas à energia, valor superior ao de qualquer outro setor em 2020 [2]. Além disso, graves consequências vêm alterando fatores ambientais críticos, como a extinção de espécies, a fome e o surgimento de doenças consideradas sensíveis às mudanças climáticas [3]. Mesmo que os limites máximos de aquecimento global estabelecidos pelo Acordo de Paris (1,5 e 2 °C em relação aos níveis pré-industriais) não sejam ultrapassados, parte dos impactos decorrentes desse aquecimento sobre o sistema climático será inevitável [4].

A corrida para a redução das emissões de carbono teve início há décadas, e o mundo depende de projetos sustentáveis para minimizar riscos sociais e ambientais. Além disso, iniciativas governamentais e não governamentais têm sido amplamente consolidadas por meio de acordos, protocolos e certificações relacionados às emissões de gases de efeito estufa (GEE). Os sistemas bioenergéticos apresentam elevado potencial para substituir combustíveis fósseis [7,8] e constituem um importante recurso renovável para economias de baixo carbono no contexto da transição energética [9,10]. A maioria dos países utiliza ou considera utilizar madeira proveniente de florestas plantadas e seus resíduos para geração de energia [11]. O setor florestal representa o principal fornecedor desse recurso, respondendo por mais de 85% de toda a biomassa destinada à produção energética [8,12]. Atualmente, o mundo produz cerca de 6.890 TWh anuais de eletricidade renovável [13], sendo a energia hidrelétrica a principal fonte de geração elétrica renovável (62%), seguida pela energia eólica (19%) e pela bioenergia (9,25%).

No Brasil, a matriz elétrica/energética apresenta elevada dependência de usinas hidrelétricas (64,1%) e de combustíveis fósseis (15,4%), seguidos pelas fontes eólica (9,0%), biomassa (8,8%), solar (1,5%) e nuclear (1,2%) [14]. Entretanto, as fases de aquecimento e resfriamento dos oceanos vêm alterando os padrões de precipitação e temperatura no território brasileiro. As atuais condições hidrológicas têm impactado negativamente os níveis dos reservatórios e a oferta de energia hidrelétrica. Além disso, diversos impactos sociais e ambientais estão associados à implantação de grandes barragens [15,16], bem como a outras questões relacionadas à viabilidade técnica e ao ciclo de vida desses empreendimentos.

Os projetos de geração de energia a partir de biomassa têm sido observados ao longo dos anos no Brasil. Como exemplo, a capacidade instalada de geração elétrica proveniente de biomassa atingiu 14.978 MW em 2019. As projeções de crescimento até 2050 indicam um aumento de 166% no uso de biomassa florestal para fins energéticos no país. Esses valores são impulsionados principalmente pela indústria de celulose e papel, que também amplia sua base florestal destinada à geração de energia [17,18]. Nesse contexto, a matéria-prima encontra-se fortemente integrada verticalmente ao setor industrial. Além disso, resíduos ou produtos florestais secundários são frequentemente gerados durante o processamento industrial e as operações de colheita florestal. Anualmente, o Brasil produz cerca de 41 milhões de toneladas de resíduos de madeira [19], equivalentes a aproximadamente 1,7 GW

de potencial energético. Esses recursos ainda apresentam elevado potencial de aproveitamento para geração de energia e ampliação dos benefícios econômicos associados [20].

1.1. O setor florestal brasileiro diante da crise energética global

A cadeia produtiva florestal brasileira tem incentivado a diversificação da economia nacional, promovendo geração de empregos, renda e políticas de desenvolvimento sustentável. O país possui extensas áreas de florestas plantadas com ciclos de rotação mais curtos e os maiores níveis de produtividade florestal do mundo, características que favorecem a produção de energia elétrica renovável. Atualmente, o Brasil possui 9,55 milhões de hectares de florestas plantadas, dos quais 78,21% são compostos por espécies do gênero *Eucalyptus*, apresentando taxa média de crescimento de $36,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ [21]. O estoque de biomassa e a flexibilidade do planejamento de colheita permitem o chamado “armazenamento de energia” ao longo do período de consumo, reduzindo riscos operacionais [22]. Em contrapartida, as fontes eólicas e solar ainda apresentam limitações técnicas relacionadas ao armazenamento operacional da energia gerada ou aos elevados custos envolvidos.

Os desafios enfrentados pelos países na produção de energia estão associados à dependência excessiva e à limitação de fontes primárias, à necessidade de sistemas eficientes de geração e transmissão, ao aumento da diversificação da matriz energética, aos elevados investimentos requeridos, à volatilidade dos preços internacionais e às crescentes demandas globais. A crise energética mundial é uma realidade, especialmente diante da dependência comercial global de combustíveis fósseis provenientes das grandes potências energéticas. A União Europeia, por exemplo, importa aproximadamente 82% do petróleo e 57% do gás natural consumidos de origem russa. Demandas energéticas igualmente expressivas também são observadas em países populosos, como Índia e China. As projeções indicam que a demanda global por energia poderá aumentar cerca de 45% até 2030 e ultrapassar 300% até o final do século [23]. Esse cenário também pode refletir os impactos da desaceleração econômica e do período de recuperação após os dois últimos anos de pandemia.

Nesse contexto, o planejamento espacial e a gestão do uso da terra sob múltiplas restrições sociais, ecológicas e produtivas tornam-se essenciais para a construção de cadeias sustentáveis de suprimento de madeira. O problema de otimização envolve simultaneamente a minimização dos custos de implantação dos projetos e a seleção de áreas aptas de acordo com critérios previamente definidos. Embora os investimentos financeiros representem um elemento central para empreendimentos privados e restrições políticas, a análise da paisagem desempenha papel fundamental na redução dos riscos do empreendimento. Além disso, a localização da cadeia de suprimento industrial influencia diretamente a tomada de decisão e deve estar adequadamente integrada à dinâmica territorial da paisagem. Mesmo quando os investimentos promovem desenvolvimento econômico regional, projetos de grande escala estão inevitavelmente associados a padrões socioecológicos complexos. A perspectiva da gestão não deve se restringir apenas ao custo

da terra ou à qualidade produtiva do sítio, mas considerar uma visão holística baseada na interação entre múltiplas variáveis. Nessas circunstâncias, o problema de decisão espacial enfrenta inúmeras restrições. A definição de limites de expansão industrial ou o zoneamento territorial adequado pode contribuir para reduzir pressões sobre a paisagem, protegendo comunidades tradicionais, espécies endêmicas da fauna e flora, recursos hídricos, paisagens de valor cênico, hotspots de biodiversidade e outros possíveis impactos decorrentes das atividades industriais. A gestão territorial sustentável e precisa aumenta a eficiência do uso da terra para fins econômicos [24][25][26]. Empreendimentos florestais voltados à produção de biomassa energética demandam grandes extensões territoriais dentro de uma região. A dimensão territorial desses investimentos depende de fatores como a demanda por madeira, a qualidade do sítio, a disponibilidade de mão de obra, os avanços tecnológicos, a formação de capital, a estabilidade política e a possibilidade de diferentes usos da terra e de produtos florestais, entre outros aspectos [27].

A Análise Multicritério de Decisão (*Multi-Criteria Decision Analysis* – MCDA) consiste em um método analítico baseado em critérios e parâmetros destinados ao suporte à tomada de decisão [28] em diversas áreas de aplicação, incluindo a gestão de recursos naturais [29]. De modo geral, esse subcampo da pesquisa operacional utiliza matrizes e regras para solucionar problemas complexos que envolvem objetivos conflitantes [28]. Nas últimas décadas, a integração desse método com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) tem sido amplamente aplicada em problemas de localização e gestão de empreendimentos [30–39]. Essa associação possibilita incorporar critérios econômicos, ambientais e sociais na definição de zonas territorialmente aptas e desejáveis sob uma perspectiva espacial [40]. As operações de sobreposição matricial permitem eliminar áreas problemáticas e identificar territórios mais favoráveis, livres de restrições severas.

1.2. Qual questão-chave queremos responder?

A hipótese central que orienta o presente estudo é que, por meio da aplicação de técnicas de MCDA-SIG associadas a um modelo de programação linear, é possível auxiliar a tomada de decisão com inteligência geográfica voltada à compra de madeira, arrendamento de terras, fomento florestal e aquisição de áreas destinadas à implantação e ao suprimento de projetos termelétricos baseados em resíduos de florestas plantadas.

As principais contribuições desta pesquisa estão relacionadas à urgente necessidade de diversificação da matriz energética brasileira. Nosso estudo também contribui diretamente para as premissas discutidas na COP-30 voltadas à promoção da energia sustentável. Dessa forma, esta pesquisa analisou áreas disponíveis e prioritárias para o desenvolvimento de usinas termelétricas e desenvolveu um modelo de alocação de recursos por meio de programação linear inteira mista, com o objetivo de definir as melhores estratégias de uso da terra em escala de bacia hidrográfica, utilizando um estudo de caso aplicado ao Brasil. Uma vez identificadas as áreas potenciais para fins produtivos, surge a necessidade de planejar e avaliar todas as condições técnicas, produtivas e econômicas para garantir a viabilidade do empreendimento. Foram explorados novos critérios e restrições ainda não empregados em estudos anteriores, buscando representar de forma mais realista a complexidade inerente às

análises espaciais. Além disso, desenvolvemos um modelo matemático de alocação de recursos baseado nas áreas potenciais previamente mapeadas, utilizando programação linear inteira mista e incorporando diferentes modalidades de negócios florestais em cenários realistas de tomada de decisão.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo em larga escala

A área de estudo corresponde a uma porção do território brasileiro delimitada pela Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG), com aproximadamente 86.086,4 km², localizada no estado de Minas Gerais (Figura 1.A). A região apresenta elevada expansão econômica e constitui importante fronteira para o agronegócio, atividades industriais, turismo e geração hidrelétrica, destacando-se os reservatórios de Camargos, Itutinga, Funil e Furnas. Atualmente, cerca de 255.000 hectares de povoamentos de *Eucalyptus* spp. são cultivados para fins comerciais [45], com estimativas de produtividade (Incremento Médio Anual – IMA) variando entre 37,55 e 50,35 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ aos seis anos de rotação final [46].

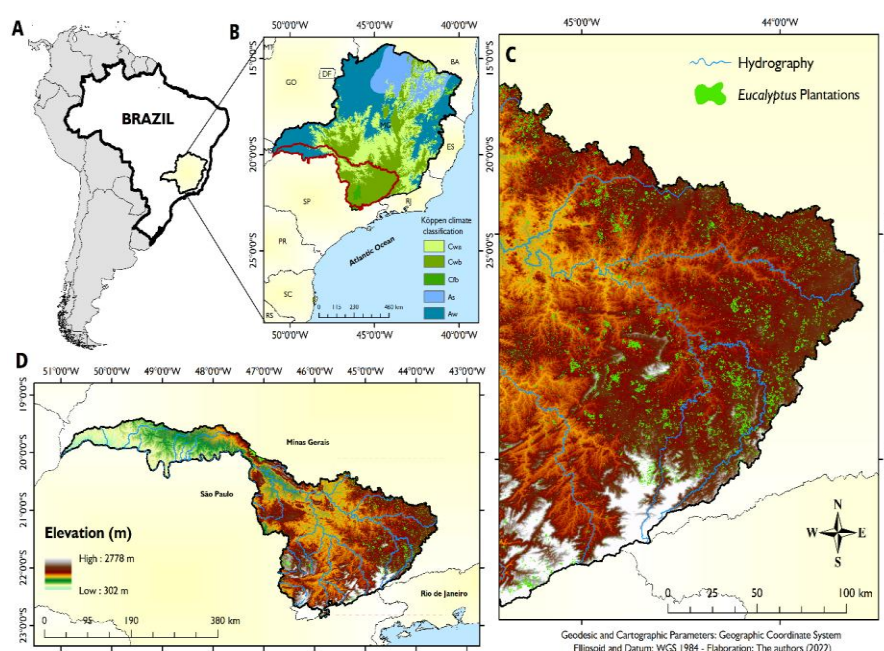


Figura 1. Bacia hidrográfica do Rio Grande no estado de Minas Gerais, Brasil (A), tipos de classificação climática (B), distribuição espacial das plantações de eucalipto (C) e gradiente altitudinal (D). Fonte: Os autores (2026).

2.2. Cadeia de suprimento de madeira e problema de gestão territorial

O problema abordado neste estudo envolve o uso adequado da terra para a implantação de grandes projetos termelétricos baseados no consumo de biomassa florestal. A biomassa vegetal tornou-se uma matéria-prima estratégica para impulsionar a economia

em diversos setores, como papel e celulose, painéis de madeira, serrarias e geração de energia termelétrica. Essa concepção já vem sendo consolidada há muitos anos no Brasil e no mundo. Entretanto, recentemente, ganhou maior relevância diante das frequentes crises de geração de energia enfrentadas tanto pelo país quanto em escala global.

Se, por um lado, existe disponibilidade de matéria-prima pronta para uso, por outro, também é possível observar a existência de áreas disponíveis para a expansão de plantações comerciais de eucalipto, além de condições climáticas favoráveis à silvicultura e fatores que favorecem o sucesso operacional desses empreendimentos.

