

Resumos Expandidos

Modelo Integrado para Colheita Florestal e Planejamento Viário

Integrated Model for Forest Harvesting and Road Planning

Carlos Eurico Galvão Rosa¹, Gustavo Valentim Loch², Cassius Tadeu Scarpin²

¹ Mestre em Matemática. Professor Assistente da Universidade Federal do Paraná - Campus Jandaia do Sul

² Doutor em Métodos Numéricos em Engenharia. Professor do Departamento de Administração Geral e Aplicada da Universidade Federal do Paraná

✉ cegalvao@ufpr.br, gustavo.valentim@ufpr.br, cassiusts@ufpr.br

Palavras-chave:

Modelo matemático;
Colheita florestal;
Rede viária.

Resumo

A correta modelagem de problemas florestais é crucial para a obtenção de soluções aplicáveis. O presente trabalho, parte de uma pesquisa mais ampla em otimização de colheita florestal, apresenta o processo de criação de um modelo integrado para colheita florestal e planejamento viário, utilizando Programação Linear Inteira Mista. O estudo foca na integração do agendamento e sequenciamento da colheita com a construção e manutenção de estradas de acesso. O objetivo central é aprimorar a eficiência da colheita florestal, visando a maximização do lucro, o cumprimento da demanda periódica e o respeito às restrições ambientais. Para isso, o modelo aborda a formação de blocos de colheita, a logística de viagens necessárias para cada talhão e a gestão da infraestrutura viária, incluindo os custos de abertura e manutenção das estradas. As restrições detalham o planejamento da colheita, a utilização da rede de estradas e o fluxo de veículos, culminando em uma função objetivo que busca a otimização desses processos. É enfatizado que a aplicabilidade das soluções matemáticas depende da acurácia da modelagem e da disponibilidade de dados de campo para garantir a viabilidade do modelo.

Keywords:

Mathematical model;
Forest harvesting;
Road network.

Abstract

The correct modeling of forestry problems is crucial for obtaining applicable solutions. This work, part of a broader research in forest harvest optimization, presents the process of creating an integrated model for forest harvesting and road planning using Mixed Integer Linear Programming. The study focuses on integrating harvest scheduling and sequencing with the construction and maintenance of access roads. The main objective is to improve forest harvesting efficiency, aiming to maximize profit, meet periodic demand, and comply with environmental constraints. To this end, the model addresses the formation of harvest blocks, the logistics of trips required for each plot, and the management of road infrastructure, including the costs of opening and maintaining roads. The constraints detail harvest planning, the use of the road network, and vehicle flow, culminating in an objective function that seeks to optimize these processes. It is emphasized that the applicability of mathematical solutions depends on the accuracy of modeling and the availability of field data to ensure the model's feasibility.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, com quase 60% do território coberto por florestas, tem um setor florestal significativo com contribuição substancial ao PIB e geração de empregos. Contudo, a produção enfrenta desafios de planejamento, em especial para atendimento da legislação do tema e restrições intrínsecas ao contexto florestal. O presente artigo é um recorte de uma tese acadêmica que propõe um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para otimizar o agendamento da colheita, as operações de abertura e manutenção das estradas de acesso. O objetivo geral da pesquisa da tese é aprimorar a colheita florestal, considerando as restrições de roteamento e transporte. Neste artigo, é apresentado o processo de construção do modelo PLIM integrado, com as considerações feitas para cada restrição elaborada.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Planejar, conforme Chiavenato (2021), é definir o que fazer e como fazer, traçar o destino e o caminho para lá chegar com correto uso dos recursos disponíveis. São produzidas estratégias tendo em vista os objetivos traçados e os meios de alcançá-los. Desde o século XIX, como indicado por Martell et al. (1998), o planejamento estratégico é fundamental na gestão florestal, evoluindo da maximização do volume de colheita para um modelo sustentável em um contexto de aumento tanto de demandas quanto de restrições como a escassez de áreas e a pressão de diversos grupos. A Pesquisa Operacional (PO) é crucial para auxiliar os planejadores a otimizar soluções e conciliar restrições.

