



MODELO MULTIPERÍODO DE OTIMIZAÇÃO PARA ALOCAÇÃO DE FLORESTAS PARA SUPRIMENTO ENERGÉTICO NA SECAGEM DE GRÃOS

Moises Knaut Tokarski (UFPR) moises.knaut@ufpr.br
José Eduardo Pécora Jr (UFPR) pecora@ufpr.br

Resumo

O eucalipto é matéria prima para setores como de móveis e celulose, porém é também um importante insumo para energia térmica, sendo utilizado em diversos outros segmentos industriais. O alto preço das commodities agrícolas e o baixo preço do eucalipto afetam a renovação de áreas florestais. O risco de suprimento no Paraná (Brasil), faz com que as cerealistas situadas no estado busquem a implantação de estratégias que garantam o fornecimento de cavaco de eucalipto para a secagem de soja e milho. O presente trabalho propõe um modelo matemático para otimização de alocação de unidades florestais, reduzindo custos de arrendamento e transporte de cavaco entre os maciços florestais e as unidades de recebimento de grãos em um ciclo de produção de 8 anos, considerando cortes em florestas com idades de 5 a 8 anos. A validação do modelo foi feita a partir do estudo de caso de uma empresa situada nos Campos Gerais no Paraná, no qual a otimização garantiu o fornecimento de cavaco nas 10 unidades de recebimento de grãos e resultou na escolha de 7 entre as 14 unidades florestais disponíveis para arrendamento. O modelo também permite a análise das políticas de negócio da empresa, como a verificação do impacto da alteração de área mínima para colheita, ou lote mínimo de transporte entre um ponto de origem e um único destino.

Palavras-Chaves: Cavaco, eucalipto, alocação, otimização, recebimento de grãos

1. Introdução

O eucalipto possui diversos usos econômicos, tanto nos setores de movelaria, matéria prima na cadeia de papel e celulose, quanto como insumo no processo industrial de diversas outras atividades, como para a secagem de grãos de soja e milho. No Paraná, segundo maior produtor de grãos do Brasil, a oferta de eucalipto está ameaçada nos próximos anos, por não se haver reposição do plantio florestal no estado. A competição de área com commodities

agrícolas, que batem recorde de preços mensalmente, o baixo valor pago na madeira, devido a um reflexo de alto estoque de madeira em pé observado nos anos anteriores, somados a intensificação da verticalização de indústrias de celulose na região, faz com que haja risco no equilíbrio entre oferta e demanda de madeira nos próximos anos.

Estratégias de suprimento são cada vez mais imprescindíveis para evitar desabastecimento ou exposição a preços futuros exorbitantes de eucalipto para qualquer tipo de uso. Se observa no mercado, bem como na literatura, grande organização das cadeias de papel e celulose em relação ao planejamento e otimização de processos produtivos do eucalipto, tanto em termos de agendamento e composição de rotas para atendimento de demanda de indústria, como apresentado em Bórdon et al (2020), bem como, no planejamento de transporte respeitando restrições de sazonalidade por conta de neve e gelo em países nórdicos, proposto por Sfeir et al (2021), e também, na alocação ótima de áreas para plantio, conforme Rönnqvist, (2003).

Porém, outras atividades que não possuem na silvicultura o principal componente do negócio, como na comercialização de grãos, muitas vezes negligenciam a gestão estratégica deste insumo. Na academia também não se encontram trabalhos que foquem na otimização de processos voltados ao abastecimento de cavaco de eucalipto para uso energético na secagem de grãos, ou em outros processos industriais.

Este estudo propõe uma adaptação do modelo de programação linear apresentado em Rönnqvist (2003), a fim de garantir a alocação ótima de unidades de produção florestal, reduzindo custos de arrendamento e transporte de cavaco entre os pontos de origem e as unidades de recebimento de grãos de uma empresa paranaense que utiliza cavaco de eucalipto para secagem de soja e milho.

A metodologia de pesquisa é classificada como modelagem axiomática normativa, segundo Cauchik-Miguel et al (2018), por ser uma otimização com base em um misto de dados empíricos e dados gerados para validação do resultado.

A seção seguinte descreve o problema proposto, enquanto na terceira é apresentado o modelo matemático. No quarto item, o modelo é testado e validado em um estudo de caso. Por fim, a quinta seção apresenta as conclusões do trabalho.

2. Descrição do problema

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento - Conab, existem mais de 3 mil unidades de armazenagem de grãos no estado do Paraná, sendo que a maior parte delas possuem estrutura para secagem e beneficiamento destes produtos. A capacidade estática somada é de aproximadamente 45 milhões de toneladas (Conab,2020). Considerando as características de período de colheita das principais culturas agrícolas do estado, soja e milho, e da grande liquidez da comercialização, estima-se que uma mesma unidade receba o equivalente a 1,6 vezes sua capacidade estática por ano. Nas áreas do estado com predominância do cultivo do milho de segunda safra (plantado após a colheita da soja), pode-se dizer que, em média, as unidades recebam 70% da sua capacidade de soja, e 90% de sua capacidade de milho.

