
GOAL PROGRAMMING APLICADO AO PLANEJAMENTO DO PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM UNIDADES SUCROENERGÉTICAS

CARMO, Carlos Roberto Souza¹

MOTA, Flávia Diniz²

FLORENTINO, Helenice de Oliveira³

Recebido em: 2021.07.21

Aprovado em: 2022.04.18

ISSUE DOI: 10.3738/1982.2278.3948

RESUMO: Este trabalho de pesquisa teve por objetivo aplicar a técnica de *goal programming* visando obter um modelo matemático de otimização multiobjetivo voltado para a escolha de cultivares de cana-de-açúcar a serem plantadas, de forma a atender aos parâmetros técnico-produtivos exigidos por unidades produtivas sucroenergéticas, e, ainda, minimizar os respectivos custos. O modelo proposto teve por finalidade minimizar os desvios negativos referentes à demanda de POL ($n1$), ou seja, a quantidade aparente de sacarose contida no caldo da cana-de-açúcar plantada, assim como atender à demanda de energia ($n2$) gerada a partir da queima do palhão e, ainda, minimizar o desvio positivo ($p3$) referente ao custo do processo de coleta e transporte do palhão. A ocorrência dos desvios negativos ($n1$ e $n2$) impacta tanto na produtividade de açúcar e etanol, quanto na produção de calor necessário ao processo de cogeração energética. A ocorrência do desvio positivo ($p3$) tem reflexo financeiro, pois impacta o montante de recursos financeiros da empresa destinados a cobrir os custos com o processo de coleta e transporte do palhão, fazendo com que o total gasto seja superior aos montantes previstos para essa finalidade. Para validação do modelo proposto foram realizados testes computacionais, a partir dos quais foi possível observar uma produção de 0,76% menos palhão, reduzindo o respectivo custo de coleta e transporte na mesma proporção. Contudo, mesmo com a redução na quantidade produzida de palhão, o poder calorífico gerado foi 0,04% superior e a quantidade de POL superou a quantidade mínima demandada pela empresa em 2,20%.

Palavras-chave: Otimização. Palhão. Modelagem.

GOAL PROGRAMMING APPLIED TO THE PLANNING OF SUGAR CANE PLANTATION IN COMPANIES OF THE SUGAR-ENERGY SECTOR

SUMMARY: The objective of this research was to apply the goal programming technique to obtain a mathematical model of multi-objective optimization directed to the selection of sugarcane cultivars to be planted in order to meet the technical and productive parameters required by productive units, and to minimize their costs. The purpose of the proposed model was to minimize the negative deviations related to the demand for POL ($n1$), that is, the apparent amount of sucrose contained in the planted sugarcane juice, as well as to meet the energy demand ($n2$) generated from straw burning and to minimize the positive deviation ($p3$) related to the cost of collecting and transporting the straw. The occurrence of the negative deviations ($n1$ and $n2$) impacts both the sugar and ethanol productivity and the heat production required for the energy cogeneration process. The occurrence of the positive deviation ($p3$) has a financial consequence, since it impacts the amount of financial resources of the company to cover the costs of collecting and transporting the material, making the total expenditure exceed the amounts foreseen for this goal. For the validation of the proposed model, computational tests were performed, from which it was possible to observe a the production of 0.76% less straw, reducing the respective cost of collection and transport in the same proportion. However, even with the reduction in the quantity of straw produced, the heat generated was 0.04% higher, and the amount of POL exceeded the minimum quantity demanded by the company by 2.20%.

Keywords: Optimization. Sugar cane straw. Modeling.

¹ ORCID-ID <https://orcid.org/0000-0002-3806-9228> Doutor em Agronomia com ênfase em Energia na Agricultura. Professor adjunto da Faculdade de Ciências Contábeis da Universidade Federal de Uberlândia (FACIC-UFU).

² Departamento de Engenharia Rural, Universidade Estadual Paulista.

³ Departamento de Bioestatística, Universidade Estadual Paulista.