A região analisada neste estudo apresenta facilidades para conexão elétrica ao sistema interligado nacional, fator que contribui para a redução dos custos operacionais. Entretanto, a real sustentabilidade do empreendimento depende diretamente da consolidação de sua própria base florestal, reduzindo a dependência das oscilações e reajustes dos preços da madeira no mercado. Nesse contexto, buscamos responder a uma série de questões: (i) é possível identificar, com elevado nível de detalhamento, os locais mais adequados para a implantação desse cluster florestal por meio de um zoneamento espacial robusto? e (ii) o desenvolvimento de um modelo de programação matemática pode fornecer diretrizes para a tomada de decisão em investimentos florestais e termelétricos?

A viabilidade de implantação de indústrias termelétricas nessa região refletirá diretamente na possibilidade de geração de empregos, arrecadação tributária, adoção de melhores práticas de uso da terra, maior controle da proteção florestal, cumprimento da legislação ambiental e manutenção de áreas de vegetação nativa preservada, além de reduzir a dependência dos níveis dos reservatórios hídricos e contribuir para o debate global sobre a emergência climática.

2.3. Parte I: Índice de Sustentabilidade Territorial (IST)

2.3.1. Análise de Decisão Multicritério (MCDA)

Foram utilizadas 17 camadas de entrada para definir as áreas restritas e não restritas ao longo da bacia hidrográfica. Todos os dados espaciais utilizados são de acesso público e provenientes de instituições oficiais brasileiras (Tabela 1 – Material Suplementar). As regras de uso da terra foram estabelecidas com base em informações legais relacionadas a instalações governamentais e industriais. O zoneamento territorial do projeto de biomassa florestal, livre de restrições, foi desenvolvido considerando fatores ambientais, sociais e econômicos. Ao final, foi calculado o Índice de Sustentabilidade Territorial (*Territorial Sustainability Index* – TSI), com o objetivo de definir as áreas prioritárias para implantação de usinas termelétricas e seus respectivos projetos silviculturais. Para o mapeamento e execução do método AHP, foram utilizados o software ArcGIS 10.8 [50] e uma plataforma gratuita baseada na web denominada AHP-OS package [51].

2.3.2. Consideração das áreas restritivas e de sustentabilidade

Uma análise de exclusão foi utilizada para definir as áreas consideradas inadequadas para a implantação de usinas termelétricas. Foram consideradas restrições topológicas relacionadas a elementos artificiais, naturais e ambientais, resumidas na Tabela 2. A aceitabilidade social, ambiental e legal da implantação de indústrias termelétricas baseadas em biomassa florestal depende, em grande parte, do tratamento adequado atribuído a esses três componentes [42]. Na análise das áreas restritivas, foi implementada uma zona de influência (*buffer zone*) para cada restrição, considerando as características da região de estudo e diretrizes obtidas na literatura científica e na legislação vigente.

Tabela 2. Restrições técnicas de uso da terra para delimitação de zonas espaciais de amortecimento.

Tema	Valores técnicos das áreas restritivas	Fontes de referência
Áreas urbanas	Raio (≤ 1 km)	[37,41,42]
Sítios arqueológicos	Distância (≤ 200 m)	[52]
Aeródromos (Públicos e Privados)	Zona de amortecimento (<i>buffer zone</i>) (≤ 13 km ou ≤ 20 km) ^a	[37,41,53–56]
Hidrografia (rios, lagos e outros corpos d'água)	Zona de amortecimento (<i>buffer zone</i>) (≤ 200 m) ^b	[37,42,52,57,58]
Áreas ambientalmente sensíveis (Veredas)	Distância (≤ 50 m)	[37,58,59]
Unidade de conservação (Proteção integral)	Zona de amortecimento (<i>buffer zone</i>) (≤ 10.000 m)	[37,42,60]
Unidade de conservação (Uso sustentável)	Polígonos (área)	—
Rodovias e ferrovias	Zona de amortecimento (<i>buffer zone</i>) (≤ 30 m)	[37,41,42,52,61]
Linhas de transmissão de energia	Zona de amortecimento (<i>buffer zone</i>) (≤ 30 m)	[37,41]
Declividade do terreno	Encostas ($>25\%$ ou $>15^\circ$)	[37,41,56,61]
Terras indígenas	Polígonos (área)	[41]
Assentamentos rurais	Polígonos (área)	[37,41]

^a Raio de 20 km para aeroportos que operam segundo regras de voo por instrumentos (*Instrument Flight Rules* – IFR) e raio de 13 km para os demais aeródromos. ^b Conforme a Portaria MINTER nº 124, de 20 de agosto de 1980, que estabelece critérios para localização de indústrias potencialmente poluidoras em áreas de captação hídrica.

Por meio da manipulação de dados geoespaciais, foi gerado um mapa *raster* com resolução espacial de 90 m para cada elemento de restrição. Os dados matriciais foram transformados em imagens binárias mediante a reclassificação das células localizadas dentro da área restritiva com valor “0” e das células situadas fora da área de restrição com valor “1”. Assim, células com valor “1” indicaram locais potencialmente favoráveis à implantação das usinas termelétricas, enquanto células com valor “0” representaram áreas inadequadas. O mapa binário final de restrições foi produzido por meio da multiplicação das camadas de dados (Equação 1), em que CE_i representa o valor da célula i correspondente ao valor booleano (0,1) atribuído à célula i -ésima da camada restritiva j -ésima; e n corresponde ao número total de restrições consideradas na análise.

$$C_{E,i} = \prod_{j=1}^n C_{i,j} \quad \text{Eq.1}$$

Examinamos os fatores que mais influenciam a seleção e a sustentabilidade de áreas potencialmente prioritárias para instalação de usinas termelétricas. Nesta etapa, foram utilizados 12 critérios/temas (Tabela 3) em dados espacialmente definidos para o mapeamento de áreas adequadas ou preferenciais. As escolhas dos critérios e a definição das classes de preferência foram estabelecidas com base em aspectos técnicos observados em uma ampla revisão bibliográfica [7,36,37,41,63–66], especialmente para os critérios cujas distâncias/zonas de amortecimento não são especificadas por regulamentações governamentais ou legislações ambientais regionais. Para a análise de aptidão, foram gerados buffers ao redor dos elementos físicos da paisagem e de suas áreas de influência. Cada zona de buffer foi reclassificada mediante atribuição de uma pontuação representando a influência relativa de cada zona. Para os critérios em que a distância euclidiana não se aplicava (por exemplo, custo da terra), os valores das células *raster* foram reclassificados diretamente por meio da atribuição de pontuações relativas.

Em contraste com os critérios de exclusão, a análise das áreas prioritárias foi utilizada para quantificar o grau de aptidão da terra para instalação de usinas termelétricas. Para todas as camadas, foi estabelecida uma escala uniforme de pontuação variando de 1 a 3, sendo: Baixa Aptidão (Pontuação 1), Média Aptidão (Pontuação 2) e Alta Aptidão (Pontuação 3). Os subcritérios que influenciavam positivamente a aptidão receberam pontuações mais elevadas, enquanto aqueles com alguma limitação ou maior distância das fontes de influência receberam pontuações relativas mais baixas (Tabela 3).

Tabela 3. Critérios selecionados (fatores) para avaliação de aptidão preferencial à instalação de usinas termelétricas movidas à biomassa florestal e respectivas referências.

Critério	Informação	Gradiente	Subcritérios/Pontuações	Fontes de referência
Plantações florestais comerciais	Distância da oferta imediata de suprimento de madeira (km)	Proximidade	> 80 (1) 40 – 80 (2) 0 – 40 (3)	[67,68]
Áreas urbanas	Distância das áreas urbanas (km)	Mais distante	1 – 3 (1) 3 – 5 (2) ≥ 5 (3)	[41,69]
Hidrografia	Distância dos corpos hídricos (m)	Proximidade	200 – 1000 (3) 1000 – 5000 (2) > 5000 (1)	[41,70]
Termelétricas	Indicação da distância existente até outras usinas termelétricas (quanto mais próximo, melhor)	Proximidade	1 – 5 km (3) > 5 km (2)	—
Linhas de transmissão	Proximidade às linhas de transmissão de energia (quanto mais próximo, melhor)	Proximidade	30 – 1600 m (3) > 1600 m (1)	[41,71]
Rodovias	Indicação da distância existente até as principais rodovias (quanto mais próximo, melhor)	Proximidade	30 – 750 m (3) 750 – 1500 m (3) > 1500 m (3)	[70,71]
Ferrovias	Indicação da distância existente até as ferrovias	Proximidade	30 – 5000 m (3) > 5000 m (2)	[71]

	(quanto mais próximo, melhor)			
Subestações elétricas	Indicação da distância até as subestações existentes (quanto mais próximo, melhor)	Proximidade	2 – 5 km (3) 5 – 10 km (2) > 10 km (1)	[56,65]
Inclinação superficial	Indicação da declividade do terreno para instalações industriais (quanto mais plano, melhor)	Menor declividade	0 – 10% (3) 10 – 20% (2) 20 – 25% (1)	[41,43,56]
Volume de estoque de madeira (m ³)	Quantidade de madeira produzida	Grande volume	51.930 – 206.600 (3) 13.500 – 51.930 (2) 0 – 13.500 (1)	Os autores
a Incremento Médio Anual (IMA)	Indica o crescimento médio da floresta até a idade n (quanto maior o IMA, melhor)	Maior incremento	> 40 m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹ (3) 37,55 – 40 m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹ (2)	[21,41]
b Valor da Terra Nua (VTN) (US\$/ha)	Indica o preço da terra (quanto menor o custo, maior a atratividade)	Menor preço	274,38 – 1317,04 (3) 1317,04 – 2497,44 (2) 2497,44 – 5291,03 (1)	Os autores

^a A espacialização do IMA de Eucalyptus foi realizada utilizando o procedimento geoestatístico de krigagem ordinária; ^b VTN ou custo da terra: valores monetários convertidos para dólar americano.

2.3.3. Pesos AHP

Utilizamos o método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) de apoio multicritério à tomada de decisão, uma técnica de análise decisória e planejamento baseada em múltiplos indicadores. Sua aplicação reduz o estudo de sistemas complexos a uma sequência de comparações pareadas entre componentes devidamente identificados [72]. Por meio de uma matriz de comparação pareada, o AHP calcula o valor do peso para cada critério (w_i) a partir do autovetor correspondente ao maior autovalor da matriz, normalizando posteriormente a soma dos componentes para unidade [73]. Algumas condições são necessárias para a correta aplicação do método [74]: (i) definição do problema e do objetivo a ser alcançado; (ii) estruturação dos indicadores em forma hierárquica; (iii) construção de uma matriz quadrada de comparação pareada; e (iv) atribuição de pesos para cada indicador, em uma escala de 1 a 9 (Tabela 4 – material suplementar), de acordo com a escala fundamental referente à comparação dos critérios.

O método deve respeitar três pressupostos matemáticos: (i) Reciprocidade (se $a_{ij} = x$, então $a_{ji} = 1/x$, com $1/9 \leq x \leq 9$); (ii) Homogeneidade (se os elementos i e j forem considerados igualmente importantes, então $a_{ij} = a_{ji} = 1$, além disso, $a_i = 1$ para todo i); e (iii) Consistência (o Índice de Consistência e a Razão de Consistência devem ser $\leq 0,10$ ou 10%) [72]. Verificamos a taxa de consistência da avaliação AHP realizada no estudo. A verificação de consistência tem como objetivo avaliar a confiabilidade das ponderações. Assim, o cálculo do índice de consistência [74] é dado pela Equação 2, em que CI = Índice de Consistência; n = número de indicadores avaliados; λ_{Max} = principal autovalor. A Razão de Consistência (CR) é determinada pela razão entre o valor do Índice de Consistência (CI) e o Índice Aleatório (RI). A matriz é considerada consistente quando essa razão é $\leq 0,1$ ou 10% [72,74,75]. A Equação 3

descreve essa relação, em que RI é um valor constante dependente da dimensão da matriz comparada, isto é, do número de critérios (n) avaliados. Os valores de RI devem ser verificados de acordo com o tamanho (n) da matriz [72,76] (Tabela 5 – material suplementar).

$$CI = \frac{(\lambda_{Max} - n)}{(n - 1)} \quad \text{Eq.2}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Eq.3}$$

Quando o valor de CR é superior a 0,1 (10%), torna-se necessário revisar os pesos estabelecidos na matriz principal AHP. Os resultados também serão considerados válidos se a matriz principal de comparação pareada apresentar $\lambda_{max} \geq n$ [77]. Essas estatísticas indicam que as comparações das características foram adequadamente consistentes e que os pesos relativos são viáveis para uso posterior na modelagem espacial multicritério [78]. O autovetor ou vetor principal de Eigen (λ_{Max}) compreende a soma do produto de cada elemento da matriz de comparação pelo vetor de prioridade (Eigen) de cada critério, dividindo o resultado dessa expressão pelo vetor de prioridade a partir do qual se calcula a média aritmética [79,80] (Equação 4). Em que $\{Aw\}_i$ corresponde à matriz resultante do produto da matriz de comparação pareada pelos pesos calculados (w).

