



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

GABRIEL MADEIRA DA SILVA GUANAES

**OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE TRANSPORTE DE MADEIRA
PARA DUAS COMBINAÇÕES VEICULARES DE CARGA**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2023

GABRIEL MADEIRA DA SILVA GUANAES

**OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE TRANSPORTE DE MADEIRA PARA
DUAS COMBINAÇÕES VEICULARES DE CARGA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Manejo dos Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Henrique Cordeiro Ramalho

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2023

OTIMIZAÇÃO DE ROTAS DE TRANSPORTE DE MADEIRA PARA
DUAS COMBINAÇÕES VEICULARES DE CARGA

Gabriel Madeira da Silva Guanaes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 24 de março de 2023.



Documento assinado digitalmente

EDUARDO DA SILVA LOPES

Data: 28/03/2023 08:59:03-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes (Examinador Externo)
Universidade Estadual do Centro Oeste - Campus Irati - PR



Documento assinado digitalmente

Luiz Paulo de Sousa Correia

Data: 27/03/2023 17:07:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Paulo de Sousa Correia (Examinador Externo)
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará - Campus São Félix do Xingu



Documento assinado digitalmente

FLAVIO CIPRIANO DE ASSIS DO CARMO

Data: 28/03/2023 09:47:03-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Flavio Cipriano de Assis do Carmo (Examinador Externo)
Universidade Federal de Campina Grande - Campus Patos - PB

Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas -
SIBI/UFES e elaborada pelo autor

G913o Guanaes, Gabriel Madeira da Silva, 1996-
Otimização de rotas de transporte de madeira para duas
combinações veiculares de carga / Gabriel Madeira da Silva
Guanaes. - 2023.
59 f. : il.

Orientador: Nilton Cesar Fiedler.
Coorientador: Antonio Henrique Cordeiro Ramalho. Dissertação
(Mestrado em Ciências Florestais) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias.

1. Sensoriamento remoto. 2. Análise de rede. 3. Engenharia
florestal. 4. Logística. 5. Transporte. I. Fiedler, Nilton Cesar. II.
Ramalho, Antonio Henrique Cordeiro. III. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.
IV. Título.

CDU: 630

Dedico a todas as pessoas que partilharam comigo as dificuldades e me forneceram algum tipo de apoio para que essa etapa fosse concluída.

AGRADECIMENTOS

Aos amigos e professores Nilton César Fiedler e Antonio Henrique Cordeiro Ramalho pela orientação e apoio no desenvolvimento deste trabalho, pela oportunidade, por todo conhecimento, experiências compartilhadas e a sua paciência para que minha aprendizagem fosse sempre a melhor e mais completa;

A minha mãe e a minha família que foram essenciais nesse processo;

A Universidade Federal do Espírito Santo por ter fornecido todo o suporte necessário ao desenvolvimento de minhas habilidades e a minha qualificação profissional através de todo seu corpo docente, técnicos, demais servidores, direção e administração;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por ter fornecido o apoio financeiro e o incentivo a pesquisa;

A KLABIN S/A, em especial a gerência de planejamento e a coordenação de sistemas de informações geográficas, que compartilharam os dados e informações essenciais para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus irmãos de república Anderson, Saulo, Guilherme, Jessé, Erasmus e Vinícius que compartilharam e estiveram presentes em todos os momentos e me ofereceram suporte nas horas de dificuldade;

E a todas as pessoas que fizeram parte desta caminhada de maneira direta ou indireta, presencialmente ou a distância, a minha sincera e completa gratidão.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“A ciência mais útil é aquela cujo fruto é o mais comunicável.”

Leonardo Da Vinci

RESUMO

GUANAES, Gabriel Madeira da Silva. **Otimização de rotas de transporte de madeira para duas combinações veiculares de carga**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler. Coorientador: Prof. Dr. Antonio Henrique Cordeiro Ramalho.

O transporte de madeira é uma das atividades mais importantes na indústria florestal, pois permite o escoamento de produtos florestais para as áreas de processamento e mercado. Portanto, o planejamento eficiente das rotas de transporte, com vistas a redução do tempo de viagem, aumento da capacidade dos veículos e otimização das rotas, é crucial para garantir a segurança das operações, a minimização dos custos e a preservação dos recursos florestais. Desta forma, o objetivo com a presente pesquisa foi determinar as rotas ótimas para o transporte de madeira por bitrens e tritrens, a partir da aplicação das técnicas de análise de redes. Para tal, a pesquisa foi conduzida em uma área de estudo correspondente aos limites de uma Regional de uma empresa florestal situada no estado do Paraná, Brasil. O banco de dados necessário para realizar a presente pesquisa foi composto pelo limite da área de estudo, pela malha rodoviária, pelo mapa de declividade, pelos pontos de oferta e de demanda e pelos custos de transporte. A pesquisa foi conduzida seguindo as seguintes etapas metodológicas: 1) Preparação do banco de dados; 2) Atualização da tabela de atributos da malha viária; 3) Geração do mapa de declividade; 4) Extração dos pontos de oferta e de demanda individualizados; 5) Cruzamento das classes de declividade com a malha viária; 6) Introdução dos pesos de declividade no modelo; 7) Criação da análise de redes; e 8) Determinação da melhor composição veicular de carga (CVC). Após a aplicação da metodologia, os resultados evidenciaram que a rota mais próxima foi a que transporta a madeira do ponto de oferta 4 até a demanda 1, em todos os cenários. Já as rotas mais distantes foram aquelas que transportam a madeira dos pontos de ofertas 5 e 6. Além disso, constatou-se que o bitrem possui um custo médio por tonelada por quilometro 20,29% menor que o tritrem, o que fez com que em todos os cenários avaliados, o custo de transporte de madeira utilizando a CVC do tipo bitrem fosse inferior ao transporte realizado com CVC do tipo tritrem. Esses resultados permitiram concluir que a análise de redes é uma importante ferramenta para o planejamento logístico e operacional de determinação das rotas ótimas para o transporte de madeira por bitrens e tritrens. Conclui-se, ainda que, para os cenários avaliados, o bitrem apresenta menores custos de

transporte o que o torna, economicamente, mais viável que o tritrem e que não é indicada a implantação de sistemas de transporte por tritrem, nos cenários apresentados.

Palavras-Chave: Logística Florestal, Transporte florestal, Análise de redes, Roteamento de veículos.

ABSTRACT

GUANAES, Gabriel Madeira da Silva. **Optimization of wood transportation routes for two load vehicle combinations**. 2023. Dissertation (Master's in Forest Sciences) - Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Prof. Dr. Nilton Cesar Fiedler. Co-advisor: Prof. Dr. Antonio Henrique Cordeiro Ramalho.

The transportation of wood is one of the most important activities in the forestry industry, as it allows the flow of forest products to processing and market areas. Therefore, efficient planning of transportation routes, aiming to reduce travel time, increase vehicle capacity, and optimize routes, is crucial to ensure safe operations, cost minimization, and preservation of forest resources. Thus, this research aimed to determine optimal routes for the transportation of wood using bitrains and tritrains, based on the application of network analysis techniques. For this purpose, the research was conducted in a study area corresponding to the boundaries of a Forestry Regional from a forestry company in Paraná, Brazil. The necessary database for this research was composed of the study area boundary, the road network, the slope map, the supply and demand points, and the transportation costs. The research was conducted following the following methodological steps: 1) Preparation of the database; 2) Update of the road network attribute table; 3) Generation of the slope map; 4) Extraction of individualized supply and demand points; 5) Intersection of slope classes with the road network; 6) Introduction of slope weights into the model; 7) Creation of network analysis; and 8) Determination of the best Commercial Vehicle Combination (CVC). After the application of the methodology, the results showed that the closest route was the one that transports wood from supply point 4 to demand 1 in all scenarios. The farthest routes were those that transport wood from supply points 5 and 6. Additionally, it was found that the bitrains have an average cost that is 20,29% lower than tritrains, which made the transportation cost of wood using bitrains lower than that of tritrains in all evaluated scenarios. These results allowed us to conclude that network analysis is an important tool for the logistic and operational planning of determining optimal routes for the transportation of wood using bitrains and tritrains. It was concluded that, for the evaluated scenarios, the bitrain presents lower transportation costs, making it more economically viable than the tritrain, and the implementation of tritrain transportation systems is not indicated in the presented scenarios.

Keywords: Forest logistics, Forest transportation, Network analysis, Vehicle routing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Composições Veiculares de Carga (CVC).....	21
Figura 2. Mapa de caracterização da área de estudo.....	26
Figura 3. Planta dimensional do Bitrem (dimensões em mm).....	28
Figura 4. Planta dimensional do tritrem (dimensões em mm).....	28
Figura 5. Distribuição espacial da malha viária na área de estudos.....	30
Figura 6. Caracterização dos pontos de demanda e de oferta da área de estudo.....	31
Figura 7. Fluxograma metodológico.....	32
Figura 8. Rotas ótimas para transporte de madeira com bitrem, com direção ao Ponto de demanda 1 (fábrica 1).....	40
Figura 9. Rotas ótimas para transporte de madeira com bitrem, com direção ao Ponto de demanda 2 (fábrica 2).....	42
Figura 10. Rotas ótimas para transporte de madeira com tritrem, com direção ao Ponto de demanda 1 (fábrica 1).....	44
Figura 11. Rotas ótimas para transporte de madeira com tritrem, com direção ao Ponto de demanda 2 (fábrica 2).....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Condição ideal e de risco operacional das CVC no transporte florestal.	27
Tabela 2. Descrição dos cenários considerados na presente pesquisa.....	36
Tabela 3. Custo médio de transporte de madeira por CVC e tipo de pavimentação	37
Tabela 4. Quantidade de madeira disponível por ponto de oferta.....	38
Tabela 5. Análise de custos de transporte florestal por CVC	47
Tabela 6. Análise de custos de transporte florestal por CVC, distância e tipo de pavimento da via.	49
Tabela 7. Análise de viabilidade de cada CVC por cenário analisado.	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1 Logística no abastecimento florestal	17
3.2 Transporte florestal rodoviário.....	18
3.3 O custo no transporte florestal	19
3.3.1 <i>Composição Veicular de Carga (CVC)</i>	20
3.3.2 <i>Distância de transporte</i>	22
3.4 Geotecnologias aplicadas ao transporte florestal	23
3.4.1 <i>Análise de redes</i>	24
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1 Caracterização da área de estudo	26
4.2 Caracterização das Combinações Veiculares de Carga (CVC).....	27
4.2.1 <i>Bitrem</i>	27
4.2.2 <i>Tritrem</i>	28
4.3 Banco de dados	29
4.3.1 <i>Limite da área de estudo e Malha rodoviária</i>	29
4.3.2 <i>Mapa de declividade</i>	30
4.3.3 <i>Pontos de oferta e demanda</i>	30
4.4 Procedimento metodológico.....	32
4.4.1 <i>Atualização da tabela de atributos da malha viária</i>	33
4.4.2 <i>Criação do mapa de declividade</i>	33
4.4.3 <i>Extração dos pontos de oferta individualizados</i>	34
4.4.4 <i>Extração dos pontos de demanda individualizados</i>	34
4.4.5 <i>Cruzamento das classes de declividade com a malha viária</i>	34
4.4.6 <i>Introdução dos pesos de declividade no modelo</i>	34
4.4.7 <i>Criação da análise de redes</i>	35
4.4.8 <i>Custos de transporte</i>	37
4.4.9 <i>Determinação da melhor CVC</i>	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1 Definição da rota ótima de transporte - Bitrem	39

5.2 Definição da rota ótima de transporte - Tritrem	43
5.3 Análises de custo por rota de transporte e tipo de CVC	47
6. CONCLUSÕES.....	54
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

O transporte de madeira é uma das atividades mais importantes na indústria florestal, pois permite o escoamento de produtos florestais para as áreas de processamento e mercado (RAMALHO et al., 2022). Sendo assim, a falta de eficiência no planejamento das atividades de transporte florestal, influenciam diretamente no custo do produto, podendo tornar essa etapa do processo produtivo, responsável por até 60% dos custos logísticos do empreendimento que, por sua vez, elevam o custo final da madeira (LOPES; VIEIRA; RODRIGUES, 2016).

Além da qualidade das estradas, fatores como as condições climáticas, as legislações vigentes e o tipo de veículo utilizados na operação, exercem forte influência sobre a eficiência das operações logísticas dos empreendimentos do setor florestal (SILVA et al., 2007). Sendo assim, a escolha da Composição Veicular de Carga (CVC) mais adequada à legislação vigente, à produtividade de cada talhão e às condições da malha viária, é imprescindível para obter bons resultados no processo logístico.

Portanto, o planejamento eficiente das rotas de transporte, com vistas a redução do tempo de viagem, garantia de abastecimento e otimização das rotas, é crucial para garantir a segurança das operações, a minimização dos custos e a preservação dos recursos florestais (SILVA et al., 2016). Desta forma, diante do atual cenário competitivo, diversas empresas do setor florestal têm empenhado esforços para introduzir novas tecnologias e pesquisas para aumentar a eficiência e, conseqüentemente, reduzir custos no transporte florestal (FERNANDES et al., 2020).

Com esta nova abordagem de trabalho, informações valiosas são mais eficientemente utilizadas nas atividades de planejamento e decisão das empresas. Por isso, os gestores florestais reconhecem que a capacidade de controlar e gerenciar seus recursos pode ser aumentada exponencialmente com a inserção de tecnologias no processo logístico de seus empreendimentos (RAMALHO, 2020). De maneira geral, as empresas têm optado por abordagens computacionais para solucionar problemas logísticos complexos, com destaque para as ferramentas presentes no universo das geotecnologias (SILVA et al., 2016).

As geotecnologias podem ser definidas como um conjunto de ferramentas tecnológicas aplicadas na coleta, armazenamento, processamento e conversão de dados espaciais em informações sobre a localização e distribuição geográfica de atributos da superfície terrestre, com o objetivo de possibilitar um gerenciamento mais eficiente dos recursos e, conseqüentemente, auxiliar na tomada de decisão (ARAGÃO; PEREIRA; DA

SILVA, 2022). De acordo com o estudo de Akay e Kakol (2014), a aplicação das ferramentas geotecnológicas no planejamento de rotas de transporte florestal tem o potencial de reduzir em até 30% os custos de operação. Além disso, é possível identificar áreas críticas ou sensíveis (áreas de preservação ambiental ou regiões com restrições de leis de tráfego), para evitar impactos negativos e garantir a conformidade com as regulamentações rodoviárias e ambientais (CAMPOS, 2022).