1 INTRODUÇÃO

Com cerca de 9 milhões de hectares de área plantada, predominantemente na região centro-sul, além do Nordeste, o setor sucroenergético brasileiro ocupa a terceira posição em relação à área cultivada no país (LORIZOLA; CAPITANI, 2018).

Além do aumento do número de operações de fusões e incorporações por parte de grandes grupos usineiros, tem-se observado o ingresso de investimentos internacionais em função do crescimento da relevância internacional atribuída aos biocombustíveis como o etanol (LORIZOLA; CAPITANI, 2018).

Em relação capacidade de produção energética, as usinas sucroalcooleiras se tornaram autossuficientes apenas com a queima do bagaço. Contudo, uma parcela muito significativa do potencial energético-produtivo desses empreendimentos está relacionada ao aproveitamento do palhiço deixado no campo devido ao processo de colheita mecanizada.

Tanto o bagaço da cana quanto o palhiço podem ser utilizados para produção de energia elétrica, mediante o processo de cogeração, e, também para a produção do etanol celulósico, ou etanol de segunda geração; contudo, o bagaço já vem sendo utilizado há muito tempo, e, por outro lado, o palhiço passou a receber maior atenção a partir da introdução do processo colheita mecanizada da cana (TROMBETA; CAIXETA FILHO, 2017).

O aproveitamento do palhiço demanda um planejamento próprio, que vai desde a tomada de decisão acerca dos cultivares de cana-de-açúcar escolhidos para plantio, passando pelo processo de coleta e transporte dessa biomassa do campo até o centro de processamento na unidade sucroenergética, e ainda, levando-se em conta as demandas técnico-operacionais das usinas, sem perder de vista os custos relacionados a esse processo como um todo.

Com referência à tomada de decisão voltada para o plantio e colheita da cana-de-açúcar, Ramos *et al.* (2016) consideram que o planejamento e a seleção otimizada de variedades de cana a serem plantadas promovem uma série de benefícios operacionais, econômicos e ambientais, tanto ao longo do ciclo produtivo da cultura quanto na sua utilização industrial, com especial destaque para: o aumento da produtividade; melhor aproveitamento da área de cultivo; simplificação dos processos de logística e de industrialização; e, por consequência, a redução de custos, entre outros fatores positivos.

Em relação às demandas técnico-operacionais, Silva *et al.* (2018) afirmam que a matéria prima utilizada pela indústria sucroenergética deve apresentar certos parâmetros de qualidade de forma a viabilizar o processo produtivo de forma satisfatória. Entre outros fatores considerados como parâmetros de qualidade a serem monitorados, Silva *et al.* (2018) destacam a POL, que é a quantidade aparente de sacarose contida no caldo da cana-de-açúcar, e a fibra, que pode ser

entendida como a quantidade de matéria seca presente na cana, a qual está relacionada ao balanço energético da usina, uma vez que ela será queimada em caldeiras para produzir calor e gerar energia.

Ainda com referência ao processo de planejamento da cultura de cana-de-açúcar, especificamente em relação ao aproveitamento do palhiço para geração de energia, os custos envolvidos podem ser considerados um fator crítico, uma vez que se forem mal planejados podem inviabilizar economicamente a atividade.

Autores como Ansari e Bell (1997) e Cooper e Chewii (1996) afirmam que, no mínimo, 70% dos custos são determinados na fase de planejamento, por outro lado, Sakurai (1997) e Cooper e Slagmulder (1997) ponderam que esse percentual pode chegar até a 90%.

Além dos fatores já descritos, o planejamento relacionado à cultura da cana-de-açúcar também deve levar em conta as ações demandadas para redução do risco de concentração varietal (RAIZER; BRAGA JÚNIOR; SELEGATO, 2013). Pois, o surgimento de ataque de praga ou doença severa da cana pode afetar justamente a variedade que está sendo utilizadas em larga escala, derrubando drasticamente as produtividades (BRAGA JÚNIOR *et al.*, 2018).