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{\{Aw\}_i}{w} \quad \text{Eq.4}$$

2.3.4. Operações de sobreposição raster para terras aptas (IST)

A análise de sobreposição ponderada combinou os mapas referentes aos critérios e identificou as zonas preferenciais. A abordagem MCDA utilizada foi a *Weighted Linear Combination* (WLC), considerada um dos métodos mais utilizados devido à sua praticidade e eficiência [81–83]. A WLC possui a vantagem de atribuir diferentes pesos aos temas, o que indica sua importância relativa [43]. Para criar um mapa final de terras aptas utilizando a WLC, multiplicamos cada camada normalizada pelo respectivo peso obtido a partir do modelo AHP. Em seguida, somamos essas camadas utilizando operações pixel a pixel para criar um único plano de informação de saída (utilizando o *Raster Calculator*). Esse plano foi classificado em três classes de aptidão (em uma escala de 1 a 3) utilizando o método Natural Breaks-Jenks. Para calcular o modelo de aptidão (Equação 5), multiplicamos o resultado pelas zonas de exclusão. O valor final de preferência da zona de aptidão é representado por S . W_i é o peso do vetor para o i -ésimo critério, x_i é o valor normalizado da célula do i -ésimo critério. C_{ij} é o valor booleano (0,1) atribuído à i -ésima célula da j -ésima zona de exclusão. A análise da zona de aptidão considera k critérios e a análise das zonas de exclusão considera n restrições.

$$S = \sum_{i=1}^n w_i \times x_i * \prod_{j=1}^k C_{i,j} \quad \text{Eq.5}$$

2.4. Parte II: Planejamento do suprimento de madeira para o primeiro ciclo de vida da termelétrica

2.4.1. O problema de otimização florestal

O problema de programação matemática foi modelado dentro de premissas técnicas relacionadas à operação da usina termelétrica. O projeto termelétrico possui capacidade de geração de 50 MWh, sendo razoável assumir a viabilidade da oferta de biomassa ao longo do período operacional. Existem diferentes formas de resolver o problema, e o dividimos em um conjunto de subproblemas para restringir o número de variáveis de decisão (grande escala espacial). Em outras palavras, escolhemos individualmente $n = \{1, 2, \dots, 10\}$ locais de instalação de termelétricas que minimizam o custo final do projeto. A distribuição espacial das termelétricas seguiu o índice de sustentabilidade ($\geq 1,82$) para áreas mais adequadas. A função objetivo inclui os custos totais de transporte, colheita, plantio, terra {compra, arrendamento ou esquema de fomento florestal}, e compra de biomassa no mercado durante os anos iniciais (apenas do 3º ao 6º ano), descontados a uma taxa anual de 8%. Esses valores correspondem a dados obtidos com especialistas florestais e empresas do setor (Tabela 6 – material suplementar). Desde o início do projeto, os dois primeiros anos foram destinados à construção da usina termelétrica. Os anos restantes (7º ao 12º ano) corresponderam à efetiva produção própria de biomassa nas áreas do projeto. A localização dos n sítios foi coberta por um conjunto de grades espaciais (100 ha) dentro de um raio de 150 km da usina termelétrica. O número de grades possui áreas disponíveis suficientes para abastecer o projeto, e cada grade apresenta três opções de uso {compra, arrendamento ou esquema de fomento florestal}. Apenas grades com área efetiva superior a 80 ha foram consideradas na análise, pois isso equivale, em média, à dimensão de dois talhões no Brasil. A área mínima de 80 ha possibilita que uma grade seja utilizada como entrada no modelo em nossa análise. Esse valor limite foi previamente definido para reduzir a demanda computacional. Infelizmente, aplicamos distância euclidiana em vez da rota real para definir a conexão entre as grades e a usina termelétrica. Não há muitas informações de rotas disponíveis entre todas as grades, reduzindo a aplicação de algoritmos de caminho mínimo.

A biomassa florestal é uma fonte renovável de energia, e as árvores de eucalipto apresentam elevadas vantagens nesse contexto. Nessas circunstâncias, o desafio consiste em tentar configurar uma localização ótima das áreas para abastecimento do projeto. Assim, existe um conjunto de áreas com recursos disponíveis, porém sem detalhes técnicos adicionais (por exemplo, idade ou espécie). Assumimos uma taxa de crescimento homogênea e disponibilidade para operação de colheita em qualquer momento. Esse conjunto de biomassa comercializável compreende 2.403 talhões distribuídos em um mapa real. Portanto, eliminamos áreas inferiores a 20 ha em nossa análise. Essa ação de filtragem foi implementada para reduzir esforços logísticos em áreas muito pequenas e melhorar o desempenho computacional devido à natureza combinatória do problema. A Equação 6

converte a quantidade de biomassa em energia [41,84] considerando alguns fatores técnicos, tais como densidade da madeira, conversão da unidade de volume de madeira para tonelada, sendo 1 m³ equivalente a 0,68 t de toras (madeira para energia) (m³ madeira * 0,68) [84,85]. O Poder Calorífico Inferior (PCI) (2.000 kcal/kg) [41], a eficiência da termelétrica (33%) [41,86,87], e o fator de conversão de kcal/kg para kWh/kg são obtidos pela divisão por 860 e pelas horas de operação anuais (8.322) [88].

$$Potential \left(\frac{MW}{year} \right) = \frac{\left[(\text{ton of logs} * 0,5) * LCV \frac{kcal}{kg} * 0,33 \right]}{860 * 8,322 / year} \quad (Eq. 6)$$

A característica mais marcante do modelo é a minimização dos custos totais (Equação 7), sujeita às estratégias de uso da terra e aos usos florestais (Equações 8 – 12). A variável de decisão X_{glt} é contínua e está associada à fração de área da grade g sob as regras de uso da terra {1 – compra, 2 – arrendamento, 3 – esquema de fomento florestal} ao longo do período t . Apesar da curta rotação do eucalipto, o projeto concentrou-se nos contratos iniciais ao longo de 6 anos para posterior colheita (7º aos 12º anos). Também deve ser observado que qualquer contrato dessas variáveis será colhido apenas 6 anos depois. A variável de decisão Y_{sj} {0,1} está associada às florestas comercializáveis s dentro da área de estudo no período j ={3-6 anos}. O custo da termelétrica é semelhante em qualquer localização escolhida. Dessa forma, todos os custos foram descontados a uma taxa de 8% ao ano inicial do projeto de acordo com suas descrições (C1 – custo (US\$.ha-1) descontado do empreendimento para o ano zero e distribuído conforme sua ocorrência ao longo dos 12 anos; C2 – segue o mesmo raciocínio, porém envolvendo o período de 3 a 6 anos e a madeira adquirida no mercado; e C3 – representa o custo de geração elétrica de 50 MW).

O coeficiente Ag é o limite superior da área disponível na grade g para o regime de uso da terra l ao longo do tempo de contrato $t = \{1-6 \text{ anos}\}$. Assim, uma vez que g é ativada no período t , definimos um ciclo final de rotação nos 6 anos subsequentes, e o talhão deve ser colhido. Portanto, (tk) corresponde ao intervalo de tempo entre plantio-colheita (contrato-colheita) sujeito aos custos totais ao longo de 6 anos, por exemplo, $t=1^\circ$ (contrato) e rotação = 6 anos ou $(tk) = 1+6=7 \therefore k=7^\circ$ do plano de programação da colheita. Assim, a produção futura da grade g é projetada por v_{glk}^2 no tempo k . A Eq. 8 representa o processo de compra de madeira proveniente do mercado a partir de talhões existentes com um nível limite de biomassa (Eq. 9). Devido à natureza da variável de decisão Y , toda a biomassa do talhão selecionado é exaurida nessas restrições.

As restrições subsequentes (Eqs. 10 e 11) estão relacionadas às terras próprias do projeto ou grades. A primeira equação define um limite superior de área para produção de biomassa ao longo do período t do esquema de contratos. Em relação ao tipo de contrato selecionado, limitamos uma fração (Pl) da biomassa produzida pertencente ao arrendamento (30%), esquema de fomento florestal (10%) e compra de terra (60%). A biomassa ofertada por essas grades está disponível apenas entre o 7º e o 12º ano do projeto. As Equações 11 e 12 representam variáveis de decisão não negativas e binárias. O modelo de programação linear

inteira mista (MILP) foi desenvolvido no software R [89] utilizando o pacote lpSolveAPI [90] para escrita do arquivo MPS (*Mathematical Programming System*), e o pacote Gurobi [91], versão 9.0.2, para obtenção da solução final. Todo o processamento considerou um computador com processador Intel® Core™ i3–2100 CPU @ 3.10 GHz e 8 GB de memória RAM.

Função Objetivo:

$$\text{Min}Z = \sum_g \sum_l \sum_t C^1_{gl(tk)} X_{gl(tk)} + \sum_s \sum_j C^2_{sj} Y_{sj} + C^3 \quad (\text{Eq.7})$$

Sujeito à

$$\sum_j Y_{sj} \leq 1; \forall_s \quad (\text{Eq.8})$$

$$\sum_s v_s Y_{sj} \geq V_j \quad (\text{Eq.9})$$

$$\sum_l \sum_t X_{gl} \leq A_g; \forall_g \quad (\text{Eq.10})$$

$$\sum_g v^2_{glk} X_{gl} = p_l V_k; \forall_l; \forall_k; t < k \leq HP; k - t = 6 \quad (\text{Eq.11})$$

$$X_{gl} \geq 0 \quad (\text{Eq.12})$$

$$Y_{sj} \in \{0,1\} \quad (\text{Eq.13})$$

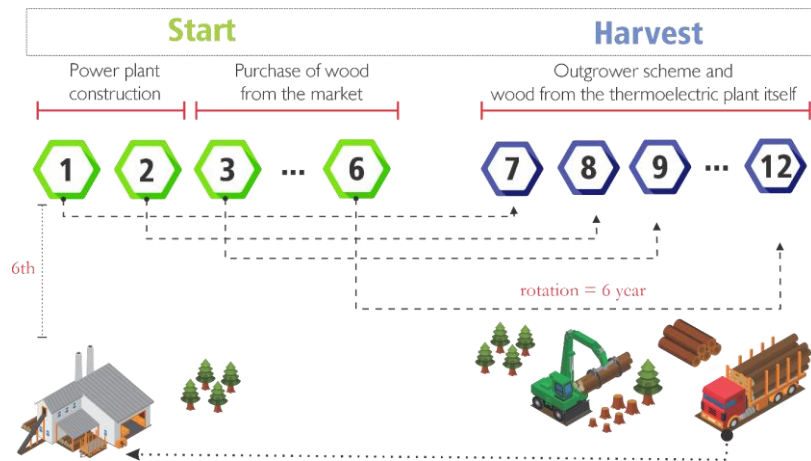


Figura 2. Esquema do horizonte de planejamento considerando 12 anos; os seis anos iniciais estão relacionados à construção da planta, prospecção de áreas e compra de madeira proveniente de florestas disponíveis, enquanto os anos restantes correspondem à efetiva produção volumétrica com a colheita da matéria-prima. Fonte: Os autores (2026).

Utilizamos uma análise geoestatística para interpolar os resultados dos custos minimizados pela função objetivo correspondente ao melhor cenário termelétrico. Para análise comparativa, geramos um mapa do custo total, do custo de compra de madeira no

mercado e do custo de produção de madeira própria. O método geoestatístico utilizado foi a Krigagem Ordinária [92]. Avaliamos os resultados sob dois aspectos: (i) a interpretação do mapeamento espacial do índice de aptidão e da disponibilidade de terras e (ii) o resultado gerado pelo modelo matemático. No primeiro item, foram identificados locais potenciais, descrevendo suas vantagens e desvantagens em relação à seleção. Essa análise é descritiva e quantitativa em nível espacial, observando as interações com os maciços florestais na GRHB. No segundo momento, as respostas do modelo matemático foram confrontadas com os aspectos técnicos e econômicos de sua interpretação. Como todas as análises foram individualizadas entre os possíveis pontos de instalação das usinas termelétricas, os valores da função objetivo e da área utilizada foram amplamente valorizados para esse propósito. Todos os critérios utilizados neste estudo são determinísticos na tomada de decisão. A Figura 3 descreve os procedimentos metodológicos do estudo.

