



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

Abordagens Heurísticas para a Definição de uma Malha Minimizada de Estradas Florestais

Guilherme Camacho Cadore

Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia - Universidade Federal do Paraná

Julio Eduardo Arce

Departamento de Ciências Florestais - Universidade Federal do Paraná

Cassius Tadeu Scarpin

Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia - Universidade Federal do Paraná

Resumo: O presente estudo teve como objetivo central definir uma rede minimizada de estradas florestais a ser obtida a partir da aplicação de duas abordagens heurísticas. Para tanto, os algoritmos *shortest-path* de Dijkstra e *minimum-spanning tree* de Prim foram utilizados para a minimização desta rede. Os dados utilizados nesse estudo são advindos da base de dados de informações geográficas de uma empresa de gestão de recursos florestais. Os dados consistem em trechos de estradas contidos na propriedade - representando o conjunto de arcos passíveis de serem selecionados para integrar a rede a ser definida. A base contém também dados acerca da localização dos talhões e do ponto de escoamento da produção, representados pelos nós a serem conectados. Os custos dos arcos foram definidos por suas extensões em quilômetros. A abordagem *shortest-path* selecionou um subconjunto de trechos de estradas formando uma rede mínima de 80,3 km de extensão. Já a abordagem *minimum-spanning tree* gerou uma rede cujo somatório dos trechos selecionados foi 68,1 km. O resultado encontrado com o *minimum-spanning tree* foi mais atrativo que a solução obtida pelo *shortest-path*, dado que houve a criação de uma malha de estradas 15.2% menor quando comparado à abordagem alternativa.

Palavras-chave: *shortest-path*, *minimum-spanning tree*, algoritmos de redes, malha viária florestal

Heuristic Approaches for Defining a Minimized Forest Road Network

Abstract: The central goal of this study was to define a minimized network of forest roads obtained through the application of two heuristic approaches. For this purpose, Dijkstra's *shortest-path* and Prim's *minimum-spanning tree* algorithms were used to minimize a road network. The data used in this study comes from the geographic information database of a forest resource management company. The data consists of road segments within the property, representing the set of arcs eligible to be selected for the designed network. The database also contains data on the location of the stands and the production outflow point, represented by nodes to be connected by the network. The arc costs were represented by their lengths in kilometers. The heuristics were able to connect all the target stands to the final node, such as to form a minimized network. The *shortest-path* approach selected a subset of road segments forming a minimal network of 80.3 km in length. On the other hand, the *minimum-spanning tree* approach generated a network whose total selected segments amounted to 68.1 km. The result found with the *minimum-spanning tree* heuristic was more attractive than the solution obtained by the *shortest-path*, as it created a road network 15.2% shorter.

Keywords: *shortest-path*, *minimum-spanning tree*, network algorithms, forest road network.

1 Introdução

As atividades relacionadas às estradas e à colheita florestal representam duas substanciais fontes de custo para a operação florestal, podendo inclusive comprometer a viabilidade e a rentabilidade de empreendimentos se as mesmas não forem adequadamente planejadas (NAFAJI *et al.*, 2008). A construção e a manutenção de uma rede de estradas são atividades fundamentais para o sucesso de projetos florestais industriais. A partir da rede estradas será possível garantir o acesso aos talhões, desde a fase de estabelecimento das plantações até momento da colheita, e é por onde se dará o fluxo de insumos e o escoamento da produção (MCDILL, 2014; BORGES *et al.*, 2014; MAJNOUNIAN *et al.* 2009; KIRBY *et al.*, 1986).

Por outro lado, a necessidade de garantia de acesso deve ser contrabalanceada em relação a restrições físicas, climáticas, ambientais e sociais relacionadas à construção e manutenção da rede de estradas (ABCFP; APEGBC, 2012; EPSTEIN *et al.*, 2007). Dessa forma, frequentemente o planejamento de uma rede que atenda a uma gama de objetivos se torna uma atividade onerosa e complexa. A partir dessa prerrogativa, a definição de uma rede de estradas deve ser realizada de forma eficiente com vistas a atender os objetivos da companhia e que respeitem as demais restrições relacionadas ao estabelecimento da malha viária (MCDILL, 2014).

Apesar da complexidade do planejamento de uma rede apropriada de estradas florestais, comumente tal atividade é realizada de forma empírica, e decisões são tomadas com base na experiência prática dos profissionais envolvidos sem a utilização de métodos analíticos apropriados para auxiliar na tomada de decisões. Por consequência, tais práticas podem, frequentemente, resultar em redes viárias não adequadamente definidas (EPSTEIN *et al.*, 2007; BREDSTRÖM *et al.*, 2005). O planejamento de uma rede eficiente de estradas é uma tarefa desafiadora, pois envolve a consideração de diversas variáveis, como fatores de produção, características do terreno, questões ambientais, além da ausência de especificações claras de restrições e a presença de objetivos conflitantes (BUONGIORNO; GILLES, 2003).