Diversos autores atestam a eficiência das ferramentas geotecnológicas no planejamento logístico do transporte florestal. Os autores Mokhiev e Medvedev (2020), por exemplo, concluíram, em sua pesquisa, que a aplicação da geotecnologia para determinar a densidade ótima de estradas florestais para escoamento da produção na Rússia, possibilitou a redução dos tempos de viagem e, conseqüentemente, dos custos de transporte. Já os autores afirmaram que a aplicação de geotecnologias na determinação das rotas de transporte e da densidade ótima de estradas para transporte de madeiras em toras curtas em povoamentos florestais plantados, possibilitou a determinação da relação entre o tamanho dos talhões e a capacidade de estocagem de madeira nas vias, com o volume médio individual das árvores e com a CVC (CAMPOS, 2022).

No entanto, é importante elucidar que para cada demanda, existem métodos, técnicas e ferramentas adequadas. No caso do transporte florestal, em que a eficiência e os custos operacionais são, diretamente, influenciados pela distância percorrida, metodologias que determinem as melhores rotas em função da localização do centro consumidor e dos reflorestamentos, ou da alocação dessas estruturas em função das menores e melhores rotas, são indispensáveis (SILVA et al., 2007).

Neste sentido, uma das ferramentas mais eficientes para atender ao objetivo principal dessa pesquisa (determinação de rotas de transporte), de acordo com Ramalho et al. (2022), é a Análise de Redes (*Network Analyst*). O Instituto de Pesquisa dos Sistemas Ambientais (ESRI) da Califórnia afirma que a análise de redes permite ao usuário resolver problemas de roteamento complexos a partir de modelos de dados de rede de transporte configuráveis, ou seja, essa ferramenta viabiliza o planejamento de rotas, estimativas de tempo de viagem, localização ótima de pontos de oferta (talhão) e de demanda (fábrica) (ESRI, 2020). De acordo com Ramalho et al. (2022), a partir da análise de redes, é possível ao usuário responder às seguintes questões: “Qual a maneira mais ágil de alcançar o local de demanda através do local de oferta?”; “Quais os locais de demanda estão mais próximos dos locais de oferta?”; “Quanto locais de demanda são abrangidos por um ponto de oferta?”; “Quais os CVC conseguem atender a demanda de maneira mais eficiente?”

A presente pesquisa foi elaborada sob a hipótese de que a aplicação das técnicas de análise de redes, poderá auxiliar, diretamente, os tomadores de decisão quanto à escolha das melhores rotas de transporte de madeira em função de cada tipo de veículo e da qualidade da malha viária.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Otimizar as rotas de transporte de madeira com o uso de duas combinações veiculares de carga aplicando a ferramenta geotecnologica de análise de redes.

2.2 Objetivos específicos

- a) Determinar as rotas ótimas de transporte da madeira com base no menor custo de transporte, pavimentação das vias e em restrições operacionais dos veículos; e
- b) Realizar uma análise comparativa dos custos de transporte florestal entre veículos do tipo bitrem e tritrem.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Logística no abastecimento florestal

É chamado de “Logística Florestal” todo o conjunto de atividades que compõem o sistema produtivo de uma empresa do ramo silvicultural, desde a escolha do local de plantio, até a entrega do produto aos clientes (NUNES; CAUSER; CIOLKOSZ, 2020). Dentre os principais objetivos da logística florestal, destacam-se o planejamento, o controle e a execução ordenada e eficiente dos processos de expedição, fluxo e armazenamento de bens, serviços e informações (ALAYET; LEHOUX; LEBEL, 2018).

O processo de planejamento logístico é considerado complexo, devido à necessidade de se trabalhar, conjuntamente, diversos setores independentes entre si, que, por sua vez, são, individualmente, responsáveis por um grande número de atividades dependentes (FU et al., 2021). Neste sentido, é cada vez mais importante introduzir técnicas de planejamento logístico nas indústrias florestais (CARLSSON; RÖNNQVIST, 2005; RÖNNQVIST et al., 2015).

O autor Silveira (2003) afirmou que é possível classificar a logística florestal em dois grandes grupos que envolvem o controle da movimentação e a coordenação demanda-suprimento: 1) Administração de recursos; e 2) Coordenação da oferta/demanda. De acordo com o autor citado, o primeiro grupo se trata do agrupamento e controle de todos os recursos e produtos gerados pelo empreendimento, enquanto o segundo grupo preocupa-se com a distribuição física dos produtos, ou seja, o transporte eficiente dos recursos produzidos ao final da linha de produção até o consumidor.

É natural que uma associação direta com o transporte de madeira seja feita sempre que se ouve o termo “logística florestal”, haja vista que, em resumo, o planejamento logístico tem como objetivo entregar o produto certo, na quantidade certa, ao cliente certo, no local e momentos certos (MACHADO, 2006). Portanto, assim como transporte é indissociável do planejamento logístico, a recíproca é verdadeira, haja vista que a logística é fundamental para o transporte de madeira, tendo influência desde a extração da madeira e seus derivados, até o seu destino final.

O controle dos custos do transporte florestal através da logística é essencial para garantir preços competitivos para os clientes, haja vista que essa etapa do

processo produtivo pode responder até por 60% dos custos do produto final (LOPES; VIEIRA; RODRIGUES, 2016). A logística também desempenha um papel fundamental na sustentabilidade do transporte de madeira, minimizando o impacto ambiental, como a emissão de gases de efeito estufa, o uso de combustível e o desgaste de veículos.

3.2 Transporte florestal rodoviário

Corresponde ao transporte florestal rodoviário, toda a movimentação de madeira e seus derivados desde os povoamentos florestais até seu destino final, alguns fatores que influenciam o transporte podem ser descritos pelo tipo de veículo utilizado, distância entre os povoamentos florestais e locais de destino final da madeira, além de outros como, as taxas de transporte cobradas pelas transportadoras, da qualidade da rede viária florestal, da carga líquida que o veículo pode transportar (MACHADO et al., 2009). Portanto, o planejamento logístico do transporte é fundamental para o sucesso do empreendimento, haja vista é o elemento econômico mais importante do custo logístico (ALVES et al., 2013).

De uma maneira generalizada, todo o processo logístico de transporte de cargas no Brasil pode ser realizado por cinco modais de transporte distintos ou complementares, sendo eles: ferroviário, hidroviário, dutoviário, aeroviário ou rodoviário (MACHADO; LOPES; BIRRO, 2009). Devido à elevada quantidade de vias que compõem a malha rodoviária do país, o modal de transportes baseado na movimentação de cargas por estradas e rodovias (rodoviário), é majoritário, transportando mais de 64% das cargas do Brasil, inclusive as de origem florestal (CNT, 2022).

A utilização massiva do transporte rodoviário no Brasil tem relação com a sua maior eficiência em pequenas distâncias, com o menor custo de implantação e com a elevada quantidade de vias existentes no país, sendo cerca de 215.000 km de rodovias públicas pavimentadas e outras 1,35 milhões de km não pavimentados (MACHADO; LOPES; BIRRO, 2009). Além disso, a utilização de veículos rodoviários apresenta versatilidade e facilidade de acesso a diferentes origens e destinos em praticamente toda a superfície terrestre (CAMPOS, 2022). O setor florestal segue a tendência nacional, utilizando o modal rodoviário para transportar mais de 85% da madeira produzida no país (OLIVEIRA, 2013).

No que se fez respeito a legislação, as normas de trânsito brasileiras são descritas na Lei nº 9.503, que institui o Código Nacional de Trânsito (CTB).

Como no transporte rodoviário utilizam-se veículos com alta capacidade de carga, classificados em sua grande maioria como pesados e extrapesados, é necessário seguir as limitações de dimensões e pesos dos veículos e possuir Autorização Especial de Trânsito (AET) (MACHADO et al., 2009). No Código Nacional de Trânsito é especificado todos os artigos que influenciam nas limitações das dimensões dos veículos de transporte de carga, o número de unidades e pesos para cada tipo de veículos bem com sua distribuição (BRASIL, 1997).

3.3 O custo no transporte florestal

O transporte da madeira é uma das atividades mais importantes na indústria florestal, pois permite o escoamento de produtos florestais para as áreas de processamento e mercado (RAMALHO et al., 2022). Sendo assim, a falta de eficiência no planejamento das atividades de transporte florestal, influenciam diretamente no custo do produto, podendo tornar essa etapa do processo produtivo, responsável por até 60% dos custos logísticos do empreendimento que, por sua vez, elevam o custo final da madeira (LOPES; VIEIRA; RODRIGUES, 2016).

Apesar de o transporte florestal pelo modal rodoviário no Brasil apresentar eficiência, relativamente, alta, em detrimento da extensão da rede rodoviária do país, da existência de uma gama de variedade de CVC com diferentes capacidades de carga, da adaptabilidade dos veículos, da flexibilidade de rotas e do menor custo de instalação, as condições precárias da malha rodoviária têm sido responsáveis pelo aumento exponencial dos custos de frete e de manutenção dos veículos, tornando o mercado muito menos competitivo (LOPES; VIEIRA; RODRIGUES, 2016).

Além da qualidade das vias, os gestores logísticos devem atentar-se às variáveis que influenciam no seu custo operacional do transporte florestal, com o objetivo de reduzir, diretamente, os custos da madeira para o consumidor final. Neste sentido, durante essa etapa do planejamento, devem ser avaliados e custo de transporte, a composição veicular de carga, a legislação vigente e a distância de transporte (CAMPOS, 2022).

A especificidade do transporte florestal e o valor relativamente baixo da carga são os principais fatores que contribuem para os altos custos de transporte rodoviário. De acordo com Machado, Lopes e Birro (2009), o fato de os veículos serem adaptados somente para o transporte de madeira e trafegarem carregados somente em um único sentido, aumenta o custo do transporte em comparação com outros produtos. Lopes,

Vieira e Rodrigues (2016) destacam que, devido ao volume elevado de madeira transportado em relação ao baixo valor da carga, as empresas transportadoras também enfrentam custos elevados.

Os autores Lopes, Vieira e Rodrigues (2016) realizaram uma pesquisa de avaliação técnica e de custos do transporte rodoviário com diferentes espécies e sortimentos de madeira e perceberam que as variáveis que mais comprometeram os custos de transporte foram a distância de transporte e o tempo de permanência dos veículos nas filas de espera.

3.3.1 Composição Veicular de Carga (CVC)

A escolha dos veículos para o transporte de madeira depende das características do local onde a madeira será retirada, devendo-se considerar, especialmente, as características das estradas como por exemplo sua geometria vertical (rampas), tipo de pavimentação, a distância de transporte e o volume de madeira a ser transportado.

De acordo com Machado, Lopes e Birro (2009) entende-se por:

- **Veículo:** qualquer meio utilizado para movimentar pessoas e cargas de um ponto a outro;
- **Caminhão:** veículo motorizado utilizado no transporte de cargas;
- **Cavalo-mecânico:** unidade tratora responsável pela tração dos reboques e semirreboques;
- **Reboque:** compartimento de carga de dois ou mais eixos (traseiros e dianteiros);
- **Semirreboque:** compartimento de carga, apoiado no cavalo-mecânico, composto por um ou mais eixos traseiros;
- **Composição Veicular de Carga (CVC):** combinação de unidades de um veículo (motoras e não motoras);

Os veículos de transporte rodoviário florestal podem, ainda, ser classificados de acordo com a combinação de unidades, ou seja, de acordo com a CVC (MACHADO; LOPES; BIRRO, 2009):

- **Caminhão simples:** veículo composto por uma única unidade, dividida entre a cabine, motor e compartimento de carga (Figura 1A);

- **Articulado (Carreta):** veículo composto por um cavalo-mecânico e um semirreboque (Figura 2B);
- **Biminhão:** veículo composto por um caminhão simples e um reboque (Figura 2C);
- **Bitrem:** veículo composto por um cavalo-mecânico e dois semirreboques (Figura 2D);
- **Tritrem:** veículo composto por um cavalo-mecânico e três semirreboques (Figura 2E);
- **Rodotrem:** veículo composto por um cavalo-mecânico, um semirreboque e um reboque (Figura 2F)

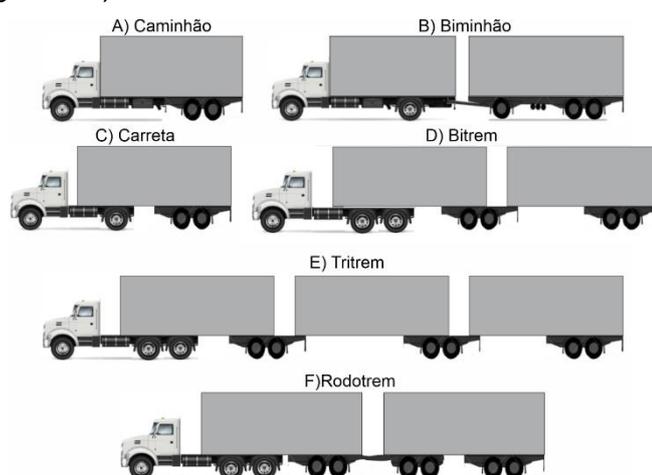


Figura 1. Composições Veiculares de Carga (CVC).

Fonte: O autor (2023).

Na maior parte das vezes, os empreendimentos florestais optam por utilizar veículos articulados em seu sistema logístico de transporte, devido à maior capacidade de carga, melhor distribuição de peso e versatilidade em manobras (ALBUQUERQUE, 2013). No entanto, a escolha do tipo de veículo de transporte deve ser realizada com base no tipo de carga a ser transportada (madeira em toras, biomassa, cavaco), tamanho e formato da carga, características da via e atendimento às legislações (BRASIL, 2022).

Ao determinar os pontos críticos para diferentes CVC de transporte de madeira, Campos (2022), listou os parâmetros limítrofes de inclinação de rampa para os veículos do tipo Bitrem e Tritrem. De acordo com o autor, as condições ideais para operações com bitrens e tritrens variam de 0 a 12% e 0 a 8%, respectivamente, tal fator evidencia que os veículos do tipo Tritrem, apesar de possibilitarem o transporte

de uma maior quantidade de madeira por viagem, são mais limitados quanto à versatilidade de rotas, em função da maior restrição de rampa. O bitrem, por sua vez, transportam menor quantidade de madeira por viagem, no entanto possuem restrição mais flexível de rotas em função da inclinação das vias.

3.3.2 Distância de transporte

O custo de transporte florestal é afetado por diversos fatores, dentre os quais a distância percorrida é um dos mais significativos (RAMALHO et al., 2022), haja vista que influencia diretamente na viabilidade dos empreendimentos e na rentabilidade a longo prazo. Neste sentido, é cada vez mais comum as empresas do ramo florestal estabelecerem raios de transporte com a distância viável máxima entre a fábrica, ou mercado consumidor, e os povoados florestais, com o objetivo de minimizar o impacto dos altos custos de transporte no valor final dos produtos (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2017). Porém, por vezes, devido à escassez de área disponível, limitações viárias e falta de planejamento logístico a curto, médio e longo prazo, fazem com que as empresas necessitem da realização de grandes deslocamentos para suprir a fábrica ou atender ao cliente final.