Os informes sobre custos de recebimento, secagem e limpeza de grãos, atualizados por safra pela Organização das Cooperativas do Estado do Paraná – Ocepar, apontam os coeficientes técnicos médios para secagem de soja e milho. Segundo esse informe, cada cultura possui uma unidade de referência média de recebimento do produto da lavoura. Para soja o valor de referência é 18%, já para o milho 22%. Para armazenagem de ambos os produtos é necessário realizar a secagem até, pelo menos, 14%. A Tabela 1 apresenta o consumo de cavaco de eucalipto, com umidade de 35%, para a secagem de 100 toneladas de cada cultura.

Tabela 1 – Consumo de cavaco de eucalipto (35% de umidade) para secagem de soja e milho

Cultura	Unidade referência Cultura	Quantidade produto (t)	Consumo cavaco (t)
Soja	18%	100	1
Milho	22%	100	3,375

Fonte: Adaptado de Ocepar, 2020

Normalmente o corte de eucalipto para fins energéticos ocorre entre os 5 e 8 anos de idade do maciço florestal. Para conseguir colheita anual para atender de forma estável a necessidade de secagem das unidades de recebimento de grãos, o plantio deve ser escalonado em áreas distintas, sejam essas contínuas ou não. Considerando o incremento médio anual – IMA – do

estado do Paraná de 40 m³ por hectare por ano (APRE,2018), a quantidade de madeira disponível em um hectare varia de 200 a 320 m³, de acordo com a idade do maciço. Dados empíricos coletados com empresas que atuam no estado apontam que ao picar um metro cúbico de eucalipto se obtém aproximadamente 2,94 m³, que equivalem a 300 kg de cavaco, com umidade de 35%. Os dados de produção de eucalipto e de cavaco por hectare de acordo com sua idade são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Produção média de madeira(m³) e cavaco (m³ e t) por hectare e por idade no Paraná

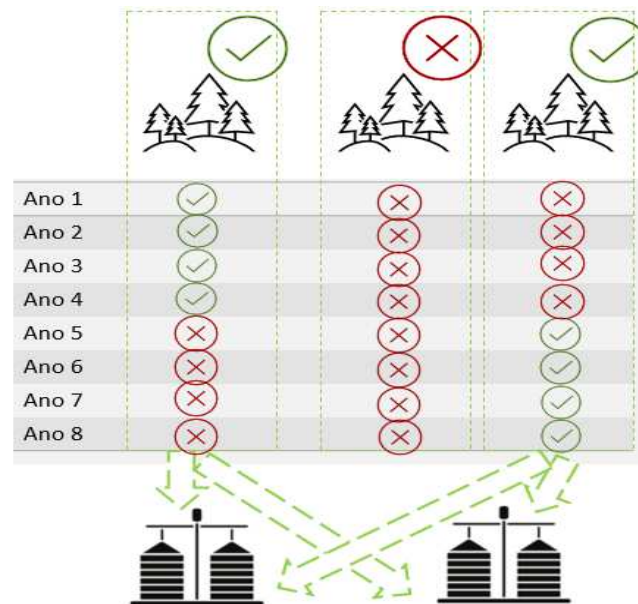
Idade (anos)	Madeira (m ³)	Cavaco (m ³)	Cavaco (t)
5	200,0000	587,8571	176,3571
6	240,0000	705,4286	211,6286
7	280,0000	823,0000	246,9000
8	320,0000	940,5714	282,1714

Fonte: Adaptado de Apre, 2018

Um levantamento florestal realizado pela Ocepar em parceria com a consultoria Innovatech em 2020 demonstra que o transporte do cavaco é um dos principais custos associados ao fomento desta matéria prima nas cooperativas paranaenses, acrescentando em média R\$ 1,84 por quilômetro e por tonelada.

A Figura 1 demonstra o funcionamento do modelo de otimização proposto no sentido de decisão de que áreas elencadas devem ser arrendadas e em quais anos terá que haver colheita para garantir o abastecimento das unidades de grãos. No exemplo ilustrado, percebe-se a escolha das unidades florestais 1 e 3, a origem 2 não seria arrendada. Observa-se também que as origens se completam no ciclo, de acordo com suas idades, no abastecimento das unidades consumidoras. Além do valor de arrendamento, o modelo leva em conta o custo por quilometro e tonelada de cavaco transportado entre os pontos de origem e de consumo, reduzindo o custo total da operação.

Figura 1 – Esquema de tomada de decisão do modelo proposto



Fonte: Autores (2021)

O modelo possibilita a tomada de decisão estratégica em médio prazo, não abordando a parte operacional, como períodos de colheita, nem ordem de carregamento de caminhões com cavaco. Para essas atividades, sugere-se adaptação do modelo proposto por Bórdon et al (2020), que prevê o agendamento semanal de carregamento de caminhões para atender o consumo de madeira. O sistema proposto no atual trabalho, considera apenas o valor de arrendamento e o custo médio de deslocamento, não levando em conta o investimento de aquisição de caminhões, nem custo marginal de operação de produção de cavaco, ou seja, o valor que se gastaria para produzir uma tonelada de cavaco a mais do que a capacidade do conjunto de equipamentos responsáveis pela colheita e picagem da madeira.

