

RENOVABIO E A ESTRATÉGIA ÓTIMA DE PRODUÇÃO E DE COMERCIALIZAÇÃO PELAS USINAS DE CANA-DE-AÇÚCAR: UMA APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA APOIO À TOMADA DE DECISÃO

RENOVABIO AND THE OPTIMAL STRATEGY OF PRODUCTION AND COMMERCIALIZATION BY SUGARCANE MILLS: AN APPLICATION OF LINEAR PROGRAMMING TO SUPPORT DECISION MAKING

Autor(es): Rodrigo de Moraes Santos¹; Luciano Rodrigues²

Filiação: Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP)¹; Escola Superior de Agricultura
'Luiz de Queiroz' (ESALQ/USP)²

E-mail: rodrigo.moraes.santos@usp.br¹; lurodrig@usp.br²

Grupo de trabalho 1. Mercados Agrícolas e Comércio Exterior

Resumo

A decisão de produção e de comercialização das usinas de cana-de-açúcar é influenciada por uma série de fatores de mercado, bem como limitações técnicas, financeiras e operacionais das próprias unidades. Adicionalmente, a nova Política Nacional de Biocombustíveis, ao incorporar a possibilidade de emissão de títulos de descarbonização (CBio) pelas unidades produtoras, deve tornar essa análise ainda mais complexa nos próximos anos. Nesse contexto, no presente trabalho se tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático de programação linear para auxiliar a tomada de decisão das usinas, identificando as melhores estratégias de produção e de comercialização de etanol, de açúcar e de CBio para um grupo de três usinas localizadas em diferentes Estados do País. A modelagem tem como objetivo maximizar a margem líquida da empresa. Os resultados e a estrutura do modelo evidenciam a complexidade do planejamento conduzido rotineiramente pelas unidades produtoras. Trata-se de um problema com muitos parâmetros, variáveis e interrelações, justificando o emprego de modelagem matemática. A comparação dos dois cenários desenhados indica que a incorporação do CBio à dinâmica de decisão das empresas promoveu uma alteração na estratégia ótima de alocação de cana-de-açúcar, de comercialização dos produtos e até mesmo de transferência de produtos entre as unidades produtoras.

Palavras-chave: Setor Sucroenergético. Programação Linear. Planejamento da Produção. Política Nacional de Biocombustíveis.

Abstract

The decision on the production and sale of the sugar cane mills is influenced by several market factors, as well as technical, financial and operational limitations of the units themselves. In addition, the new National Biofuels Policy, by incorporating the possibility of commercializing decarbonization bonds (CBio) by the production units, should make this analysis even more complex in the coming years. In this context, this paper aims to develop a mathematical model of linear programming to assist the decision of the mills, identifying the best strategies for the production and commercialization of ethanol, sugar and CBio for a group of three plants located in different states of the country. The modeling aims to maximize the company's net margin. The results and the structure of the model show the complexity of the planning routinely conducted by the companies. It is a problem with many parameters, variables and interrelations, justifying the use of mathematical modeling. The comparison of the two scenarios designed indicates that the incorporation of CBio promoted a change in the optimal strategy for allocating sugarcane, selling products and even transferring products between the production units.

Key words: Sugar-energy Industry. Linear Programming. Production Planning. National Biofuels Policy.

1. Introdução

O agronegócio é um dos pilares da economia nacional, sendo responsável por 21,4% do PIB brasileiro em 2019 (CEPEA; CNA, 2020). A cadeia da cana-de-açúcar se destaca como um dos principais setores do agronegócio nacional (BACCHI; RODRIGUES, 2018; CEPEA; CNA, 2020; UNICA, 2020).

As usinas em operação no país produzem prioritariamente etanol anidro, etanol hidratado e açúcar. O biocombustível tem como destino principal o mercado interno (UNICA, 2020), enquanto mais de 70% do açúcar produzido é direcionado para o atendimento do mercado mundial (MDIC, 2020).

A decisão sobre qual desses produtos produzir e como comercializá-los ao longo do ano safra incorpora diversos fatores de mercado e, ainda, restrições operacionais, de armazenagem e financeira das empresas (PAIVA; MORABITO, 2015; PAIVA; MORABITO, 2009).

Nesse contexto, a recente Política Nacional de Biocombustíveis, também conhecida como RenovaBio, deve trazer maior complexidade ao planejamento de produção e às estratégias comerciais das empresas. Isso porque, entre os instrumentos do Programa se destaca a possibilidade de emissão e comercialização de títulos de crédito de descarbonização, ou CBios, pelas unidades produtoras. Esses títulos estão associados ao volume de etanol combustível comercializado pelas usinas e à eficiência energético-ambiental das empresas.

Nesse novo cenário, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de programação matemática para definir a melhor estratégia de produção e de comercialização de açúcar e etanol por um grupo típico de usina, visando maximizar a sua margem líquida. Além das variáveis que tradicionalmente estão envolvidas nessa definição, o modelo incorpora os elementos que serão introduzidos pela nova Política de Biocombustíveis no País.

O estudo se apoia em diversos trabalhos que utilizaram modelos matemáticos para auxiliar as usinas no processo de tomada de decisão estudado (ver PAIVA; MORABITO, 2009; PAIVA; MORABITO, 2015; KHATIWADA et al, 2016; JUNQUEIRA; MORABITO, 2019; BRANCO et al, 2019, entre outros). O trabalho inova ao incorporar as mudanças que devem ser observadas após o início do RenovaBio, permitindo reflexões importantes sobre o impacto do Programa no fluxo de caixa das empresas e na definição da melhor estratégia de produção e comercialização das usinas.

2. Revisão da literatura

2.1. Números gerais do setor sucroenergético no Brasil

Segundo a UNICA (2020), a produção de açúcar e etanol ocorre em diferentes meses no Brasil, variando de acordo com a localização geográfica das usinas de cana de açúcar. Na região Centro-Sul, as empresas iniciam a moagem da cana-de-açúcar no mês de abril e usualmente encerram a safra no mês de novembro. Na região Norte-Nordeste, por outro lado, a safra se inicia em setembro e é finalizada no mês de março.

A produção brasileira de açúcar na safra 2018/2019 atingiu 29,04 milhões de toneladas, enquanto a produção de etanol total, considerando o etanol anidro e o hidratado, alcançou 33,1 bilhões de litros (UNICA, 2020)

Das 29,04 milhões de toneladas de açúcar produzidas na safra 2018/2019, 17,89 milhões (61,6%) foram exportadas, indicando que grande parte do produto produzido no país tem como principal destino o mercado externo. Já o etanol é majoritariamente comercializado no mercado interno, seja na forma de etanol anidro misturado à gasolina ou de etanol hidratado que é consumido diretamente pelos veículos flex-fuel (RODRIGUES e BACCHI, 2018).