Os autores Silva et al. (2007), afirmaram que o custo unitário por volume de madeira transportada aumenta, proporcionalmente, em função da distância do trajeto percorrido. Os autores afirmam ainda que uma das principais maneiras de se reduzir os custos de transportes nos trajetos, demasiadamente, longos é utilizar CVC's com maior capacidade de carga. Por este motivo, inúmeras empresas do setor florestal têm empenhado esforços na inserção de veículos do tipo bitrem e tritrem em suas frotas de transporte (ALVES et al., 2013). No entanto, há de se evidenciar que a utilização desses veículos é mais eficiente em transporte de curtas distâncias (SILVA et al., 2007), onde se tem um maior controle das condições das vias, devido às limitações de transporte relativas a cada CVC.

É certo que a redução da distância de transporte auxilia na alavancagem da margem de lucro ou na redução do custo final dos produtos florestais. No entanto, a seleção de rotas somente por influência da distância de transporte, não garante a eficiência e a redução direta dos custos da madeira posta em fábrica. Por este motivo, é importante que sejam estabelecidas as limitações de cada CVC em relação à largura

das vias, pavimentação e perfil horizontal (curvas) e vertical (aclives e declives) da malha viária.

Neste sentido, a utilização de ferramentas que auxiliem na delimitação precisa das rotas de transporte florestal, levando em consideração todos os fatores que afetam na eficiência operacional dos veículos, é indispensável para o planejamento estratégico e operacional dos empreendimentos do ramo. Assim, as empresas têm optado por abordagens computacionais para solucionar problemas logísticos complexos, com destaque para as ferramentas presentes no universo das geotecnologias (SILVA et al., 2016).

3.4 Geotecnologias aplicadas ao transporte florestal

A utilização de geotecnologias tem sido vital para o crescimento de soluções eficientes no setor florestal, incluindo o planejamento da logística e o transporte de madeira. Com a complexidade das tendências e padrões no mundo, é necessário aprimorar as técnicas de obtenção de informações, tornando-as de grande valor (BLIŠŤAN; KOVANIČ; KOVANIČOVÁ, 2015). Para atender a essa necessidade, instituições de ensino e pesquisa ao redor do mundo têm se dedicado ao desenvolvimento de habilidades para usar informações para solucionar problemas de maneira criativa e eficiente (DE SOUSA; SEVILLA-PAVÓN; SEIZ-ORTIZ, 2012; RAMALHO, 2022).

As definições de geotecnologias variam entre diferentes autores, mas geralmente são descritas como uma combinação de técnicas computacionais e processos para coletar, armazenar, analisar e interpretar dados relacionados ao espaço geográfico (FOMBUENA, 2017; PRUDENTE, 2016; RAMALHO et al., 2022). Esses processos têm uma abordagem transdisciplinar, integrando conceitos de diferentes áreas de conhecimento, tecnologias, dados, metodologias e técnicas para tratar e representar informações georreferenciadas (FOMBUENA, 2017). As geotecnologias são valiosas porque ajudam a apoiar decisões sobre o monitoramento, gestão e planejamento do espaço geográfico, combinando dados espaciais e não espaciais em modelos matemáticos ou estatísticos (SANTOS et al., 2016).

As geotecnologias permitem a coleta de informações valiosas que apoiam a administração ambiental e operacional no setor de produção florestal (CAMPOS, 2022). No contexto do planejamento logístico do transporte florestal, destacam-se as

geotecnologias baseadas em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), o Sensoriamento Remoto e a Cartografia (AKAY; KAKOL, 2014).

As aplicações dos SIG são inúmeras, abrangendo desde a análise de padrões de cobertura do solo, modelos de elevação, malha viária, tipos de solo e clima, até ajudar na tomada de decisões empresariais (RAMALHO et al., 2022). De acordo com Ribeiro et al. (2017) as técnicas de SIG são amplamente utilizadas no setor florestal para determinar a localização de fontes de madeira, a topografia do terreno, o tipo de solo e as redes de estradas existentes. No entanto, é importante elucidar que para cada demanda, existem métodos, técnicas e ferramentas adequadas.

No transporte florestal, a eficiência e os gastos operacionais são impactados diretamente pela distância de transporte. Por isso, é fundamental ter metodologias que possam identificar as melhores rotas levando em consideração a localização do centro de consumo e dos reflorestamentos, para que as estruturas sejam alocadas de forma a minimizar o percurso e otimizar o transporte (SILVA et al., 2007). Assim, um dos recursos mais efetivos para atingir o objetivo principal da pesquisa, que é a determinação de rotas de transporte, é a Análise de Redes, segundo Ramalho et al. (2022).

3.4.1 Análise de redes

O Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais afirma que essa ferramenta possibilita a solução de problemas de roteamento complexos a partir de modelos de dados de rede de transporte configuráveis, o que significa que é possível planejar rotas, estimar o tempo de viagem e encontrar a localização ideal dos pontos de oferta (talhão) e demanda (fábrica) (ESRI, 2020). Utilizando os dados de rede de transporte, plataformas que empregam Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como o software ArcGIS® tornam possível o planejamento de rotas, cálculo do tempo de viagem, determinação da localização de instalações e solução de vários outros problemas relacionados à rede de transporte (ESRI, 2020).

De acordo com Ramalho et al. (2022), com a ajuda da Análise de Redes, é possível responder questões como: “Qual a maneira mais ágil de alcançar o local de demanda através do local de oferta?”; “Quais os locais de demanda estão mais próximos dos locais de oferta?”; “Quantos locais de demanda são abrangidos por um ponto de oferta?”; “Quais os CVC conseguem atender a demanda de maneira mais

eficiente?”. A capacidade de simular diferentes cenários é extremamente importante no transporte florestal, pois conforme destacado por Machado, Lopes e Birro (2009), na realização desta operação é crucial definir as rotas que reduzam a distância percorrida e os riscos operacionais, resultando assim em uma eficiência operacional aumentada. O autor argumenta que esta necessidade de minimização é resultado do fato de que quanto maior a distância percorrida, maior o custo final do transporte.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo possui 2.426.526,70 hectares e corresponde aos limites de uma Regional Florestal pertencente a uma empresa florestal situada no estado do Paraná, Brasil. A Regional situa-se na região de Campos Gerais, mais precisamente entre os meridianos de 50°00'00" a 52°00'00" longitude Oeste e os paralelos de 23°00'00" a 24°60'00" de latitude Sul (Figura 2).

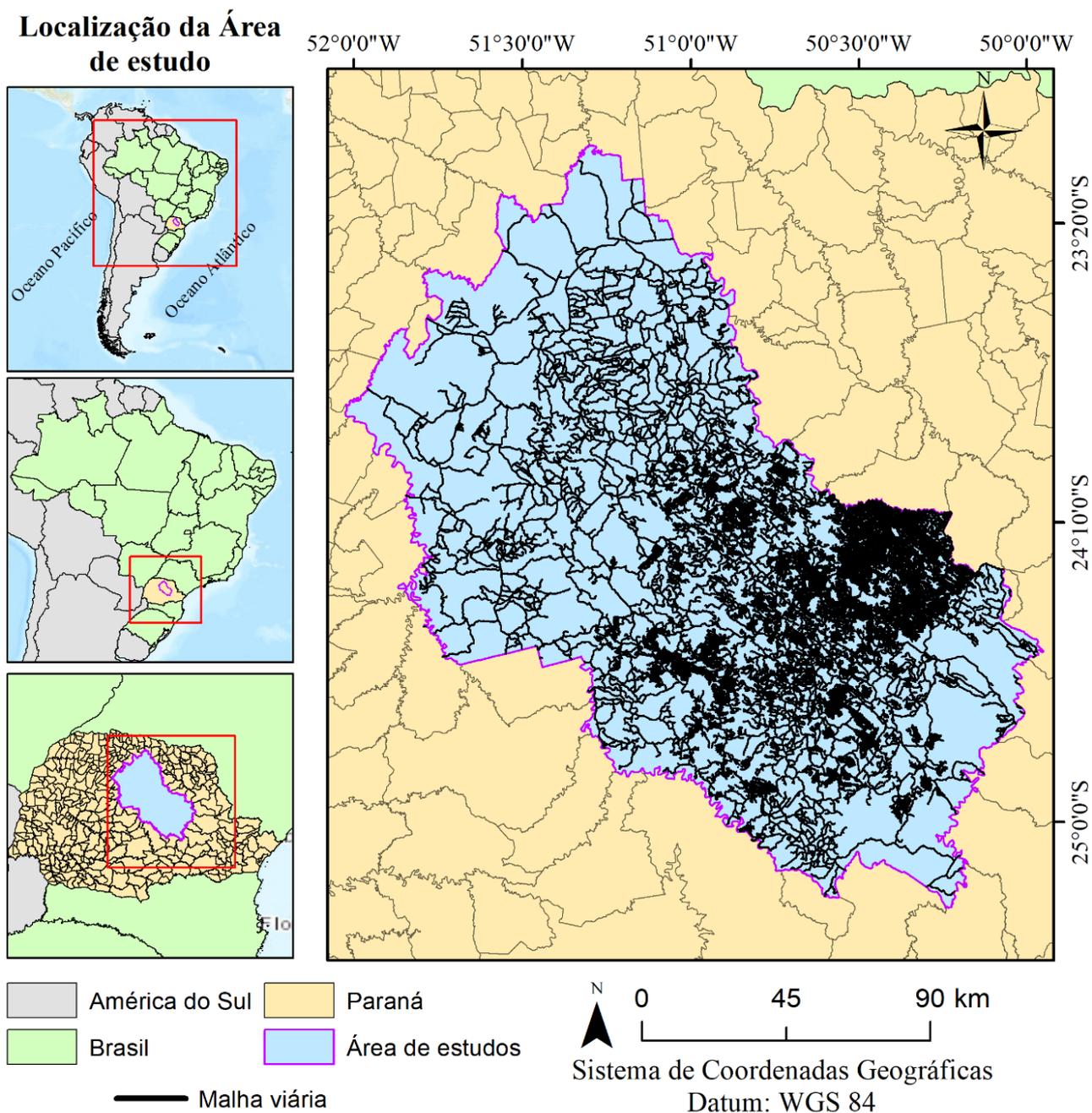


Figura 2. Mapa de caracterização da área de estudo.

Fonte: O autor (2023).

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a área é composta pelos climas dos tipos: Cfa (temperado sem estação seca e com verão quente) e Cfb (temperado sem estação seca e com verão fresco) (ALVARES et al., 2013; KOTTEK et al., 2006). A precipitação média anual varia entre 1.200 mm e 1.500 mm. A temperatura do ar permanece entre 19 °C e 22 °C. As classes de solo da área são representadas por: Argissolo vermelho-amarelo, Cambissolo hapílico ou húmico, Latossolo vermelho, Neossolo litólico e Nitossolo vermelho (EMBRAPA, 2020). Em se tratando de malha rodoviária, a área de estudo conta com 24.126 km de vias, distribuídas em vias pavimentadas com asfalto (7,86%) ou cascalho (19,05%) e vias sem pavimentação (73,10%).

4.2 Caracterização das Combinações Veiculares de Carga (CVC)

As composições veiculares de carga a serem analisadas na presente pesquisa serão dos tipos bitrem e tritrem. Segundo Campos (2022), esses são os principais veículos que atuam no transporte florestal no Brasil. No entanto, Malinovski (2010) atesta que essas CVC, assim como todas as demais, apresentam limitações quanto à inclinação das rampas das vias. Sendo assim, na presente pesquisa foram considerados os valores propostos por Campos (2022) (Tabela 1).

Tabela 1. Condição ideal e de risco operacional das CVC no transporte florestal.

CVC	Inclinação das rampas (%)	
	Condição ideal	Risco operacional
Bitrem	Até 12%	Acima de 12%
Tritrem	Até 8%	Acima de 8%

Fonte: Adaptado de Campos (2022).

4.2.1 Bitrem

A CVC do tipo bitrem é definida como veículos compostos por três partes, sendo uma unidade motora (cavalo-mecânico) e duas caixas de carga acopladas (semirreboque). Em virtude dessa configuração, os bitrens são capazes de transportar até 37 toneladas líquidas, a depender das normas estabelecidas no país ou estado em que circulam, configurando-se como um meio de transporte de grande porte e capacidade (CONTRAN, 2006). Além disso, seu design permite maior estabilidade em relação a outros veículos de carga e uma melhor utilização do espaço nas estradas, reduzindo a emissão de poluentes na atmosfera, se comparado a dois caminhões que fizessem o mesmo transporte. O

comprimento máximo dessa CVC é de 19,80 m e dispensa a necessidade de AET. De forma ilustrativa as dimensões do bitrem podem ser observadas na Figura 3 a seguir, a planta considera o bitrem fabricado pelo fabricante NOMA e um cavalo mecânico do modelo Scania G 420 CA6X4 CZ STZ.

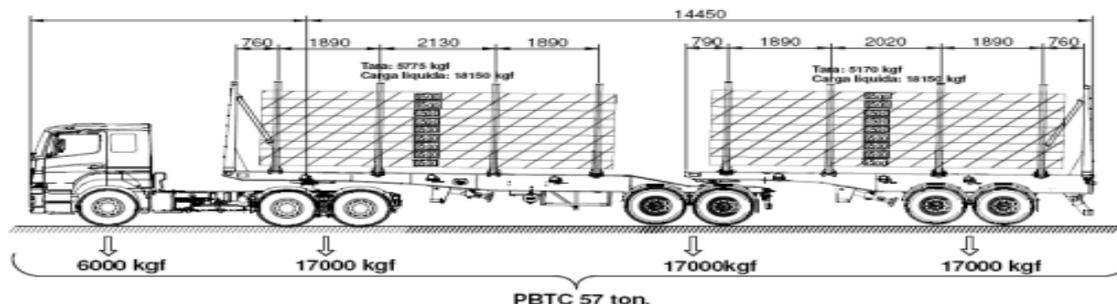


Figura 3. Planta dimensional do Bitrem (dimensões em mm).

Fonte: Malinovski (2010)

4.2.2 Tritrem

Veículos do tipo tritrem são utilizados no transporte de grandes volumes de mercadorias, da mesma forma que os bitrens. Eles são compostos por quatro partes, sendo uma unidade motora (cavalo-mecânico) e três caixas de carga acopladas (semirreboques). A capacidade de carga líquida do tritrem pode alcançar 48,8 toneladas, que varia conforme as regulamentações estabelecidas no país ou estado em que circulam (CONTRAN, 2006). É importante ressaltar que a condução de tritrens exige motoristas altamente qualificados e atentos às leis de trânsito, uma vez que se trata de um veículo de grande porte. Dessa forma, o tritrem é capaz de aproveitar melhor o espaço nas estradas, reduzir a emissão de poluentes e diminuir o tráfego de veículos nas rodovias, tornando-se uma opção viável para o transporte de grandes volumes de carga. O comprimento máximo do tritrem é de 30 metros. De forma ilustrativa as dimensões do tritrem podem ser observadas na Figura 4 a seguir, a planta considera o bitrem fabricado pelo fabricante NOMA e um cavalo mecânico do modelo Scania G 420 CA6X4 CZ STZ.