3. Modelo

Esta seção apresenta o modelo matemático de programação linear proposto para a solução do presente problema, divididos em 4 itens: conjuntos, parâmetros, variáveis e o modelo em si.

3.1. Conjuntos

- O (pontos origem): $o \in O = \{1, \dots, N\}$
- D (pontos destino): $d \in D = \{1, \dots, N\}$
- A (anos): $a \in A = \{1, \dots, 8\}$

3.2. Parâmetros

- Custo entre pontos de origem “o” e consumo de cavaco “d”: C_{od}
- Demanda no ponto destino “d” no ano “a”: R_{da}
- Produção por hectare no ano “a” na origem “o”: K_{oa}
- Custo de arrendamento por hectare ao ano: W_{oa}
- Área total, em hectares, por origem: H_o

3.3. Variáveis

- Quantidade de cavaco entre os pontos, expressa de forma contínua: Q_{oda}
- Alocação de colheita de área arrendada no ano, sendo binária, com valor um quando a área “o” estiver ativa no ano “a”. Caso contrário, valor será zero: Y_{oa} ;
- Alocação de maciço florestal arrendada no período, sendo binária, com valor um quando a área o estiver no ciclo completo (oito anos). Caso contrário, valor será zero: V_o ;
- Área colhida por ano “a” na origem “o”, variável contínua: N_{oa} ;
- Se a origem “o” vai entregar para destino “d” no ano “a”, variável binária, sendo um quando ativa e zero caso contrário: B_{oda} .

3.4. Modelo

$$(I) \quad \text{Min } Z = \sum_{a \in A} \sum_{d \in D} \sum_{o \in O} C_{od} * Q_{oda} + \sum_{o \in O} W_o * V_o + \sum_{a \in A} \sum_{o \in O} N_{oa}$$

Sujeito a:

$$(II) \quad \sum_{o \in O} Y_{oa} \leq \sum_{o \in O} V_o \quad , \forall a$$

$$(III) \quad \sum_{d \in D} Q_{oda} \leq K_{oa} * N_{oa} \quad , \forall o, a$$

$$(IV) \quad N_{oa} \leq H_o * Y_{oa} \quad , \forall o, a$$

$$(V) \quad Y_{oa} \leq V_o \quad , \forall o, a$$

$$(VI) \quad \sum_{a \in A} Y_{oa} \geq V_o \quad , \forall o$$

$$(VII) \quad \sum_{a \in A} N_{oa} \leq H_o * V_o \quad , \forall o$$

$$(VIII) \quad \sum_{o \in O} Q_{oda} \geq R_{da} \quad , \forall d, a$$

$$(IX) \quad Q_{oda} \geq B_{oda} * 30 \quad , \forall o, d, a$$

$$(X) \quad Q_{oda} \leq B_{oda} * K_{oa} * H_o \quad , \forall o, d, a$$

$$(XI) \quad B_{oda} \leq Y_{oa} \quad , \forall o, a, d$$

$$(XII) \quad N_{oa} \geq 5 * Y_{oa} \quad , \forall o, a$$

A Equação I apresenta a função objetivo que pode ser dividida em três partes: a primeira é o somatório de custos de deslocamento entre os pontos de origem e destino multiplicados pela quantidade de cavaco transportada. A segunda, a soma do valor de arrendamento de cada unidade florestal, quando essa for alocada ($V_o = 1$). Considera-se que o custo de colheita por hectare seja o mesmo, indiferente da área em que esteja ocorrendo, desta forma, a terceira parte da equação reduz a área colhida, para que não ocorra colheita desnecessária.

Os conjuntos de restrições dados pelas equações II a VII são referentes a alocação das unidades de origem florestal, área colhida e produção de cavaco por ano. A Equação II limita o número máximo de maciços florestais ativos (com colheita) em um ano (Y_{oa}) pelo número total de origens ativas no ciclo completo (V_o). A Equação III limita a quantidade transportada de uma origem para todos os destinos no máximo que a área é capaz de produzir naquele período. A IV impõem que um maciço tenha parte, ou o total de sua área colhida num período, apenas se essa origem estiver ativa nesse ano. As equações V e VI vinculam as variáveis de alocação anual com alocação no período, onde uma origem que não esteja ativa no ciclo, não pode ser ativa em único ano (Eq. V) e um maciço que esteja ativo no ciclo, pagando arrendamento, deve ter ao menos parte de sua área colhida em pelo menos um ano (Eq. VI). A equação VII faz com que o total de área colhida no ciclo não seja maior do que a área do respectivo maciço.