Dessa forma, Brasil (2016) indica a diversidade varietal como estratégica para garantir a segurança biológica e evitar que o canavial seja atingido por pragas e doenças.

A combinação desse conjunto de fatores faz com que a tomada de decisão relacionada à cultura da cana-de-açúcar seja muito complexa, tornando-se uma tarefa muito difícil.

Nesse contexto, esta pesquisa científica teve por objetivo aplicar a técnica de *goal programming* para auxílio no processo de planejamento operacional visando obter um modelo matemático de otimização multiobjetivo, o qual teve por finalidade auxiliar na escolha de variedades de cultivares de cana-de-açúcar a serem plantadas, de forma a atender aos parâmetros técnico-produtivos exigidos por unidades produtivas sucroenergéticas, bem como, minimizar os respectivos custos.

O modelo proposto teve por finalidade minimizar os desvios negativos referentes à demanda de POL (n_1) ou seja, quantidade aparente de sacarose contida no caldo da cana-de-açúcar plantada, assim como, o atendimento da demanda de energia (n_2) gerada a partir da queima do palhiço e, ainda, minimizar o desvio positivo (p_3) referente ao custo do processo de coleta e transporte do palhiço, garantindo que o valor orçado pela empresa seja cumprido. Tudo isso, sem perder de vista a diversificação varietal necessária para a minimização dos riscos relacionados à pragas e doenças no canavial.

A ocorrência dos desvios negativos (n_1 e n_2) impacta tanto na produtividade de açúcar e etanol, quanto na produção de calor necessária ao processo de cogeração energética. Em ambos

os casos, tais desvios fazem com que os montantes produzidos sejam inferiores às quantidades demandadas de cada um daqueles dois recursos (POL e fibra).

A ocorrência do desvio positivo (p_3) tem reflexo financeiro, uma vez que impacta o montante de recursos financeiros da empresa destinado a cobrir os custos com o processo de coleta e transporte do palhiço, fazendo com que o total gasto seja superior aos montantes previstos para essa finalidade.

A escolha da técnica de *goal programming* deve-se ao fato dela permitir formular modelos matemáticos mais flexíveis em relação à tomada de decisão, uma vez que são admitidas certas variações (desvios) e pode-se também atribuir graus de importância para tais variações mediante o uso de pesos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Ponderam, Uribe *et al.* (2016), que nem sempre é possível obter dados reais para a realização de experimentos envolvendo à cultura de cana-de-açúcar devido a problemas relacionados a fatores como custos, tempo, acesso limitado, entre outros. Por isso, a utilização de simulações a partir de programas computacionais pode ajudar a fornecer informações de suporte à tomada de decisões, sem que seja preciso acompanhar todo um ciclo produtivo da cultura em questão (URIBE *et al.*, 2016).

Os processos relacionados à produção sucroenergética são complexos e de difícil investigação, nesse sentido, a identificação de técnicas de pesquisas que permitam minimizar custos e desonerar operações são um fator crítico neste segmento econômico (COELHO *et al.*, 2019).

Dessa forma, observa-se a mais variada gama de aplicações de modelagens matemáticas na solução de problemas do setor sucroenergético, desde estudos voltados para o planejamento do plantio, passando por formas de tratamento da biomassa da cana, até a sua colheita (JUNQUEIRA; MORABITO, 2017; SANTOS-ROCHA *et al.*, 2017).

Ao analisarem abordagens de otimização voltadas para o apoio à tomada decisões relacionadas à programação e sequenciamento das frentes de colheita de cana-de-açúcar, Junqueira e Morabito (2017) utilizaram três modelos, um original e dois adaptados por eles, com vistas ao dimensionamento e sequenciamento de lotes da produção em máquinas paralelas, com custos e tempos de *setup* dependentes da sequência.