2.2. A Política Nacional de Biocombustíveis

A importância de consolidação da posição brasileira no setor de biocombustíveis e de materialização das potencialidades do país nessa área foi reforçada com a aprovação da Lei no. 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Ao estabelecer a Política Nacional de Biocombustíveis, ou RenovaBio, o referido instrumento legal propôs um mecanismo arrojado para promover segurança energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Inspirado em iniciativas de sucesso em outros países, o RenovaBio se fundamenta em três pilares principais. O primeiro deles refere-se à proposição de uma meta decenal de descarbonização para o setor de transporte. Esse instrumento deve definir o nível máximo de emissão de GEE por unidade de energia consumida no setor de transportes no País.

A redução de GEE a partir dos biocombustíveis é um dos elementos do compromisso firmado pelo Brasil na 21ª Conferência das Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas (COP-21). Ratificado pelo congresso e pelo presidente da república em 2016, o acordo passou a vigorar oficialmente e estabelece uma meta de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) de 43% até 2030, tendo como parâmetro os níveis registrados em 2005.

Definidas as metas, o segundo pilar do sistema proposto pelo RenovaBio refere-se ao mecanismo de valoração do carbono que deixou de ser emitido no processo de substituição da energia fóssil por energia renovável.

Essa remuneração será dada pela comercialização de certificados de redução de emissões, conhecidos como CBio, que serão emitidos na venda do biocombustível pelo produtor. O sistema prevê a compra do mencionado certificado pelas distribuidoras para o cumprimento das metas em cada ano. O preço do CBio, por sua vez, será determinado pelas condições de oferta e de demanda, com ajustes imediatos realizados em um processo comercialização em mercado organizado.

Por fim, o terceiro e último elemento do programa estabelece um vínculo entre a eficiência energético-ambiental da produção e a receita que pode ser auferida com a venda de CBios. Ao quantificar as emissões de acordo com o ciclo de vida de cada biocombustível, o mecanismo reconhece as diferentes etapas do processo de produção, definindo notas distintas de acordo com as práticas adotadas por cada produtor.

Por exemplo, produtores com reduzido consumo de diesel na produção terão nota de eficiência energético-ambiental mais elevada e poderão emitir um maior número de CBios para cada volume de biocombustível comercializado. Como esse título representa uma tonelada de carbono que deixou de ser emitida, é natural que os produtores mais eficientes tenham maior receita com a venda do mesmo.

Ao entrar em funcionamento, é evidente que a nova política deve incorporar novos elementos ao já intrincado processo de decisão de produção e de comercialização pelas usinas.

Isso porque, a venda de etanol combustível permitirá a emissão de CBios e, com isso, uma nova receita será agregada no fluxo de caixa das empresas, justificando a análise aqui proposta.

2.3. O problema de decisão das usinas e o uso de modelos matemáticos

A decisão sobre qual produto será produzido em cada mês do ano-safra está sujeita a variáveis como o preço recebido pelo açúcar, a receita obtida pelo etanol, a capacidade de estoque e os custos de transporte de cada um desses produtos até o consumidor (RODRIGUES; BACCHI, 2018; PAIVA, 2009; SOARES, M. G.; CAIXETA FILHO, 1996). Esse conjunto de fatores torna o planejamento produtivo das usinas mais difícil para o tomador de decisão (PAIVA; MORABITO, 2015).

Uma das formas de dar suporte à tomada de decisão para o planejamento do mix de produção e de estratégias de comercialização consiste no emprego de modelos matemáticos, como propõe Taylor (2008).

Autores como Paiva e Morabito (2015) utilizaram um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção de um grupo de usinas do setor sucroenergético. Nele, os autores buscaram determinar a quantidade que o grupo deveria colher de cana-de-açúcar e, ainda, a proporção da matéria-prima destinada à fabricação de açúcar, etanol, melão e energia elétrica.

Na mesma linha, Khatiwada et al (2016) propuseram um modelo de programação inteira mista para realizar o planejamento da produção de etanol e eletricidade usinas de cana-de-açúcar localizadas no estado de São Paulo. Junqueira e Morabito (2019), por sua vez, desenvolveram um modelo de programação inteira mista para determinar o calendário ótimo de colheita da cana-de-açúcar para uma unidade produtora.

Os trabalhos de Paiva e Morabito (2009) e Paiva e Morabito (2015) aplicados ao setor evidenciam que técnicas de programação matemática se mostraram eficazes no planejamento de produção.

Nessa linha, o presente trabalho também utiliza o método de programação linear para suporte ao planejamento da produção, armazenagem e comercialização de um grupo econômico típico, com três usinas produtoras no país.

3. Metodologia

3.1. Caracterização do grupo de produção e dos cenários

Para a realização da modelagem matemática, foram consideradas três usinas características localizadas em Ribeirão Preto-SP, Quirinópolis-GO e em Coruripe-AL. Para cada uma dessas unidades, foram estabelecidos parâmetros médios da região para produção, vendas, custos, preços dos produtos produzidos, capacidade de estoque, emissão de CBIO e valores de frete de açúcar e de etanol. Os dados utilizados, bem como o detalhamento do modelo proposto, são apresentados nos próximos tópicos deste capítulo.

Para estruturar a avaliação proposta, foram criados dois cenários distintos. O “Cenário A” leva em consideração o planejamento da produção sem a política do RenovaBio. O “Cenário B”, por sua vez, incorpora as mudanças esperadas após a implementação do Programa.

3.2. Modelo proposto

O modelo proposto nesse trabalho tem como objetivo maximizar o caixa do grupo de usinas no último mês do período de safra. Em notação matemática, a função objetivo é representada por:

$$MAX C_{12}$$

em que C_{12} representa o montante de recursos em caixa no último mês de safra (mês 12).

Como output, o modelo deve definir para cada um dos meses as quantidades produzidas, vendidas, armazenadas e transferidas de uma usina para a outra. Em suma, a estrutura matemática adotada utiliza as seguintes variáveis:

- Q_{PMU} - Quantidade produzida de cada produto, em cada usina e em cada mês da safra;
- V_{PMU} - Quantidade vendida de cada produto, em cada usina e em cada mês da safra;
- E_{PMU} - Quantidade armazenada de cada produto, em cada usina e em cada mês da safra;
- SP_{PMU} - Quantidade de cada produto recebida pela usina de Ribeirão Preto em cada mês da safra;
- AL_{PMU} - Quantidade de cada produto recebida pela usina de Alagoas em cada mês da safra;
- GO_{PMU} - Quantidade de cada produto recebida pela usina de Goiás em cada mês da safra;
- C_M - Caixa mensal do grupo em cada um dos meses da safra;
- $CBIO_{PMU}$ - Quantidade de CBio emitida por cada produto e usina, em cada um dos meses da safra.

Em que:

- P representa o açúcar (1), o etanol anidro (2) e o etanol hidratado (3);
- M representa cada um dos meses da safra, de abril (1) até março (12);
- U representa as usinas situadas no estado de São Paulo (1), Alagoas (2) e Goiás (3).