A Equação VIII garante o atendimento da demanda de consumo de cavaco pelas unidades de secagem de grãos. Enquanto as equações IX a XII são conjuntos de restrições que representam os aspectos políticos da empresa: os conjuntos IX, X e XI são responsáveis por garantir um lote mínimo para cada destino, ou seja, uma área florestal deverá destinar ao menos 30 toneladas de cavaco para cada unidade de grãos, para preencher a capacidade do caminhão e evitar a alocação de quantias como uma ou duas toneladas entre os pontos. A última equação representa a área mínima que a empresa considera viável em realizar a colheita, nesse caso, deve se colher ao menos cinco hectares por ano em uma área ativa ($Y_{oa} = 1$).

4. Estudo de caso

Nesta seção serão apresentados os dados e resultados do estudo de caso baseado em uma empresa localizada na região dos Campos Gerais, no Estado do Paraná. Os dados são em parte reais e outra parte criados para validação do modelo.

4.1. Dados

O estudo de caso considerou 10 unidades de recebimento de grãos pertencentes a uma empresa com sede nos Campos Gerais. As unidades estão instaladas no estado do Paraná. Tanto as localizações quanto as capacidades estáticas são reais. Para cálculo da necessidade de cavaco estimado, foi utilizado o potencial recebimento de grãos de soja e milho, bem como a necessidade de cavaco para secagem destes, descrita na Tabela 1 deste trabalho. O Quadro 1 apresenta os dados de consumo de cada ponto para o primeiro ano do ciclo, sendo que foi considerado consumo constante ao longo do ciclo de análise, se repetindo os valores para os demais anos. Entretanto, o modelo é capaz de calcular a oferta variável, se informadas diferentes demandas por ano.

Quadro 1 – Pontos de consumo e demanda de cavaco em toneladas por ano

Destino	Município	Estado	Capacidade Estática	Latitude	Longitude	Necessidade de cavaco (t/ano)
1	Carambeí	PR	1.800	-24,94194	-50,013006	180,68
2	Carambeí	PR	30.900	-24,94414	-50,501289	3.101,59
3	Carambeí	PR	2.810	-24,94274	-50,012986	282,05
4	Carambeí	PR	36.540	-24,94355	-50,501275	3.667,70
5	Imbaú	PR	1.180	-24,4405	-50,07637	118,44
6	Imbaú	PR	4.610	-24,4407	-50,07644	462,73
7	Imbaú	PR	1.810	-24,4408	-50,07641	181,68
8	Imbaú	PR	9.620	-24,4404	-50,07644	965,61
9	Imbituva	PR	18.610	-25,2188	-50,05836	1.867,98
10	Imbituva	PR	3.540	-25,2183	-50,05841	355,33
11	Ponta Grossa	PR	15.340	-25,15525	-50,013997	1.539,75
Total			126.760			12.723,54

Fonte: Autores (2021)

Os 14 pontos de origem utilizados foram gerados de forma aleatória, bem como suas respectivas áreas e idades no ano inicial. Consecutivamente, o potencial de produção de cada área foi calculado de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 2. Nota-se que ao atingir idade de 8 anos no decorrer do ciclo, considera-se o ano seguinte como idade zero e reinicia a contagem. Desta forma, um maciço florestal que tem idade 8 no ano 1, terá 6 anos no último período do ciclo. O Quadro 2 apresenta os dados de origem, enquanto o Quadro 3 apresenta a capacidade de produção por ano, filtrando apenas as unidades que estão em época de corte por ano, ou seja, entre as idades de 5 e 8 anos.

Quadro 2 – Dados dos maciços florestais que podem ser escolhidos como origens para o cavaco

Origem	Município	Estado	Área (ha)	Latitude	Longitude	Idade (ano 1)	Custo arrendamento ciclo/ha
1	Carambeí	PR	116	-24,9419	-50,3657	4	R\$ 8.000,00
2	Carambeí	PR	103	-24,9256	-50,9657	4	R\$ 10.000,00
3	Carambeí	PR	95	-24,9445	-50,5016	4	R\$ 10.400,00
4	Imbaú	PR	129	-24,4488	-50,0886	5	R\$ 7.920,00
5	Imbituva	PR	108	-25,5454	-50,0555	8	R\$ 8.800,00
6	Imbituva	PR	147	-25,5858	-50,0625	8	R\$ 8.000,00
7	Ponta Grossa	PR	52	-25,1818	-50,0155	1	R\$ 8.000,00
8	Ponta Grossa	PR	124	-25,1557	-50,0366	1	R\$ 8.000,00
9	Ponta Grossa	PR	67	-25,149	-50,0145	1	R\$ 9.600,00
10	Ponta Grossa	PR	84	-25,1545	-50,5152	1	R\$ 8.880,00
11	Teixeira Soares	PR	111	-25,4188	-50,0566	1	R\$ 7.600,00
12	Tibagi	PR	79	-24,5157	-50,4586	7	R\$ 8.000,00
13	Tibagi	PR	48	-24,6878	-50,5859	7	R\$ 8.000,00
14	Tibagi	PR	115	-24,5987	-50,1515	7	R\$ 9.240,00