Depois de verificarem a adequação dos seus modelos a partir de experimentos com dados reais, Junqueira e Morabito (2017) constataram que as abordagens propostas pelas modelagens

adaptadas, poderiam representar apropriadamente o modelo conceitual original, com grande potencial para redução de custos na prática.

A despeito do potencial do setor sucroenergético para a geração de energia elétrica a partir do processo de cogeração, mediante a queima do bagaço da cana e do palhiço, a biomassa residual agrícola da cana ainda é subutilizada, pois ela é comumente deixada para decomposição natural, sem aproveitamento da energia nela contida e gerando passivos ambientais significativos (MORAES *et al.* (2017).

Os autores, Moraes *et al.* (2017) afirmam que o bagaço da cana apresenta elevados teores de umidade e volume, e a sua simples aglomeração na usina faz com que a sua densidade energética se eleve, e isso, por sua vez, aumenta sua eficiência energética como combustível. Sendo que, esse é um dos motivos pelos quais as empresas do setor sucroenergético se tornaram autossuficientes energeticamente.

À medida que surgem novas possibilidades para o aproveitamento do bagaço da cana-açúcar no setor sucroenergético, com especial destaque para a possibilidade de produção do etanol de segunda geração, surgem também novas possibilidades e interesses em fontes alternativas para a produção de energia elétrica mediante o processo de cogeração, e nesse sentido, o palhiço se torna uma alternativa viável (TROMBETA; CAIXETA FILHO, 2017)..

Por outro lado, a falta de um planejamento adequado voltado para a utilização do palhiço no processo de cogeração energética é um fator crítico (PEREA; BIAGGIONI; SERAPHIM, 2012), utilizando diversos maquinários para enfardamento, coleta e transferência deste ao centro de processamento. Nesse contexto, os custos do processo de coleta e transporte tornam-se uma variável de decisão muito relevante.

De forma geral, a produção de cana-de-açúcar é dependente de um conjunto de fatores das mais variadas naturezas, e a interação desses fatores pode impactar diretamente nos resultados agrônômicos, industriais e, por consequência, nos resultados econômicos dos empreendimentos sucroenergéticos (SANTOS *et al.*, 2018).

Nesse contexto, levando-se em conta essa diversidade de fatores, a etapa do planejamento no setor agrícola envolve múltiplos objetivos que vão desde a maximização da produtividade até a minimização do custo de produção, e, normalmente não é possível atender metas conflitantes simultaneamente, sendo assim, é necessária a tomada de decisão utilizando técnicas de otimização multiobjetivo. Para flexibilizar o atendimento de todos estes objetivos, a utilização de técnicas de *Goal Programming* (Programação por Metas) pode ser muito útil (ROMERO, 1991).

A Programação por Metas (PM) ou *Goal Programming* (GP) é uma técnica de tomada de decisões multicritério que permite o desenvolvimento de um modelo de otimização de processos considerando níveis de prioridade, análise de sensibilidade de pesos, balanceamento de desvios

das metas a serem alcançadas e até mesmo comparação direta de metas desiguais, entre outras possibilidades (JONES; TAMIZ, 2010).

A PM pode abordar na tomada de decisão multicritério o conceito de *satisficing* (*satisfação e suficiência*), que pode ser definido como o estado de suficiência ao atingir os objetivos e satisfação por parte do tomador de decisão ao alcançar as metas propostas (ROMERO, 1991; JONES; TAMIZ, 2010).

Os primeiros registros de aplicação dessa técnica datam da década de 50, quando Charnes *et al.* (1955, *apud* JONES; TAMIZ, 2010) utilizaram a programação linear adaptada no contexto de remuneração de executivos. Desde então, vários estudos foram se apresentando com a formalização da PM difundindo e popularizando a técnica dentro da tomada de decisão multicritério (CHARNES; COOPER, 1961, *apud* JONES; TAMIZ, 2010);

Para desenvolvimento de um modelo PM, o primeiro passo é a identificação das variáveis de decisão e das restrições a serem consideradas no problema. Uma vez que o conjunto de variáveis é estabelecido, é necessário determinar as metas e os respectivos desvios para cada uma delas. Deve-se também indicar o nível de satisfação de cada restrição, ou seja, se cada restrição deve ser satisfeita com exatidão, superada ou não (ROMERO, 1991). Resumidamente, consiste em estabelecer o conjunto de metas, restrições e seus desvios correspondentes para solucionar o problema.