O processo da colheita florestal consiste em agendar a colheita dos talhões, considerando a maximização do lucro, atendimento da demanda periódica e de restrições ambientais. Um de seus aspectos é a construção de estradas para deslocamento das equipes do corte e retirada do volume colhido. Na análise feita por D'Arace et al (2019), problemas de construção das rotas foram indicados como causa do aumento da probabilidade de perdas na colheita. Para a análise da abertura e manutenção de estradas optou-se, nesta pesquisa, pela abordagem do Problema de Roteamento em Arcos Capacitados (CARP). O conjunto de estradas forma um grafo, cujas arestas representam as possíveis estradas entre os talhões, com demanda de abertura e manutenção prévia antes do uso. A mesma abordagem é utilizada em situações semelhantes, como limpeza de neve em ruas e manutenção de estradas de ferro, como mencionado por Batista et al (2019). O modelo aqui apresentado se baseia no modelo de agendamento de colheita florestal proposto por Correa et al (2019) e no de roteamento apresentado por Batista et al (2019).

2.1 Análise do problema

Nesta análise são detalhadas as características do problema que conduzem à modelagem obtida. O objetivo principal é fazer a colheita dos talhões e transportar a carga para um local do empreendimento como um sumidouro não necessariamente único, visando atender à demanda de cada período, seguindo restrições de distância e maximizando o lucro. São levantados os seguintes aspectos numerados abaixo:

- 1) Em cada período deverão ser colhidos talhões para atender à demanda, proibindo a repetição de um talhão em mais de um período do Horizonte de Planejamento (HP). A idade do talhão deve ser considerada para a colheita, evitando talhões abaixo de uma idade mínima. O atendimento à demanda leva em conta um parâmetro de tolerância.
- 2) Serão formados blocos de colheitas com as restrições abaixo:
 - a) Não serão colhidos talhões adjacentes nem no mesmo período ou em períodos consecutivos;
 - b) Talhões em um raio de distância Δ_b podem ser colhidos no mesmo período e bloco de colheita, desde que não sejam adjacentes;

- c) Talhões em um raio de distância Δ_a podem ser colhidos no mesmo período e blocos distintos, desde que não sejam adjacentes;
 - d) Talhões dentro de um raio de distância Δ_c podem ser colhidos em períodos consecutivos, desde que não sejam adjacentes.
- 3) Cada talhão demanda uma quantidade de viagens para atendimento, sendo necessárias estradas que conectam os pontos de carregamento ao sumidouro para estas viagens.
- 4) Estradas utilizadas em um período específico precisam apenas de manutenção para serem utilizadas em um certo intervalo de tempo, necessitando de uma reabertura para falta de uso além deste intervalo
- 5) Para cada talhão é selecionado um ponto do grafo para carregamento. Com isso, cada ponto do grafo terá:
- a) Um volume colhido em algum dos talhões a ele conectados, que será carregado neste local;
 - b) Um volume carregado em outros pontos, mas que foi transportado por estradas que passam naquele ponto;
 - c) Não sendo sumidouro, todo volume do ponto do grafo precisa ser movido para outro ponto no mesmo período.

2.2 Modelagem do problema

Seguindo os aspectos acima elencados, são elaboradas as restrições do modelo. O primeiro ponto, relacionado à colheita e demanda, indica a necessidade de uma variável ligada à colheita de um talhão t , no período p e bloco b . Assim, sendo F o conjunto de talhões, P o conjunto de períodos do HP e B o conjunto de blocos de colheita, pode-se definir a variável binária x_{tpb} sendo 1 caso o talhão $t \in F$ seja colhido em $p \in HP$ e $b \in B$, e 0 caso contrário. São necessários ψ_{tsp} que indica o volume do sortimento $s \in S$ colhido no talhão t no período p ; v_{tsp} o valor líquido do volume ψ_{tsp} e η_t a idade mínima de colheita do talhão t , sendo n_t a idade do talhão no início do HP.

Para algumas situações é interessante considerar um período inicial denotado como $p = 0$ referente a ações anteriores à colheita efetiva, como indicação de estradas pré-existentes, ou indicar talhões que não são colhidos em nenhum período próprio de colheita do HP. Para diferenciar, denota-se HP^* o conjunto de períodos excluindo-se o $p = 0$. Definida uma demanda d_{sp} para todo $p \in HP^*$, são estabelecidas as seguintes restrições:

$$\begin{aligned} \sum_p \sum_b x_{tpb} &\leq 1, \forall t \in F & (1) \\ \sum_p \sum_b \psi_{tsp} x_{tpb} &\geq (1 - \lambda) d_{sp}, \forall s \in S, \forall p \in HP^* & (2) \\ \sum_p \sum_b \psi_{tsp} x_{tpb} &\leq (1 + \lambda) d_{sp}, \forall s \in S, \forall p \in HP^* & (3) \\ (n_t + p - 1) \sum_b x_{tpb} &\geq \eta_t \sum_b x_{tpb}, \forall t \in F, \forall p \in HP^* & (4) \end{aligned}$$