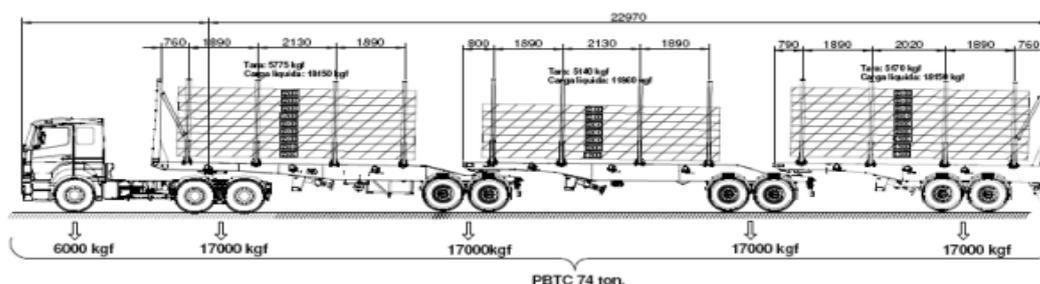


Figura 4. Planta dimensional do tritrem (dimensões em mm).

Fonte: Malinovski (2010)

4.3 Banco de dados

O banco necessário para realizar a presente pesquisa foi composto pelos seguintes arquivos e informações:

- a) Limite da área de estudo;
- b) Malha rodoviária;
- c) Mapa de declividade;
- d) Pontos de oferta;
- e) Pontos de demanda; e
- f) Custos de transporte.

4.3.1 Limite da área de estudo e Malha rodoviária

Os limites da área de estudo, bem como o arquivo referente à malha rodoviária, foram fornecidos em formato vetorial, pela empresa proprietária da regional florestal. O arquivo de malha viária contém, em sua tabela de atributos, informações acerca da pavimentação das vias (asfalto, cascalho ou terra) (Figura 5), comprimento e número de identificação de cada segmento da pista.

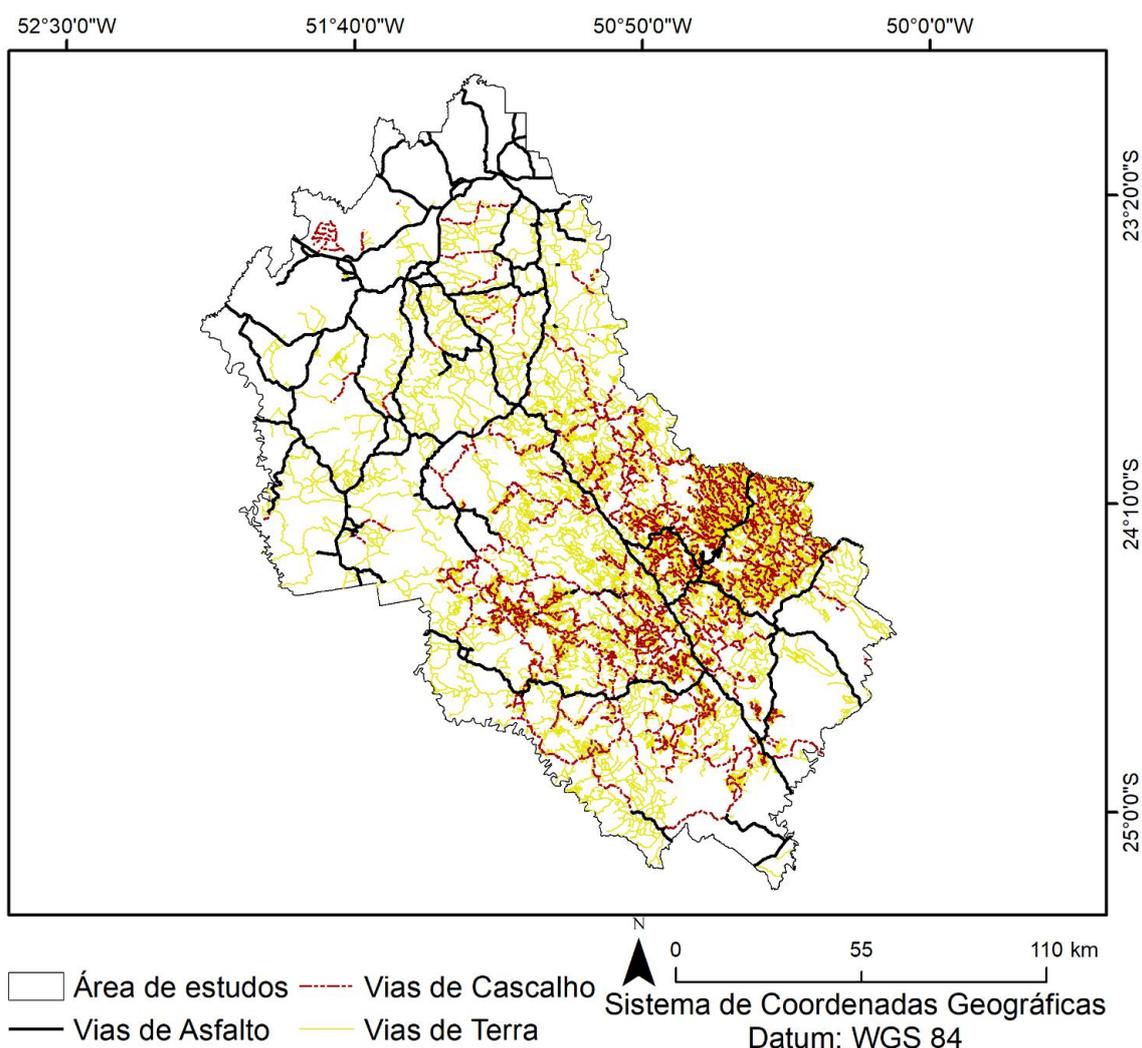


Figura 5. Distribuição espacial da malha viária na área de estudos.

Fonte: Dados fornecidos pela empresa proprietária da regional florestal.

4.3.2 Mapa de declividade

Para a obtenção do mapa de declividade da área, foi aplicada a ferramenta “*Slope*” sobre o Modelo Digital de Elevação (MDE), derivado de um arquivo matricial (30 metros) da missão topográfica de radar *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), adquirido na plataforma *Google Earth Engine*. O arquivo de saída foi o mapa de declividade em porcentagem.

4.3.3 Pontos de oferta e demanda

Os arquivos referentes aos pontos de oferta e demanda, fornecidos pela empresa, correspondem, respectivamente, aos dez maiores talhões florestais e às duas fábricas situadas na regional. Sendo assim, o modelo de roteamento de veículos será realizado no sentido talhão/fábrica e que os pontos de oferta e demanda acabaram se distribuindo em

dois municípios da regional. A Figura 6, apresenta a caracterização dos pontos de oferta e de demanda utilizados na presente pesquisa.

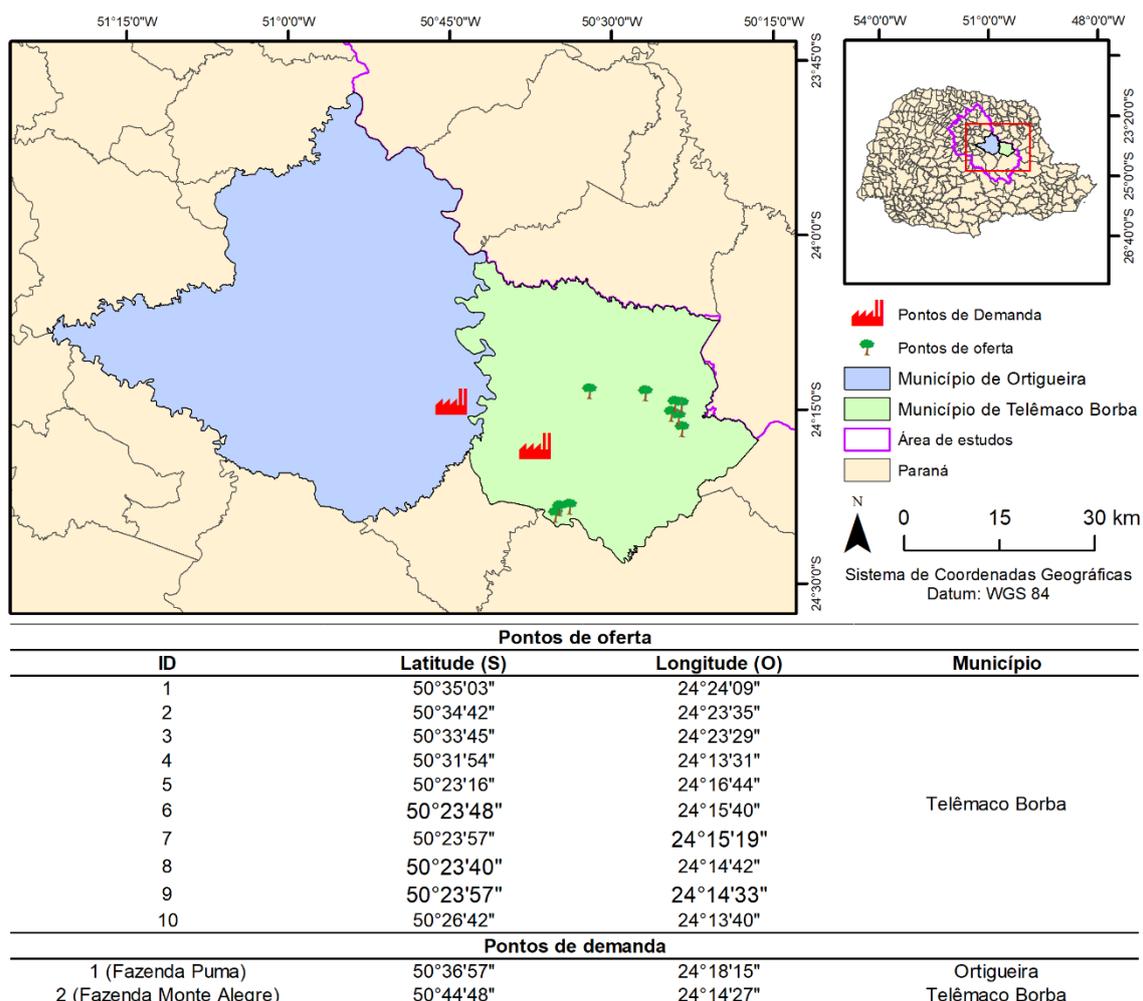


Figura 6. Caracterização dos pontos de demanda e de oferta da área de estudo.

Fonte: Dados fornecidos pela empresa proprietária da regional florestal.

4.4 Procedimento metodológico

A metodologia proposta foi dividida em etapas, didaticamente, apresentadas no fluxograma metodológico da Figura 7.

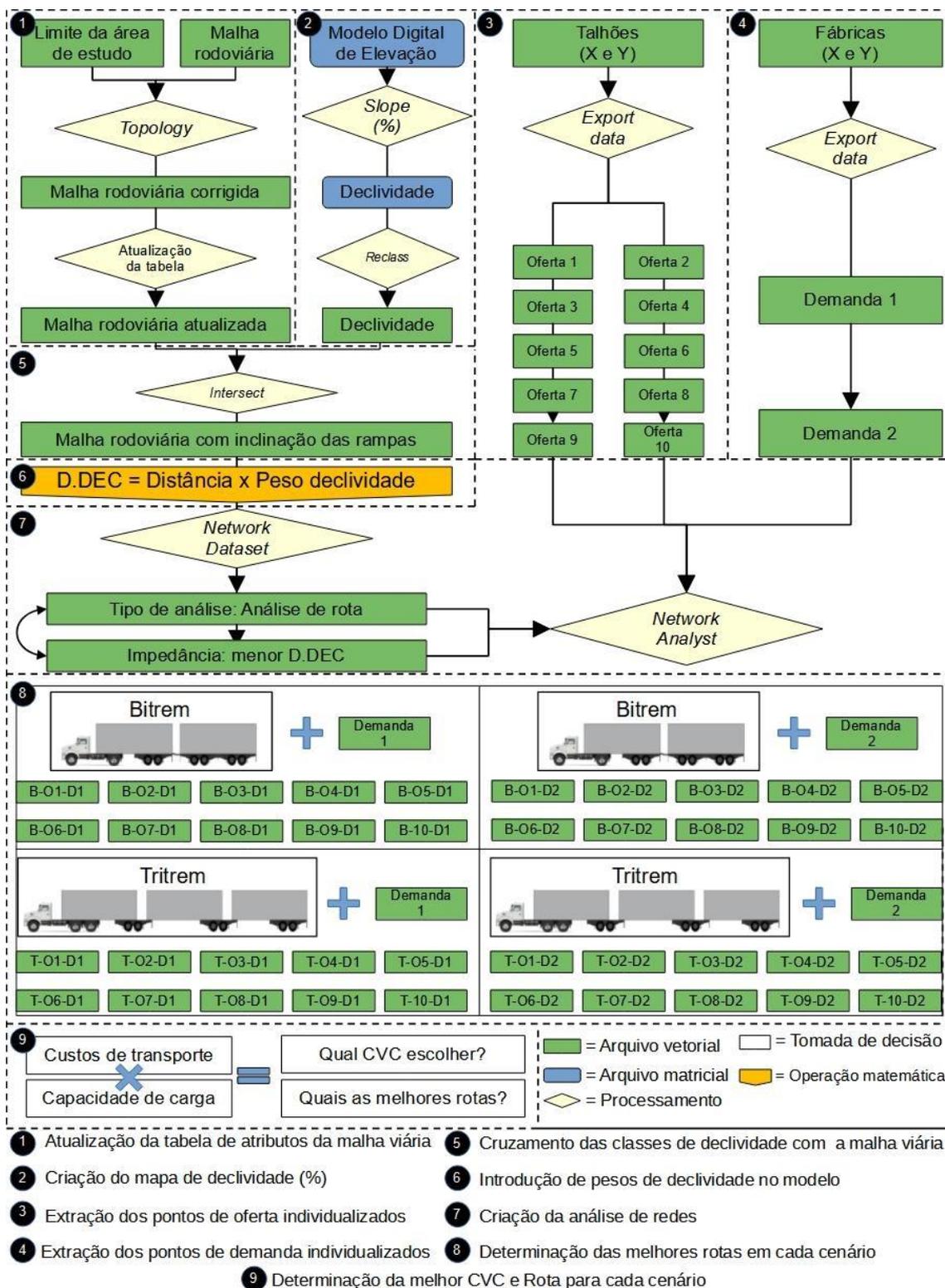


Figura 7. Fluxograma metodológico.