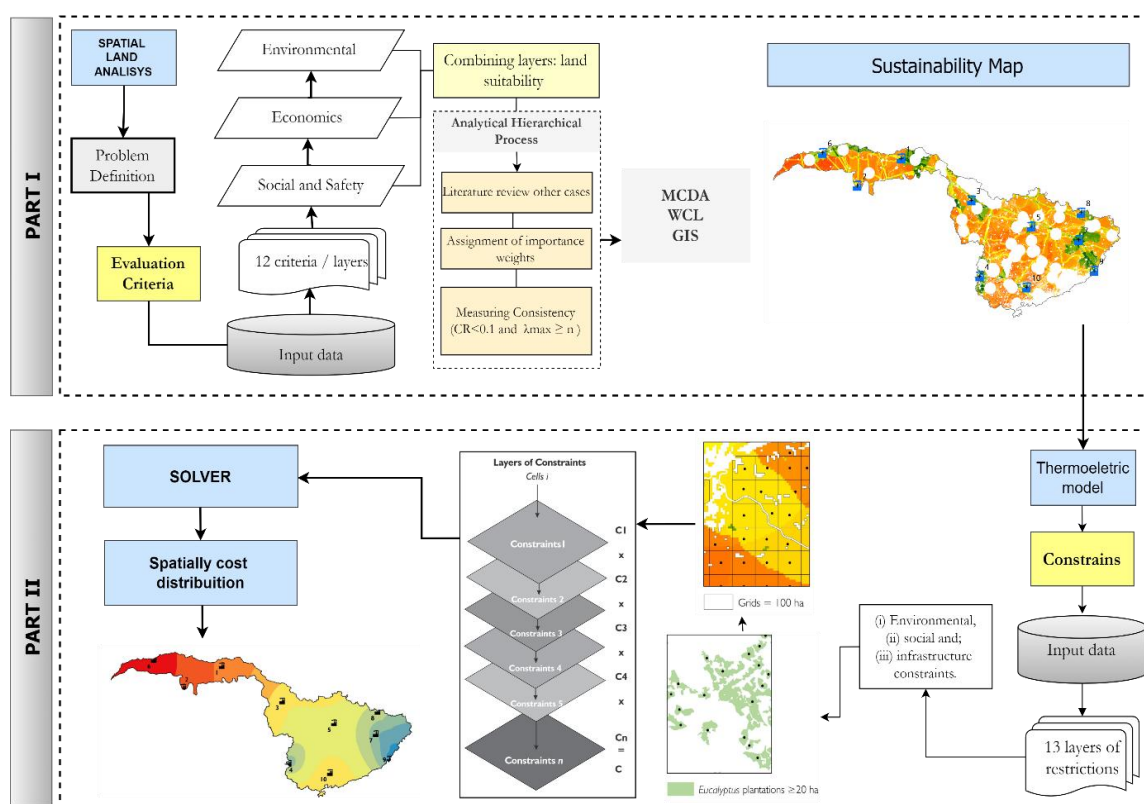


Figura 3. Fluxograma dos procedimentos metodológicos para direcionar áreas adequadas de investimento para usinas termelétricas baseadas em biomassa florestal.

3. Resultados

3.1. Parte I: Índice de Sustentabilidade Territorial

3.1.1. Importância das camadas obtidas por meio do modelo AHP

Utilizamos o modelo AHP para determinar uma hierarquia de prioridade para a importância dos critérios. A Tabela 7 (material suplementar) apresenta o resultado da matriz pareada. O critério “proximidade de plantações florestais” apresentou a maior relevância no

zoneamento de áreas aptas para instalação de usinas termelétricas baseadas em biomassa florestal, representando 23,7% de importância na composição do modelo de avaliação multicritério (MCDA). Na sequência de importância, os critérios “estoque de madeira em tora (m^3)”, “proximidade de rodovias” e “proximidade de linhas de transmissão” apresentaram os maiores pesos, respectivamente, 17,1%, 13,9% e 10,9%. A Tabela 8 (material suplementar) apresenta os demais critérios e seus respectivos pesos em ordem de importância.

O Índice de Consistência (CI) e a Razão de Consistência (CR) calculados foram 0,09 e 0,06, respectivamente. Esses valores seguem a escala de coerência e confiabilidade ($\leq 0,10$ ou 10%) [75]. O valor obtido para $\lambda_{max} = 12,97$ ($n = 12$) também confirmou a adequação das ponderações realizadas, em que $\lambda_{max} \geq n$ [77]. O mapa composto da Figura 4 apresenta os dados da Tabela 3 em camadas espacializadas.

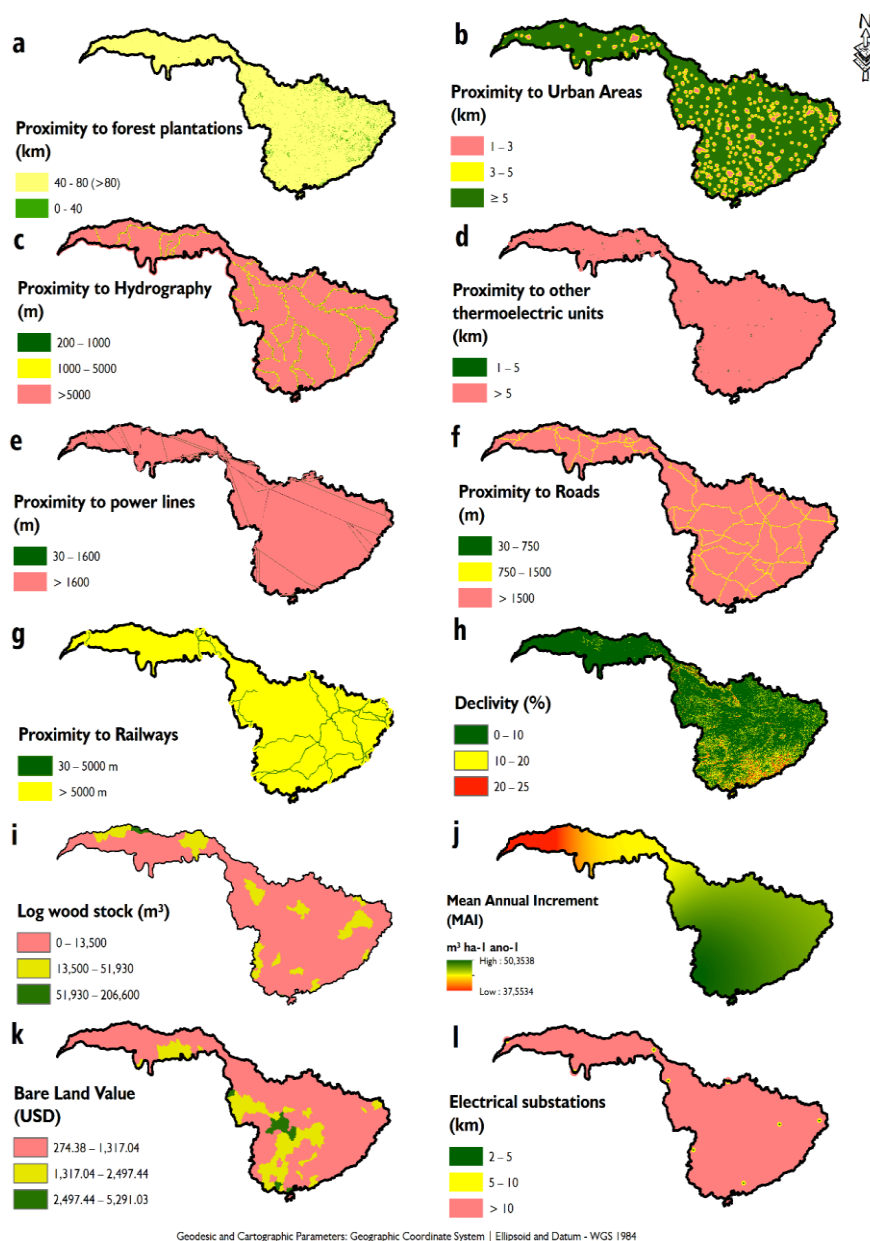
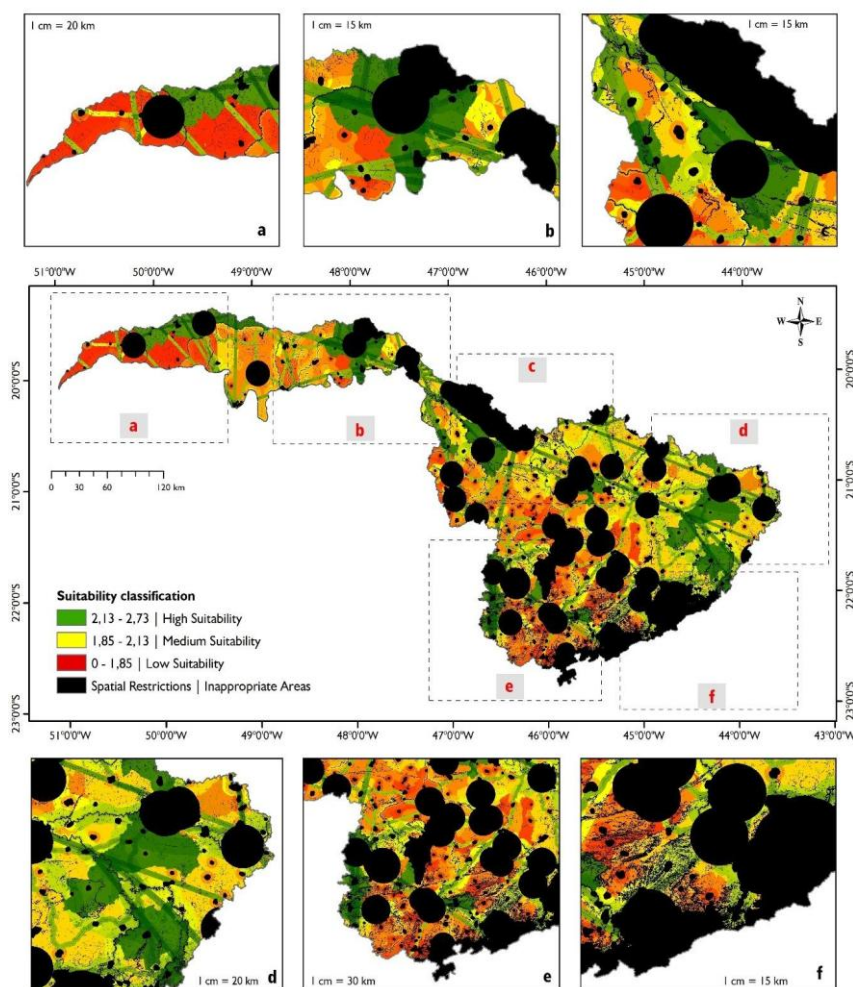


Figura 4. Critérios normalizados utilizados na composição do modelo espacial para zoneamento da aptidão territorial para implantação de usinas termelétricas baseadas em biomassa florestal na GRHB, Brasil.

3.1.2. Áreas restritivas e mapas de aptidão territorial

A análise das áreas restritivas ou zonas de exclusão identificou os locais inadequados ou permanentemente impróprios para instalação de usinas termelétricas baseadas em biomassa florestal. Aproximadamente 39,06% da área de estudo apresentou algum tipo de restrição (Tabela 10 – material suplementar). As restrições relacionadas às unidades de conservação, zonas de aeródromos e declividade do terreno representaram cerca de 87% da área total das zonas de exclusão. A área total restrita representou 44.459,47 km² considerando cada tema individualmente. Calculando as sobreposições entre os temas de restrição, obtivemos o valor efetivo das áreas de exclusão de 33.620,66 km² (Tabela 10 – material suplementar). Finalmente, o mapa multicritério e as restrições foram multiplicados para criar o mapa final de aptidão e adequabilidade territorial. Essa operação equivale ao recorte das áreas restritivas do mapa multicritério. O valor do índice de aptidão do modelo variou de 1,56 a 2,73 (Figura 5), com média de 1,82 e desvio padrão de 0,17. Locais com altos valores do índice indicam maior aptidão territorial. Essas áreas são mais adequadas para o desenvolvimento de projetos termelétricos baseados em biomassa florestal. Áreas totalmente adequadas não atenderam simultaneamente todas as variáveis; nenhuma célula resultou em aptidão igual a 3 (valor máximo), assim como também não houve áreas com aptidão totalmente baixa igual a 1 (valor mínimo).



Geodesic and Cartographic Parameters: Geographic Coordinate System | Ellipsoid and Datum - WGS 1984

Figura 5. Aptidão e disponibilidade de terras para instalação de usinas termelétricas baseadas em biomassa florestal na GRHB, estado de Minas Gerais, Brasil. Fonte: Os autores (2026).

De acordo com o modelo de aptidão aplicado, 42,6% (36.682,04 km²) da GRHB apresentam áreas de baixa ou negligenciável aptidão para instalação de usinas termelétricas, enquanto 15,26% (13.135,91 km²) e 3,07% (2.640,04 km²) correspondem a áreas de média e alta aptidão, respectivamente (Tabela 10 – material suplementar). Desconsiderando as áreas permanentemente inadequadas, aproximadamente 52.456,98 km² da GRHB encontram-se disponíveis para o desenvolvimento desses projetos florestais.

3.2. *Parte II: Modelo proposto para suprimento de madeira para usinas termelétricas*

Entre as 10 plantas candidatas, o modelo apresentou entre 178.758 e 354.384 variáveis de decisão, variando em função das diferenças entre as áreas envolvidas, com tempo médio de processamento de 8 horas. Após a avaliação da aptidão do solo e das áreas disponíveis por meio do mapeamento multicritério, a etapa inicial consiste em identificar as regiões onde a usina termelétrica buscará terras para aquisição, arrendamento ou utilização em esquema de fomento florestal, além da compra de madeira. A Figura 6 apresenta a distribuição das 10 potenciais usinas termelétricas, localizadas com base nos pontos de maior índice de aptidão territorial. A partir desse resultado, o modelo matemático determinístico desenvolvido identificou conjuntos de locais de suprimento (plantios/áreas existentes) que minimizaram o custo final dos projetos para oferta de biomassa destinada ao atendimento da demanda das potenciais plantas. As organizações podem eventualmente utilizar o modelo para avaliar diferentes cenários de tomada de decisão de forma eficiente.