As variáveis de desvios podem ser negativas (representado por n_i) e positivas (representado por p_i). Os desvios negativos (n_i) representam a quantificação do número de unidades em que a meta não foi satisfeita com relação à meta estabelecida. E, a variável de desvio positivo (p_i) representa o oposto, ou seja, as unidades em que o objetivo foi superado

Assim, a partir da realização desta investigação científica, espera-se que, além de atender aos parâmetros técnico-produtivos exigidos pelas empresas sucroenergéticas, o modelo proposto também possa identificar um conjunto de informações voltadas para o suporte da tomada de decisões relacionadas ao planejamento de custos do processo de coleta e transporte do palhiço do campo até a unidade de processamento e geração de energia.

3 METODOLOGIA

Esta seção está dividida em duas seções secundárias. A primeira teve por objetivo descrever todo o modelo matemático proposto para esta investigação, detalhando inclusive seus índices, parâmetros e variáveis. A segunda seção foi destinada ao detalhamento dos dados utilizados para validação da modelagem matemática pesquisada.

3.1 Modelo Matemático Proposto

Dentre as “ i ” variedades de cultivares de cana-de-açúcar adaptáveis à região de uma unidade sucroenergética, a serem plantadas nos “ j ” talhões, o modelo proposto nesta pesquisa visa identificar aquelas variedades que permitam atender aos parâmetros técnico-produtivos exigidos pela empresa em questão (demanda de POL e de energia e, ainda, a diversificação varietal), de forma a minimizar os desvios (negativos) em relação a aqueles parâmetros técnico-produtivos e, ainda, o desvio positivo em relação ao montante previsto de custos necessários para se coletar e transportar o palhiço do campo até a unidade processadora dessa biomassa residual para a geração de energia, conforme descrito pelas Equações 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

$$\text{Min} \left(\frac{n_1}{T \bar{A}} + \frac{n_2}{T \overline{PP} \overline{PCU}} + \frac{p_3}{T \overline{PP} cc} \right) \quad (1)$$

$$\sum \sum a X_{ij} + n_1 - p_1 = T \bar{A} \quad (2)$$

$$\sum \sum pp_{ij} pcu_{ij} X_{ij} + n_2 - p_2 = T \overline{PP} \overline{PCU} \quad (3)$$

$$\sum \sum cc_{ij} X_{ij} + n_3 - p_3 = T \overline{PP} cc \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^k X_{ij} L_j \leq 0,15 \left(\sum L_j \right), \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, k \quad (6)$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se plantar a variedade } i \text{ no talhão } j \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases}$$

A Equação 1 representa a função objetivo do problema, em que: “ n_1 ” é o desvio admitido para a quantidade mínima estabelecida para o teor de POL da cana demandada pela empresa sucroenergética (t ha^{-1}), que é dada pela multiplicação entre a área total “ T ” em hectares (ha) e a quantidade de POL média esperada “ \bar{A} ” em toneladas por hectare (t ha^{-1}); “ n_2 ” representa o desvio admitido para a quantidade demandada, pela empresa, de energia a ser produzida a partir da queima do palhiço, expressa em poder calorífico útil (Mcal), que é dada pela multiplicação entre a área total “ T ” (ha) e a quantidade mínima estabelecida de palhiço “ \overline{PP} ” por hectare de cana (t ha^{-1}) e, ainda, a quantidade mínima estabelecida de poder calorífico útil por tonelada de palhiço “ \overline{PCU} ” (Mcal t^{-1}); e, “ p_3 ” representa o desvio admitido para o valor orçado/previsto para o custo total com o processo de coleta e transporte do palhiço, expresso unidades do Dólar americano (US\$), que é calculado pela multiplicação entre a área total “ T ” (ha) e a quantidade

mínima estabelecida de palhiço “ \overline{PP} ” por hectare de cana ($t\ ha^{-1}$) e, ainda, a o custo de coleta e transporte do palhiço “ cc ” por tonelada $US\$ t^{-1}$).