O modelo utiliza os seguintes parâmetros:

- $E_{max_{PMU}}$ – Capacidade máxima mensal de estoque de cada produto (P) em cada uma das usinas (U) em cada mês de safra (M).
- $E_{f_{PMU}}$ – Estoque final de cada produto (P) em cada uma das três usinas (U) do grupo em cada mês de safra (M).
- $Q_{max_{PMU}}$ – Capacidade máxima mensal de produção de cada produto (P) em cada uma das usinas (U) em cada mês de safra (M).
- $V_{min_{PMU}}$ – Quantidade mensal mínima vendida de cada um dos três produtos (P) em cada usina (U) em cada mês de safra (M), visando atender as exigências dos contratos firmados.
- F_{cana_p} – Fator de transformação da cana de açúcar de cada um dos três produtos (P).
- M_{MU} – Quantidade mensal de cana de açúcar moída em cada uma das usinas (U) do grupo.
- ATR_{MU} – Açúcar total recuperável (ATR) mensal da cana de açúcar em cada uma das usinas (U) do grupo em cada mês de safra (M).

- $MIXmax_{PMU}$ – Participação máxima mensal do açúcar no *mix* de produção de cada usina (U) do grupo em cada mês de safra (M).
- $MIXmin_{PMU}$ – Participação mínima mensal do açúcar no *mix* de produção de cada usina (U) do grupo em cada mês de safra (M).
- $Preço_{PMU}$ – Preço mensal de cada um dos três produtos (P) em cada estado (U), em reais, em cada mês de safra (M).
- $Ccana_{MU}$ – Custo mensal, em reais, da tonelada de cana de açúcar em cada uma das usinas (U) do grupo em cada mês de safra (M).
- $Cprodutos_{PMU}$ – Custo mensal de produção de cada um dos três produtos (P) em cada uma das três usinas (U) em cada mês de safra (M).
- CO_M – Custo oportunidade mensal associado ao estoque dos produtos produzidos pelas usinas do grupo em cada mês de safra (M).
- $FreteSP_{PMU}$ – Valor do frete pago para realizar as transferências dos produtos (P) com origem na usina (U) situada no estado de São Paulo e com destino às usinas de Goiás e de Alagoas em cada mês de safra (M).
- $FreteGO_{PMU}$ – Valor do frete pago para realizar as transferências dos produtos (P) com origem na usina situada no estado de Goiás (U) e com destino às usinas de São Paulo e de Alagoas em cada mês de safra (M).
- $FreteAL_{PMU}$ – Valor do frete pago para realizar as transferências dos produtos (P) com origem na usina situada no estado de Alagoas (U) e com destino às usinas de São Paulo e de Goiás em cada mês de safra (M).
- $Nota_U$ – Nota de eficiência energética de cada uma das usinas (U) do grupo.
- $PreçoCBIO$ – Preço recebido pela emissão de um CBio pelo grupo de usinas.

A função objetivo, por sua vez, está sujeita as seguintes restrições:

Estoque: as restrições de estoque indicam que o estoque de cada uma das usinas é calculado a partir do estoque no período anterior, ou, no caso do primeiro mês, o parâmetro do estoque inicial, somado à quantidade produzida e recebida das outras usinas, para cada um dos produtos, menos a quantidade vendida e a quantidade transferida para as outras usinas. As equações de estoque no primeiro mês da safra e as equações de estoque o longo dos demais meses estão dispostas a seguir.

- Equação 1: estoque inicial da usina localizada no estado de São Paulo.

$$E_{PMU} = Ei_U + Q_{PMU} - V_{PMU} - SP_{PMU} + AL_{PMU} + GO_{PMU}$$

Em que: $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1\}$; $U \in \{1\}$.

- Equação 2: estoque contábil da usina localizada no estado de São Paulo.

$$E_{PMU} = E_{P(M-1)U} + Q_{PMU} - V_{PMU} - SP_{PMU} + AL_{PMU} + GO_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{1\}$.

- Equação 3: estoque inicial da usina localizada no estado de Goiás.

$$E_{PMU} = Ei_U + Q_{PMU} + SP_{PMU} + AL_{PMU} - V_{PMU} - GO_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1\}$; $U \in \{3\}$.

- Equação 4: estoque contábil da usina localizada no estado de Goiás.

$$E_{PMU} = E_{P(M-1)U} + Q_{PMU} - V_{PMU} + SP_{PMU} + AL_{PMU} - GO_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{3\}$.

- Equação 5: estoque inicial da usina localizada no estado de Alagoas.

$$E_{PMU} = Ei_U + Q_{PMU} - AL_{PMU} + SP_{PMU} - V_{PMU} + GO_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1\}$; $U \in \{2\}$.

- Equação 6: estoque contábil da usina localizada no estado de Alagoas.

$$E_{PMU} = E_{P(M-1)U} + Q_{PMU} - V_{PMU} + SP_{PMU} - AL_{PMU} + GO_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{2\}$.

- Equação 7: restrição indica que a quantidade armazenada dos três produtos não pode exceder a capacidade máxima de armazenagem mensal de cada uma das três usinas.

$$E_{PMU} \leq Emax_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1, 2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{1, 2, 3\}$.

- Equação 8: restrição indica que o estoque de cada um dos três produtos, em cada uma das usinas, no final da safra deve ser maior ou igual ao parâmetro do estoque final.

$$E_{PMU} \geq EF_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1, 2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{1, 2, 3\}$.

Produção - essas restrições limitam a produção mensal máxima para cada uma das usinas.

- Equação 9: indica que a produção mensal de cada usina para cada um dos três produtos não pode exceder a respectiva capacidade máxima de produção.

$$Q_{PMU} \leq Qmax_{PMU}$$

Em que: $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1, 2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{1, 2, 3\}$.

Vendas - limitam a quantidade de etanol anidro, etanol hidratado e de açúcar que a usina é capaz de vender. As restrições de vendas mínimas indicam que há um mínimo mensal a ser comercializado de cada um dos produtos, de modo que cada usina típica possa cumprir os contratos firmados.

- Equação 10: indica que o volume mensal vendido de cada um dos três produtos deve ser maior ou igual ao mínimo exigido pelos contratos individuais de cada usina

$$V_{PMU} \geq Vmin_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1, 2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{1, 2, 3\}$.



- Equação 11: indica que o volume mensal vendido de cada um dos três produtos deve ser menor ou igual a disponibilidade de produtos da usina do Alagoas no primeiro mês da safra.

$$V_{PMU} \leq Ei_U + Q_{PMU} - AL_{PMU} + GO_{PMU} + SP_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1\}$; $U \in \{2\}$.

- Equação 12: indica que o volume mensal vendido de cada um dos três produtos deve ser menor ou igual a disponibilidade mensal de produtos da usina do Alagoas a partir do segundo mês da safra.

$$V_{PMU} \leq E_{P(M-1)U} + Q_{PMU} - AL_{PMU} - AL_{PMU} + GO_{PMU} + SP_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{2\}$.