Fonte: O autor (2023)

4.4.1 Atualização da tabela de atributos da malha viária

Após a aquisição do arquivo de malha viária, foi necessário proceder com uma série de ajustes para inseri-lo no modelo de análise de redes. Neste sentido, para remover possíveis erros de topologia no arquivo de malha viária, procedeu-se com o pré-processamento por meio da ferramenta “*topology*” do ArcGis®, versão 10.3. O objetivo com essa análise foi determinar que o final de uma estrada tocasse qualquer parte de outra linha ou dela mesma, evitando as estradas “sem saída” que comprometem a modelagem. É importante salientar que o arquivo fornecido pela empresa se trata do conjunto de estradas internas da regional. Assim, as restrições legais de circulação não foram consideradas.

Após o pré-processamento da malha viária, foram criados os seguintes campos na tabela de atributos:

- **Custo de transporte por quilômetro:** Nesse campo foram utilizados os custos de transporte por quilômetro rodado, fornecidos pela empresa, com base na CVC e no tipo de pavimentação;
- **Custo por segmento da via:** Nesse campo foi realizado, por meio da calculadora de campo do ArcGis®, versão 10.3, a multiplicação entre o campo do comprimento da via (distância) e o campo de custo de transporte por quilômetro. Assim, esse campo fornece o custo de transporte em cada segmento da via;

4.4.2 Criação do mapa de declividade

Como foi evidenciado anteriormente, o mapa de declividade criado para a presente pesquisa foi representado em valores percentuais, no intuito de ajustá-lo às necessidades e limitações das CVC estudadas (Tabela 1). Sendo assim, o próximo passo para que esse arquivo pudesse ser inserido no modelo, foi a reclassificação espacial de seus valores.

Inicialmente foi realizada uma reclassificação no mapa de declividade que serviu de base para a análise dos cenários envolvendo bitrens. Nesse cenário, com bitrens, estabeleceram-se duas classes: apta (0 a 12%) e inapta (acima de 12%). Posteriormente, em outro mapa de declividade, procedeu-se com a reclassificação em função das limitações do tritrem, criando-se as seguintes classes: apta (0 a 8%) e inapta (acima de 8%).

Por fim, ambos os arquivos gerados após a reclassificação (classes de aptidão para bitrem e tritrem), foram submetidos a um processo de vetorização e dissolução de suas classes.

4.4.3 Extração dos pontos de oferta individualizados

Para que fosse possível identificar a melhor rota partindo de cada um dos talhões, foi necessário proceder com a exportação de cada ponto de oferta, individualmente. Sendo assim, através da ferramenta “*Export data*” do software ArcGis®, versão 10.3, esse procedimento foi realizado, gerando 10 arquivos separados relativos aos pontos de oferta.

4.4.4 Extração dos pontos de demanda individualizados

Para que fosse possível identificar a melhor rota chegando em cada uma das fábricas, foi necessário proceder com a exportação de cada ponto de demanda, individualmente. Sendo assim, através da ferramenta “*Export data*” do software ArcGis®, versão 10.3, esse procedimento foi realizado, gerando dois arquivos separados relativos aos pontos de demanda.

4.4.5 Cruzamento das classes de declividade com a malha viária

Após a organização da tabela de atributos da malha viária e da geração das classes de aptidão a cada um dos CVC's, foi procedido com o cruzamento tabular dessas informações a partir da ferramenta “*Intersect*” do software ArcGis®, versão 10.3. Com isso, surgiram dois novos campos na tabela de atributos da malha viária, sendo um com as informações de aptidão clinográfica para bitrem de cada trecho da pista e o outro para tritrem.

4.4.6 Introdução dos pesos de declividade no modelo

Após o cruzamento tabular entre as classes de declividade, foi procedido com a indicação dos pesos de cada declividade. Sendo assim, foram criados outros dois campos na tabela de atributos da malha viária, a saber:

- a) Pesos para a aptidão clinográfica de bitrens: Apto (0 a 12%) = peso 1; Inapto (acima de 12%) = peso 5; e
- b) Pesos para a aptidão clinográfica de tritrens: Apto (0 a 8%) = peso 1; Inapto (acima de 8%) = peso 5

É importante afirmar que esses pesos foram determinados de maneira arbitrária, com o intuito de forçar o modelo a optar pelas vias com inclinação compatível com a CVC escolhida.

Posteriormente, para que essas informações fossem inseridas no modelo, o comprimento de cada trecho (distância) foi multiplicado pelo peso atrelado à declividade (Equação 3), gerando assim, uma distância ponderada pela declividade.

$$D.DEC = D \times P_{DEC} \quad (3)$$

Onde o D.DEC é a distância ponderada pela declividade, o D é a distância de cada trecho e o P_{DEC} é o peso dado a cada classe de declividade.

Sendo assim, dois novos campos surgiram na tabela de atributos da malha viária, a saber:

- c) Distância ponderada pela declividade de bitrens; e
- d) Distância ponderada pela declividade de tritrens.

4.4.7 Criação da análise de redes

Para criar a análise de redes, foi necessário, inicialmente, criar-se um novo arquivo de geodatabase (“*File Geodatabase*”), a partir da barra de catálogo no ArcGis, para alocar os arquivos necessários para a análise de redes. Assim, a malha viária contendo as informações de distância ponderada pelas respectivas classes de declividade foi inserida no modelo. Posteriormente, criou-se um conjunto de dados de recursos (“*Feature dataset*”), onde foi delimitado o Sistema de Coordenadas Planas WGS 84 Zona UTM 22S.

Após criar o conjunto de dados, procedeu-se com a importação da malha viária para dentro do conjunto [“*Feature class (single)*”]. Com isso, foi possível criar um novo Conjunto de dados de rede (*Network dataset*), para que fossem selecionados os parâmetros para a criação da análise de redes. Nessa etapa, foi selecionada a opção de Conectividade para qualquer vértice (“*Any vertex*”), no intuito de informar ao modelo que qualquer parte da estrada é um trecho individualizado, permitindo que a composição de vias que formassem a rota fosse flexibilizada. Posteriormente, o parâmetro selecionado para o conjunto de dados de rede foi o de menor custo de distância ponderada, ou seja, o modelo deveria selecionar a rota com menor valor do somatório do campo de distâncias ponderadas pela declividade.

Com a rede estabelecida, foram importados os 10 arquivos pontuais de oferta e os dois arquivos pontuais de demanda. A partir daí, foi realizada a identificação das melhores rotas de transporte para transportar a madeira dos pontos de oferta até os pontos de demanda. Para tal, foi utilizada a função de análises denominada “Rotas”. Essa função permite ao usuário encontrar a melhor maneira de um ponto A até um ponto B em função

da impedância escolhida. No presente modelo, a impedância selecionada foi o menor custo de distância ponderada pela declividade.

Neste sentido, assumindo-se que o bitrem possui um custo operacional diferente do tritrem e que ambas as fábricas podem ser consideradas pontos de entrega dessa madeira, foram estabelecidas 40 rotas ótimas de transporte. Na tabela 2 estão listados e descritos todos os cenários considerados.

Tabela 2. Descrição dos cenários considerados na presente pesquisa

CVC	Ponto de oferta	Ponto de demanda	Cenário	CVC	Ponto de oferta	Ponto de demanda	Cenário
Bitrem	1	1	B-O1-D1	Bitrem	1	2	B-O1-D2
	2	1	B-O2-D1		2	2	B-O2-D2
	3	1	B-O3-D1		3	2	B-O3-D2
	4	1	B-O4-D1		4	2	B-O4-D2
	5	1	B-O5-D1		5	2	B-O5-D2
	6	1	B-O6-D1		6	2	B-O6-D2
	7	1	B-O7-D1		7	2	B-O7-D2
	8	1	B-O8-D1		8	2	B-O8-D2
	9	1	B-O9-D1		9	2	B-O9-D2
	10	1	B-O10-D1		10	2	B-O10-D2
Tritrem	1	1	T-O1-D1	Tritrem	1	2	T-O1-D2
	2	1	T-O2-D1		2	2	T-O2-D2
	3	1	T-O3-D1		3	2	T-O3-D2
	4	1	T-O4-D1		4	2	T-O4-D2
	5	1	T-O5-D1		5	2	T-O5-D2
	6	1	T-O6-D1		6	2	T-O6-D2
	7	1	T-O7-D1		7	2	T-O7-D2
	8	1	T-O8-D1		8	2	T-O8-D2
	9	1	T-O9-D1		9	2	T-O9-D2
	10	1	T-O10-D1		10	2	T-O10-D2

Fonte: O autor (2023).

4.4.8 Custos de transporte

Os valores dos custos de transporte considerados na presente pesquisa foram fornecidos pela empresa proprietária da regional florestal. Esses valores referem-se à média entre três empresas responsáveis pelo transporte da madeira produzida na região, em função da CVC e tipo de pavimento. O cálculo utilizado pela empresa para contabilizar o custo de transporte em diferentes pavimentos foi baseado em pesos diferentes, onde as pistas de asfalto recebem peso 1,0, as vias de cascalho têm peso 1,3 e as estradas sem pavimentação (terra) recebem peso 1,5, como pode ser visualizado na Tabela 3.

Tabela 3. Custo médio de transporte de madeira por CVC e tipo de pavimentação

Empresa	A	B	C	A	B	C
CVC	Bitrem			Tritrem		
Capacidade de carga (Mg)	37			48,9		
Tarifa (R\$.km ⁻¹)	0,20	0,20	0,27	0,24	0,24	0,32
Combustível (R\$.km ⁻¹)	0,20	0,20	0,19	0,24	0,24	0,22
Pedágio (R\$.km ⁻¹)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo de gestão (R\$.km ⁻¹)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Peso do custo em asfalto	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Peso do custo em cascalho	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
Peso do custo em terra	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
Custo frete (R\$.Mg ⁻¹) - Asfalto	0,43	0,43	0,47	0,51	0,51	0,57
Custo frete (R\$.Mg ⁻¹) - Cascalho	0,56	0,55	0,62	0,67	0,66	0,74
Custo frete (R\$.Mg ⁻¹) - Terra	0,64	0,64	0,71	0,77	0,77	0,85

Fonte: Dados fornecidos pela empresa proprietária da regional florestal.

Considerando que o bitrem possui dois compartimentos de carga, e que o tritrem possui três compartimentos de carga, para calcular o custo de transporte por quilômetro rodado, foi utilizada a Equação 1.

$$CF_{cvc} = CF * Mg \quad (1)$$

Onde o CF_{cvc} corresponde ao custo do frete por Composição Veicular de Carga (R\$.km.CVC⁻¹), o CF é o custo do frete por tonelada (R\$.Mg⁻¹) e o Mg é a quantidade de toneladas que a CVC transporta por vez (bitrem = 37 Mg; tritrem = 48,9 Mg).

Haja vista que o orçamento foi realizado em três empresas distintas, procedeu-se com a aplicação da Equação 2 para identificar o custo médio do frete por CVC.

$$CFM_{cvc} = \frac{CF_A + CF_B + CF_C}{n} \quad (2)$$

Onde o CFM_{cvc} corresponde ao custo médio do frete por Composição Veicular de Carga ($R\$.km.CVC^{-1}$), o CF_A é o custo do frete pela empresa A ($R\$.km.CVC^{-1}$), o CF_B é o custo do frete pela empresa B ($R\$.km.CVC^{-1}$), o CF_C é o custo do frete pela empresa C ($R\$.km.CVC^{-1}$) e o n é a quantidade de empresas que compuseram o orçamento (un.).

4.4.9 Determinação da melhor CVC

Por fim, a partir dos dados de custo de transporte de cada CVC, procedeu-se com a análise do custo total por rota, considerando a porcentagem de trechos de asfalto, cascalho e terra. Após a identificação dos valores, realizou-se uma análise comparativa entre a capacidade de carga por viagem e o custo operacional para delimitar em qual cenário é mais vantajoso se utilizar o bitrem ou o tritrem. Essa análise foi realizada a partir do custo por tonelada por km de cada CVC. Para essa análise também foi considerada a distância de cada rota, em função das restrições de cada CVC e a quantidade de viagens por CVC, considerando a quantidade de madeira que cada talhão dispõe (Tabela 4).

Tabela 4. Quantidade de madeira disponível por ponto de oferta

Talhão	Quantidade de madeira (Mg)
1	10.627
2	8.729
3	8.157
4	7.995
5	7.943
6	6.961
7	6.288
8	6.026
9	5.759
10	5.293

Fonte: Dados fornecidos pela empresa proprietária da regional florestal.

Para calcular a quantidade de viagens por CVC, foi aplicada a Equação 4.

$$QV = \frac{QM_{PO}}{CC_{CVC}} \quad (4)$$

Onde o QV é a quantidade de viagens, o QM_{PO} é a quantidade de madeira disponível no ponto de oferta e o CC_{CVC} é a capacidade de carga da CVC.

O resultado da quantidade de viagens foi, então, multiplicado pelo custo por viagem de cada CVC, para determinar o custo total para transportar toda a madeira de cada ponto de oferta pelas rotas determinadas (Equação 5).

$$CT_R = QV \times CR_n \quad (5)$$

Onde o CT_R é o custo total por rota, o QV é a quantidade de viagens e o CR_n é o custo de transporte por CVC na rota n .

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Definição da rota ótima de transporte - Bitrem

Estudos que determinam a rota de transporte ótima, com base na distância, tipos de pavimento e restrições de declividade, fornecem uma visualização técnica das possibilidades e, assim, auxiliam na tomada de decisões quanto à melhor CVC por cenário proposto. Neste sentido, a Figura 8, apresenta as rotas, a proporção de tipo de pavimento e a distância total, determinadas como ótimas pelo modelo de roteamento de transporte de madeira com bitrem, com direção ao Ponto de demanda 1 (fábrica 1).