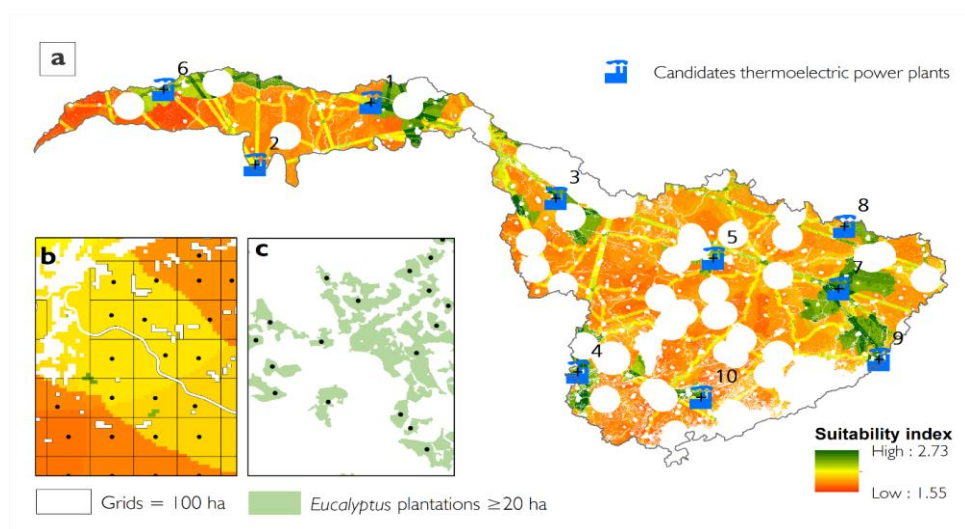


Figura 6. Distribuição espacial das usinas termelétricas candidatas. (a) Mapa de aptidão e disponibilidade de terras com a alocação ótima das usinas termelétricas candidatas; (b) Ilustração das grades de 100 ha estabelecidas na área de estudo e seleção das grades acima de 80 ha; (c) Ilustração das plantações de eucalipto filtradas para talhões/polígonos ≥ 20. Fonte: Os autores (2026).

Nossos resultados indicaram um custo total de implantação dos projetos termelétricos variando entre USD 103.479.779,34 (menor custo) e USD 139.218.170,10 (maior custo). O menor custo foi observado para a termelétrica T7, localizada na Microrregião de São João del-Rei, Alto Rio Grande, Minas Gerais. O maior custo correspondeu à termelétrica T6, situada na região de Campina Verde (Baixo Rio Grande/Triângulo Mineiro, Minas Gerais). Sob a perspectiva dos custos totais de investimento, outras localizações também podem ser atrativas para investidores, como as termelétricas T3 (Passos, região central da Bacia do Rio Grande) e T8 (Resende Costa, Alto Rio Grande), com custos de USD 103.705.448,27 e USD 104.771.948,28, respectivamente. Na Tabela 11 apresentamos os resultados da otimização referentes ao valor da função objetivo. A tabela indica o número de hectares requeridos/áreas habilitadas no contexto das soluções obtidas pelo modelo para cada usina termelétrica candidata (Tn) com potencial de geração elétrica de 50 MWh. Também são descritos os custos totais de implantação dos projetos, compra de madeira, aquisição de terras, arrendamento e esquema de fomento florestal. Os custos apresentados sintetizam as operações do modelo de acordo com o horizonte de planejamento (Fig. 2).

Tabela 11. Resultados espaciais e econômicos obtidos pelo modelo.

Usinas candidatas (Tn)	Área total requerida (ha)	Mercado de madeira (USD)	Unidade própria de terra (USD)	Arrendamento de terras (USD)	Esquema de fomento florestal (USD)	Total (USD)
T1	30.190,64	49.043.607,40	40.926.248,66	21.417.534,02	7.098.800,57	118.486.190,65
T2	30.104,64	58.404.985,61	44.081.565,00	22.183.979,93	7.091.244,35	131.761.774,89
T3	26.916,31	40.925.759,16	36.631.040,19	19.254.459,77	6.894.189,15	103.705.448,27
T4	26.375,46	38.758.366,88	40.665.056,20	20.170.420,65	7.016.735,21	106.610.578,94
T5	27.202,31	40.345.045,20	37.960.891,15	19.900.452,13	7.012.742,06	105.219.130,54
T6	31.591,86	65.953.544,10	43.435.688,63	22.561.081,90	7.267.855,47	139.218.170,10
T7	27.234,76	38.497.977,81	38.031.765,00	19.933.551,32	7.016.485,21	103.479.779,34
T8	27.553,00	39.035.904,90	38.519.483,16	20.172.503,79	7.044.056,43	104.771.948,28
T9	27.270,97	38.069.044,77	41.708.796,61	20.715.839,88	7.051.572,91	107.545.254,17
T10	26.846,09	41.673.843,69	40.941.464,56	20.242.085,10	7.020.851,04	109.878.244,39

Em relação ao custo de compra de madeira no mercado, o melhor resultado foi observado para T9 (Microrregião de Andrelândia) (USD 38.069.044,77) e T7 (Resende Costa) (USD 38.497.977,81). Os menores custos para aquisição de terras (Unidade própria de terra), arrendamento de terras e esquema de fomento florestal foram observados para T3 (Passos), com USD 36.631.040,19. Em relação à área requerida para atender ao projeto termelétrico, T4 (Microrregião de Poços de Caldas) demandou a menor área, aproximadamente 26.375,46 ha. T6 apresentou a maior área necessária, com 31.591,86 ha. As demais regiões são apresentadas na Tabela 11. Para a solução T7, que apresentou o menor custo total, toda a área demandada e alocada pelo modelo matemático para seu suprimento foi de 27.234,76 ha. Dessa área, 10.594,43 ha corresponderam à necessidade da planta de adquirir madeira proveniente de plantações existentes nos primeiros 4 anos após a construção da usina. Os 16.640,34 ha restantes equivalem às áreas disponíveis para compra, arrendamento e esquema de fomento florestal. Em relação às restrições por tipo de contrato, esse resultado

atendeu às premissas estabelecidas no modelo (60% destinados à compra, 30% ao arrendamento e 10% ao esquema de fomento florestal). Destaca-se que as áreas destinadas à compra, arrendamento e esquema de fomento florestal foram de 9.968,45 ha, 4.999,71 ha e 1.672,17 ha, respectivamente.

Um mapa com a espacialização dos resultados financeiros e da solução ótima do modelo (planta T7) é apresentado na Figura 7. O mapa mostra as áreas habilitadas para aquisição de terras (Fig. 7.A), arrendamento de terras (Fig. 7.B), esquema de fomento florestal (Fig. 7.C) e compra de madeira já disponível no mercado (Fig. 7.D), de acordo com seus respectivos períodos. Para aumentar a clareza e a interpretação dos resultados, os mapas são apresentados em escalas baseadas nas soluções espaciais derivadas do modelo, dentro de uma área/rádio viável de busca de 150 km.

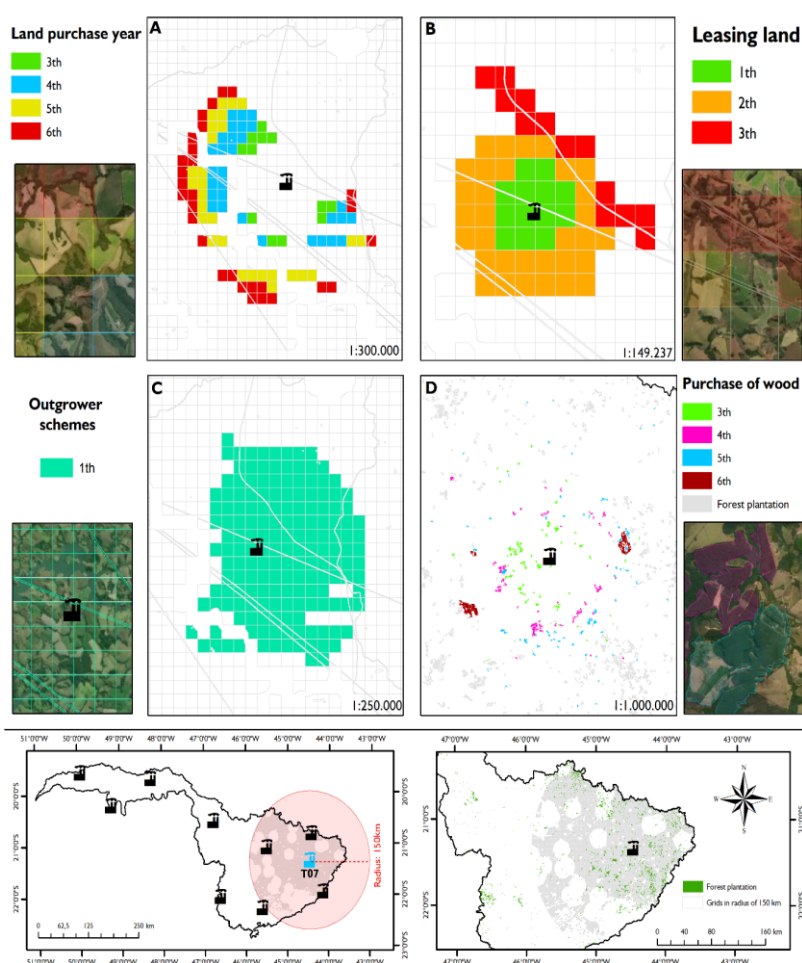


Figura 7. Mapas de espacialização dos resultados financeiros e da solução ótima do modelo para a Termelétrica 7 (T7) e seus respectivos cronogramas de corte/uso. (A) Aquisição de terras; (B) Arrendamento de terras; (C) Esquemas de fomento florestal; e (D) Compra de madeira.

A Figura 8 apresenta um mapa dos resultados da interpolação geoestatística para os custos econômicos minimizados no modelo matemático proposto. Os mapas representam os custos totais de implantação das usinas termelétricas (Fig. 8.a), destacando os menores custos estimados para a melhor solução T7 (isto é, a solução com menor custo total). Também

são apresentados os custos de compra de madeira no mercado (Fig. 8.d) e os custos de produção de madeira em terras próprias ou por meio de aquisição de terras (Fig. 8.a), arrendamento (Fig. 8.b) e esquemas de fomento florestal (Fig. 8.c).

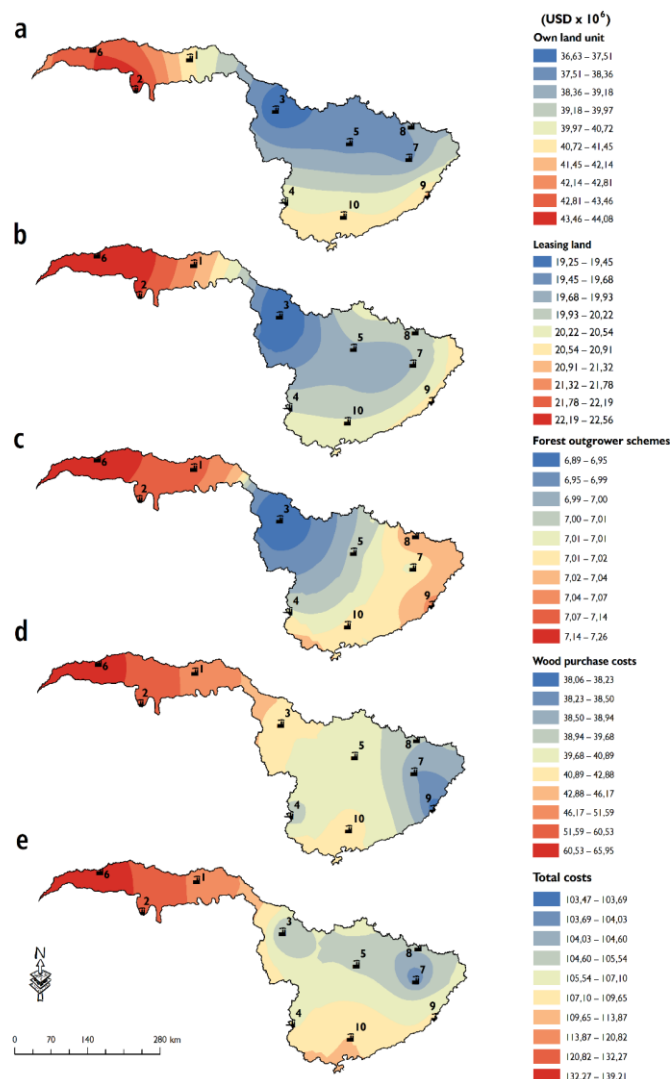


Figura 8. Resultado da interpolação geoestatística dos custos econômicos minimizados no modelo matemático proposto. Custos (USD × 10⁶) de (a) aquisição e (b) arrendamento de terras para plantio e (c) esquema de fomento florestal; (d) custos de compra de madeira no mercado; e (e) mapa dos custos totais de implantação das usinas termelétricas.

Com esses resultados espacializados (Figura 8), observamos que, apesar da planta T7 apresentar o menor custo total (Fig. 8.e e Tabela 11) e o menor custo de compra de madeira no mercado (Fig. 8.d e Tabela 11), verificou-se que a planta T3 apresentou os menores custos de produção própria de madeira (aquisição de terras, arrendamento e esquema de fomento florestal).