As Equações 2 até 6 indicam as restrições do problema proposto, sendo que: a Equação 2 indica a demanda mínima de POL a ser atendida; a Equação 3 indica a demanda energética mínima a ser atendida; a Equação 4 indica o limite dos custos totais com o processo coleta e transporte do palhiço; a Equação 5 representa o limite máximo da área a ser ocupada por cada variedade de cana, portanto, trata-se do índice de concentração varietal, que não pode ultrapassar a 15% da área total por variedade plantada, conforme recomendado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) (RAIZER; BRAGA JÚNIOR; SELEGATO, 2013); e, a Equação 6 garante que só será plantada uma variedade de cana-de-açúcar por talhão.

Adicionalmente, todos os índices, parâmetros e variáveis integrantes das Equações 1 a 6 encontram-se descritos no Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição dos índices, parâmetros e variáveis integrantes do modelo de pesquisa

Legenda	Categoria	Descrição
i, I, \dots, n	Índice	índices que representam as variedades.
$j = I, \dots, k$	Índice	índices que representam os talhões.
a	Parâmetro	estimativa de produção de sacarose da variedade “ i ” plantada no talhão “ j ” ($t\ ha^{-1}$).
\bar{A}	Parâmetro	quantidade mínima estabelecida/demanda para o teor de POL da cana ($t\ ha^{-1}$).
L_j	Parâmetro	área do talhão (ha).
T	Parâmetro	área total (ha).
cc	Parâmetro	o custo da coleta do palhiço da variedade “ i ” plantada no talhão “ j ” ($US\$ t^{-1}$).
pp	Parâmetro	estimativa de produção de palhiço da variedade “ i ” ($t\ ha^{-1}$).
pcu	Parâmetro	estimativa do poder calorífico útil do palhiço gerado pela variedade “ i ” ($Mcal\ t^{-1}$).
\overline{PP}	Parâmetro	quantidade mínima estabelecida/demandada de palhiço ($t\ ha^{-1}$).
\overline{PCU}	Parâmetro	quantidade mínima estabelecida/demandada de poder calorífico útil do palhiço ($Mcal\ t^{-1}$).
n_j	variável de decisão	desvio negativo.
p_j	variável de decisão	desvio positivo.
X_{ij}	variável de decisão	Variedade i plantada no talhão j (variável binária).

Fonte: elaborado pelos autores.

3.2 Descrição dos Dados Utilizados para Validação da Modelagem Matemática Pesquisada

No intuito de aplicar e avaliar a eficiência do modelo proposto nesta investigação científica foi considerada a situação de uma empresa sucroenergética do interior do estado de São Paulo, cujos dados foram levantados por Lima (2006).

Na unidade produtiva em questão, podem ser utilizadas aquelas 10 variedades de cultivares “*i*” cujas informações técnico-produtivas (*pp*, *pcu*, *a*) encontram-se detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações técnico-produtivas das variedades de cultivas de cana analisadas

<i>i</i>	Variedade	Produtividade palhiço; (<i>pp</i>) t ha ⁻¹	Poder calorífico útil; (<i>pcu</i>) Mcal t ⁻¹	POL _{<i>i</i>} (<i>a</i>) t ha ⁻¹
1	SP701284	13,37	2187,4	13,12
2	SP706163	23,57	1939,8	12,74
3	SP701143	22,14	1924,8	15,01
4	SP711416	27,42	2141,2	12,86
5	RB835486	21,53	2444,2	12,84
6	RB72454	23,54	2004,89	15,26
7	RB855536	26,43	2211,95	17,05
8	SP791011	24,09	1977,47	15,80
9	RB855113	29,38	2310,37	17,54
10	RB711406	33,3	2008,83	20,77

Fonte: elaborado pelos autores com base em Lima (2006).