Além disso, a crescente pressão por práticas sustentáveis na gestão florestal torna ainda mais relevante a utilização de abordagens analíticas para o planejamento de redes viárias. A implementação de técnicas quantitativas não apenas promove a eficiência operacional, mas também contribui para a minimização dos impactos (econômicos, ambientais e sociais) associados à construção de estradas. Para um adequado processo de planejamento, é essencial avaliar múltiplas alternativas e adotar uma abordagem que otimize a definição da rede viária. Nesse contexto, a não utilização de algoritmos aplicados ao planejamento de estradas pode levar a decisões menos eficientes (SESSIONS *et al.*, 2007). A adoção de abordagens heurísticas, por via da utilização de algoritmos implementados computacionalmente, permite uma análise mais robusta das alternativas disponíveis e dos resultados obtidos, possibilitando que decisões sejam tomadas com base em critérios objetivos e não apenas de forma empírica e subjetiva.

Para definir uma rede de estradas florestais, é necessário que as seções de estrada conectem pontos específicos formando uma malha viária eficiente. Para conectar esses locais utilizando uma rede de custo mínimo — onde o custo pode ser expresso em termos físicos, monetários ou temporais, por exemplo — podem ser empregados os algoritmos de busca, tais quais *shortest-path* (SP) de Dijkstra e *minimum-spanning tree* (MST) de Prim. A heurística *shortest-path* busca conectar duas localidades com menor custo possível, enquanto a abordagem *minimum-spanning tree* tem como objetivo conectar um conjunto de nós de modo que o custo total dos arcos selecionados seja minimizado (BUONGIORNO; GILLES, 2003). Com a utilização desses algoritmos pode-se, de fato, defender decisões com base em critérios quantitativos.

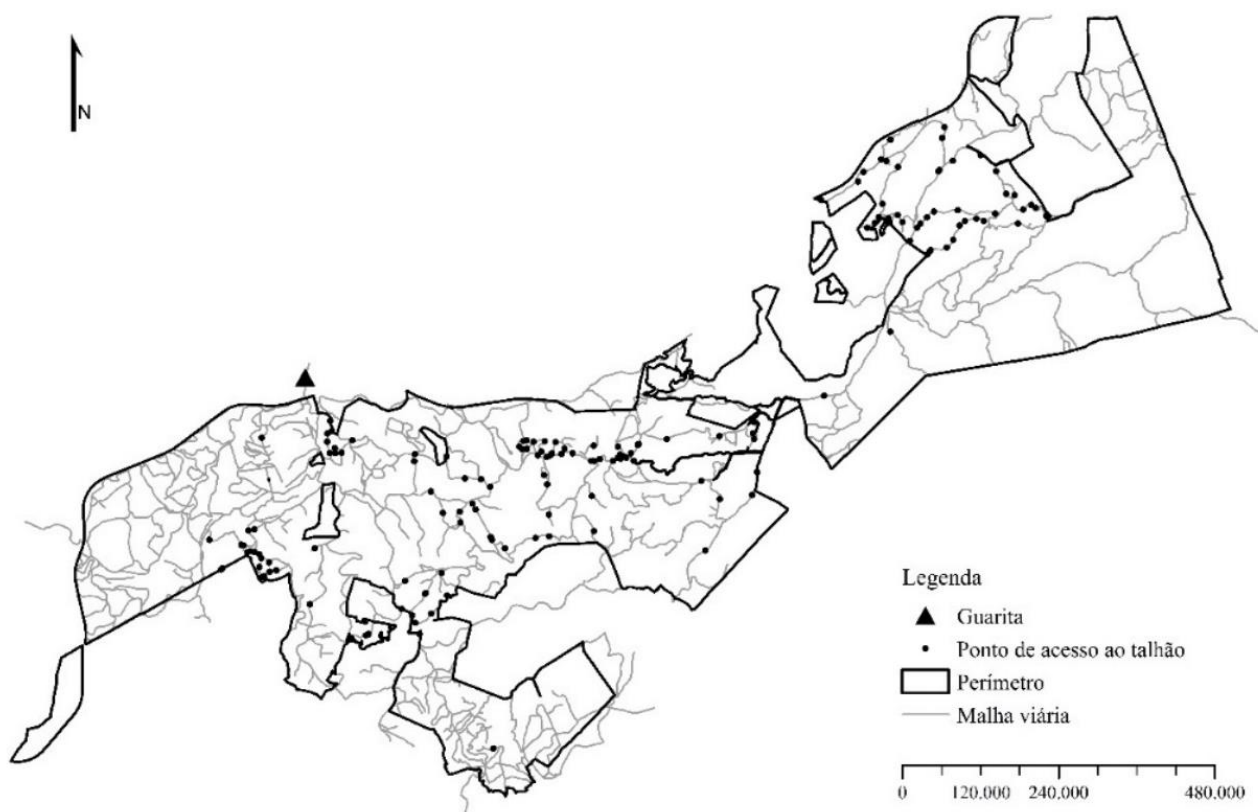
Sob esta perspectiva, torna-se evidente que heurísticas de redes se apresentam como alternativas interessantes para auxiliar no processo de planejamento de estradas florestais. Portanto, o objetivo desse trabalho foi aplicar as heurísticas *shortest-path* de Dijkstra e *minimum-spanning tree* de Prim para definir a malha mínima de estradas, a ser definida a partir de uma rede viária pré-existente.