4. Discussion

4.1. Parte I: Índice de Sustentabilidade Territorial

4.1.1. AHP e avaliação multicritério

Os critérios da primeira parte do estudo representam relevância qualitativa e espacial para o desenvolvimento das plantas, notadamente aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais [93] (Tabela 8). Por exemplo, o critério de proximidade de áreas urbanas, que envolve importância social e ambiental direta, está relacionado aos riscos associados à qualidade do ar nas proximidades de habitações humanas. Apesar disso, a legislação ambiental brasileira estabelece limites de emissão para geração termelétrica e medidas para redução dos impactos das emissões atmosféricas sobre a qualidade do ar e a saúde pública. O país possui resolução específica aplicada a derivados de madeira e seus poluentes provenientes de processos de geração de calor por combustão para geração de energia elétrica [94]. A Lei Brasileira Nº 6.938/1981, referente à Política Nacional do Meio Ambiente [53], classifica as indústrias termelétricas como “serviços de utilidade pública” com médio potencial poluidor. Apesar desses fatores, a biomassa proveniente de florestas manejadas adequadamente pode ser considerada uma fonte de energia neutra em carbono. O carbono emitido durante a conversão energética é relativamente rapidamente fixado durante os processos subsequentes de fotossíntese e crescimento florestal [40]. Embora a fonte energética seja renovável, também existem emissões associadas de CO₂, tanto no processo quanto relacionadas à manutenção. É importante destacar que a presente investigação científica não incluiu outras formas de emissões (CO₂) que possam estar associadas às instalações industriais em nossos modelos.

A proximidade de plantações florestais (Prioridade = 23,70%) (Fig. 4.a), o estoque de madeira em tora (m³) (Prioridade = 17,10%) (Fig. 4.i) e o Incremento Médio Anual (IMA) (Prioridade = 8,70%) (Fig. 4.j) compõem um elemento decisório crucial para o desenvolvimento industrial termelétrico. A maior proximidade de plantações comerciais de eucalipto e dos municípios com maiores estoques de madeira disponível proporciona maior probabilidade de suprimento de biomassa florestal. A distribuição geográfica favorável é atrativa para o setor elétrico. A indústria energética busca obter biomassa suficiente para satisfazer a demanda ao menor custo [95]. O custo das matérias-primas pode representar uma parcela significativa dos custos totais de produção [96].

Projetos de conversão de biomassa em energia são altamente dependentes da localização geográfica, e sua posição pode influenciar fortemente a rentabilidade da planta [97,98]. Os critérios relacionados às rodovias (Fig. 4.f) e linhas ferroviárias (Fig. 4.g) também representaram pesos relevantes no modelo AHP (13,90% e 5,10%, respectivamente). O transporte da biomassa representa uma parcela significativa dos custos totais da bioenergia [96]. Geralmente, mais da metade do custo dos resíduos entregues às plantas de aquecimento é decorrente do transporte [63]. As usinas termelétricas baseadas em biomassa florestal apresentam diferentes modalidades de transporte, dependendo das características da região e da disponibilidade dos recursos. O transporte rodoviário é amplamente aplicado na maioria dos casos. Simulamos esse procedimento utilizando caminhões. Os critérios de proximidade às linhas de transmissão (10,90%) (Fig. 4.e) e subestações elétricas (9,30%) (Fig. 4.i) também são elementos fundamentais e de elevado valor decisório para o desenvolvimento termelétrico da região. Também consideramos no estudo o critério Valor da Terra Nua (VTN)

(Prioridade = 3,50%). Estudos anteriores nem sempre consideraram dados de custo da terra, pois trata-se de uma base de dados nem sempre disponível publicamente em todas as regiões. Acreditamos que essa camada representa uma informação fundamental no processo de tomada de decisão para implantação de usinas termelétricas. Assim como na análise multicritério, na Parte II deste estudo, as informações de custo da terra foram essenciais para obtenção de resultados robustos.

Os critérios proximidade da hidrografia, proximidade de outras unidades termelétricas, proximidade de áreas urbanas e declividade do terreno apresentaram os menores percentuais de importância no modelo AHP, sendo 2,70%, 2,50%, 2,20% e 1,20%, respectivamente. Apesar disso, isso não significa baixa importância em situações reais. Essas variáveis são essenciais para os tomadores de decisão na construção de usinas termelétricas e projetos de suprimento florestal. Todos os critérios utilizados neste estudo são decisivos no processo de tomada de decisão por investidores do setor elétrico e florestal. A logística frequentemente é onerosa e envolve processos complexos de aquisição, transporte e utilização da biomassa. Isso reforça a necessidade de um planejamento econômico da cadeia de suprimento de biomassa florestal para superar os desafios existentes. [93] também reforçam que, no processo de tomada de decisão para projetos de bioenergia, existe a necessidade de ampliar a conscientização pública sobre questões relacionadas à sustentabilidade. Compreender os impactos econômicos, ambientais e sociais das cadeias de suprimento de biomassa florestal é necessário para mitigar impactos indesejáveis e garantir a sustentabilidade de novos projetos com atratividade, interesse e apoio das populações, governos e investidores.

4.2.2. Áreas restritivas e aptidão territorial: implicações práticas

O mapa final de aptidão e disponibilidade de terras constitui uma base fundamental para futuros processos de tomada de decisão relacionados ao uso da terra e à otimização na GRHB. O índice de aptidão obtido resultou do efeito de compensação entre os valores categorizados como menos ou mais aceitáveis de acordo com as categorias de baixa a alta aptidão. O índice de aptidão calculado (Figura 5) mostrou que nenhuma área adequada atende simultaneamente a todos os critérios. Isso significa que nenhuma célula resultou na classe máxima de aptidão igual a 3 (valor máximo), assim como também não foram encontradas áreas com aptidão totalmente baixa igual a 1 (valor mínimo). Essa característica é comum em situações reais, pois geralmente é impossível alcançar elevado valor de aptidão para todos os temas em sua totalidade [37,42].

Também identificamos uma elevada proporção de terras com baixa aptidão (42,6%) para o desenvolvimento de projetos termelétricos. Essa baixa aptidão é influenciada principalmente pela maior distância observada entre os elementos dos critérios de elevada importância no modelo espacial. A região apresentada na Figura 5.b, a oeste da GRHB (Triângulo Mineiro), apresenta grandes extensões contínuas de áreas com baixa a média aptidão. Isso reflete o trade-off entre a maior distância de importantes polos de plantações florestais existentes (Fig. 4.a), menores valores observados de IMA (Fig. 4.j) e menor ocorrência de ferrovias (Fig. 4.g). Ainda assim, o mapa de aptidão (Figura 5.a) mostra que parte do Triângulo Mineiro apresenta elevada aptidão. Essa área está relacionada à região de

Uberlândia, que vem recebendo grandes investimentos de novos players do setor florestal brasileiro. Em 2022, nessa região (municípios de Indianópolis e Araquari), foi implantada uma das maiores plantas de celulose solúvel do mundo, com investimento aproximado de USD 1,134 bilhão, incluindo uma planta de cogeração de 144 MW [99]. Essa área torna-se estratégica para usinas termelétricas em proximidade com grandes empresas florestais. Algumas porções de áreas com baixa aptidão na região centro-sul da GRHB (Fig. 5.f) também refletem a combinação de longas distâncias até linhas de transmissão de energia (Fig. 4.e) e maiores custos da terra (Fig. 4.k), além da presença de muitas áreas inadequadas devido às restrições ambientais e sociais.

A análise dos resultados considerando os critérios utilizados na modelagem conclui que os locais mais adequados foram principalmente influenciados pelo componente de proximidade da matéria-prima e da infraestrutura existente na área de estudo. A viabilidade econômica do uso de biomassa sólida como combustível para geração termelétrica é altamente influenciada pela proximidade da fonte de produção, pelos custos de transporte e manuseio, pelos teores de umidade e pelos sistemas de processamento e preparação para tecnologias mais eficientes [18]. O uso da modelagem espacial para avaliar a aptidão e disponibilidade de terras é complexo e requer uma avaliação cuidadosa das diferentes características locais e da destinação dessas áreas. Esta parte do estudo demonstrou locais potenciais para produção de eletricidade a partir de biomassa florestal. Uma análise MCA prioriza terras com determinados indicadores potenciais de qualidade. Apesar disso, recomendamos que a tomada de decisão para o desenvolvimento de projetos termelétricos e florestais também considere os interesses de desenvolvimento econômico e social de regiões menos prioritárias. Esperamos que áreas de baixa aptidão também sejam consideradas em eventuais intervenções reais. O Brasil ainda não consegue atender às necessidades energéticas de toda sua população [100], especialmente em áreas rurais, isoladas e de difícil acesso. Essa deficiência nos serviços energéticos está diretamente relacionada aos desafios físicos ou econômicos encontrados para expansão da rede elétrica. Além disso, recomenda-se investir significativamente no transporte ferroviário para maximizar a eficiência da logística de produção e distribuição de matérias-primas florestais de forma mais eficiente, acessível e segura [41].

4.2. *Parte II: Suprimento de madeira para usinas termelétricas*

Com base nos resultados do modelo desenvolvido, é possível perceber um efeito econômico sobre suas saídas. Inicialmente, o modelo utiliza a alternativa de esquema de fomento florestal no primeiro ano, refletindo os custos em função do impacto da taxa de desconto. Observamos que houve indicação de compra de terras apenas mais recentemente (do 9º ao 12º ano do horizonte de planejamento) (Fig. 7.d), período em que a usina começaria a produzir madeira apenas a partir do 9º ano em diante, com base nas áreas já adquiridas, considerando o tempo necessário para formação das florestas da planta. Em ordem de prioridade das opções de menor custo, o modelo indicou o esquema de fomento florestal, arrendamento e compra de terras, respectivamente. Houve ativação apenas do esquema de

fomento e arrendamento nos primeiros anos. Essa informação é crucial para a tomada de decisão por investidores, uma vez que o modelo aloca o uso do maior capital financeiro apenas a partir do terceiro ano para aquisição de terras. Destaca-se que o modelo distribuiu os custos temporalmente de forma inteligente. Em relação à área demandada pela T7, o modelo também direcionou a compra da maior quantidade de hectares para os últimos anos (a partir do décimo ano em diante), priorizando a aquisição de áreas mais produtivas.

É notável no resultado da Figura 7A que os contratos de terra foram alocados na forma de zonas em um raio claramente definido. Quanto maior o horizonte de planejamento (Fig. 2), mais espacialmente distantes se apresentam os contratos de terra. Provavelmente, isso ocorre devido ao efeito da taxa de desconto de juros, em que os locais mais caros e necessários tendem a permanecer para o final do contrato, reduzindo os custos.

Apesar dos benefícios do uso da biomassa florestal, desafios técnicos e econômicos ainda dificultam sua utilização intensificada. Os resíduos florestais encontram-se distribuídos em grandes regiões, aumentando os custos de coleta, manuseio e transporte. Além disso, existe variabilidade na quantidade e qualidade da biomassa florestal devido à acessibilidade da floresta ao longo do ano, às condições climáticas, ao pré-processamento, às condições de transporte e armazenamento e à competição com outros usuários finais [93,101]. Também existe necessidade de estudos adicionais para melhor reconhecimento do estoque real de matéria-prima (resíduos de eucalipto) disponível para produção de energia a partir de biomassa florestal nessa região.

Em relação ao potencial energético (MWh) das florestas de eucalipto, é importante destacar que a densidade básica da madeira influencia diretamente a menor ou maior capacidade de geração. Os valores de densidade variam de acordo com as espécies ou materiais genéticos. A eficiência de diferentes sistemas energéticos baseados em biomassa depende principalmente de suas densidades de massa [102]. É importante destacar que investidores na GRHB também podem buscar matéria-prima e outros recursos nas áreas adjacentes e em diferentes regiões do estado de Minas Gerais ou estados vizinhos. Quando os recursos de matéria-prima de uma região são insuficientes, as usinas precisam competir pelos recursos de biomassa para atender suas demandas. Esses são importantes aspectos de melhoria a serem considerados em estudos futuros.

A escolha das espécies arbóreas para plantios envolve diversos fatores, incluindo considerações econômicas, necessidades industriais e condições ambientais. O eucalipto tem sido favorecido em alguns casos devido ao seu rápido crescimento, elevada produtividade e adequação para aplicações industriais específicas. Embora nosso estudo tenha se concentrado no uso da biomassa de eucalipto para geração de energia, reconhecemos a importância de considerar outras espécies de rápido crescimento, ou mesmo algumas espécies nativas, em práticas florestais sustentáveis.

Apesar de todos esses desafios científicos, ainda existem aqueles de natureza externa e política. As decisões de planejamento e operação para implantação de usinas termelétricas geralmente são influenciadas por incertezas relacionadas a políticas futuras e condições de mercado [103]. Acreditamos que nossos resultados fornecem um contexto útil para apoiar futuras pesquisas e deliberações políticas nesta e em outras regiões do Brasil. Confirmamos

a hipótese do nosso estudo de que, por meio da construção de uma estrutura SIG baseada em MCDA-AHP e um modelo de programação linear, é possível auxiliar a tomada de decisão com inteligência geográfica para compra de madeira, arrendamento de terras, esquemas de fomento florestal e aquisição de terras para implantação e suprimento de projetos termelétricos baseados em resíduos de florestas plantadas.