- Equação 13: indica que o volume mensal vendido de cada um dos três produtos deve ser menor ou igual a disponibilidade mensal de produtos da usina de São Paulo no primeiro mês da safra.

$$V_{PMU} \leq Ei_U + Q_{PMU} - SP_{PMU} + AL_{PMU} + GO_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1\}$; $U \in \{1\}$.

- Equação 14: indica que o volume mensal vendido de cada um dos três produtos deve ser menor ou igual a disponibilidade mensal de produtos da usina situada no estado de São Paulo a partir do segundo mês da safra.

$$V_{PMU} \leq E_{P(M-1)U} + Q_{PMU} - SP_{PMU} + AL_{PMU} + GO_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{1\}$.

- Equação 15: indica que o volume mensal vendido de cada um dos três produtos deve ser menor ou igual a disponibilidade mensal de produtos da usina situada no estado de Goiás no primeiro mês da safra.

$$V_{PMU} \leq Ei_U + Q_{PMU} + SP_{PMU} + AL_{PMU} - GO_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1\}$; $U \in \{3\}$.

- Equação 16: indica que o volume mensal vendido de cada um dos três produtos deve ser menor ou igual a disponibilidade mensal de produtos da usina situada no estado de Goiás a partir do segundo mês da safra.

$$V_{PMU} \leq E_{P(M-1)U} + Q_{PMU} + SP_{PMU} + AL_{PMU} - GO_{PMU}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{3\}$.

Alocação produtiva - exige que toda a cana-de-açúcar processada em cada uma das três usinas deve ser transformada em açúcar, etanol anidro e etanol hidratado.

- Equação 17: restrição de alocação produtiva para a usina localizada no estado de São Paulo.

$$\sum_{P=1}^3 \left[\frac{Q_{PMU} * F_P}{M_{MU} * ATR_{MU}} \right] = 1$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1, 2, 3, 4, \dots, 9\}$; $U \in \{1\}$.

- Equação 18: restrição de alocação produtiva para a usina localizada no estado de Alagoas.

$$\sum_{P=1}^3 \left[\frac{Q_{PMU} * F_P}{M_{MU} * ATR_{MU}} \right] = 1$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{6, 7, 8, \dots, 12\}$; $U \in \{2\}$.

- Equação 19: restrição de alocação produtiva para a usina localizada no estado de Goiás.

$$\sum_{P=1}^3 \left[\frac{Q_{PMU} * F_P}{M_{MU} * ATR_{MU}} \right] = 1$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1, 2, 3, 4, \dots, 9\}$; $U \in \{3\}$.

Mix açúcar – estabelece que a produção de açúcar não pode ser maior que o *mix* máximo e não pode ser menor do que o *mix* mínimo de cada uma das três usinas.

- Equação 19: restrição do *mix* máximo de açúcar da usina localizada no estado de São Paulo.

$$\sum_{P=1}^1 \left[\frac{Q_{PMU} * F_P}{M_{MU} * ATR_{MU}} \right] \leq MIXmax_{MU}$$

Em que $P \in \{1\}$; $M \in \{1, 2, 3, \dots, 9\}$; $U \in \{1\}$.

- Equação 20: restrição do *mix* máximo de açúcar da usina localizada no estado de Alagoas.

$$\sum_{P=1}^1 \left[\frac{Q_{PMU} * F_P}{M_{MU} * ATR_{MU}} \right] \leq MIXmax_{MU}$$

Em que $P \in \{1\}$; $M \in \{6, 7, 8, \dots, 12\}$; $U \in \{2\}$.

- Equação 21: restrição do *mix* mínimo de açúcar da usina localizada no estado de São Paulo.

$$\sum_{P=1}^1 \left[\frac{Q_{PMU} * F_P}{\frac{M_{MU} * ATR_{MU}}{1000}} \right] \geq MIXmin_{MU}$$

Em que $P \in \{1\}$; $M \in \{1, 2, 3, \dots, 9\}$; $U \in \{1\}$.

- Equação 22: restrição do *mix* mínimo de açúcar da usina localizada no estado de Alagoas.

$$\sum_{P=1}^1 \left[\frac{Q_{PMU} * F_P}{\frac{M_{MU} * ATR_{MU}}{1000}} \right] \geq MIXmin_{MU}$$

Em que $P \in \{1\}$; $M \in \{6, 7, 8, \dots, 12\}$; $U \in \{2\}$.

Quantidade de CBio - quantidade de CBio emitida por cada uma das usinas leva em consideração a quantidade vendida de etanol anidro e de etanol hidratado, multiplicada pela nota de eficiência energética de cada uma das unidades produtoras.

- Equação 23: cálculo da quantidade de CBio emitida por cada uma das usinas produtoras de etanol.

$$CBIO_{PMU} = V_{PMU} * N_U$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1, 2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{1, 2, 3\}$.

Fluxo de caixa mensal - é calculado subtraindo os custos das receitas de cada uma das três unidades produtoras, somados ou subtraídos do caixa inicial, para o primeiro mês da safra, ou do caixa do mês anterior, para os demais meses.

A receita é obtida a partir da quantidade vendida multiplicada pelo preço de cada um dos três produtos, acrescida do valor do CBio emitido. Como componentes dos custos, são incorporados os custos fixos mensais, os custos variáveis de produção e de moagem da cana, os custos de transporte e o custo oportunidade da operação de armazenagem.

- Equação 24: equação que representa o caixa do grupo de usinas no primeiro mês da safra.

$$\begin{aligned} C_M = & \sum_{U=1}^3 Ci_U + \sum_{P=1}^3 \sum_{U=1}^3 V_{PMU} * P_{PMU} - \sum_{U=1}^3 CF_U - \sum_{U=1}^3 M_U * CC_U - \sum_{P=1}^3 \sum_{U=1}^3 Q_{PMU} * CV_{PMU} \\ & - \sum_{P=1}^3 \sum_{U=1}^3 E_{PMU} * CO_M - \sum_{U=1}^3 \sum_{P=1}^3 SP_{PMU} * Fsp_{PMU} - \sum_{U=1}^3 \sum_{P=1}^3 GO_{PMU} * Fgo_{PMU} \\ & - \sum_{U=1}^3 \sum_{P=1}^3 AL_{PMU} * Fal_{PMU} + \sum_{P=1}^3 \sum_{U=1}^3 CBIO_{PMU} * Pcbio \end{aligned}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{1\}$; $U \in \{1, 2, 3\}$.