Em relação ao segundo ponto, é preciso conhecer um conjunto F_{adj} de pares de talhões adjacentes e os valores δ_{tr} das distâncias entre os talhões t e r distintos. Para indicação da formação dos blocos, é proposta uma variável binária β_{bp} , indicando se o bloco $b \in B$ foi aberto no período $p \in HP^*$. É obrigatório que um bloco inicial de colheita seja aberto por período.

$$\beta_{0p} = 1 \quad (5)$$

Tendo um bloco aberto, devem ser selecionados os talhões que o comporão, de acordo com as distâncias entre talhões. Inicialmente são modeladas as proibições de colheitas nos talhões adjacentes, seja no mesmo período ou em períodos consecutivos

$$\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{rpb} \leq 1, \forall p \in HP^*, \forall (t, r) \in F_{adj} \quad (6)$$

$$\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{r(p+1)b} \leq 1, \forall p \in HP^*, \forall (t, r) \in F_{adj} \quad (7)$$

A colheita dentro de um mesmo período e um mesmo bloco, respeitando o raio Δ_b é representada por

$$\delta_{tr}(x_{tpb} + x_{rpb} - 1) \leq \Delta_b, \forall t, r \in F, \forall p \in HP^*, \forall b \in B \quad (8)$$

A necessidade de criação de novos blocos é dada pelo atendimento da demanda por blocos previamente abertos. Dado um bloco $b \neq 0$, o volume colhido nos blocos $h \leq b$ é dado por $Y_{bsp} = \sum_{h=0}^{b-1} \psi_{tsp} x_{tpb}$. Caso $Y_{bsp} \geq (1 - \delta)d_{sp}$, a restrição 2 será contemplada, dispensando a criação do novo bloco.

A comparação da demanda que falta ser atendida $(1 + \lambda)d_{sp} - Y_{bsp}$ com o que se prevê de limite máximo da demanda $(1 + \lambda)d_{sp}$ fornece um critério para avaliação de criação do novo bloco. Dado um parâmetro $\sigma \in [0, 1]$ há interesse que o bloco seja aberto caso $\frac{(1+\lambda)d_{sp} - Y_{bsp}}{(1+\lambda)d_{sp}} \geq \sigma$, não sendo aberto se esta razão for inferior a σ . Manipulando esta inequação, pode-se escrever

$$\begin{aligned} (1 + \lambda)d_{sp} - Y_{bsp} &\geq \sigma(1 + \lambda)d_{sp} \Rightarrow (1 + \lambda)d_{sp} - \sigma(1 + \lambda)d_{sp} \geq Y_{bsp} \\ &\Rightarrow (1 - \sigma)(1 + \lambda)d_{sp} \geq Y_{bsp} \end{aligned}$$

Em outras palavras, se a quantidade colhida ainda estiver abaixo de $1 - \sigma$ do limite máximo da demanda, cria-se um bloco. E a definição de σ pode ser relacionada ao parâmetro λ da demanda, pois se $(1 - \sigma)(1 + \lambda) \geq (1 - \lambda)$ a restrição 2 acaba atendida antes da avaliação pela abertura de um novo bloco. Assim, sugere-se que σ atenda a $(1 - \sigma)(1 + \lambda) < (1 - \lambda)$ que, manipulando fica:

$$\begin{aligned} (1 - \sigma)(1 + \lambda) &< (1 - \lambda) \Rightarrow (1 + \lambda) - \sigma(1 + \lambda) < (1 - \lambda) \\ \Rightarrow (1 + \lambda) - (1 - \lambda) &< \sigma(1 + \lambda) \Rightarrow 2\lambda < \sigma(1 + \lambda) \therefore \frac{2\lambda}{1 + \lambda} < \sigma \end{aligned}$$