5. Conclusões e perspectivas

- As soluções ótimas do modelo indicam custos de investimento em torno de US\$ 103 milhões distribuídos em 27.234 ha de áreas de suprimento. Os resultados ótimos das estratégias espaciais obtidas neste estudo são importantes para o Brasil, uma vez que simulamos cenários baseados na consolidação de megaempreendimentos industriais reais. Nossos resultados representam um avanço em relação aos estudos já publicados sobre o tema.
- Foi desenvolvido um modelo SIG para zoneamento da aptidão e disponibilidade de terras para implantação de projetos termelétricos baseados em florestas em uma bacia hidrográfica do sudeste do Brasil. Mapeamos zonas com restrições legais e modelamos locais preferenciais com base em diferentes níveis de aptidão. Portanto, a combinação dos métodos MCDA e SIG pode ser considerada uma ferramenta essencial para resolução de problemas de planejamento energético, como a aptidão territorial para localização de plantas de biomassa.
- Embora a motivação tenha sido a proposição de uma estrutura SIG e de um modelo de programação linear para projetos termelétricos baseados em biomassa florestal, os contextos multicritério, multidimensionais e multiobjetivos são relevantes para qualquer outra forma de biomassa destinada à geração de eletricidade.
- O zoneamento apresentado em nosso estudo não implica que as áreas estejam totalmente disponíveis, mas apresenta fundamentos essenciais para tomadores de decisão. Outros parâmetros podem ser testados e ajustados de acordo com as características de cada região.
- A abordagem metodológica deste estudo é flexível e replicável em diferentes escalas e regiões. Além disso, encontra-se disponível para investidores, governos locais e estaduais, concessionárias de energia elétrica, produtores florestais e stakeholders interessados no potencial de expansão e diversificação da matriz energética de base florestal. Nosso estudo pode servir como guia para planejamento territorial e florestal.
- A decisão entre comprar madeira no mercado ou arrendar áreas adicionais para extração de madeira depende de diversos fatores, incluindo disponibilidade de terras adequadas, considerações ambientais, relação custo-benefício e objetivos específicos da empresa. Cada abordagem possui vantagens e desafios, e a escolha depende de uma análise abrangente de múltiplos fatores. Estudos e iniciativas futuras devem explorar diferentes cenários e avaliar a viabilidade e os impactos ambientais das diferentes abordagens para garantir práticas florestais sustentáveis e responsáveis.

- O desenvolvimento de indústrias termelétricas baseadas em biomassa florestal pode auxiliar o Brasil a enfrentar os desafios relacionados à segurança energética, ao alcance das metas climáticas no cenário global e à geração de empregos e desenvolvimento econômico de base florestal. O país possui extensas áreas plantadas com rotações curtas e uma das maiores produtividades florestais do mundo. O reflorestamento comercial possibilita o uso de áreas degradadas, improdutivas e subutilizadas, geralmente inadequadas para agricultura.

6. Referências Bibliográficas

- [1] L. Abdallah, T. El-Shennawy, Evaluation of CO₂ emission from Egypt's future power plants, *Euro-Mediterranean J. Environ. Integr.* 5 (2020) 49. <https://doi.org/10.1007/s41207-020-00184-w>.
- [2] I. Energy Agency, Review 2021 Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021 *Global Energy*, (2021). www.iea.org/t&c/ (accessed October 17, 2022).
- [3] L.C. Grobusch, M.P. Grobusch, A hot topic at the environment–health nexus: investigating the impact of climate change on infectious diseases, *Int. J. Infect. Dis.* 116 (2022) 7–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2021.12.350>.
- [4] F.B. Martins, R.B. Benassi, R.R. Torres, F.A. de Brito Neto, Impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on Eucalyptus plantations in South America, *Sci. Total Environ.* 825 (2022) 153820. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153820>.
- [5] M. Liebensteiner, M. Wrienz, Do Intermittent Renewables Threaten the Electricity Supply Security?, *Energy Econ.* 87 (2020) 104499. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104499>.
- [6] M.P. Pablo-Romero, A. Sánchez-Braza, A. Galyan, Renewable energy use for electricity generation in transition economies: Evolution, targets and promotion policies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 138 (2021) 110481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110481>.
- [7] F. Zhang, J. Wang, S. Liu, S. Zhang, J.W. Sutherland, Integrating GIS with optimization method for a biofuel feedstock supply chain, *Biomass and Bioenergy*. 98 (2017) 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.01.004>.
- [8] A. Briones-Hidrovo, J. Copa, L.A.C. Tarelho, C. Gonçalves, T. Pacheco da Costa, A.C. Dias, Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion, *J. Clean. Prod.* 289 (2021) 125680. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125680>.
- [9] B. Gabrielle, L. Bamière, N. Caldes, S. De Cara, G. Decocq, F. Ferchaud, C. Loyce, E. Pelzer, Y. Perez, J. Wohlfahrt, G. Richard, Paving the way for sustainable bioenergy in Europe: Technological options and research avenues for large-scale biomass feedstock supply, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 33 (2014) 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.050>.
- [10] M. Acuna, J. Sessions, R. Zamora, K. Boston, M. Brown, M.R. Ghaffariyan, Methods to Manage and Optimize Forest Biomass Supply Chains: a Review, *Curr. For. Reports* 2019 53. 5 (2019) 124–141. <https://doi.org/10.1007/S40725-019-00093-4>.
- [11] G. Pena-Vergara, L.R. Castro, C.A. Gasparetto, W.A. Bizzo, Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil, *Energy*. 239 (2022) 122243. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122243>.
- [12] GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2019 World Bioenergy Association, (n.d.).
- [13] GLOBAL BIOENERGY STATISTICS 2020 World Bioenergy Association, (n.d.).
- [14] BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL BRAZILIAN ENERGY BALANCE, (n.d.).
- [15] L. Lyrio de Oliveira, C. de Oliveira Ribeiro, M. Qadrdan, Analysis of electricity supply and demand intra-annual dynamics in Brazil: A multi-period and multi-regional generation expansion planning model, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 137 (2022) 107886. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107886>.
- [16] D.F. Botelho, L.W. de Oliveira, B.H. Dias, T.A. Soares, C.A. Moraes, Prosumer integration into the Brazilian energy sector: An overview of innovative business models and regulatory challenges, *Energy Policy*. 161 (2022) 112735. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112735>.
- [17] EPE – Empresa de Pesquisa Energética., Resource Potential Horizon 2050. Nota Técnica PR 04/18, 2018. , 2018 (n.d.). www.mme.gov.br (accessed November 12, 2022).
- [18] MME – Ministério de Minas e Energia., Plano Nacional de Energia 2030. , MME – Empres. Pesqui. Energética. Brasília MMEPE, . (2007). https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-165/topico-173/PNE_2030_-_Projeções.pdf (accessed November 13, 2022).
- [19] L.R.A. Ferreira, R.B. Otto, F.P. Silva, S.N.M. De Souza, S.S. De Souza, O.H. Ando Junior, Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 94 (2018) 440–455. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.034>.
- [20] V. Ferreira-Leitao, L.M.F. Gottschalk, M.A. Ferrara, A.L. Nepomuceno, H.B.C. Molinari, E.P.S. Bon, Biomass residues in Brazil: Availability and potential uses, *Waste and Biomass Valorization*. 1 (2010) 65–76. <https://doi.org/10.1007/S12649-010-9008-8/TABLES/12>.
- [21] IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores., Relatório IBÁ 2021 (Ano base 2020). , (2021).

- <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf> (accessed November 12, 2022).
- [22] L.B. van Leeuwen, H.J. Cappon, K.J. Keesman, Urban bio-waste as a flexible source of electricity in a fully renewable energy system, *Biomass and Bioenergy*. 145 (2021) 105931. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105931>.
 - [23] X. Hao, H. An, H. Qi, X. Gao, Evolution of the exergy flow network embodied in the global fossil energy trade: Based on complex network, *Appl. Energy*. 162 (2016) 1515–1522. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.04.032>.
 - [24] D. Fei, Q. Cheng, X. Mao, F. Liu, Q. Zhou, Land use zoning using a coupled gridding-self-organizing feature maps method: A case study in China, *J. Clean. Prod.* 161 (2017) 1162–1170. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.05.028>.
 - [25] J.R. Oakleaf, C.M. Kennedy, S. Baruch-Mordo, J.S. Gerber, P.C. West, J.A. Johnson, J. Kiesecker, Mapping global development potential for renewable energy, fossil fuels, mining and agriculture sectors, *Sci. Data* 2019 61. 6 (2019) 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0084-8>.
 - [26] L.C. de J. França, F.W.A. Júnior, C.S. Jarochinski e Silva, C.A.U. Monti, T.C. Ferreira, C.J. de O. Santana, L.R. Gomide, Forest landscape planning and management: A state-of-the-art review, *Trees, For. People*. 8 (2022) 100275. <https://doi.org/10.1016/J.TFP.2022.100275>.
 - [27] A. McEwan, E. Marchi, R. Spinelli, M. Brink, Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology, *J. For. Res.* 31 (2020) 339–351. <https://doi.org/10.1007/S11676-019-01019-3/TABLES/1>.
 - [28] I. Kougkoulos, S.J. Cook, V. Jomelli, L. Clarke, E. Symeonakis, J.M. Dortch, L.A. Edwards, M. Merad, Use of multi-criteria decision analysis to identify potentially dangerous glacial lakes, *Sci. Total Environ.* 621 (2018) 1453–1466. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.10.083>.
 - [29] J. Kangas, A. Kangas, Multiple Criteria Decision Support Methods in Forest Management, (2002) 37–70. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9906-1_3.
 - [30] D. Latinopoulos, K. Kechagia, A GIS-based multi-criteria evaluation for wind farm site selection. A regional scale application in Greece, *Renew. Energy*. 78 (2015) 550–560. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.01.041>.
 - [31] M.K. Delivand, A.R.B. Cammerino, P. Garofalo, M. Monteleone, Optimal locations of bioenergy facilities, biomass spatial availability, logistics costs and GHG (greenhouse gas) emissions: a case study on electricity productions in South Italy, *J. Clean. Prod.* 99 (2015) 129–139. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.03.018>.
 - [32] J.M. Sánchez-Lozano, M.S. García-Cascales, M.T. Lamata, Evaluation of suitable locations for the installation of solar thermoelectric power plants, *Comput. Ind. Eng.* 87 (2015) 343–355. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2015.05.028>.
 - [33] V.W.B. Azevêdo, A.L.B. Candeias, C. Tiba, Location Study of Solar Thermal Power Plant in the State of Pernambuco Using Geoprocessing Technologies and Multiple-Criteria Analysis, *Energies*. 10 (2017) 1–23. <https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v10y2017i7p1042-d105359.html> (accessed November 12, 2022).
 - [34] J.S. Jeong, Á. Ramírez-Gómez, A Multicriteria GIS-Based Assessment to Optimize Biomass Facility Sites with Parallel Environment—A Case Study in Spain, *Energies* 2017, Vol. 10, Page 2095. 10 (2017) 2095. <https://doi.org/10.3390/EN10122095>.
 - [35] F.H. Roel, M. Jiska, V. Dijk, B.G. Stokke, M. De Stefano, Spatial Multi-Criteria Decision Analysis (SMCDA) toolbox for Consensus-based Siting of Powerlines and Wind-power plants (ConSite), (n.d.).
 - [36] H. Woo, M. Acuna, M. Moroni, M.S. Taskhiri, P. Turner, Optimizing the Location of Biomass Energy Facilities by Integrating Multi-Criteria Analysis (MCA) and Geographical Information Systems (GIS), *For.* 2018, Vol. 9, Page 585. 9 (2018) 585. <https://doi.org/10.3390/F9100585>.
 - [37] F.R. Costa, C.A.A.S. Ribeiro, G.E. Marcatti, A.S. Lorenzon, T.R. Teixeira, G.F. Domingues, N.L.M. de Castro, A.R. dos Santos, V.P. Soares, S.J.M. da C. de Menezes, P.H.S. Mota, L.A. de A. Telles, J.R. de Carvalho, GIS applied to location of bioenergy plants in tropical agricultural areas, *Renew. Energy*. 153 (2020) 911–918. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.01.050>.
 - [38] T. Panagopoulos, B. Ramos, Methods to assess aesthetic value for forest aesthetic value for forest planning and design planning and design, n.d. http://www.iefc.net/manifestations/2006_ISFM/photosweb/S4_Panagopoulous.pdf (accessed May 4, 2019).
 - [39] J. Ma, N.R. Scott, S.D. DeGloria, A.J. Lembo, Siting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS, *Biomass and Bioenergy*. 28 (2005) 591–600. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2004.12.003>.
 - [40] S. Van Holsbeeck, M. Brown, S.K. Srivastava, M.R. Ghaffariyan, A Review on the Potential of Forest Biomass for Bioenergy in Australia, *Energies* 2020, Vol. 13, Page 1147. 13 (2020) 1147. <https://doi.org/10.3390/EN13051147>.
 - [41] T.R. Teixeira, C.A.A. Soares Ribeiro, A. Rosa dos Santos, G.E. Marcatti, A.S. Lorenzon, N.L.M. de Castro, G.F. Domingues, H.G. Leite, S.J.M. da Costa de Menezes, P.H. Santos Mota, L.A. de Almeida Telles, R. da Silva Vieira, Forest biomass power plant installation scenarios, *Biomass and Bioenergy*. 108 (2018) 35–47. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2017.10.006>.
 - [42] A. Sultana, A. Kumar, Optimal siting and size of bioenergy facilities using geographic information system, *Appl. Energy*. 94 (2012) 192–201. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2012.01.052>.
 - [43] F.R. Costa, C.A.A.S. Ribeiro, G.E. Marcatti, A.S. Lorenzon, T.R. Teixeira, G.F. Domingues, N.L.M. de Castro, A.R. dos Santos, V.P. Soares, S.J.M. da C. de Menezes, P.H.S. Mota, L.A. de A. Telles, J.R. de Carvalho, GIS applied to location of bioenergy plants in tropical agricultural areas, *Renew. Energy*. 153 (2020) 911–918. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.01.050>.
 - [44] T.T. Cuong, H.A. Le, N.M. Khai, P.A. Hung, L.T. Linh, N.V. Thanh, N.D. Tri, N.X. Huan, Renewable energy from biomass surplus resource: potential of power generation from rice straw in Vietnam, *Sci. Reports* 2021 111. 11 (2021) 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80678-3>.