Fonte: Autores (2021)

Quadro 3 – Produção de cavaco em toneladas por hectare e por ano, de acordo com a idade da floresta

Ano	Origem	Idade	Produção (t/ha)	Ano	Origem	Idade	Produção (t/ha)
1	4	5	176,36	5	9	5	176,36
1	5	8	282,17	5	10	5	176,36
1	6	8	282,17	5	11	5	176,36
1	12	7	246,90	6	7	6	211,63
1	13	7	246,90	6	8	6	211,63
1	14	7	246,90	6	9	6	211,63
2	1	5	176,36	6	10	6	211,63
2	2	5	176,36	6	11	6	211,63
2	3	5	176,36	7	5	5	176,36
2	4	6	211,63	7	6	5	176,36
2	12	8	282,17	7	7	7	246,90
2	13	8	282,17	7	8	7	246,90
2	14	8	282,17	7	9	7	246,90
3	1	6	211,63	7	10	7	246,90
3	2	6	211,63	7	11	7	246,90
3	3	6	211,63	8	5	6	211,63
3	4	7	246,90	8	6	6	211,63
4	1	7	246,90	8	7	8	282,17
4	2	7	246,90	8	8	8	282,17
4	3	7	246,90	8	9	8	282,17
4	4	8	282,17	8	10	8	282,17
5	1	8	282,17	8	11	8	282,17
5	2	8	282,17	8	12	5	176,36
5	3	8	282,17	8	13	5	176,36
5	7	5	176,36	8	14	5	176,36
5	8	5	176,36				

Fonte: Autores (2021)

O modelo foi programado na linguagem c#, pelo aplicativo *Visual Studio* e resolvido pelo *Solver Gurobi 9.1*. Para o cálculo da distância, foi utilizada a fórmula de Haversine que resulta na distância em linha reta, considerando a curvatura da terra, a partir dos dados de latitude e longitude dos pontos. Para o custo de deslocamento foi atribuído o valor de R\$ 1,84 por quilômetro e por tonelada carregada.

A empresa base deste estudo, possui políticas bem estabelecidas em relação a área mínima de colheita e lote mínimo de transporte:

- Área mínima para colheita: só deve-se ativar uma origem se a colheita for igual ou superior a 5 hectares;
- Lote mínimo para transporte: Só deve existir fluxo de cavaco entre uma origem e um destino, caso a quantia transportada seja igual ou superior a 30 toneladas.

O modelo deve reduzir os custos de deslocamento e arrendamento de terra, garantindo o atendimento da demanda e respeitando as restrições físicas e políticas do processo. Como

premissa, considera-se que as unidades de recebimento de grãos possuem capacidade de armazenagem de todo o cavaco que necessita em um ano, ou seja, podem receber em qualquer momento do ano toda a matéria prima que vai ser utilizada.

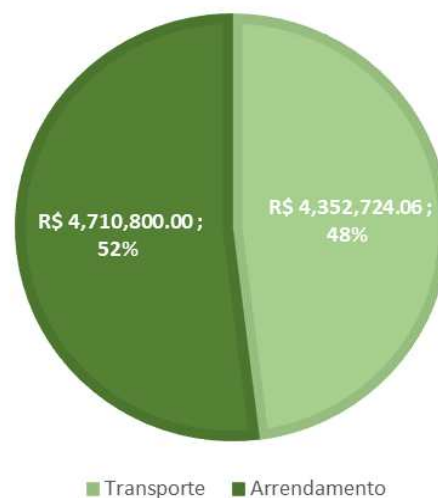
Adaptações para atender pontos de consumo que não obedeçam a essa premissa podem ser feitas acrescentando um subconjunto “P” de destinos com essa característica no modelo, que pertençam ao conjunto “D” (pontos de destino). Além disso, também é necessário adicionar uma restrição similar a Equação IX, alterando o multiplicador B_{oda} por Y_{oa} . Dessa forma, toda a origem ativa naquele ano, deverá entregar cavaco aos pontos “P”, conforme apresentado na equação XIII.

$$(XIII) \quad Q_{opa} \geq Y_{oa} * 30 \quad , \forall p, o, a$$

4.2. Resultados

Todas as restrições do modelo foram satisfeitas, atendendo a demanda das unidades de recebimento de grãos, ativando 7 entre os 14 maciços florestais disponíveis. Foram respeitados os limites de colheita de área e suas capacidades de produção de acordo com suas respectivas idades. Não foi gerado estoque nos pontos de origem, ou seja, toda a madeira colhida foi picada e encaminhada para as unidades destinos. O custo total no período foi de R\$9,06 milhões, sendo R\$ 4,35 milhões referente a transporte de cavaco e R\$ 4,71 milhões para arrendamento das áreas, conforme demonstrado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Composição dos custos e participação de transporte e arrendamento