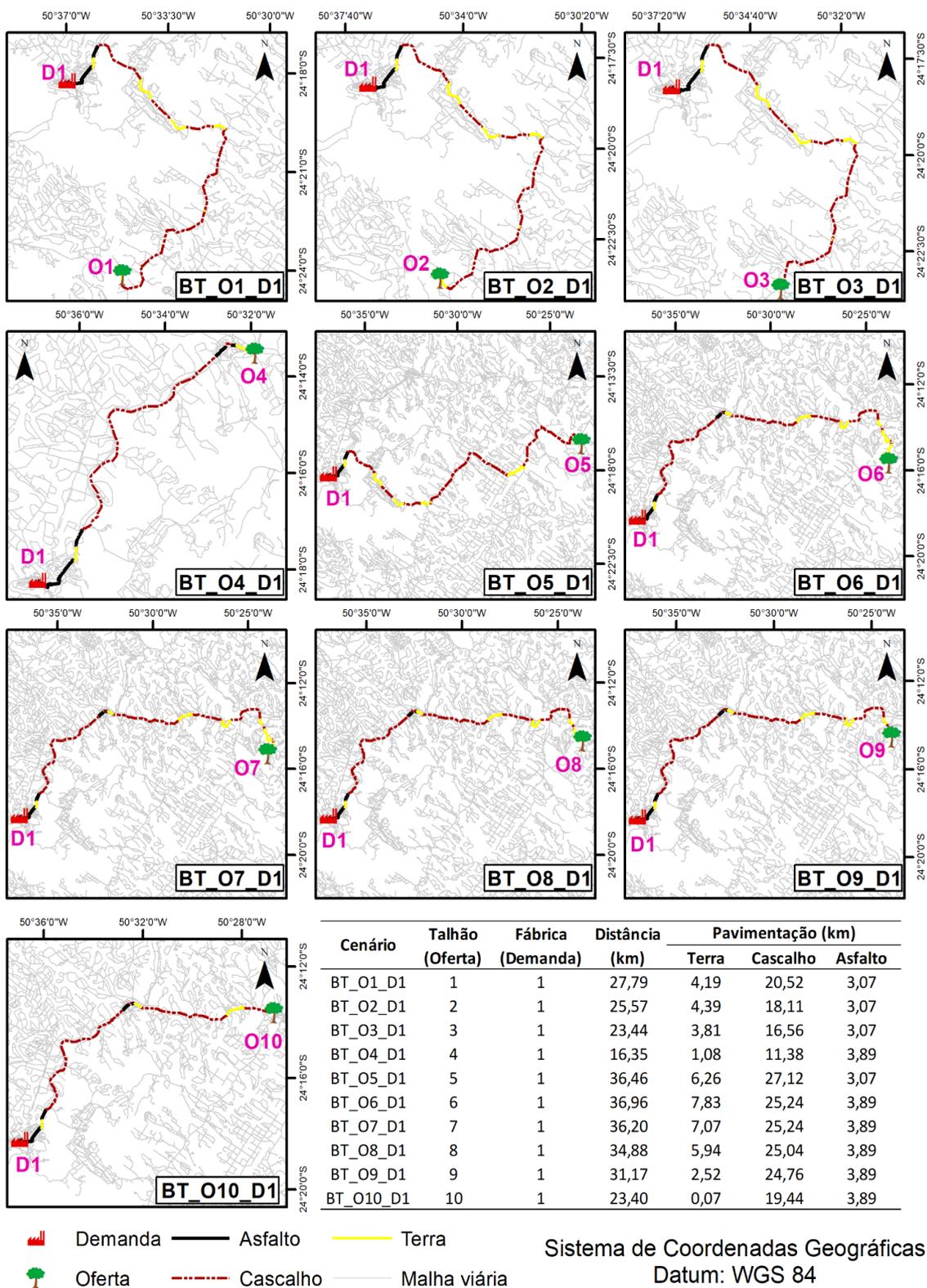


Figura 8. Rotas ótimas para transporte de madeira com bitrem, com direção ao Ponto de demanda 1 (fábrica 1).

Onde, BT_O_n_D1 corresponde ao transporte com bitrem (BT), partindo do ponto de oferta n (O_n) para o ponto de demanda 1 (D1).

Fonte: O autor (2023).

Na Figura 8, é possível perceber que a rota mais próxima foi a que transporta a madeira do ponto de oferta 4 até a demanda 1 (BT_O4_D1), sendo percorrido um total de 16,35 km, dos quais 1,08 km não têm pavimentação, 11,38 km são pavimentados com cascalho e 3,89 km são pavimentados com asfalto. Já o cenário 6 (BT_O6_D1), onde a madeira é transportada do talhão 4 para a demanda 1, é o que apresenta maior percurso, totalizando 36,96 km de via, subdivididos em 7,83 km de terra, 25,24 km de cascalho e 3,89 km de asfalto.

Em se tratando do transporte de madeira com bitrens com destino à demanda 2, é possível perceber na Figura 9 que, novamente, a rota mais próxima foi a que transporta a madeira partindo do ponto de oferta 4 (BT_O4_D2).

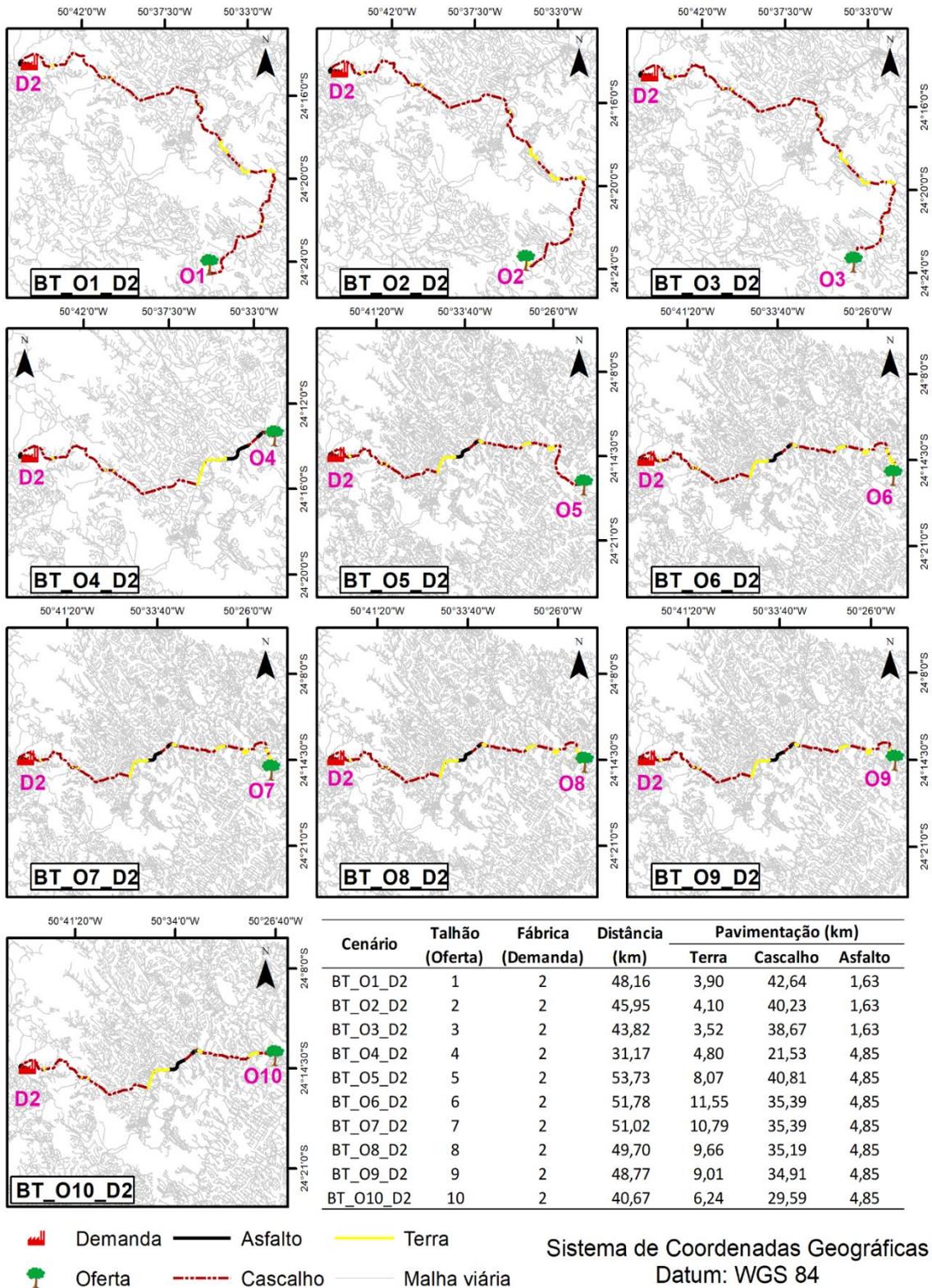


Figura 9. Rotas ótimas para transporte de madeira com bitrem, com direção ao Ponto de demanda 2 (fábrica 2).

Onde, BT_O_n_D2 corresponde ao transporte com bitrem (BT), partindo do ponto de oferta n (O_n) para o ponto de demanda 2 (D2).

Fonte: O autor (2023).

No entanto, fica evidenciado que a demanda 2 necessita de um maior percurso para ser alcançada pelos veículos que transportam madeira advinda dos talhões analisados, haja vista que, no cenário com menor distância a ser percorrida (BT_O4_D2), é preciso que os motoristas conduzam os veículos por 31,17 km, dos quais 4,80 km não têm pavimentação, 21,53 km são pavimentados com cascalho e 4,85 km são pavimentados com asfalto. Já a rota mais distante, nesse caso, é a que liga o ponto de oferta 5 à demanda 2 (BT_O5_D2), é o que apresenta maior percurso, totalizando 53,73 km de via, subdivididos em 8,07 km de terra, 40,81 km de cascalho e 4,85 km de asfalto.

5.2 Definição da rota ótima de transporte - Tritrem

As rotas delimitadas para o tritrem com destino ao ponto de demanda 1, apresentadas na Figura 10, deixam claro que a rota mais próxima, novamente, foi a que transporta a madeira do ponto de oferta 4 até a demanda 1 (TT_O4_D1), sendo percorrido um total de 16,44 km, dos quais 1,08 km não têm pavimentação, 11,38 km são pavimentados com cascalho e 3,97 km são pavimentados com asfalto.

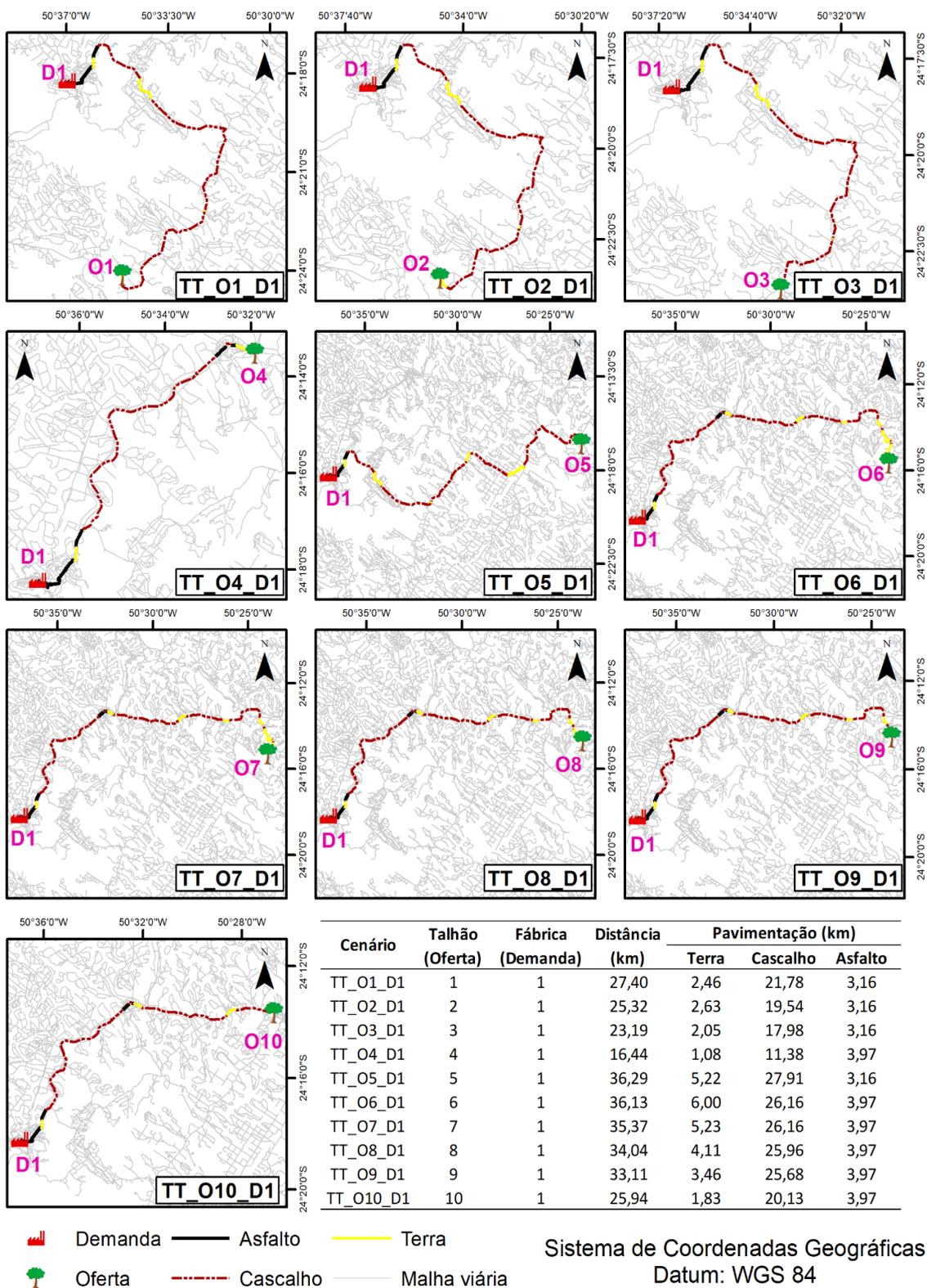


Figura 10. Rotas ótimas para transporte de madeira com tritrem, com direção ao Ponto de demanda 1 (fábrica 1).

Onde, TT_On_D1 corresponde ao transporte com tritrem (TT), partindo do ponto de oferta n (On) para o ponto de demanda 1 (D1).

Fonte: O autor (2023).

Analisando-se as variações nas rotas ótimas de transporte por bitrem e tritrem, com os mesmos pontos de oferta e o mesmo destino (demanda 1), apresentadas nas Figuras 8 e Figura 10, é possível perceber que alterações nas restrições não alteraram, significativamente, a distância a ser percorrida. Isso ocorreu em função da homogeneidade do relevo da área de estudo. Realizando-se uma análise no mapa de declividade, numa porção onde todos os pontos de oferta e de demanda e as rotas ótimas para cada cenário foram abrangidos, percebeu-se que cerca de 63% da área apresenta inclinação máxima de 15%, dos quais 46% são classificados, segundo a EMBRAPA (1999), como suave ondulado (3 a 8% de inclinação). Partindo-se do ponto que a única restrição distinta entre os cenários de transporte com bitrem e tritrem foi a declividade, os resultados encontrados são plausíveis.

A Figura 11, por sua vez, apresenta as rotas, a proporção de tipo de pavimento e a distância total, determinadas como ótimas pelo modelo de roteamento de transporte de madeira com tritrem, com direção ao ponto de demanda 2 (fábrica 2). Nessa Figura é possível perceber que a rota mais próxima, novamente, foi a que transporta a madeira do ponto de oferta 4 até a fábrica 1 (TT_O4_D2), sendo percorrido um total de 30,88 km, dos quais 4,55 km não têm pavimentação, 21,48 km são pavimentados com cascalho e 4,85 km são pavimentados com asfalto. Já o cenário 5 (TT_O5_D2), onde a madeira é transportada do talhão 2 para a demanda 2, é o que apresenta maior percurso, totalizando 52,52 km de via, subdivididos em 5,99 km de terra, 41,68 km de cascalho e 4,85 km de asfalto.