2 Materiais e Métodos

2.1 Dados

Os dados utilizados neste estudo são de uma fazenda localizada no norte do estado do Paraná, região sul do Brasil. A área total da propriedade é de 5.529 hectares, onde foram selecionados 47 talhões de *Pinus* spp. para serem colhidos. O plano de colheita fora definido de forma prévia pela empresa gestora da área. Nesta situação específica, os talhões estão subdivididos em áreas menores não contíguas, ou seja, um talhão pode ser composto por uma ou mais subdivisões. Os talhões e suas subdivisões resultaram em 236 polígonos, e cada polígono foi representado por um nó na rede analisada. A localização de cada nó foi determinada pela interseção entre uma linha horizontal, que parte do centroide de cada polígono, e a malha viária da propriedade (Figura 1). A malha viária pré-existente possui uma extensão total de 283 km. Os dados utilizados no estudo foram extraídos de um Sistema de Informações Geográficas, que contém a localização espacial de cada talhão, as distâncias entre os trechos conectando os nós, e a distância até o ponto exclusivo de escoamento da produção da fazenda, denominado por “guarita”.

Figura 1 - Delimitação da área de estudo: malha viária pré-existente e nós a serem conectados



Para modelar a malha viária da fazenda assumiu-se a mesma como um grafo completo não-direcionado, uma vez que um mesmo segmento de estrada pode ser percorrido em dois sentidos diferentes e os polígonos estão conectados todos entre si e ao ponto de escoamento da produção.

No problema apresentado, os polígonos pertencentes a cada talhão são representados por um conjunto de nós, e os trechos de estrada correspondem aos arcos do grafo, cujos custos são dados por seus comprimentos em quilômetros. As estradas numa propriedade florestal são construídas adjacentes aos talhões, e a madeira deve ser transportada do interior de cada talhão até o ponto mais próximo da estrada. Os pontos de saída de madeira para cada polígono foram definidos tendo em conta esse objetivo. Dessa forma, cada polígono possui um ponto exclusivo de escoamento da produção, para o qual toda a madeira deverá ser arrastada e acumulada para então ser carregada em caminhões e seguir pelas estradas da propriedade. Para determinar esses pontos, foram traçadas linhas perpendiculares às estradas a partir do centroide de cada polígono até a interseção com a estrada mais próxima. O ponto de interseção entre essa linha e a estrada foi considerado um nó na rede — o ponto de acesso ao talhão — que deverá ser conectado aos demais e ao ponto de escoamento da produção. Toda a edição dos dados geográficos foi realizada com o *software* ESRI ArcMap® 10.4.1. O conjunto de dados para esse estudo consiste em uma matriz de distâncias entre nós e foi construído com a utilização da extensão *Network Analyst* do mesmo *software*.

2.2 Algoritmos de redes

O objetivo dos algoritmos utilizados nesse trabalho foi encontrar um subgrafo cujo somatório dos pesos (distâncias das estradas) fosse o menor possível. Vale ressaltar que esses algoritmos foram concebidos sob o conceito de heurísticas construtivas e, por tanto, não é possível garantir que um ótimo global seja encontrado. No entanto, essas heurísticas são capazes de encontrar respostas satisfatórias de forma rápida para problemas de maiores escalas com mais nós e arcos, quando comparadas a modelos matemáticos. Estes, por sua vez, podem vir a encontrar repostas ótimas em detrimentos de maiores tempos de processamento.

Seguindo a abordagem tradicional de planejamento, o plano de custo mínimo da rede de estradas foi determinado de maneira sequencial, ou seja, após a definição do agendamento ótimo dos talhões a serem colhidos (CANDIA, 2010; WEINTRAUB *et al.*, 1994). Desse modo, a seleção dos trechos de estradas pelas heurísticas apresentadas nesse trabalho visou conectar apenas os talhões a serem colhidos e que foram previamente definidos pelo modelo de agendamento de colheita, e não a totalidade dos talhões que compõem essa propriedade.

Para aplicação do algoritmo *shortest-path*, a extensão *Network Analyst* do *software* ESRI ArcMap® 10.4.1 foi utilizada. A fim de gerar as múltiplas rotas entre os nós da rede e o local de escoamento da produção, utilizou-se a função *Route* dessa extensão, que aplica o algoritmo *shortest-path* de Dijkstra.

Já para a aplicação do *minimum-spanning tree* foram utilizadas as extensões *Combinatorics*® e *Optimize*® de Jensen (2004) instaladas no *software* Microsoft Office Excel®. A extensão *Combinatorics* foi utilizada para formatar uma matriz de custos entre os nós da rede de modo que o programa possa lê-la. Já a extensão *Optimize* foi utilizada para encontrar a solução por meio do algoritmo *minimum-spanning tree* de Prim.