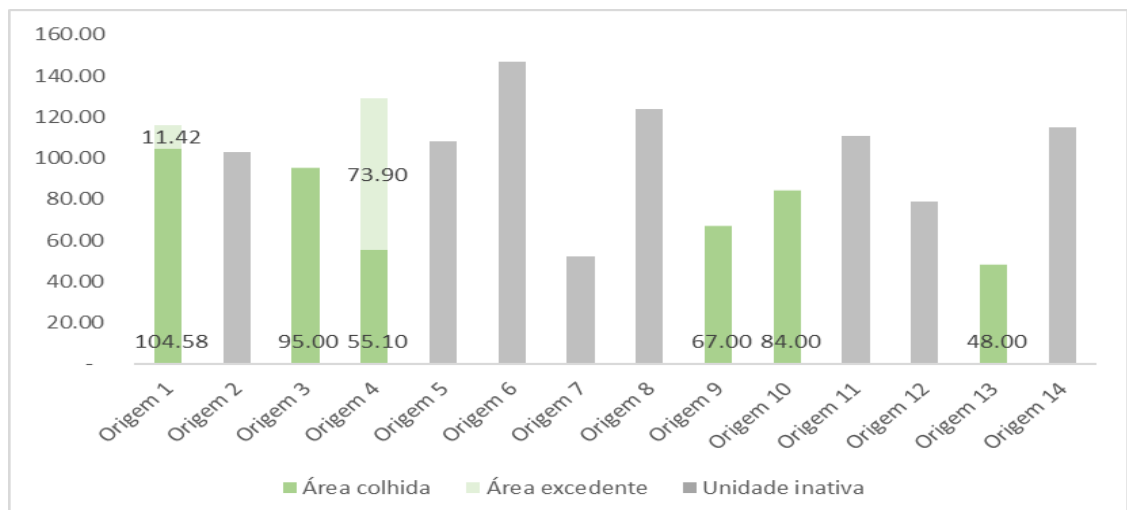


Fonte: Autores (2021)

O Gráfico 2 demonstra a escolha das unidades de produção florestal, bem como a área colhida dessas. Observa-se que as unidades 1 e 4 apresentam sobra de área sem ter sido colhida no período. Neste cenário, esse excedente é um desperdício, pois o arrendamento pago corresponde ao total da área, que está sendo apenas parcialmente utilizada. Por outro lado, essa é uma oportunidade para a empresa, que a partir dessas informações pode decidir entre várias opções, como:

- Revisão do contrato de arrendamento, ajustando a área real que será utilizada;
- Aproveitamento da área excedente para outros fins, como manejo para movelaria;
- Aproveitamento da ociosidade do conjunto de equipamentos para colheita e picagem (53% da capacidade utilizada por ano) e venda de cavaco para terceiros.

Gráfico 2 – Unidades florestais com áreas colhidas, excedentes e inativas



Fonte: Autores (2021)

4.2. Análise de políticas

Alterando os conjuntos de restrições que definem as políticas da empresa, é possível verificar o impacto dessa mudança no custo total de operação, servindo como base de confirmação ou revisão das políticas adotadas. Neste trabalho será feita a projeção de custos com a alteração da área mínima para colheita e do lote mínimo de transporte.

Entretanto, outras alterações no modelo também podem ser feitas, como o maior aproveitamento das áreas arrendadas no mesmo período, criando uma variável que seja a diferença entre a área total e a área colhida, que deverá substituir a terceira parte da função

objetivo (que reduz a área colhida). Para o correto funcionamento do cenário, deve-se criar uma restrição que limite o estoque em um valor inferior ao do lote mínimo de transporte, para evitar que a colheita ocorra, mas fique tudo armazenado no próprio maciço florestal.

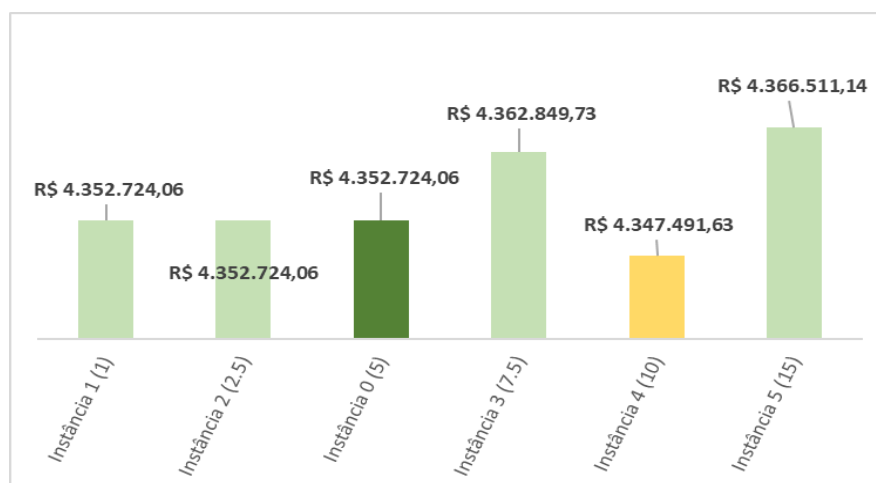
Outra alteração possível, seria aumentar o percentual de utilização dos equipamentos de picagem e colheita, a qual também necessitaria da criação de uma variável que seja a diferença entre produção de cavaco máxima (capacidade dos equipamentos) e a produção obtida, substituindo na função objetivo, parte três. Neste caso, não seria necessária a adição de restrição de estoque, pois, como o consumo é bem inferior a capacidade produtiva, esse excedente deve ser vendido para terceiros e não compõe o restante do modelo.