Ao incluir a variável β_{bp} como multiplicador do parâmetro σ , se obtêm $(1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp}$ que fica inalterada para $\beta_{bp} = 1$ e $(1 + \lambda)d_{sp}$ para $\beta = 0$. Naturalmente são válidas as desigualdades $(1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp} \leq (1 - \sigma)(1 + \lambda)d_{sp} \leq (1 + \lambda)d_{sp}$ pelos possíveis valores de β_{bp} e σ usados. Posicionando Y_{bsp} nestas desigualdades, inicialmente não faz sentido considerar $(1 + \lambda)d_{sp} < Y_{bsp}$, pois a restrição 3 seria violada. Com isso, é possível que: $(1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp} \leq Y_{bsp} \leq (1 + \lambda)d_{sp}$ ou $Y_{bsp} \leq (1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp} \leq (1 + \lambda)d_{sp}$. No primeiro caso, o volume Y_{bsp} supera o percentual definido para a criação do bloco, sendo válida apenas para $\beta_{bp} = 0$. Já o segundo é válido tanto para $\beta_{bp} = 0$, caso que o volume anterior dispensa a abertura do novo bloco, quanto $\beta_{bp} = 1$ indicando a necessidade desta abertura. Feito isso, utilizando o significado inicial de Y_{bsp} , estipula-se a restrição

$$\sum_{h=0}^{b-1} \psi_{tsp} x_{tpb} \leq (1 - \sigma\beta_{bp})(1 + \lambda)d_{sp} \quad (9)$$

A relação entre a variável β_{bp} e as variáveis x_{tpb} dos talhões no mesmo período é dada pela área colhida, sendo $\overline{A_p}$ e $\underline{A_p}$ respectivamente as áreas máximas e mínimas do período p e

$$\sum_t a_t x_{tpb} \leq \overline{A_p} \beta_{bp} \quad (10)$$

$$\sum_t a_t x_{tpb} \geq \underline{A_p} \beta_{bp} \quad (11)$$

Com estas restrições, as áreas colhidas nos blocos abertos estão dentro dos limites de área mínima e máxima, sendo obrigatoriamente nula a área colhida em bloco não aberto.

Passando para a colheita em um mesmo período, mas em blocos distintos dentro do raio Δ_a tem-se a restrição

$$\delta_{tr}(x_{tpb} + x_{rph} - 1) \leq \Delta_a, \forall t, r \in F, p \in HP^*, b, h \in B, b \neq h \quad (12)$$

A colheita em períodos consecutivos fica expressa por

$$\delta_{tr}(\sum_b x_{tpb} + \sum_b x_{r(p+1)b} - 1) \leq \Delta_c, \forall t, r \in F, 1 \leq p \leq HP - 1 \quad (13)$$

Este último grupo de inequações difere dos outros envolvendo Δ pelo somatório dos blocos pois períodos distintos tem blocos distintos, não fazendo sentido multiplicar as restrições para considerar cada combinação de blocos. Pela primeira restrição, cada somatório vale, no máximo, 1.

Seguindo ao terceiro ponto, cada talhão precisa de uma quantidade ε_{tsp} de viagens para ser atendido, dependente apenas de dados já conhecidos, como ψ_{tsp} , e a capacidade da frota q , visto que se considera uma frota homogênea nesta modelagem. Já para a abertura e manutenção de estradas, são estabelecidos: N conjunto de todos os nós do grafo, sendo i e j índices associados aos nós, e ; E conjunto de todas as estradas, sendo denotadas por e_{ij} , indicando os nós extremos de cada aresta, sendo que esta representação guarda o sentido de uso da estrada: de i para j .

Em termos práticos, as estradas são divisas entre talhões vizinhos e os nós são esquinas e cruzamentos. Com isso, faz sentido pensar em: N_t conjunto dos nós que formam o talhão t ; E_t conjunto das estradas que formam o talhão t ; E_0 conjunto de estradas pré-existentes e; E_i conjunto de estradas que tem o nó i como uma de suas extremidades.

Especificamente sobre os nós, o conjunto N pode ser dividido em três partes distintas entre si: N_0 conjunto dos nós que são origem de estradas e, para os quais não deve ser direcionado fluxo de carga; N_S conjunto dos sumidouros, ou ainda nós que são saídas de estradas, dos quais não parte viagem; N_F conjunto dos nós de fluxo sendo essencialmente $(N_0 \cup N_S)^C$, ou seja, composto por nós que não são nem origem nem saída.