2.2.1 Algoritmo *shortest-path* de Dijkstra

O algoritmo *shortest-path* estabelece o caminho mínimo a ser percorrido entre um destino e uma origem (TAHA, 2008). Conforme as especificações de Hillier & Lieberman (2005), o algoritmo inicia a busca a partir de um nó-origem, identificando sucessivos caminhos até cada nó da rede em ordem ascendente de distâncias mais curtas até que se alcance o nó de destino.

Para resolver o problema proposto foram considerados múltiplos problemas *shortest-path*, cujo objetivo foi identificar a mínima distância entre cada nós da rede e nó de escoamento

da produção. Sendo assim, vale ressaltar que um caminho selecionado por uma solução pode pertencer a mais soluções individuais. Dessa forma, a solução final foi criada considerando a sobreposição dos caminhos gerados após a busca dos caminhos mais curtos de cada nó até o nó final. Trechos pertencentes a múltiplas soluções foram então sobrepostos e contabilizados uma única vez. O algoritmo *shortest-path* de Dijkstra se dá conforme descrito abaixo (TAHA, 2008).

Seja u a menor distância entre o nó de origem e o nó i , e sendo $d_{ij} \geq 0$, o comprimento do arco (i, j) . Então o algoritmo estabelece um rótulo para o nó j imediatamente posterior como: $[u_j, i] = [u_i + d_{ij}, i]$, $d_{ij} \geq 0$. Em que u_j representa a menor distância atual até o nó j e i indica qual é o nó predecessor ao nó j .

O rótulo para o nó inicial é $[0, -]$, indicando que a distância entre o nó inicial a si mesmo é igual a zero e não há nó predecessor. No algoritmo de Dijkstra são considerados dois tipos de rótulos - temporário e permanente. Um rótulo temporário indica que o nó ainda pode ter sua menor distância atualizada à medida que novos caminhos são considerados. O rótulo temporário é alterado quando um caminho mais curto é encontrado. Um rótulo permanente indica que a menor distância até esse nó foi determinada e não mudará. O algoritmo se dá conforme a seguir:

Etapa 0. O nó de origem é rotulado permanentemente como $[0, -]$. Defina $i = 1$;

Etapa 1. Enquanto houver nós não rotulados de forma permanente ou o destino seja alcançado:

Etapa a) Os rótulos temporários $[u_i + d_{ij}, i]$ para cada nó j que puder ser alcançado diretamente a partir de i são definidos, desde que j não esteja rotulado permanentemente. Caso o nó j esteja rotulado como $[u_j, k]$, passando por outro nó k , e $u_i + d_{ij} \leq u_j$, substitui-se $[u_j, k]$ por $[u_i + d_{ij}, i]$. Ou seja, para cada nó j que puder ser alcançado a partir de i , atualize o rótulo temporário da distância até j de forma que $u_j = \min(u_j, u_i + d_{ij})$ caso essa nova distância for menor que a anterior;

Etapa b) Se todos os nós estiverem rotulados permanentemente ou caso o nó destino tenha seu rótulo alterado para permanente, o algoritmo é interrompido. Caso contrário, seleciona-se o nó com rótulo temporário $[u_r, s]$, com distância u_r e predecessor s , possua a menor distância entre todos os nós com rótulos temporários. Em caso de empate, este é resolvido de forma arbitrária. Determine $i = r$ e repita a **Etapa 1**.

2.2.2 Algoritmo *minimum-spanning tree* de Prim

O objetivo desse algoritmo é selecionar um subconjunto de arcos de um grafo de modo a conectar os nós de interesse, com vistas a obter o menor somatório dos pesos entre os arcos escolhidos. O procedimento do *minimum-spanning tree* do algoritmo de Prim se dá conforme o seguinte (TAHA, 2008):

Seja $N = \{1, 2, \dots, n\}$ o conjunto de nós de um grafo e sendo C_k o conjunto de nós que foram conectados na iteração k e $\bar{C}_k$ o conjunto de nós que ainda deverão ser conectados após a iteração k :

Etapa 0. Determine $C_0 = \{\}$ e $\bar{C}_0 = N$;

Etapa 1. Defina $k = 1$ e inicie com um nó i arbitrariamente escolhido no conjunto não conectado $\bar{C}_0$, faça $C_1 = \{i\}$ e $\bar{C}_1 = N \setminus i$. Atualize $k = 2$;

Etapa k . Selecione um nó j^* tal que o arco escolhido seja o menor possível dentre as opções disponíveis no conjunto não conectado $\bar{C}_{k-1}$ e sua seleção não crie um ciclo. Conecte j^* ,