Em relação à área produtiva destinada ao plantio da cana-de-açúcar, bem como sua disposição em talhões, foram considerados os dados descritos (*j*, *L*) pela Tabela 2.

Tabela 2 – Descrição da área produtiva destinada ao plantio da cana-de-açúcar e sua disposição em talhões

Talhão (<i>j</i>)	Área do talhão; (<i>L</i>) ha
J	ha
1	17,60
2	17,05
3	18,29
4	22,17
5	21,22
6	10,60
7	13,25
8	16,96
9	18,70
10	15,36
11	16,84
12	19,88
13	21,82
14	19,42
15	21,59

Fonte: elaborado pelos autores com base em Lima (2006).

De maneira complementar, a Tabela 3 resume as demais informações necessárias (\bar{A} , T , cc , \overline{PP} , \overline{PCU}) à aplicação da modelagem matemática baseada na técnica de *Goal Programming* alvo desta pesquisa.

Tabela 3 – Detalhamento dos informações complementares necessárias ao processo de validação

Parâmetros	Descrição	Unidade de medida	Valores
\bar{A}	Teor de POL estabelecido/demandado pela empresa	t ha-1	15,30
T	Área total	ha	270,75
cc	Custo de coleta e transporte do palhiço	US\$ t-1	7,37
\overline{PP}	Produtividade estabelecida/demandada de palhiço pela empresa	t ha-1	24,50
\overline{PCU}	Poder calorífico útil estabelecido/demandado para o palhiço pela empresa	Mcal t-1	2115,00

Fonte: elaborado pelos autores com base em Lima (2006).

O modelo proposto nesta pesquisa caracteriza-se como um modelo de programação linear multicritério e foi implementada como auxílio da ferramenta SOLVER, disponível em planilhas eletrônicas do tipo Microsoft (MS) Excel®.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Operacionalmente, a função objetivo descrita pela Equação 1 tem por finalidade minimizar a ocorrência de desvios negativos referentes à demanda de POL (n_1) a ser produzida pela cana plantada, assim como, a demanda de energia (n_2) a ser produzida a partir da queima do palhiço e, ainda, minimizar o desvio positivo (p_3) referente ao custo do processo de coleta e transporte do palhiço, o que garantiria que o valor orçado fosse cumprido.

A ocorrência daqueles dois desvios negativos (n_1 e n_2) impactaria tanto na produtividade de açúcar e etanol em si, quanto na produção de calor necessária ao processo de cogeração energética, pois, em ambos os casos, faria com que os montantes produzidos fossem inferiores às quantidades demandadas de cada um daqueles dois recursos.

A ocorrência do desvio positivo (p_3) faria com que o total gasto para a coleta e o transporte do palhiço fosse superior aos montantes previstos para essa finalidade.

De uma forma geral, a ocorrência dos desvios cujo modelo pesquisado buscou minimizar teria um reflexo econômico prejudicial sobre os lucros da empresa, uma vez que procurou-se reduzir os riscos operacionais e financeiros na fase de planejamento do plantio da cana de açúcar.

Ao certificar-se que as restrições descritas pelas Equações 2 até 6 fossem satisfeitas, além de atender as demandas de POL e energia dentro do orçamento de custos previsto, também seria garantida a redução do risco relacionado a um elevado grau de concentração varietal, e, ainda, garantiu que cada talhão fosse plantado com uma única variedade de cultivar de cana-de-açúcar, o que, logisticamente, contribui para a dinamicidade do processo de colheita da cana.

A partir dos testes computacionais realizados, a aplicação da técnica de *goal programming* a partir da modelagem proposta nesta investigação levou à produção das informações de suporte à tomada de decisão detalhadas pela Tabela 4.