- Equação 25: equação que representa o caixa do grupo de usinas a partir do segundo mês da safra.

$$C_M = \sum_{P=2}^{12} C_{M-1} + \sum_{P=1}^3 \sum_{U=1}^3 V_{PMU} * P_{PMU} - \sum_{U=1}^3 C_{F_U} - \sum_{U=1}^3 M_U * C_{C_U} - \sum_{P=1}^3 \sum_{U=1}^3 Q_{PMU} * C_{V_{PMU}} \\ - \sum_{P=1}^3 \sum_{U=1}^3 E_{PMU} * C_{O_M} - \sum_{U=1}^3 \sum_{P=1}^3 S_{P_{PMU}} * F_{sp_{PMU}} - \sum_{U=1}^3 \sum_{P=1}^3 G_{O_{PMU}} * F_{go_{PMU}} \\ - \sum_{U=1}^3 \sum_{P=1}^3 A_{L_{PMU}} * F_{al_{PMU}} + \sum_{P=1}^3 \sum_{U=1}^3 C_{BIO_{PMU}} * P_{cbio}$$

Em que $P \in \{1, 2, 3\}$; $M \in \{2, 3, 4, \dots, 12\}$; $U \in \{1, 2, 3\}$.

3.3. Parâmetros utilizados no modelo

Para a modelagem do problema proposto, foram considerados os parâmetros de custo, preço e capacidade operacional de cada uma das usinas. Os parâmetros de custo são divididos em: (i) custo fixo de cada unidade produtora; (ii) custos variáveis de produção de cada usina e produto; (iii) custo de oportunidade relacionado à armazenagem; (iv) custo de transporte de cada produto para cada uma das usinas.

O custo fixo mensal de cada usina foi obtido a partir de dados da UNICA (2018) para a safra 2017/2018. Já os custos variáveis de produção mensal de cada um dos produtos foram obtidos a partir dos dados publicados pelo PECEGE (2018). O custo de oportunidade associado ao estoque foi obtido considerando 85% do CDI mensal, conforme os dados disponibilizados pelo Banco Central (2018). Os preços de custo de transporte mensal de cada um dos produtos foram coletados na base de dados do SIFRECA (2018).

Os parâmetros de preço são divididos em: (i) preço recebido pela venda do açúcar, etanol anidro e etanol hidratado em cada um dos estados; e, (ii) preço recebido por cada CBio emitido.

Os preços recebidos com a venda do açúcar e do etanol anidro e hidratado em cada mês foram obtidos a partir de dados disponibilizados pela UNICA (2018) e pelo CONSECANA (2018). Para o preço líquido recebido por cada unidade de CBio emitido foi adotado um valor de R\$ 338 por título, levando em consideração o preço do carbono utilizado na modelagem disponibilizada pelo MME (2017) para taxa de câmbio observada em 12/04/2018 – cerca de R\$ 3,38 (BACEN, 2020);

As notas de eficiência energéticas de cada uma das usinas foram apresentadas em função quantidade de etanol total que precisa ser comercializada para a emissão de um CBio (Tabela 1).

Tabela 1. Eficiência energia das usinas, em CBio por litro de etanol comercializado (Cbio/l)

Usina	Coruripe (AL)	Quirinópolis (GO)	Ribeirão Preto (SP)
Nota de eficiência energética (CBio/l)	0,001225	0,001353	0,001439

Fonte: Elaborado pelo autor com base em UNICA (2018) e MME (2017)

Os parâmetros de capacidade operacional são divididos em: (i) capacidade de produção de cada usina para cada produto; (ii) dados de produção máxima e mínima de açúcar, etanol anidro e etanol hidratado; (iii) capacidade de estoque de cada usina para cada produto; (iv) parâmetros de estoque inicial e final; (v) dados de moagem e qualidade da cana; (vi) valores máximos e mínimos para a participação do açúcar no mix produtivo de cada usina; e (vii) fator de transformação da cana para cada um dos produtos.

Os dados de produção máxima e mínima de cada um dos produtos, bem como os dados do mix máximo e mínimo do açúcar, moagem mensal de cada uma das unidades e qualidade da cana foram obtidos a partir de informações disponibilizadas pela UNICA (2018) e MAPA (2018). Já os parâmetros de estoque inicial e final, parâmetros de capacidade máxima de estoque e os fatores de transformação foram obtidos a partir de informações disponibilizadas pela UNICA (2018), considerando os valores médios do mercado.

Tabela 2. Fator de transformação da cana de açúcar em açúcar, etanol anidro e etanol hidratado (kg de ATR/kg açúcar ou kg de ATR/l de etanol).

Produto	Açúcar	Etanol Anidro	Etanol Hidratado
Fator de Transformação da cana	1,0495	1,7492	1,6761

Fonte: UNICA (2018).

O modelo foi implementado no General Algebraic Modelling System (GAMS) e o solver Cplex foi adotado para a otimização.

4. Análise e discussão dos resultados

A Tabela 3 apresenta o volume produzido de açúcar pelas três usinas ao longo do ano safra, considerando os dois cenários analisados. Em ambos os cenários A e B, é possível notar que a produção na usina de Ribeirão Preto (SP) foi maior nos meses de julho e agosto dado o aumento da produção mínima do produto para atender aos contratos de exportação. Já para a usina localizada em Coruripe (AL), os meses de maior produção foram os de novembro a janeiro, tantos nos cenários A e B. A usina de Goiás não tem capacidade de produção de açúcar e, por isso, os volumes permaneceram zerados ao longo do ano-safra.

Comparando os cenários A e B, observa-se que a política do RenovaBio fez com que as usinas de São Paulo e Alagoas produzissem um total de 196,2 e 55,3 mil toneladas de açúcar, respectivamente, volumes 5,3% (11,1 mil toneladas) e 7,4% (4,4 mil toneladas) menores em comparação com o cenário onde não se vigora a referida política.

Esses resultados se baseiam na premissa de que os preços do açúcar não são influenciados pelo comportamento do grupo produtor em análise.

Tabela 3. Produção mensal de açúcar no ano-safra (em mil toneladas).

Cenário	Cenário sem RenovaBio (A)			Cenário com RenovaBio (B)			Comparativo (B-A)		
	AL	GO	SP	AL	GO	SP	AL	GO	SP
abr	0,0	0,0	14,9	0,0	0,0	14,9	0,0	0,0	0,0
mai	0,0	0,0	23,2	0,0	0,0	21,1	0,0	0,0	-2,0
jun	0,0	0,0	28,8	0,0	0,0	27,4	0,0	0,0	-1,4
jul	0,0	0,0	32,7	0,0	0,0	32,0	0,0	0,0	-0,7
ago	0,0	0,0	33,3	0,0	0,0	31,0	0,0	0,0	-2,3
set	3,1	0,0	28,2	2,6	0,0	25,7	-0,4	0,0	-2,4
out	9,3	0,0	25,8	6,9	0,0	23,7	-2,4	0,0	-2,1
nov	12,9	0,0	13,1	12,7	0,0	13,1	-0,2	0,0	0,0
dez	13,9	0,0	7,2	12,5	0,0	7,2	-1,4	0,0	0,0
jan	10,9	0,0	0,0	10,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
fev	6,3	0,0	0,0	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
mar	3,4	0,0	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

A Tabela 4 detalha o volume total de etanol produzido nos dois cenários, pelas três usinas, ao longo do ano-safra. As usinas localizadas nos estados de Alagoas, Goiás e São Paulo produziram 19,2, 191,7 e 93,7 mil metros cúbicos de etanol no cenário A, contra 22,0, 191,7 e 100,5 mil metros cúbicos no cenário B, respectivamente.