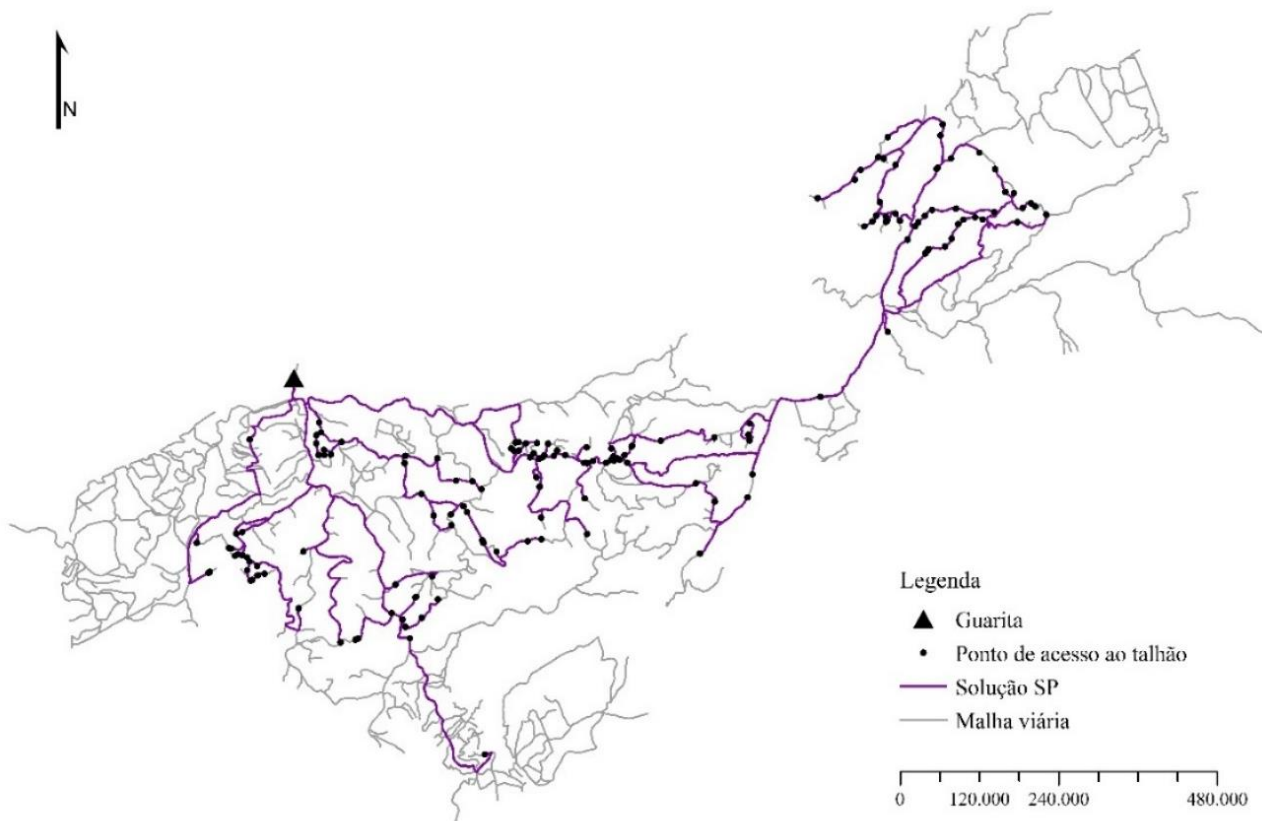
inclua-o em C_{k-1} e o remova de $\bar{C}_{k-1}$, ou seja: $C_k = C_{k-1} + \{j^*\}$, $\bar{C}_k = \bar{C}_{k-1} - \{j^*\}$. Repita k enquanto houver nós desconectados.

3 Resultados

A aplicação dessas heurísticas permitiu a geração de soluções que buscaram formar redes de estradas florestais minimizadas. Portanto, ambas as abordagens demonstraram eficácia na resolução do problema proposto. Mesmo que não seja possível garantir que uma solução ótima para esse problema seja encontrada, as duas heurísticas foram capazes de garantir a conexão entre os talhões de interesse e o ponto de escoamento da produção.