4.2.1. Alterando área mínima de colheita

Análise do impacto da área mínima de colheita no custo foi feita com a alteração da área mínima, na equação de restrição XII. As demais restrições foram mantidas e atendidas. As instâncias testadas foram:

- Instância 0: Original do problema, limite de 5 hectares;
- Instância 1: 1 hectare;
- Instância 2: 2,5 hectares;
- Instância 3: 7,5 hectares;
- Instância 4: 10 hectares e;
- Instância 5: 15 hectares.

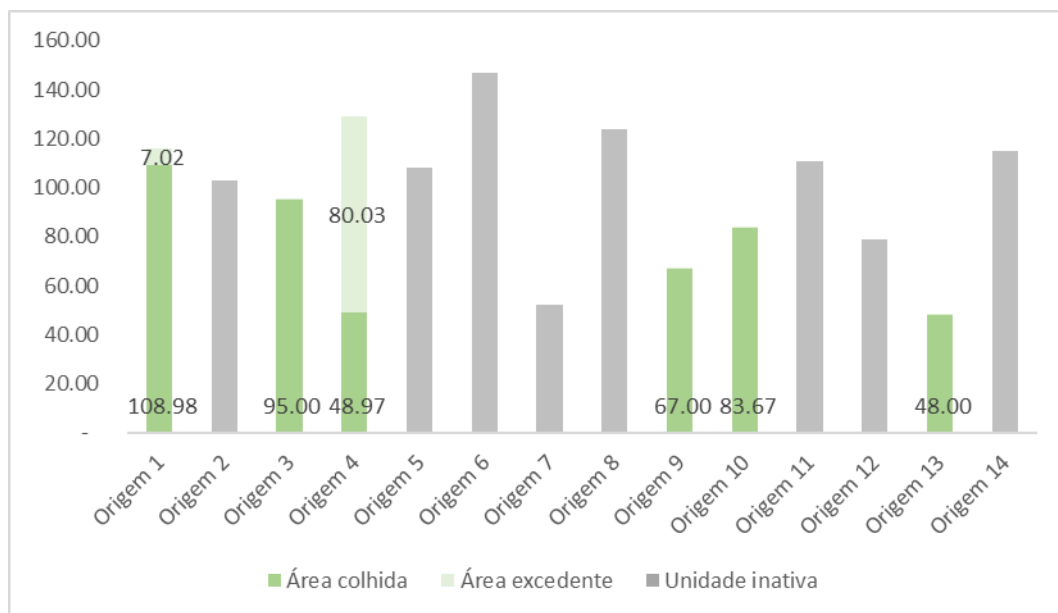
Gráfico 3 – Custo de transporte associado a alteração da área mínima de colheita



Fonte: Autores (2021)

Conforme demonstrado no Gráfico 3, as instâncias 1 e 2 não apresentaram diferença em relação a instância 0. Percebe-se que o menor valor encontrado foi na instância 4, com o mínimo de 10 hectares colhidos para ativar a área. A redução de custos foi R\$ 5.232,42 nessas condições. As unidades escolhidas para a colheita não foram alteradas com as modificações e o custo de arrendamento permaneceu o mesmo. As principais diferenças observadas foram o aumento de área colhida na origem 1 e redução na origem 4, conforme o gráfico 4.

Gráfico 4 – Unidades florestais com áreas colhidas, excedentes e inativas – Instância 4



Fonte: Autores (2021)

Um ganho secundário é a redução de unidades florestais ativas no ano 4 do ciclo, que na instância 0 eram três e na instância 4 foram duas, reduzindo o impacto de deslocamento dos equipamentos entre os maciços florestais.