Comparando os dois cenários, nota-se que a política do RenovaBio aumentou a produção de etanol total para as usinas de Alagoas e São Paulo em 2,7 (14,2%) e 6,8 (7,26%) mil metros cúbicos. A usina de Goiás, como produz exclusivamente etanol, não apresentou mudanças no volume produzido com a vigência da política do RenovaBio – esse resultado se deve ao fator de que a modelagem estruturada não incorpora a possibilidade de aumento da capacidade de produção instalada.

Tabela 4. Produção mensal de etanol total no ano-safra

Cenário	Cenário sem RenovaBio (A)			Cenário com RenovaBio (B)			Comparativo (B-A)		
	AL	GO	SP	AL	GO	SP	AL	GO	SP
abr	0,0	21,2	8,1	0,0	21,2	8,1	0,0	0,0	0,0
mai	0,0	24,6	10,0	0,0	24,6	11,2	0,0	0,0	1,2
jun	0,0	24,8	10,9	0,0	24,8	11,8	0,0	0,0	0,8
jul	0,0	27,4	11,9	0,0	27,4	12,4	0,0	0,0	0,4
ago	0,0	25,6	13,0	0,0	25,6	14,5	0,0	0,0	1,4
set	0,6	24,4	12,6	0,8	24,4	14,1	0,3	0,0	1,5
out	1,8	21,9	11,4	3,3	21,9	12,7	1,5	0,0	1,3
nov	4,5	17,4	8,6	4,6	17,4	8,6	0,1	0,0	0,0
dez	3,8	4,3	7,2	4,7	4,3	7,2	0,9	0,0	0,0
jan	4,2	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
fev	2,7	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
mar	1,6	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Em relação as quantidades vendidas de açúcar ao longo do ano-safra, dispostas na Tabela 5, observa-se nos dois cenários que grande parte do produto é comercializado pela usina de Alagoas. O fluxo ótimo de produto indica que essa unidade deve receber transferências da usina de São Paulo e comercializar o produto em janeiro, quando os preços estão mais atrativos. Já a usina de São Paulo comercializa o mínimo necessário (6,6 mil toneladas) ao longo de todo o ano-safra.

Com a vigência da política do RenovaBio, observa-se uma redução nas vendas da usina de Alagoas nos meses de maio a outubro, devido, principalmente, a redução da produção por parte da usina de São Paulo, que passa a transferir uma quantidade menor para a usina do Nordeste.

Considerando todo o período de análise, a redução das vendas da usina de Alagoas com a política do RenovaBio foi de 15,5 mil toneladas.

Tabela 5: Quantidade mensal de vendas de açúcar no ano-safra

Cenário	Cenário sem RenovaBio (A)			Cenário com RenovaBio (B)			Comparativo (B-A)		
	AL	GO	SP	AL	GO	SP	AL	GO	SP
abr	8,4	0,0	6,6	8,4	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0
mai	16,6	0,0	6,6	14,5	0,0	6,6	-2,0	0,0	0,0
jun	22,2	0,0	6,6	20,8	0,0	6,6	-1,4	0,0	0,0
jul	26,1	0,0	6,6	25,4	0,0	6,6	-0,7	0,0	0,0
ago	26,7	0,0	6,6	24,4	0,0	6,6	-2,3	0,0	0,0
set	24,7	0,0	6,6	21,8	0,0	6,6	-2,9	0,0	0,0
out	15,8	0,0	6,6	11,3	0,0	6,6	-4,5	0,0	0,0
nov	1,9	0,0	6,6	1,9	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0
dez	1,9	0,0	6,6	1,9	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0
jan	33,9	0,0	6,6	32,3	0,0	6,6	-1,6	0,0	0,0
fev	6,3	0,0	6,6	6,3	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0
mar	3,4	0,0	6,6	3,4	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Em relação ao planejamento de vendas de etanol, observa-se, no cenário A, que a usina de Coruripe (AL) vende grande parte do volume entre os meses de abril e julho, enquanto a usina de Quirinópolis (GO) registrou picos de vendas nos meses de outubro e janeiro. A unidade de Ribeirão Preto comercializou a maior parte do seu volume nos meses de novembro e março.

Já no cenário B, a usina de Goiás registrou maiores vendas nos meses de outubro, novembro, janeiro e março, enquanto a usina de São Paulo registrou pico de venda apenas no mês de março. A usina de Alagoas manteve o ritmo de venda, com grande parte do volume comercializado entre os meses de abril e julho.

Comparando os cenários A e B, observa-se mudanças no planejamento de vendas das três usinas em vários meses do ano. No mês de maio, por exemplo, os 4,8 mil metros cúbicos que seriam vendidos pela usina de Alagoas no cenário A foram comercializados pela unidade de São Paulo, que deixou de transferir o produto para a região Nordeste.

Tabela 6: Quantidade mensal de vendas de etanol total no ano-safra

Cenário	Cenário sem RenovaBio (A)			Cenário com RenovaBio (B)			Comparativo (B-A)		
Indicador/Mês	AL	GO	SP	AL	GO	SP	AL	GO	SP
abr	15,9	6,9	7,2	15,9	7,4	7,2	0,0	0,5	0,1
mai	20,4	3,0	2,5	15,6	5,7	7,3	-4,8	2,6	4,8
jun	22,3	3,0	2,5	22,3	3,0	2,5	0,0	0,0	0,0
jul	18,9	3,0	2,5	14,7	3,0	2,5	-4,1	0,0	0,0
ago	0,5	3,0	2,5	0,5	3,0	2,5	0,0	0,0	0,0
set	0,7	3,0	2,5	0,8	3,0	2,5	0,2	0,0	0,0
out	0,5	16,3	2,5	1,8	17,4	9,2	1,3	1,1	6,7
nov	0,5	7,4	17,1	0,5	17,4	7,2	0,0	10,0	-10,0
dez	3,5	3,0	8,6	4,5	4,8	6,8	1,0	1,8	-1,8
jan	4,2	23,0	2,5	4,2	23,1	2,5	0,0	0,1	0,0
fev	5,5	3,0	2,5	5,5	3,0	2,5	0,0	0,0	0,0
mar	4,0	3,0	76,7	4,0	28,6	51,1	0,0	25,6	-25,6

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Em relação aos estoques de açúcar ao longo do ano-safra, dispostos na Tabela 7, observa-se que a usina de Coruripe (AL) armazena o produto apenas nos meses de novembro e dezembro, e a usina de Ribeirão Preto (SP) mantém o açúcar estocado nos meses de outubro a fevereiro, nos dois cenários. No entanto, com a vigência da política do RenovaBio, a usina de Alagoas reduziu o volume de açúcar estocado nos meses de novembro e dezembro em 0,2 e 1,6 mil toneladas, respectivamente.