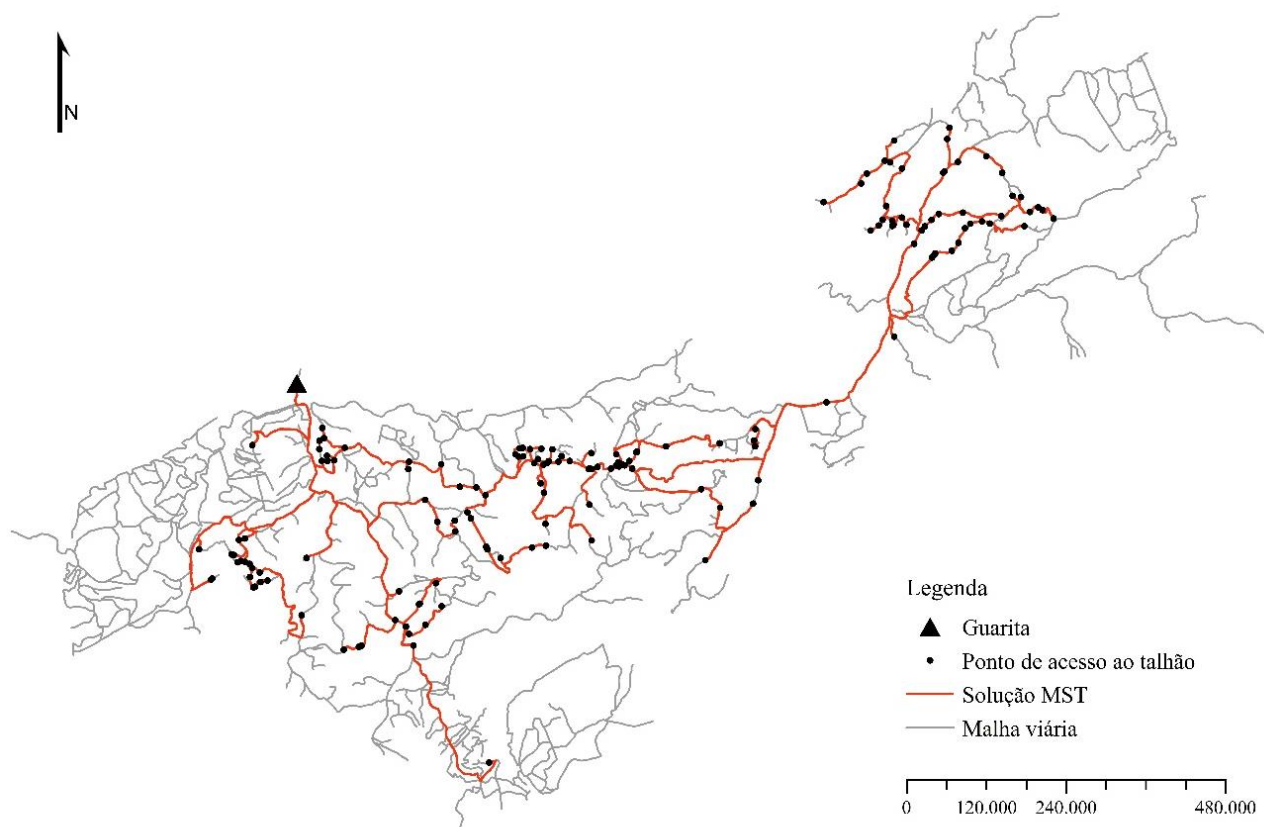
A resolução do problema pelo algoritmo de *shortest-path* selecionou um subconjunto de trechos a partir da malha viária existente formando uma rede de 80,3 km (Figura 2). Essa abordagem identificou caminhos eficientes entre cada polígono diretamente ao ponto de escoamento da produção. Esse algoritmo produziu uma malha de estradas que pode reduzir os custos de construção e manutenção de estradas, demonstrando sua eficácia para a definição de uma rede de estradas florestais minimizada.

Figura 2 - Rede de estradas minimizada encontrada pelo algoritmo *shortest-path*



O algoritmo *minimum-spanning tree* também foi capaz de encontrar uma rede minimizada de estradas. Essa abordagem visa conectar todos os pontos de acesso dos talhões ao ponto de escoamento com o menor custo total, levando em conta a extensão dos trechos selecionados e assim o fez, produzindo uma rede cujo somatório de pesos totaliza 68,1 km de extensão de estradas. Sendo assim, essa abordagem heurística também se demonstra como uma alternativa interessante para o planejamento de construção e manutenção de redes de estradas florestais (Figura 3).

Figura 3 - Rede de estradas minimizada encontrada pelo algoritmo *minimum-spanning tree*



A abordagem, *minimum-spanning tree* foi capaz de produzir uma malha 15,2% menor em relação à solução obtida pelo *shortest-path*, o que é desejável, uma vez que o objetivo central desse estudo é obter uma rede minimizada de estradas e comparar ambas as abordagens quanto a sua eficácia. O *shortest-path* prevê a utilização de 28,4% da malha de estradas pré-existente, enquanto o modelo *minimum-spanning tree* apresentou uma rede cuja utilização representa 24,1% da mesma.

4 Discussão

Embora ambos os algoritmos tenham sido capazes de definir uma rede minimizada de estradas, a abordagem utilizando o *minimum-spanning tree* foi a que apresentou a solução mais atrativa para o problema. O modelo propôs trechos alternativos a serem construídos em relação aos propostos pelo *shortest-path*. Isso deve-se à natureza dos distintos objetivos de cada heurística. O algoritmo *shortest-path* visa estabelecer o caminho mais curto entre dois nós apenas - um nó de origem e um nó final, enquanto o *minimum-spanning tree* vise criar uma rede que conecte todos os nós de interesse de forma a conectar todos os nós de interesse utilizando apenas os arcos de menor custo.

A solução via *shortest-path* é menos atrativa uma vez que uma maior extensão total de trechos é necessária para conectar todos os talhões até o ponto de escoamento da produção, pois cada nó de interesse é conectado ao nó final sem levar em consideração os trechos já selecionados anteriormente ao conectar outros talhões ao nó final, criando assim caminhos mínimos individuais e não um mínimo que leve em consideração os trechos já escolhidos anteriormente.