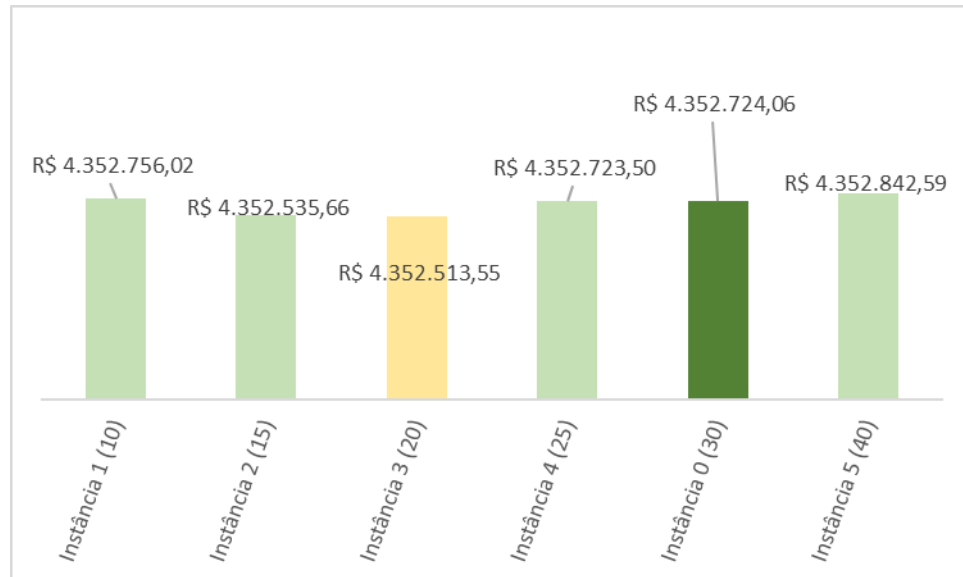
4.2.2 Alterando lote mínimo de transporte

A análise do impacto de lote mínimo de transporte no custo foi feita com a alteração dos lotes mínimos, na equação IX. As demais restrições foram mantidas e atendidas. As instâncias testadas foram:

- Instância 0: Original do problema, limite de 30 toneladas;
- Instância 1: 10 toneladas;
- Instância 2: 15 toneladas;
- Instância 3: 20 toneladas;

- Instância 4: 25 toneladas e;
- Instância 5: 40 toneladas.

Gráfico 5 – Custo de transporte associado a alteração do lote mínimo de transporte



Fonte: Autores (2021)

As áreas arrendadas novamente não foram afetadas pelas alterações no modelo. Conforme apresentado no Gráfico 5, a diferença entre o menor custo, instância 3 com 20 toneladas de limite mínimo, comparado à instância inicial, de lote mínimo de 30 toneladas, foi de apenas R\$ 210,50. Essa análise não leva em conta o custo fixo de carregamento de caminhões, sendo que a redução de lote pode impactar diretamente na proporção deste custo em relação ao custo da carga.

5. Conclusão

O modelo proposto atende o objetivo de criar uma ferramenta que possibilite a tomada de decisão de quais unidades florestais arrendar, qual a distribuição ideal de cavaco em relação a quantidade transportada entre as origens e os pontos de consumo, reduzindo o custo global da operação. Além disso, permite também a construção de cenários que possibilitam a avaliação das políticas internas das empresas, validando-as ou sugerindo mudanças para reduzir ainda mais os custos operacionais estratégicos desta importante atividade de fomento de biomassa para a secagem de grãos.



Trabalhos futuros complementares podem ser realizados em duas frentes: a primeira é a adaptação para considerar custos não contabilizados no presente trabalho, como o deslocamento de equipamentos de colheita e picagem, ou até mesmo análise de viabilidade de investimento. A segunda é a transformação do modelo para decisões estratégicas para otimização tática operacional, conforme apresentado por Bordón et al (2020).

REFERÊNCIAS

BORDÓN, Maximiliano; MONTAGNA, Jorge and CORSANO, Gabriela. **Mixed integer linear programming approaches for solving the raw material allocation, routing and scheduling problems in the forest industry**. International Journal of Industrial Engineering Computations. 2020.

CAUCHICK-MIGUEL, Paulo. A; FLEURY, Afonso; MELLO, Carlos Henrique Pereira; NAKANO, Davi Noboru; LIMA, Edson Pinheiro de; TURRIONI, João Batista; HO, Linda Lee; MORABITO, Reinaldo; COSTA, Sérgio E. Gouvêa da; MARTINS, Roberto Antonio; SOUSA, Rui; PUREZA, Vitória. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 3ª ed. Coordenação de CAUCHICK-MIGUEL, Paulo A., Ed.; Elsevier: Rio de Janeiro, 2018.

Custo de Recepção, Secagem e Limpeza de Grãos nº457. Sindicato e Organização das Cooperativas do Estado do Paraná - Ocepar. 2020.

Diálogo Estratégico – Abastecimento de Madeira nas Cooperativas do Paraná. Sindicato e Organização das Cooperativas do Estado do Paraná – Ocepar e Innovatech Consultoria. 2020.

Estudo Setorial – APRE. Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal. 2018.

RÖNNQVIST, Mikael. **Optimization in forestry**. Math. Program., Ser. B 97, 267–284. 2003.

SFEIR, Tamires de Almeida; PECORA, Jose Eduardo; RUIZ, Angel and LEBEL, Luc. **Integrating natural wood drying and seasonal trucks’ workload restrictions into forestry transportation planning**. Omega – International Journal of Management Science. 2021.

Sistema de Cadastro Nacional de Unidades Armazenadoras – Sicarm. Companhia Nacional de Abastecimento - Conab. <https://www.conab.gov.br/armazenagem/sistema-de-cadastro-nacional-de-unidades-armazenadoras-sicarm-1>. Acessado em 15 de Agosto de 2020 às 20 horas.