Feitas estas considerações, podem ser expressas as variáveis binárias w_{ijp} que será 1 se e_{ij} foi aberta no período p , e; z_{ijp} que será 1 se e_{ij} recebeu manutenção no período p . Acompanham estas variáveis os coeficientes ω_{ijp} e ζ_{ijp} respectivamente os custos de abertura e manutenção de e_{ij} em p . A obtenção destes pode levar em conta um custo fixo de operação mais um custo variável pelo comprimento de e_{ij} , facilmente sendo calculado antes da execução do modelo. Também se estabelece uma variável inteira y_{ijp} para contabilizar viagens que passam por e_{ij} em p . Seu coeficiente é o custo de cada viagem feita por e_{ij} , representado por φ_{ijp} e dado pelo produto do custo da viagem por unidade de distância no período p vezes o comprimento de e_{ij} .

As estradas pré-existentes, para serem bem consideradas na solução, são representadas por uma abertura no período zero, sendo

$$w_{ij0} = 1, \forall e_{ij} \in E_0 \quad (14)$$

As estradas não são utilizadas no período inicial, devendo receber manutenção apenas quando for usada em efetiva colheita. Desse modo, considera-se que nenhuma estrada deve ser mantida em $p = 0$.

$$z_{ij0} = 0, \forall i, j \in N \quad (15)$$

Importante ressaltar que, para não desperdiçar gastos, considera-se que tanto uma estrada aberta no período p quanto uma estrada mantida no período p são adequadas para o tráfego. Portanto, não é operacionalmente coerente que um mesmo trecho seja simultaneamente aberto e mantido no mesmo período. Isso é expresso por

$$w_{ijp} + z_{ijp} \leq 1, \forall e_{ij} \in E, p \in HP^* \quad (16)$$

Também não faz sentido fazer manutenção de uma estrada que se considera fechada. Como uma estrada sem uso pode ser considerada “fechada” pelo passar do tempo, é preciso estipular uma quantidade de períodos e formar o conjunto P_p com essa determinada quantia de períodos anteriores a p . Assim, uma estrada só pode ser mantida no período p se ela já tiver sido aberta ou mantida em um dos períodos de P_p .

$$z_{ijp} \leq \sum_{p' \in P_p} (w_{ijp'} + z_{ijp'}), \forall e_{ij} \in E, p \in HP^* \quad (17)$$

Para unir a avaliação da disponibilidade de uso da estrada com a quantidade de viagens que nela podem passar, estipula-se V_{ijp} como o limite de viagens em e_{ij} no período p . Esse limitante deve ser compreendido dentro do contexto que se busca a solução e pode ser, por exemplo, a capacidade da estrada e_{ij} no período p ; a dimensão da frota disponível no período p ou o total de viagens contratadas para serem realizadas no período p . Isto posto, é possível limitar o valor da variável y_{ijp} forçando $y_{ijp} = 0$ se a estrada não tiver sido mantida ou aberta em p com

$$y_{ijp} \leq V_{ijp} (w_{ijp} + z_{ijp}), \forall e_{ij} \in E, p \in HP^* \quad (18)$$

Importante destacar, em especial no algoritmo, a proibição de que variáveis referentes a estradas que saem e chegam no mesmo nó devem ser nulas em qualquer período, bem como viagens em $p = 0$.

$$y_{iip} = w_{iip} = z_{iip} = 0, \forall i \in N, \forall p \in HP \quad (19)$$

$$y_{ij0} = 0, \forall i, j \in N \quad (20)$$

Por fim, em relação à forma de carregamento, cada talhão t tem um conjunto de pontos N_t a ele associados. Qualquer ponto de N_t pode ser escolhido como ponto de carregamento do material colhido em t no período p . De forma semelhante, cada nó i tem um conjunto de talhões F_i associados e qualquer $t \in F_i$ pode escolher i como ponto de carga. Ao tratar dos veículos já foi definida a quantidade ε_{tsp} compatibilizando tanto a medida utilizada para o volume colhido quanto a capacidade dos veículos utilizados. Considerando isso, pode-se definir a variável inteira k_{itp} ligada à quantidade de veículos a serem carregados em i para atender o talhão t em p . Associa-se à variável k_{itp} o coeficiente κ_p , representando os custos de carregamento e descarregamento de um veículo em p .