A abordagem *minimum-spanning tree* se demonstrou superior ao reduzir a malha de estradas em 15,2% em comparação com a solução obtida pelo *shortest-path*. Essa redução é especialmente desejável, considerando que o objetivo central deste estudo é desenvolver uma rede de estradas que minimize sua extensão total, e potencialmente outros aspectos

relacionados a mesma, tais como impacto ambiental e custos de construção e manutenção, por exemplo. Em contraste, a rede resultante do *shortest-path* foi 17,9% maior do que a rede obtida através do *minimum-spanning tree*, o que indica que o algoritmo de caminho mais curto tende a utilizar uma malha mais extensa quando se considera apenas as distâncias entre cada nó e o nó final individualmente.

Ao se considerar a distância entre todos os nós a serem conectados, em detrimento de distancias individuais, o potencial para se gerar soluções com redes menores é maior. Embora o a utilização do *minimum-spanning tree* não produza o caminho mais direto ao nó-alvo, como produzido com o *shortest-path*, essa abordagem produziu a rede menos custosa. O *shortest-path* prevê a utilização de 28,4% da malha de estradas pré-existente, enquanto o *minimum-spanning tree* apresentou uma rede que utiliza cerca 24,1% dessa malha. Essa diferença percentual não só reflete uma maior eficiência na utilização dos recursos disponíveis, mas também destaca a importância da utilização de heurísticas de busca no planejamento e gestão de infraestruturas viárias florestais.

A fim de aprimorar as soluções obtidas nesse trabalho, acredita-se que uma quantidade menor de pontos de acesso aos talhões poderia ser utilizada. A quantidade adequada de pontos de acesso aos talhões pode ser obtida a partir da avaliação das condições de acesso ao talhão, eficiência do baldeio de madeira, bem como topografia e a avaliação da necessidade de acesso a talhões adjacentes. A definição dos pontos de acesso deve ser ater ao mínimo de modo a não prejudicar a operações dentro do talhão e facilitando o escoamento da madeira. Preferencialmente, os pontos definindo devem atender dois ou mais polígonos adjacentes, em detrimento de múltiplos pontos próximos pertencentes a polígonos distintos.

Nesse trabalho não foram abordadas diferentes funções de custo para definir os pesos dos arcos. O custo de um arco pode ser representado em função de um conjunto de variáveis, tais quais comprimento, topografia e obras adicionais (BUONGIORNO; GILLES, 2003). Tais funções podem vir a influenciar nas soluções obtidas e, potencialmente, resultar em redes de estradas consideravelmente distintas das obtidas nesse estudo. Um exemplo disso seria, por exemplo, considerar o custo de construção e manutenção dos trechos ao invés do comprimento em quilômetros dos mesmos. Para trechos de mesmo comprimento, o custo monetário será superior para aquele que eventualmente exija a construção de alguma estrutura adicional, como uma ponte, ou exija manutenção mais frequente devido a questões de declividade, características do solo, clima, entre outras. Sendo assim, uma alternativa interessante para modelar a rede de estradas seria substituir o custo representado pela distância física por um custo expresso em função de tais variáveis.

Além disso, esse trabalho foi conduzido de acordo com a abordagem sequencial - definição dos talhões a serem colhidos seguida da definição de uma malha mínima de estradas. De acordo com Weintraub & Navon (1976), tal abordagem pode conduzir o estudo a uma situação problemática: a definição de uma rede de estradas não-ótima quando o lucro da operação for levado em consideração. Essas situações podem ocorrer devido às excessivas restrições impostas pelo conjunto de talhões selecionados no agendamento ótimo da colheita sem que haja integração dos custos relacionados às estradas. Kirby *et al.* (1986) e Candia (2010) demonstram aplicações mais flexíveis, a partir de modelos de programação linear inteira mista, nos quais o agendamento ótimo da colheita é resolvido levando em consideração custos de construção, manutenção e alteração do revestimento das estradas. De acordo com Borges *et al.* (2014), a solução ótima obtida por meio de tais modelos pode resultar em aumentos relativamente pequenos nos custos de colheita dada a redução do custo de estradas, o que pode não vir a ser identificado ao se adotar a abordagem sequencial de planejamento de operações.

5 Conclusões

Os resultados deste estudo evidenciam a superioridade do algoritmo *minimum-spanning tree* em relação ao *shortest-path* na definição de uma rede minimizada de estradas para o escoamento da produção florestal. A capacidade do modelo *minimum-spanning tree* de reduzir a malha de estradas em 15,2% representa não apenas uma economia considerável em termos de extensão de estradas, mas também um potencial de redução de custos operacionais e outros potenciais impactos. Ao priorizar a conexão eficiente entre todos os nós, essa heurística minimiza a utilização de recursos como um todo, ao contrário do *shortest-path*, que tende a criar conexões individuais menores, porém que resultam em uma rede mais dispendiosa e menos eficiente quando essas soluções são agregadas de modo a formar uma malha única de estradas.