Tabela 7: Quantidade mensal de estoques de açúcar no ano-safra

Cenário	Cenário sem RenovaBio (A)			Cenário com RenovaBio (B)			Comparativo (B-A)		
Indicador/Mês	AL	GO	SP	AL	GO	SP	AL	GO	SP
abr	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
mai	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jun	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
jul	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ago	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
set	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
out	0,0	0,0	12,7	0,0	0,0	12,7	0,0	0,0	0,0
nov	11,0	0,0	19,2	10,8	0,0	19,2	-0,2	0,0	0,0
dez	23,0	0,0	19,8	21,4	0,0	19,8	-1,6	0,0	0,0
jan	0,0	0,0	13,2	0,0	0,0	13,2	0,0	0,0	0,0
fev	0,0	0,0	6,6	0,0	0,0	6,6	0,0	0,0	0,0
mar	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Já para o etanol total, no cenário onde não vigora a política do RenovaBio, o estoque médio das usinas de Alagoas, Goiás e São Paulo foram de 1,9, 28,6 e 33,8 mil metros cúbicos, respectivamente. Com a política do RenovaBio, esses valores sofram variações de -0,73%, -0,91% e +3,67% para as usinas de Alagoas, Goiás e São Paulo, respectivamente (Tabela 8).

Tabela 8: Quantidade mensal de estoques de etanol total no ano-safra

Cenário	Cenário sem RenovaBio (A)			Cenário com RenovaBio (B)			Comparativo (B-A)		
	AL	GO	SP	AL	GO	SP	AL	GO	SP
abr	0,4	0,1	2,5	0,0	0,0	2,5	-0,4	-0,1	-0,1
mai	0,0	6,5	5,2	0,0	3,3	6,4	0,0	-3,2	1,1
jun	1,0	6,6	11,9	0,9	6,6	10,9	-0,1	0,0	-1,1
jul	0,6	12,5	21,3	0,5	12,5	24,8	0,0	0,0	3,5
ago	0,1	30,6	36,3	0,0	30,6	41,3	-0,1	0,0	4,9
set	0,0	52,0	46,4	0,0	52,0	52,8	0,0	0,0	6,5
out	1,3	56,5	56,3	1,5	56,5	56,3	0,2	0,0	0,0
nov	5,3	56,5	57,7	5,7	56,5	57,7	0,3	0,0	0,0
dez	5,7	56,4	57,7	5,7	56,5	57,7	0,0	0,1	0,0
jan	5,7	33,4	55,2	5,7	33,4	55,2	0,0	0,0	0,0
fev	2,8	30,4	52,7	2,8	30,4	52,7	0,0	0,0	0,0
mar	0,5	1,7	1,6	0,5	1,7	1,6	0,0	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Em relação ao mix produtivo, observa-se que no cenário sem a política do RenovaBio o mix produtivo médio do açúcar, considerando apenas os meses de moagem para cada usina, foi de 66% para a usina de Alagoas, 0% para a usina de Goiás e 56% para a usina de São Paulo (Tabela 9). Já no cenário onde se vigora a política do RenovaBio, observa-se que os mesmos indicadores apresentam valores de 60%, 0% e 53%, respectivamente.

Tabela 9: Mix médio de açúcar no ano safra

Cenário	Cenário sem RenovaBio (A)			Cenário com RenovaBio (B)			Comparativo (B-A)		
	AL	GO	SP	AL	GO	SP	AL	GO	SP
abr	0%	0%	53%	0%	0%	53%	0%	0%	0%
mai	0%	0%	59%	0%	0%	54%	0%	0%	-5%
jun	0%	0%	62%	0%	0%	59%	0%	0%	-3%
jul	0%	0%	63%	0%	0%	61%	0%	0%	-1%
ago	0%	0%	61%	0%	0%	57%	0%	0%	-4%
set	77%	0%	58%	66%	0%	53%	-11%	0%	-5%
out	75%	0%	58%	56%	0%	53%	-19%	0%	-5%
nov	63%	0%	49%	63%	0%	49%	-1%	0%	0%
dez	69%	0%	38%	62%	0%	38%	-7%	0%	0%
jan	61%	0%	0%	61%	0%	0%	0%	0%	0%
fev	59%	0%	0%	59%	0%	0%	0%	0%	0%
mar	56%	0%	0%	56%	0%	0%	0%	0%	0%

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

A Tabela 10 apresenta os resultados financeiros do grupo de usinas ao longo do ano-safra. Nela, observa-se que os custos são maiores nos meses de maio a agosto devido ao aumento da produção por parte das usinas de São Paulo e Goiás, o que acarreta um aumento nos custos variáveis de produção.

No cenário A, o grupo apresentou um custo médio de R\$ 46,44 milhões e uma receita média de R\$ 74,12 milhões, com montante de R\$ 392,02 milhões em caixa no último mês do ano-safra. Nos meses de agosto a novembro, o lucro bruto mensal do grupo registrou valores negativos dada a estratégia de armazenagem adotada.

Tabela 10: Resultados dos indicadores financeiros para o grupo de usinas nos dois cenários

Cenário	Cenário sem RenovaBio (A)			Cenário com RenovaBio (B)			Comparativo (B-A)		
Indicador/mês	Custo	Receita	Caixa	Custo	Receita	Caixa	Custo	Receita	Caixa
abr	51,2	73,6	82,4	51,1	88,1	97,0	-0,1	14,5	14,7
mai	60,5	80,9	102,7	58,4	92,8	131,4	-2,1	11,9	28,7
jun	64,0	91,3	130,0	63,1	100,8	169,1	-0,9	9,6	39,2
jul	66,5	87,1	150,6	65,5	87,9	191,6	-1,1	0,8	41,0
ago	62,0	54,3	142,9	61,1	53,7	184,2	-0,9	-0,5	41,3
set	58,6	50,5	134,8	57,6	49,7	176,3	-1,0	-0,8	41,6
out	57,4	54,7	132,1	56,1	75,3	195,5	-1,3	20,6	63,4
nov	50,4	48,2	129,9	49,4	59,0	205,1	-0,9	10,9	75,2
dez	33,7	34,5	130,7	33,4	43,5	215,1	-0,3	9,0	84,5
jan	19,6	108,3	219,4	19,6	120,6	316,2	0,0	12,3	96,8
fev	16,3	35,6	238,7	16,3	40,5	340,4	0,0	4,9	101,7
mar	17,2	170,5	392,0	14,8	207,0	532,7	-2,4	36,5	140,6

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

No cenário B, observa-se que os custos foram menores em praticamente todos os meses do ano-safra, exceto em janeiro e fevereiro. Com a vigência da política do RenovaBio, dada a mudança da estratégia das usinas, observou-se que o custo médio do grupo alcançou R\$ 45,52 milhões (-1,98% em comparação com o cenário A) e a receita média foi de R\$ 84,91 milhões (+14,57% em comparação com o cenário A). O caixa ao final do ano-safra no Cenário B totalizou R\$ 532,67 milhões.