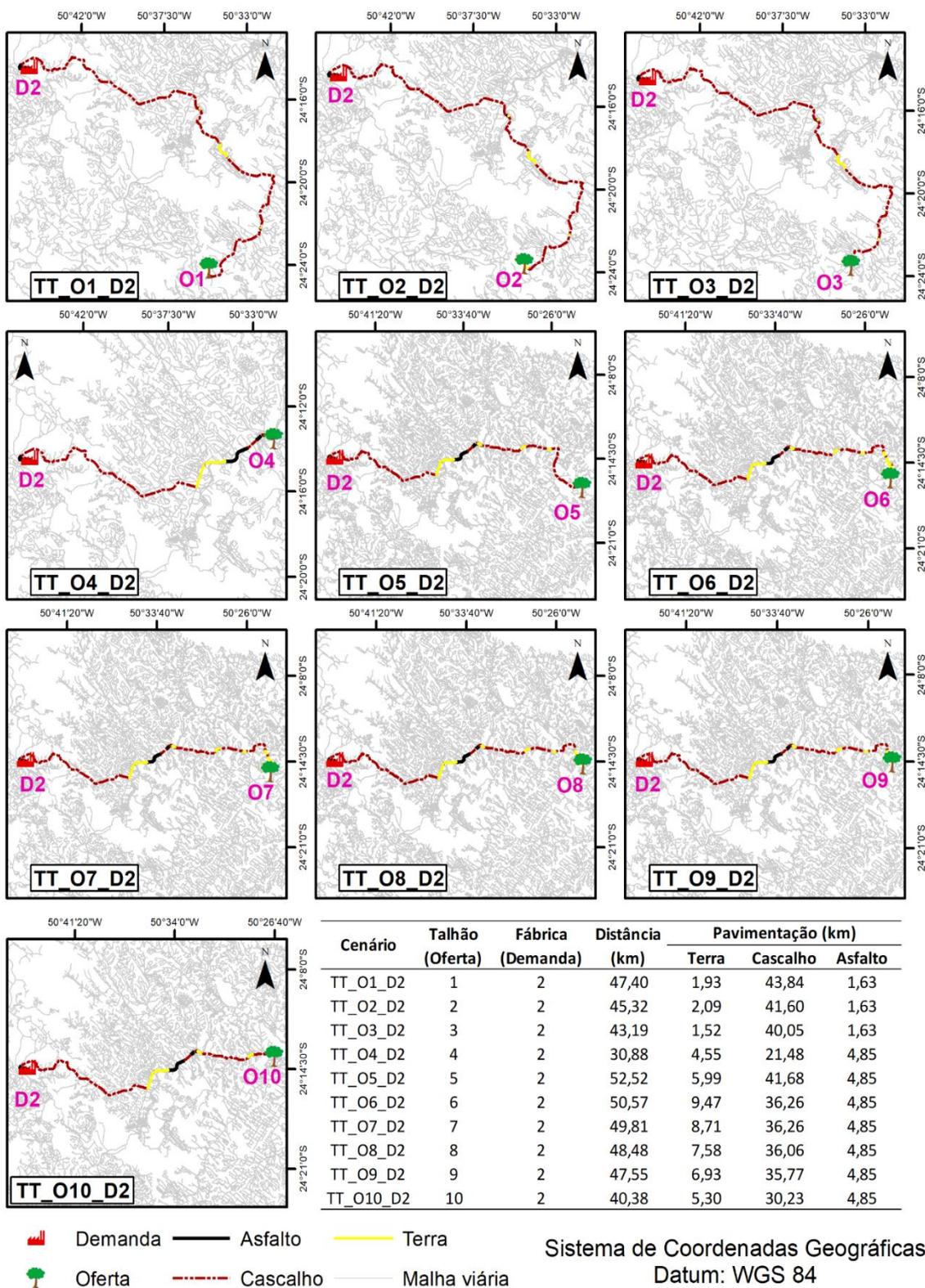


Figura 11. Rotas ótimas para transporte de madeira com tritrem, com direção ao Ponto de demanda 2 (fábrica 2).

Onde, TT_On_D2 corresponde ao transporte com tritrem (TT), partindo do ponto de oferta n (On) para o ponto de demanda 2 (D2).

Fonte: O autor (2023).

Novamente, as alterações nas restrições não alteraram, significativamente, a distância a ser percorrida pelos cenários apresentados nas Figuras 9 e Figura 11. Assim como explicado anteriormente, isso ocorreu em função da homogeneidade do relevo da área de estudo.

5.3 Análises de custo por rota de transporte e tipo de CVC

Apesar das variações de rota terem sido, consideravelmente, baixas, após a realização dos cálculos de determinação dos custos de transporte, foi possível perceber que em todos os cenários avaliados, o custo de transporte de madeira utilizando a CVC do tipo bitrem foi inferior ao transporte realizado com CVC do tipo tritrem (Tabela 6). Os resultados encontrados após a aplicação das funções de determinação dos custos de transporte por CVC mostraram que o bitrem possui um custo médio 20,29% menor que o tritrem, como pode ser visto na tabela 5.

Tabela 5. Análise de custos por quilometro do transporte florestal por CVC

Empresa	A	B	C	A	B	C
CVC	Bitrem			Tritrem		
CF _{CVC} (R\$.km ⁻¹) - Asfalto	15,85	15,73	17,54	25,14	24,95	27,81
CF _{CVC} (R\$.km ⁻¹) - Cascalho	20,61	20,45	22,80	32,69	32,44	36,16
CF _{CVC} (R\$.km ⁻¹) - Terra	23,78	23,60	26,31	37,71	37,43	41,72
CFM _{CVC} (R\$.km ⁻¹) - Asfalto	16,37			25,97		
CFM _{CVC} (R\$.km ⁻¹) - Cascalho	21,29			33,76		
CFM _{CVC} (R\$.km ⁻¹) - Terra	24,56			38,95		

Fonte: Adaptado dos dados fornecidos pela empresa proprietária da regional florestal.

Esse resultado está, diretamente, relacionado com os maiores custos variáveis (combustível, serviço e tarifas) que a CVC do tipo tritrem onera. Os autores Silva et al. (2007), ao avaliarem o custo de transporte de madeira com diferentes tipos de CVC, identificaram um custo de transporte por tritrem, superior ao transporte por bitrem. No entanto, os autores evidenciam que distâncias mais longas e maiores quantidades de carga a ser transportada podem resultar na redução dos custos do transporte por veículos com maior capacidade de carga.

A Tabela 6 mostra ainda que o custo de transporte em ambas as CVC são, consideravelmente, reduzido em estradas pavimentadas, o que evidencia a importância de se realizar estudos de viabilidade econômica da pavimentação das vias com vistas a diminuir os custos operacionais da empresa. O autor Malinovski (2010), explica em sua

pesquisa que a pavimentação das vias pode resultar em reduções significativas no custo de transporte e na viabilização do uso de veículos com maiores capacidades de carga.

Tabela 6. Análise de custos de transporte florestal por CVC, distância e tipo de pavimento da via.

Cenário	CVC	Ponto de Oferta	Ponto de Demanda	Distância (km)	Pavimentação			Custo total (R\$)	Custo relativo 1 (R\$.Mg ⁻¹)	Custo relativo 2 (R\$.Km ⁻¹)	Custo relativo 3 (R\$.Mg ⁻¹ .Km ⁻¹)
					Terra	Cascalho	Asfalto				
BT_O1_D1	Bitrem	O1	D1	27,79	4,19	20,52	3,07	590,07	15,95	21,24	0.57
BT_O2_D1	Bitrem	O2	D1	25,57	4,39	18,11	3,07	543,69	14,69	21,26	0.57
BT_O3_D1	Bitrem	O3	D1	23,44	3,81	16,56	3,07	496,42	13,42	21,18	0.57
BT_O4_D1	Bitrem	O4	D1	16,35	1,08	11,38	3,89	332,55	8,99	20,33	0.55
BT_O5_D1	Bitrem	O5	D1	36,46	6,26	27,12	3,07	781,54	21,12	21,44	0.58
BT_O6_D1	Bitrem	O6	D1	36,96	7,83	25,24	3,89	793,39	21,44	21,46	0.58
BT_O7_D1	Bitrem	O7	D1	36,20	7,07	25,24	3,89	774,68	20,94	21,40	0.58
BT_O8_D1	Bitrem	O8	D1	34,88	5,94	25,04	3,89	742,74	20,07	21,30	0.58
BT_O9_D1	Bitrem	O9	D1	31,17	2,52	24,76	3,89	652,64	17,64	20,94	0.57
BT_O10_D1	Bitrem	O10	D1	23,40	0,07	19,44	3,89	479,29	12,95	20,48	0.55
BT_O1_D2	Bitrem	O1	D2	48,16	3,90	42,64	1,63	1030,03	27,84	21,39	0.58
BT_O2_D2	Bitrem	O2	D2	45,95	4,10	40,23	1,63	983,64	26,58	21,40	0.58
BT_O3_D2	Bitrem	O3	D2	43,82	3,52	38,67	1,63	936,38	25,31	21,37	0.58
BT_O4_D2	Bitrem	O4	D2	31,17	4,80	21,53	4,85	655,49	17,72	21,03	0.57
BT_O5_D2	Bitrem	O5	D2	53,73	8,07	40,81	4,85	1146,42	30,98	21,34	0.58
BT_O6_D2	Bitrem	O6	D2	51,78	11,55	35,39	4,85	1116,32	30,17	21,56	0.58
BT_O7_D2	Bitrem	O7	D2	51,02	10,79	35,39	4,85	1097,61	29,67	21,51	0.58
BT_O8_D2	Bitrem	O8	D2	49,70	9,66	35,19	4,85	1065,67	28,80	21,44	0.58

BT_O9_D2	Bitrem	O9	D2	48,77	9,01	34,91	4,85	1043,74	28,21	21,40	0.58
BT_O10_D2	Bitrem	O10	D2	40,67	6,24	29,59	4,85	862,33	23,31	21,20	0.57
TT_O1_D1	Tritrem	O1	D1	27,40	2,46	21,78	3,16	970,99	13,12	35,44	0.68
TT_O2_D1	Tritrem	O2	D1	25,32	2,63	19,54	3,16	897,31	12,13	35,44	0.68
TT_O3_D1	Tritrem	O3	D1	23,19	2,05	17,98	3,16	817,60	11,05	35,26	0.68
TT_O4_D1	Tritrem	O4	D1	16,44	1,08	11,38	3,97	563,19	7,61	34,26	0.66
TT_O5_D1	Tritrem	O5	D1	36,29	5,22	27,91	3,16	1305,38	17,64	35,97	0.69
TT_O6_D1	Tritrem	O6	D1	36,13	6,00	26,16	3,97	1297,25	17,53	35,90	0.69
TT_O7_D1	Tritrem	O7	D1	35,37	5,23	26,16	3,97	1265,69	17,10	35,79	0.69
TT_O8_D1	Tritrem	O8	D1	34,04	4,11	25,96	3,97	1211,83	16,38	35,60	0.68
TT_O9_D1	Tritrem	O9	D1	33,11	3,46	25,68	3,97	1174,84	15,88	35,48	0.68
TT_O10_D1	Tritrem	O10	D1	25,94	1,83	20,13	3,97	908,22	12,27	35,02	0.67
TT_O1_D2	Tritrem	O1	D2	47,40	1,93	43,84	1,63	1698,77	22,96	35,84	0.69
TT_O2_D2	Tritrem	O2	D2	45,32	2,09	41,60	1,63	1625,09	21,96	35,86	0.69
TT_O3_D2	Tritrem	O3	D2	43,19	1,52	40,05	1,63	1545,38	20,88	35,78	0.69
TT_O4_D2	Tritrem	O4	D2	30,88	4,55	21,48	4,85	1093,61	14,78	35,41	0.68
TT_O5_D2	Tritrem	O5	D2	52,52	5,99	41,68	4,85	1878,43	25,38	35,76	0.69
TT_O6_D2	Tritrem	O6	D2	50,57	9,47	36,26	4,85	1827,67	24,70	36,14	0.69
TT_O7_D2	Tritrem	O7	D2	49,81	8,71	36,26	4,85	1796,11	24,27	36,06	0.69
TT_O8_D2	Tritrem	O8	D2	48,48	7,58	36,06	4,85	1742,25	23,54	35,93	0.69
TT_O9_D2	Tritrem	O9	D2	47,55	6,93	35,77	4,85	1705,26	23,04	35,86	0.69
TT_O10_D2	Tritrem	O10	D2	40,38	5,30	30,23	4,85	1438,64	19,44	35,63	0.69

O cenário com o maior custo de transporte, dentre os avaliados, foi o TT_O5_D2, com um custo total de R\$1.878,43 por viagem, o que corresponde a um valor relativo de R\$0,69 por tonelada transportada. O cenário de menor custo, por sua vez, foi o BT_O4_D1, com um custo total de R\$332,55 por viagem, o que corresponde a um valor relativo de R\$0,55 por tonelada transportada.

Ao analisar, conjuntamente, os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6, é possível fazer uma relação direta entre a média dos custos de transporte apresentadas pelas três empresas orçadas, e o custo por rota de transporte. Essa análise evidencia que, dado o fato que as rotas possuem, praticamente as mesmas distâncias, o custo do transporte com tritrem é, naturalmente mais elevado. Além da distância, a proporção de vias pavimentadas e não pavimentadas foi um fator determinante para esses resultados, haja vista que no cenário BT_O4_D1, apenas 1,08 km da pista era de terra, enquanto no cenário TT_O5_D2 esse valor foi de 5,99 km.

Porém, essa associação por si só não evidencia a real diferença entre os valores apresentados pelo transporte de cada CVC, sendo que foi delimitado, principalmente, pelas distâncias maiores ou menores das vias. Sendo assim, a análise do custo por tonelada por quilômetro rodado apresentado na Tabela 6, deixa esclarecido que, em todos os cenários de transporte com bitrem, para a fábrica 1, o custo relativo de transporte foi inferior que o transporte com tritrem. Nesse caso, o custo médio ($R\$.Mg^{-1}.Km^{-1}$) do tritrem nos apresenta um valor de R\$0,69 por tonelada por quilômetro transportando. Enquanto o bitrem nos apresenta um custo relativo R\$0,55 por tonelada transportada por quilômetro (20,29% menor).

O estudo dos custos de transporte por viagem, fornece um panorama sobre a viabilidade da utilização de CVC do tipo tritrem ou bitrem, no entanto, uma maneira de auxiliar nessa tomada de decisões é a análise da quantidade de viagens necessárias para transportar toda a madeira de um determinado talhão. Neste sentido, a Tabela 7, apresenta uma análise do custo total a ser gasto para transportar toda a madeira disponível em cada talhão.

Tabela 7. Análise de viabilidade de cada CVC por cenário analisado.