Um dos objetivos de otimização é a escolha do melhor nó $i \in N_t$ para que seja feito o carregamento. Este pode ser previamente definido, considerando as trajetórias entre os pontos do talhão e os sumidouros do grafo, obtidas pelo algoritmo de Floyd-Warshall. Para a modelagem, importa que o volume colhido

seja carregado em um dos pontos de transbordo e único por talhão caso haja escolha prévia. Isso é modelado por

$$\sum_{i \in N_t} k_{itp} = \varepsilon_{tsp} \sum_b x_{tpb}, \forall t \in F, s \in S, p \in HP^* \quad (21)$$

Cada nó pode receber carga dos diversos talhões a ele associados. Pode também, dependendo do conjunto ao qual ele pertence (N_O , N_F ou N_S), receber viagens oriundas de outros nós em direção ao sumidouro. Nestas condições, apresentam-se como adequadas as restrições a seguir:

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = \sum_{j \in E_i} y_{jip} + \sum_{t \in F_i} k_{itp}, \forall p \in HP^*, i \in N_F \quad (22)$$

Para $i \in N_F$, a quantidade de veículos que saem de i para algum j em p deve ser a soma de todos os veículos que chegam em i com as cargas efetuadas por algum dos talhões que lhe são associados.

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = \sum_{t \in F_i} k_{itp}, \forall i \in N_O, p \in HP^* \quad (23)$$

$$\sum_{j \in E_i} y_{jip} = 0, \forall i \in N_O, p \in HP \quad (24)$$

Para $i \in N_O$, a quantidade de veículos que saem de i para algum j em p deve ser apenas aqueles com cargas efetuadas por algum dos talhões que lhe são associados. Nenhum veículo vindo de outro nó deverá ser direcionado ao nó i , pois este não é um nó de passagem.

$$\sum_{j \in E_i} y_{ijp} = 0, \forall i \in N_S, p \in HP \quad (25)$$

$$\sum_{j \in E_i} k_{itp} = 0, \forall i \in N_S, p \in HP \quad (26)$$

Para $i \in N_S$, não devem sair veículos em direção a outros nós j , visto este nó ser o destino final no contexto do problema. Pode-se considerar também que os pontos de saída não sejam considerados como possíveis pontos de carga, para indicar a existência do transporte dentro da capacidade das vias. Porém, na prática, ignorar a restrição 26 deve trazer melhor resultado financeiro, sem prejuízo à factibilidade da resolução.

Com todas as restrições acima colocadas, se estabelece como função objetivo

$$\begin{aligned} \max Z = & \sum_s \sum_t \sum_p \sum_b v_{tsp} x_{tpb} - \sum_i \sum_j \sum_p (\omega_{ijp} w_{ijp} + \zeta_{ijp} z_{ijp} + \varphi_{ijp} y_{ijp}) \\ & - \sum_i \sum_t \sum_p \kappa_p k_{itp} \end{aligned}$$

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A correta modelagem do problema é fundamental para que a solução obtida matematicamente tenha ligação com o problema real e seja possível de ser aplicada. Na continuidade da pesquisa constatou-se que algumas informações necessárias ao modelo são levantadas em campo ou definidas arbitrariamente, o que pode tornar a aplicação prática do modelo inviável. Já para testes teóricos, pode ser necessário o emprego de outros métodos, como metaheurísticas, para definir valores que permitam a execução do modelo.

REFERÊNCIAS

BATISTA, G. V.; SCARPIN, C. T.; PÉCORA, J. E.; RUIZ, A. A New Ant Colony

Optimization Algorithm to Solve the Periodic Capacitated Arc Routing Problem with Continuous Moves. **Mathematical Problems in Engineering**, Hindawi, v. 2019, p. 3201656, jul. 2019. Disponível em: doi.org/10.1155/2019/3201656. Acesso em: 7 ago. 2025.

CHIAVENATO, I. **Administração para Todos: Ingressando no Mundo da Gestão de Negócios**. 3. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2021. E-book. p.3.

CORREA, R. N.; SCARPIN, C. T.; FERRARI, L. S.; ARCE, J. E. Application of relax-and-fix heuristic in the aggregation of stands for tactical forest scheduling. **Forest Policy and Economics**, Elsevier, v. 119, p. 102284, 2020. Disponível em: doi.org/10.1016/j.forpol.2020.102284. Acesso em: 7 ago. 2025.

D'ARACE, L. M. B. et al. O manejo florestal como estratégia para mitigar os impactos da exploração florestal. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 6, p. 32-42, 2019. Disponível em doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0004

MARTELL, D. L.; GUNN, E. A.; WEINTRAUB, A. **Forest management challenges for operational researchers**. European journal of operational research, v. 104, n. 1, p. 1-17, 1998. Disponível em [doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00329-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00329-9)