5. Conclusões

A partir do modelo matemático desenvolvido, o presente trabalho avaliou as melhores estratégias de produção e comercialização de etanol, açúcar e CBio para um grupo de três usinas localizadas em diferentes Estados do País.

Os resultados e a estrutura do modelo evidenciam a complexidade do planejamento conduzido rotineiramente pelas unidades produtoras. Trata-se de um problema com muitos parâmetros, variáveis e interrelações, justificando o emprego de modelagem matemática para suporte à tomada de decisão.

A comparação dos dois cenários evidencia que a incorporação do CBio à dinâmica de produção e de comercialização não resultou apenas em receita adicional ao produtor. De fato, a presença do crédito de descarbonização promoveu uma alteração em toda a estratégia ótima de alocação de cana-de-açúcar, de comercialização dos produtos e até mesmo de transferência entre as unidades produtoras.

Em outras palavras, para maximizar a receita após a introdução da venda de CBios, as unidades industriais precisam promover mudanças nas estratégias de produção, comercialização e armazenagem ao longo do ano-safra. Essa dinâmica só é possível quando a

decisão é tomada de forma sistêmica, considerando todos os custos e receitas envolvidas nas inúmeras possibilidades de produção e de comercialização.

De forma geral, se observou que o preço líquido adotado para o CBio promoveu um aumento de 9,5 milhões de litros na produção de etanol do grupo, mantendo-se inalterada a capacidade produtiva. Já no Cenário B, o montante em caixa ao final do ano-safra foi de R\$ 592,7 milhões, com aumento considerável em relação aos R\$ 392,0 milhões verificados na melhor estratégia obtida para o Cenário A.

Por fim, cabe ressaltar que este estudo se configura como uma primeira abordagem para o problema. Entre as limitações observadas, cabe ressaltar: i) foram utilizadas usinas típicas para cada região, logo, os resultados não permitem uma comparação entre a estratégia ótima sugerida pelo modelo e aquela observada na operação real; ii) nas premissas da modelagem, se considerou que a produção do grupo em questão não altera os preços de mercado do etanol, do açúcar e do CBio; iii) o modelo faz uma avaliação pontual para 12 meses de safra, não incorporando, dessa forma, a possibilidade de investimentos ao longo do tempo para a ampliação da produção; iv) foram adotadas inúmeras premissas acerca do mercado de CBio, as quais precisam ser melhor avaliadas quando esse mercado estiver funcionando.

Referências bibliográficas

BACCHI, M. R. P. B.; RODRIGUES, L. Estrutura de Mercado e Formação de Preços na Cadeia Produtiva de Cana-de-açúcar. In: ALVES, L. R. A.; BACHA, C. J. C. **Panorama da agricultura brasileira estrutura de mercado, comercialização, formação de preços, custos de produção e sistemas produtivos**. Campinas: Campinas Alínea, 2018.

BACEN. **Série Histórica do Crédito de Depósito Bancário (CDI)**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/pt-br/#!/home>>. Acesso em 3 ago. 2018.

BRANCO, J. E. Holler et al. Study of optimal locations for new sugarcane mills in Brazil: Application of a MINLP network equilibrium model. **Biomass and Bioenergy**, v. 127, p. 105, 2019.

Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA) e Confederação Nacional da Agricultura e Pecuária (CNA). **PIB do agronegócio brasileiro de 1996 a 2019**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>>. Acesso em 19 mar. 2020.

CEPEA; CNA. **PIB do Agronegócio Brasil**. 2020. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br>>. Acesso em 02 mar. 2020.

CONAB: Companhia Nacional De Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Monitoramento agrícola- Safra 2019/2020, v. 4, n. 1, p. 1–98, 2020.

CONSECANA. **Indicadores de Preços**. Disponível em: <<https://www.consecana.com.br/>>. Acesso em 19 jun. 2018.

ESALQ-LOG. **Sistema de Informações de Frete (SIFRECA)**. Disponível em <<https://sifreca.esalq.usp.br/>>. Acesso em 23 abr. 2018.

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A. G. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. **Industrial crops and products**, v. 129, p. 201-205, 2019.

JUNQUEIRA, R. Á. R.; MORABITO, R. Modeling and solving a sugarcane harvest front scheduling problem. **International Journal of Production Economics**, v. 213, p. 150-160, 2019.

KHATIWADA, D. et al. Optimizing ethanol and bioelectricity production in sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable Energy**, v. 85, p. 371-386, 2016.

MDIC. **Balança Comercial Comex Vis Siscomex - Milho em grãos**. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/comex-vis/frame-ppe?ppe=1240>>. Acesso em: 22 jul. 2018.

MDIC. **Balança Comercial Comex Vis Siscomex - Soja, mesmo triturada**. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/comex-vis/frame-ppe?ppe=1315>>. Acesso em: 22 jul. 2018.

MDIC. **Comex Vis: Principais Produtos Exportados - Açúcar de Cana, bruto**. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/comex-vis/frame-ppe?ppe=2010>>. Acesso em: 22 jul. 2018.

MICHELS, I. L.; ARAKAKI, S. R. M. V. Setor sucroenergético Brasileiro: os custos ambientais como fator de diferenciação. **Desarrollo Local Sostenible**, v. 5, p. 1-14, 2012.

Ministério Minas e Energia. **Nota Técnica sobre o RenovaBio**. 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em 19 jul. 2018.

OLIVÉRIO, J. L.; BOSCARIOL, F. C.; FERREIRA, R. E. Brazilian monetary carbon credits (CBio) optimized using sustainable mill technologies. In: **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**. 2019. p. 165-175.

PAIVA, R. P. O. DE; MORABITO, R. An optimization model for the aggregate production planning in alcohol and sugar mills. **Gestão & Produção**, v. 14, n. 1, p. 25-41, 2009.

PAIVA, R. P. O. **Modelagem Do Planejamento Agregado da Produção em Usinas Cooperadas do Setor Sucroenergético Utilizando Programação Matemática e Otimização Robusta**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. p. 243, 2009.

PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. An optimization model for the aggregate production planning of a Brazilian sugar and ethanol milling company. **Annals of Operations Research**, v. 169, n. 1, p. 117, 2009.

PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. Otimização do planejamento hierárquico da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético. **Production**, v. 23, n. 3, p. 449-467, 2013.

PECEGE. **Relatório dos Custos de Produção**. Disponível em <<http://pecege.org.br/>>. Acesso em 18 jun. 2018.

SOARES, M. G.; CAIXETA FILHO, J. V. Características do mercado de frete para cargas agrícolas. **Preços Agrícolas**, v. 121, p. 21-25, 1996.

TAYLOR, B. W. **Introduction to Management science**. 11. ed. Bookman, 2008.

UNICA. **UNICADATA**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/>>. Acesso em 16 jun. 2018.