Ponto de oferta	Ponto de demanda	Madeira por talhão (Mg)	CVC (Mg)		Distância km ⁻¹		Nº de viagens		R\$.Mg ⁻¹ .km ⁻¹		R\$.viagem ⁻¹		Custo total (R\$)	
			Bitrem	Tritrem	Bitrem	Tritrem	Bitrem	Tritrem	Bitrem	Tritrem	Bitrem	Tritrem	Bitrem	Tritrem
1	1	10627.00	37	48.9	27.79	27.40	287	217	0.57	0.68	590.07	913.11	169,478.83	198,437.53
2	1	8729.00	37	48.9	25.57	25.32	236	179	0.57	0.68	543.69	843.82	128,266.15	150,628.12
3	1	8157.00	37	48.9	23.44	23.19	220	167	0.57	0.68	496.42	768.86	109,441.01	128,253.62
4	1	7995.00	37	48.9	16.35	16.44	216	163	0.55	0.66	332.55	529.62	71,858.77	86,590.86
5	1	7943.00	37	48.9	36.46	36.29	215	162	0.58	0.69	781.54	1,227.56	167,778.36	199,396.97
6	1	6961.00	37	48.9	36.96	36.13	188	142	0.58	0.69	793.39	1,219.92	149,264.70	173,657.08
7	1	6288.00	37	48.9	36.20	35.37	170	129	0.58	0.69	774.68	1,190.24	131,653.62	153,051.73
8	1	6026.00	37	48.9	34.88	34.04	163	123	0.58	0.68	742.74	1,139.59	120,966.65	140,432.89
9	1	5759.00	37	48.9	31.17	33.11	156	118	0.57	0.68	652.64	1,104.81	101,582.71	130,114.08
10	1	5293.00	37	48.9	23.40	25.94	143	108	0.55	0.67	479.29	854.08	68,564.30	92,446.47
1	2	10627.00	37	48.9	48.16	47.40	287	217	0.58	0.69	1,030.03	1,597.49	295,840.97	347,169.19
2	2	8729.00	37	48.9	45.95	45.32	236	179	0.58	0.69	983.64	1,528.21	232,059.80	272,796.06
3	2	8157.00	37	48.9	43.82	43.19	220	167	0.58	0.69	936.38	1,453.25	206,433.19	242,416.05
4	2	7995.00	37	48.9	31.17	30.88	216	163	0.57	0.68	655.49	1,028.41	141,638.11	168,142.13
5	2	7943.00	37	48.9	53.73	52.52	215	162	0.58	0.69	1,146.42	1,766.44	246,108.45	286,929.51
6	2	6961.00	37	48.9	51.78	50.57	188	142	0.58	0.69	1,116.32	1,718.71	210,019.42	244,661.26
7	2	6288.00	37	48.9	51.02	49.81	170	129	0.58	0.69	1,097.61	1,689.03	186,534.49	217,191.11
8	2	6026.00	37	48.9	49.70	48.48	163	123	0.58	0.69	1,065.67	1,638.38	173,560.82	201,899.80
9	2	5759.00	37	48.9	48.77	47.55	156	118	0.58	0.69	1,043.74	1,603.60	162,456.92	188,857.51
10	2	5293.00	37	48.9	40.67	40.38	143	108	0.57	0.69	862.33	1,352.87	123,360.27	146,436.57

Após realizar a análise do custo total necessário para transportar toda a madeira disponível em cada um dos pontos de oferta, utilizando as CVC's estudadas e as rotas ótimas de transporte, percebeu-se que, para a realidade da empresa sede do presente estudo, é, economicamente, inviável utilizar o tritrem para o transporte de madeira, sendo portanto, mais vantajoso utilizar bitrem nas operações logísticas dentro dos cenários avaliados. Essa consideração se dá pelo fato que em todos os cenários, o tritrem apresentou custo por quilometro por tonelada, superior ao bitrem.

No entanto, é importante evidenciar que não foram considerados os custos fixos e nem os indicativos técnicos de viabilidade desses CVC's para cada cenário. Estudos como o de Alves et al. (2013), Lopes, Vieira e Rodrigues (2016), por exemplo, consideram todos esses fatores em suas análises de viabilidade técnica e de custos do seu trabalho, tornando esta, a principal limitação da presente pesquisa. Porém, é evidente que a determinação de rotas ótimas, como foi realizado nessa pesquisa, é indispensável para qualquer planejamento logístico de uma empresa, fazendo com que essa análise seja a principal diferenciação do presente trabalho em relação às pesquisas mencionadas.

6. CONCLUSÕES

- A aplicação da análise de redes para determinar as rotas ótimas para o transporte de madeira por bitrens e tritrens, se mostrou importante para o planejamento logístico e operacional das empresas do ramo florestal, ao fornecer informações valiosas acerca da melhor rota em função das restrições de cada CVC;
- A partir da análise comparativa dos custos de transporte florestal entre veículos do tipo bitrem e tritrem, pode-se concluir que, para os cenários avaliados, o bitrem apresenta menores custos de transporte, o que o torna, economicamente, mais viável que o tritrem;
- Não é indicada a implantação de sistemas de transporte por tritrem, nos cenários apresentados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAY, A. E. et al. A GIS-based decision support system for determining the shortest and safest route to forest fires: A case study in Mediterranean Region of Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 3, p. 1391–1407, 2012.
- AKAY, A. E.; KAKOL, A. A. H. Forest Transportation Planning by using GIS-based Decision Support System. In: **FEC (5th Forest Engineering Conference: Propelling the Forest Value Chain)**. 1. ed. Gerardmer, France. v. 5p. 23–26.
- ALAYET, C.; LEHOUX, N.; LEBEL, L. Logistics approaches assessment to better coordinate a forest products supply chain. **Journal of Forest Economics**, v. 30, p. 13–24, 1 jan. 2018.
- ALBUQUERQUE, J. M. R. **Avaliação econômica de diferentes composições veiculares empregadas no transporte rodoviário de madeira: estudo de caso**. 2013. 53f. TCC (Bacharelado em engenharia Industrial Madeireira) — Itapeva, SP: Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, 2013.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, R. T. et al. Análise técnica e de custos do transporte de madeira com diferentes composições veiculares. **Revista Arvore**, v. 37, n. 5, p. 897–904, set. 2013.
- ANDRADE, V. C. L. DE; GAMA, R. D. C.; TERRA, D. L. C. V. Revisão sobre modelos volumétricos empregados em povoamentos florestais brasileiros. **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 1, p. 561, 16 abr. 2019.
- ARAGÃO, H. G.; PEREIRA, V. A.; DA SILVA, R. F. Free geotechnologies applied to basic sanitation management: a case study at the Empresa Baiana de Águas e Saneamento. **Revista de Gestao Social e Ambiental**, v. 16, n. 2, 2022.
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A. et al. Sistema Multi-Agente Para Planejamento De Atividades De Transporte Florestal. **Cerne**, v. 23, n. 3, p. 329–337, 1 jul. 2017.
- BARROS, T. D.; MANZONI, L. P. **Setor Florestal - Portal Embrapa**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/socioeconomia/florestas/setor-florestal>>. Acesso em: 11 fev. 2023.
- BLIŠŤAN, P.; KOVANIČ, Ľ.; KOVANIČOVÁ, M. The importance of Geographic Information Systems education at universities in the process of building a European knowledge-based society. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 195, p. 2458 – 2462, 2015.

BRASIL, D. **Caminhões e carretas: quais as diferenças e como escolher o melhor.** Disponível em: <<https://www.hivecloud.com.br/post/caminhoes-e-carretas/>>. Acesso em: 9 fev. 2023.

CAMPOS, J. R. A. **Densidade ótima de estradas aplicada ao transporte de toras curtas em florestas plantadas.** 2022. 85f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Jerônimo Monteiro, ES: Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, 2022.

CARLSSON, D.; RÖNNQVIST, M. Supply chain management in forestry - Case studies at Södra Cell AB. **European Journal of Operational Research**, v. 163, n. 3, p. 589–616, 16 jun. 2005.

CAVALHEIRO, F. N. et al. Análise de indicativos concordantes a eucaliptocultura e o setor florestal paranaense. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, p. e40011427656, 21 mar. 2022.

CNT. **Boletim Unificado - Outubro 2022.** Brasília, DF. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/boletins>>. Acesso em: 22 fev. 2023.

CORREIA, T. P. et al. Edaphic-climatic zoning of eucalyptus species in the Rio de Janeiro state, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 1, 2019.

COUTINHO, V. M. et al. Mapeamento das áreas plantadas com Eucalyptus spp. no estado do Paraná. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2, n. 1, p. 32, 19 abr. 2017.

DE MORAES, A. C. **Classificação de estradas florestais e determinação de Rotas de transporte utilizando Sistema de Informação Geográfica.** 2014. 66f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) — Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2014.

DE SOUSA, A. C.; SEVILLA-PAVÓN, A.; SEIZ-ORTIZ, R. Autonomy and ICT in Environmental Education. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 46, p. 1343–1347, 2012.

DONG, Y. Forests are the predominant terrestrial ecosystem of Earth. **African Journal of Wood Science and Forestry**, v. 9, n. 6, p. 001–002, 2021.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília, Serviço de Produção de Informação, 1999. 412p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapa de solos do Brasil.** Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_solos_5m_20201104>. Acesso em: 21 fev. 2023.

ESRI. **ArcGIS Network Analyst | Vehicle Routing Problem & Spatial Network Analysis.** Disponível em: <<https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-network-analyst/overview>>. Acesso em: 4 mar. 2021.

- FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020**Global Forest Resources Assessment 2020. Rome: FAO, 2020.
- FERNANDES, D. L. et al. Influence of wood stacking location on forest transport costs. **Floresta**, v. 50, n. 1, p. 1047–1052, 2020.
- FOMBUENA, A. Unmanned Aerial Vehicles and Spatial Thinking: Boarding Education With Geotechnology And Drones. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 5, n. 3, p. 8–18, 2017.
- FU, R. et al. Closed-loop supply chain network with interaction of forward and reverse logistics. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 737–752, 1 jul. 2021.
- HUANG, J. et al. An improved double-row rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation system increases land use efficiency by allowing intercropping with yam bean, common bean, soybean, peanut, and coffee: A 17-year case study on Hainan Island, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, 1 ago. 2020.
- IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2022**. Brasília: DF. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2023.
- KOTTEK, M. et al. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.
- LOPES, E. DA S.; VIEIRA, T. P.; RODRIGUES, C. K. Avaliação técnica e de custos do transporte rodoviário com diferentes espécies e sortimentos de madeira. **Floresta**, v. 46, n. 3, p. 297–305, 2016.
- MACHADO, C. C.; LOPES, E. DA S.; BIRRO, M. H. B. **Transporte Rodoviário Florestal**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2009. v. 1
- MACHADO, R. R. **Avaliação do desempenho logístico do transporte rodoviário de madeira utilizando rede de Petri**. 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2006.
- MALINOVSKI, R. A. **Modelo matemático para otimização dos custos operacionais de transporte de toras com base na qualidade de estradas**. 2010. 180f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) — Curitiba, PR: Universidade Federal do Paraná, 2010.
- MAN, Y. et al. Energy transition for the low-carbon pulp and paper industry in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 131, 1 out. 2020.
- MOKHIREV, A.; MEDVEDEV, S. **Assessment of road density in logging areas using geographical information systems**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. **Anais...**Institute of Physics Publishing, 30 jun. 2020.

NUNES, L. J. R.; CAUSER, T. P.; CIOLKOSZ, D. **Biomass for energy: A review on supply chain management models**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Elsevier Ltd, , 1 mar. 2020.

OLIVEIRA, D. DE. **Análise Operacional e Custos de Sistemas de Colheita de Madeira em Povoamentos de Eucalipto**. Irati, PR: [s.n.].

PASSADOR, M. M. et al. Influence of *Mycosphaerella* and *Teratosphaeria* leaf diseases on chemical composition of essential oils of *Eucalyptus globulus* and effect of these essential oils on ascospores germination. *Archives of Microbiology*, v. 203, n. 6, p. 3415–3423, 1 ago. 2021.

PRUDENTE, T. D. **Risco integrado de incêndio florestal em áreas de Cerrado: contribuições metodológicas**. 2016. 130f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2016.

RAMALHO, A. H. C. **Zoneamento de áreas potenciais para implantação de fomento florestal no estado do Espírito Santo por meio de lógica Fuzzy**. 2020. 63f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) — Jerônimo Monteiro - ES, Brasil: Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, 2020.

RAMALHO, A. H. C. et al. Fuzzy logic applied in the prospecting of suitable areas for the establishment of commercial forest plantations. *Canadian Journal of Forest Research*, v. 52, n. 7, p. 1042–1059, 2022.

RAMALHO, A. H. C. **Modelagem geotecnológica de predição, prevenção, detecção e combate a incêndios florestais**. 2022. 117f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) — Jerônimo Monteiro, ES: Universidade Federal do Espírito Santo - ES, 18 jul. 2022.

RIBEIRO, C. A. A. S. et al. **Otimização do traçado de trilhas para acesso a recursos florestais naturais**. 1. ed. Manaus, AM: EMBRAPA, 2017.

RICHARDS, K. R.; STOKES, C. **A Review of Forest Carbon Sequestration Cost Studies: A Dozen Years of Research**. [s.l: s.n.].

RÖNNQVIST, M. et al. Operations Research challenges in forestry: 33 open problems. *Annals of Operations Research*, v. 232, n. 1, p. 11–40, 17 set. 2015.

SANTOS, A. R. DOS et al. Geotechnology and landscape ecology applied to the selection of potential forest fragments for seed harvesting. *Journal of Environmental Management*, v. 183, p. 1050–1063, 2016.

SANTOS, T. W. DOS; PELISSARI, A. L.; SANQUETTA, C. R. Quantificação e distribuição espacial dos certificados florestais FSC no Brasil. *Agrarian Academy*, v. 4, n. 8, p. 228–239, 30 dez. 2017.

SILVA, M. L. DA99095069692541 et al. Cost and distance of reforestation wood transport for different types of trucks. **Árvore**, v. 31, n. 6, p. 1073–1079, 2007.

SILVA, F. et al. Padrão das estradas florestais e determinação de rotas utilizando sistema de informação geográfica. **Revista Arvore**, v. 40, n. 2, p. 329–335, 1 mar. 2016.

SILVEIRA, G. L. DA. **Monitoramento do consumo de combustível de veículos de transporte rodoviário de madeira utilizando computador de bordo**. 2003. 68f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) —Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa - UFV, 2003.

THE WORLD BANK. **Brazil's INDC Restoration and Reforestation Target Analysis of INDC Land-use Targets Federative Republic of Brazil**. Washington, DC: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.copyright.com/>>.

VALENÇA, D. V. D. C.; KRUGER, P. Analysis of management tools and data compilation in the planning and management of the der/pr road network. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, v. Ed. Especial, n. s/n, p. 1–19, 2022.