- [45] Mapbiomas Brasil, (n.d.). <https://brasil.mapbiomas.org/> (accessed November 13, 2022).
- [46] D. Binkley, O.C. Campoe, C.A. Alvares, R.L. Carneiro, J.L. Stape, Variation in whole-rotation yield among Eucalyptus genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project, *For. Ecol. Manage.* 462 (2020) 117953. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2020.117953>.
- [47] Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM, (n.d.). <http://www.igam.mg.gov.br/> (accessed November 12, 2022).
- [48] C.A. Alvares, J.L. Stape, P.C. Sentelhas, J. Leonardo, M. Gonçalves, G. Sparovek, Köppen's climate classification map for Brazil, (n.d.). <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- [49] L.G. de Carvalho, M. de Carvalho Alves, M.S. de Oliveira, R.L. Vianello, G.C. Sediya, L.M.T. de Carvalho, Multivariate geostatistical application for climate characterization of Minas Gerais State, Brazil, *Theor. Appl. Climatol.* 102 (2010) 417–428. <https://doi.org/10.1007/S00704-010-0273-Z/FIGURES/6>.
- [50] ArcGIS Desktop | Desktop GIS Software Suite, (n.d.). <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/overview> (accessed November 12, 2022).
- [51] K.D. Goepel., Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS), (2018).
- [52] C. Perpiñá, J.C. Martínez-Llario, Á. Pérez-Navarro, Multicriteria assessment in GIS environments for siting biomass plants, *Land Use Policy.* 31 (2013) 326–335. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2012.07.014>.
- [53] BRASIL, Law N° 7.565, of December 19, 1986. , (1986). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7565.htm (accessed November 12, 2022).
- [54] BRASIL, Ordinance N° 1.141/GM5, of December 8, 1987., (1987). https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/portarias/portarias-1987/portaria-no-1141-gm5-de-08-12-1987/@display-file/arquivo_norma/portaria1141.pdf (accessed November 12, 2022).
- [55] BRASIL, Conama Resolut. N°. 4 Oct. 9, 1995 - Establ. Airt. Secur. Areas – ASAs. (1995). <http://www2.cprh.pe.gov.br/wp-content/uploads/2021/02/4de9deoutubrode1995.pdf> (accessed November 12, 2022).
- [56] J. Dong, GIS and Location Theory Based Bioenergy Systems Planning, Thesis Degree Master Appl. Sci. Syst. Des. Eng. (2008) 1–138. https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/3805/GIS_and_Location_Theory_Based_Bioenergy_Systems_Planning.pdf?sequence=1.
- [57] BRASIL, Presidency of the Republic. Law No. 6.938, of August 31, 1981. Provides on the National Environmental Policy, its purposes and formulation and application mechanisms, and other provisions. Official Diary of the Federative Republic of Brazil. , (1981). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm (accessed November 12, 2022).
- [58] BRASIL, Law N°. 12.651, of May 25, 2012., (2012).
- [59] MINAS GERAIS, Law N°. 20.922 of October 16, 2013. Provides for forestry and biodiversity protection policies in the state., (2013). <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=30375> (accessed November 13, 2022).
- [60] SNUC – National System of Nature Conservation Units, Law N° 9.985, of July 18, 2000. , (2000). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm (accessed November 13, 2022).
- [61] C. Perpiñá, D. Alfonso, A. Pérez-Navarro, E. Peñalvo, C. Vargas, R. Cárdenas, Methodology based on Geographic Information Systems for biomass logistics and transport optimisation, *Renew. Energy.* 34 (2009) 555–565. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2008.05.047>.
- [62] BRASIL, Portaria MINTER nº 124 de 20/08/1980, (1980). https://www.normasbrasil.com.br/norma/portaria-124-1980_180484.html (accessed November 13, 2022).
- [63] J. Richardson, R. Bjorheden, P. Hakk, : Ila, A.T. Lowe, C.T. Smith, BIOENERGY FROM SUSTAINABLE FORESTRY: GUIDING PRINCIPLES AND PRACTICE edited by, New Zeal. J. For. Sci. 32 (n.d.).
- [64] F. Recanatesi, M. Tolli, R. Lord, Multi criteria analysis to evaluate the best location of plants for renewable energy by forest biomass: a case study in central Italy, *Appl. Math. Sci.* 8 (2014) 6447–6458. <https://doi.org/10.12988/AMS.2014.46451>.
- [65] ENERGY ANSWERS ARECIBO, IN RE ENERGY ANSWERS ARECIBO, LLC (ARECIBO PUERTO RICO RENEWABLE ENERGY PROJECT), (2014). [https://yosemite.epa.gov/oa/EAB_Web_Docket.nsf/Published_Decisions_By_Citation/087FA0AC7FB0C0F685257CA60065AC33/\\$File/Energy_Answers_Arecibo_Vol._16.pdf](https://yosemite.epa.gov/oa/EAB_Web_Docket.nsf/Published_Decisions_By_Citation/087FA0AC7FB0C0F685257CA60065AC33/$File/Energy_Answers_Arecibo_Vol._16.pdf) (accessed November 13, 2022).
- [66] S. Sánchez-García, D. Athanassiadis, C. Martínez-Alonso, E. Tolosana, J. Majada, E. Canga, A GIS methodology for optimal location of a wood-fired power plant: Quantification of available woodfuel, supply chain costs and GHG emissions, *J. Clean. Prod.* 157 (2017) 201–212. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.04.058>.
- [67] A. Asikainen, R. Björheden, I. Nousiainen, Cost of Wood Energy, *Bioenergy from Sustain. For.* (2002) 125–157. https://doi.org/10.1007/0-306-47519-7_4.
- [68] T.R. Teixeira, C.A.A. Soares Ribeiro, A. Rosa dos Santos, G.E. Marcatti, A.S. Lorenzon, N.L.M. de Castro, G.F. Domingues, H.G. Leite, S.J.M. da Costa de Menezes, P.H. Santos Mota, L.A. de Almeida Telles, R. da Silva Vieira, Forest biomass power plant installation scenarios, *Biomass and Bioenergy.* 108 (2018) 35–47. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.006>.
- [69] J. Dong, GIS and Location Theory Based Bioenergy Systems Planning, (2008).
- [70] B. Sharma, S. Birrell, F.E. Miguez, Spatial modeling framework for bioethanol plant siting and biofuel production potential in the U.S, *Appl. Energy.* 191 (2017) 75–86. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.01.015>.
- [71] J.S. Koikai, Utilizing GIS-Based Suitability Modeling to Assess the Physical Potential of Bioethanol Processing Plants in Western Kenya, (n.d.). http://www2.smumn.edu/deptpages/winlibrary/about/about_staff.html (accessed November 12, 2022).
- [72] R.W. Saaty, The analytic hierarchy process—what it is and how it is used, *Math. Model.* 9 (1987) 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).

- [73] L. Quinta-Nova, P. Fernandez, N. Pedro, GIS-Based Suitability Model for Assessment of Forest Biomass Energy Potential in a Region of Portugal, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 95 (2017) 042059. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/4/042059>.
- [74] T.L. Saaty, Decision making with the analytic hierarchy process, *Int. J. Serv. Sci.* 1 (2008) 83–98.
- [75] T.L. Saaty, How to make a decision: The analytic hierarchy process, *Eur. J. Oper. Res.* 48 (1990) 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I).
- [76] T.L. Saaty, How to make a decision: The analytic hierarchy process, *Eur. J. Oper. Res.* 48 (1990) 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I).
- [77] T.L. Saaty, Some Mathematical Concepts of the Analytic Hierarchy Process, *Behav.* 1991 1829. 18 (1991) 1–9. https://doi.org/10.2333/BHMK.18.29_1.
- [78] B. Feizizadeh, T. Blaschke, GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran, (n.d.). <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0463-3>.
- [79] L. Ferreira dos Santos, R. Barreto Castelo da Cruz, O Uso do Método AHP na Tomada de Decisão para Seleção de Sistemas de Lajes de Edifícios Comerciais, (n.d.).
- [80] D.T. Morandi, L.C. de J. França, E.S. Menezes, E.L.M. Machado, M.D. da Silva, D.P. Mucida, Delimitation of ecological corridors between conservation units in the Brazilian Cerrado using a GIS and AHP approach, *Ecol. Indic.* 115 (2020) 106440. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2020.106440>.
- [85] Brazil Forest Facts and Figures., SBS – Brazilian Society of Forestry, São Paulo. (2008) 1–92.
- [86] A.C.O. A. C. O. Carneiro, Produção sustentável de carvão vegetal., Viçosa, SIF. (2013). <http://diretoriopre.mma.gov.br/index.php/category/66-gef-bra-14-g31-producao-de-carvao-de-biomassa-renovavel-sustentavel-para-a-industria-siderurgica-do-brasil?download=135:produto-3-apoio-pedagogico-e-metodologico-para-confeccao-de-cartilha> (accessed November 12, 2022).
- [87] J. Goldemberg, Biomassa e energia, *Quim. Nova*, Vol. 32, No. 3. (2009) 582–587. http://static.sites.sbq.org.br/quimicanova.sbq.org.br/pdf/Vol32No3_582_03-QN08645.pdf (accessed November 12, 2022).
- [88] CEMIG - Minas Gerais Energy Company, Minas Gerais Biomass Atlas., (2017). <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2021/03/atlas-biomassa-mg.pdf> (accessed November 12, 2022).
- [89] R: The R Project for Statistical Computing, (n.d.). <https://www.r-project.org/> (accessed November 15, 2022).
- [90] CRAN - Package lpSolveAPI, (n.d.). <https://cran.r-project.org/web/packages/lpSolveAPI/index.html> (accessed November 15, 2022).
- [91] The Leader in Decision Intelligence Technology - Gurobi Optimization, (n.d.). <https://www.gurobi.com/> (accessed November 15, 2022).
- [92] H. Wackernagel, Ordinary Kriging, *Multivar. Geostatistics.* (1995) 74–81. https://doi.org/10.1007/978-3-662-03098-1_11.
- [93] C. Cambero, T. Sowlati, Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 36 (2014) 62–73. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.04.041>.
- [94] CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006. , (2006).
- [95] B.H.L. S. Chalmers, Develop a GIS-based tool for estimating supply curves for forest thinning and residues to biomass facilities in California. Final report, Dep. Biol. Agric. Eng. Univ. California, Davis, 39pp. (2005).
- [96] F.B. Zhan, X. Chen, C.E. Noon, G. Wu, A GIS-enabled comparison of fixed and discriminatory pricing strategies for potential switchgrass-to-ethanol conversion facilities in Alabama, *Biomass and Bioenergy.* 28 (2005) 295–306. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2004.06.006>.
- [97] C.E. Noon, M.J. Daly, GIS-based biomass resource assessment with BRAVO, *Biomass and Bioenergy.* 10 (1996) 101–109. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00065-8).
- [98] L. Panichelli, E. Gnansounou, GIS-based approach for defining bioenergy facilities location: A case study in Northern Spain based on marginal delivery costs and resources competition between facilities, *Biomass and Bioenergy.* 32 (2008) 289–300. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2007.10.008>.
- [99] LD Celulose, Plano de Manejo Florestal: Resumo Público., (2021). https://ldcelulose.com.br/fileadmin/user_upload/documentos/plano_de_manejo_resumo_publico_ld_celulose.pdf (accessed November 12, 2022).
- [100] W. Org, O. Lucon, V. Romeiro, T. Fransen, i Bridging the Gap Between Energy and Climate Policies in Brazil BRIDGING THE GAP BETWEEN ENERGY AND CLIMATE POLICIES IN BRAZIL Policy Options to Reduce Energy-Related GHG Emissions, (n.d.).
- [101] S. Wood, D.B. Layzell, C. Foundation, S.M. Wood, D.B. Layzell, A Canadian biomass inventory: Feedstocks for a bio-based economy - Final report, (2003). <http://atrium.lib.uoguelph.ca/xmlui/handle/10214/15053> (accessed November 13, 2022).
- [102] J. van Zalk, P. Behrens, The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: A review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S., *Energy Policy.* 123 (2018) 83–91. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2018.08.023>.
- [103] C.S. Galik, M.E. Benedum, M. Kauffman, D.R. Becker, Opportunities and barriers to forest biomass energy: A case study of four U.S. states, *Biomass and Bioenergy.* 148 (2021) 106035. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2021.106035>.