Embora esse estudo não tenha explorado todos os fatores que podem influenciar a configuração da rede, os pontos levantados em relação ao custo de construção de estruturas adicionais e a quantidade ideal de pontos de acesso aos talhões se demonstram como oportunidades de aprimoramento desse estudo. A integração de diferentes variáveis de custo e a adoção de abordagens mais amplas, considerando a otimização conjunta do plano de colheita e planejamento de estradas por exemplo, podem ser direções interessantes a serem investigadas futuramente.

Em síntese, a utilização de abordagens heurísticas no planejamento e gestão de infraestruturas viárias em contextos florestais é de fundamental relevância. Este trabalho contribui para a compreensão de como diferentes abordagens podem impactar a eficiência das operações. As recomendações propostas visam não apenas aprimorar o processo de planejamento, mas também servir de base para estudos futuros que integrem diferentes aspectos relacionados aos custos da operação, assim como promover a utilização de abordagens heurísticas para a definição de redes de estradas florestais.

REFERÊNCIAS

- ABDI, E.; MAJNOUNIAN, B.; DARVISHSEFAT, A.; MASHAYEKHI, Z.; SESSIONS, J. A GIS-MCE based model for forest road planning. **Journal of Forest Science**. v. 55, n. 4, p. 171 - 176, 2009.
- ASSOCIATION OF BRITISH COLUMBIA FOREST PROFESSIONALS - ABCFP; ASSOCIATION OF PROFESSIONAL ENGINEERS AND GEOSCIENTISTS OF BRITISH COLUMBIA - APEGBC. **Guidelines for Professional Services in the Forest Sector – Forest Roads**. Burnaby. 2012.
- BORGES, J. G.; GARCIA-GONZALO, J.; MARQUES, S.; VALDEBENITO V. A.; MCDILL, M. E.; FALCÃO, A. O. Designing the industrial forest landscape in long term management planning. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. E. **The management of industrial forest plantations - theoretical foundations and applications**. New York: Springer, 2014, 544 p.
- BREDSTRÖM, D.; LUNDGREN, J. T.; RÖNNQVIST, M.; CARLSSON, D.; MASON, A. Supply Chain Optimization in the Pulp Mill Industry—IP Models, Column Generation and Novel Constraint Branches. **European Journal of Operational Research**. v. 156, n. 1, p. 2–22, 2004.
- BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. K. **Decision Methods for Forest Resource Management**. San Diego: Academic press, 2 ed. 2003, 458 p.
- CANDIA, V. A. V. **Integrating road building decisions into harvest scheduling models**. 90 p. Thesis (MSc in Forest Resources and Operations Research) - The Pennsylvania State University. 2010.
- EPSTEIN, E. R.; KARLSSON, J.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. Harvest operational models in forestry. In: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJØRNDAL, T.; EPSTEIN, E. R. **Handbook of Operations Research in Natural Resources**. New York: Springer, 2007, 608 p.

- GRAHAM, R. L.; HELL, P. On the history of the minimum spanning tree problem. **Annals of the History of Computing**. v. 7, n. 1, p. 43 - 57, 1985.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Operations Research**. New York: McGraw-Hill, 8 ed. 2005, 1061 p.
- JENSEN, P. A. **Operations Research Models and Methods**. Disponível em: <https://www.me.utexas.edu/~jensen/ORMM/computation/unit/combin/tree_span.html> Acesso em: 25 jun. 2017.
- KIRBY, M. W., HAGER, W. A. WONG, P. Simultaneous planning of wildland management and transportation alternatives. **Systems Analysis in Forestry and Forest Industries**. v. 21, p. 371-387, 1986.
- MCDILL, M. E. An overview of forest management planning and information management. In: BORGES, J. G.; DIAZ-BALTEIRO, L.; MCDILL, M. E.; RODRIGUEZ, L. C. E. **The management of industrial forest plantations - theoretical foundations and applications**. New York: Springer, 2014, 544 p.
- NAFAJI, A.; SOBHANI, H.; SAEED, A.; MAKHDOM, M.; MOHAJER, M. M. Planning and assessment of alternative forest roads and skidding networks. **Croatian Journal of Forest Engineering**. v. 29, n. 1, p. 63 - 73, 2008
- SESSIONS, J.; BETTINGER, P.; MURPHY, G. Heuristics in forest planning. In: WEINTRAUB, A.; ROMERO, C.; BJØRNDAL, T.; EPSTEIN, E. R. **Handbook of Operations Research in Natural Resources**. New York: Springer, 2007, 608 p.
- TAHA, H., A. **Pesquisa Operacional**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 8 ed. 2008, 366 p.
- WEINTRAUB, A.; GREB, J.; MAGENDZO, A.; MEACHAN, M.; KIRBY, M. A heuristic system to solve mixed integer forest planning models. **Operations Research**. v. 42, n. 6, p. 1010-1024, 1994.
- WEINTRAUB, A.; NAVON, D. A forest management planning model integrating silvicultural and transportation activities. **Management Sciences**. v. 22, n. 12, p. 1299–1309, 1976.