Segundo o modelo matemática proposto a parti desta investigação, seriam plantadas nove das dez variedades de cultivares adaptáveis à região em que a unidade sucroenergética desenvolve suas atividades.

Ou seja, no processo de plantio, as variedades SP701143, RB835486, RB72454, RB855536, SP791011 e RB855113 seriam cultivadas em mais de um talhão, nesse caso, dois talhões cada uma delas. Mas, ainda assim, a área ocupada por essas variedades não excederia 15% da área total destinada ao plantio, assim como acontece também com as variedades SP701284, SP706163 e RB711406, que seriam cultivadas em apenas um talhão cada uma.

A partir da identificação de qual variedade seria plantada em cada um dos quinze talhões disponíveis, pôde-se estimar os montantes de palhiço produzido, o poder calorífico útil geral, a quantidade de POL e, ainda, o custo de coleta e transporte do palhiço, para cada uma das variedades identificadas.

Além disso, foi possível avaliar todos esses parâmetros em termos totais e, a partir daí, avaliar o quanto eles estariam próximos, ou não, dos montantes demandados pela empresa.

Tabela 4 – Detalhamento dos montantes identificados a partir da aplicação do modelo de pesquisa

Variedade (i)	Talhão (j)	Palhiço (t)	Poder calorífico útil (Mcal)	POL (t)	Custo de coleta e transp. do palhiço (US\$)
SP701284	2	227,96	498.636,42	223,70	1.680,05
SP706163	6	249,84	484.643,51	135,04	1.841,34
SP701143	1	389,66	750.025,27	264,18	2.871,82
SP701143	5	469,81	904.291,83	318,51	3.462,51
RB835486	9	402,61	984.061,81	240,11	2.967,24
RB835486	15	464,83	1.136.144,09	277,22	3.425,82
RB72454	8	399,24	800.429,08	258,81	2.942,39
RB72454	13	513,64	1.029.797,31	332,97	3.785,55
RB855536	3	483,40	1.069.267,03	311,84	3.562,69
RB855536	4	585,95	1.296.098,96	378,00	4.318,47
SP791011	10	370,02	731.708,20	242,69	2.727,07
SP791011	11	405,68	802.211,33	266,07	2.989,83
RB855113	7	389,29	899.392,39	232,41	2.869,03
RB855113	12	584,07	1.349.427,97	348,70	4.304,63
RB711406	14	646,69	1.299.082,24	403,35	4.766,08
Totais identificados pelo modelo		6.582,70	14.035.217,41	4.233,59	48.514,51
Totais considerados como meta		6.633,38	14.029.588,13	4.142,48	48.887,97
Desvios		-50,67	5.629,29	91,12	-373,46

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa.

Conforme pode ser visto na Tabela 4, o modelo proposto com base na técnica de *goal programming* identificou as variedades e talhões, e suas combinações, de tal forma que fosse possível atender as demandas operacionais e financeiras da usina, diversificação varietal e, ainda, assegurar que os montantes totais desses parâmetros se desviassem o mínimo possível da projeção desejada pela entidade.

Em relação aos parâmetros técnicos mínimos estabelecidos pela empresa, os desvios observados indicaram que se produziria 0,76% (50,67 t / 6.633,38 t x 100) menos palhiço, reduzindo o custo de coleta e transporte do palhiço na mesma proporção (0,76% = R\$373,46 / R\$48.887,97 x 100). Contudo, mesmo com a redução na quantidade de biomassa residual, o poder calorífico gerado foi 0,04% (5.629,29 Mcal / 14.029.588,13 Mcal x 100) superior e a quantidade de POL também superou a quantidade demandada pela empresa em 2,20% (91,12 t / 4.142,48 t x 100).

Ou seja, além de contemplar os parâmetros técnicos (demandas e diversificação varietal) e financeiros (orçamento de custos) mínimos definidos pela empresa, a modelagem proposta permitiu minimizar possíveis desvios em relação a tais parâmetros.

Outro fator que poderia ser trabalhado na modelagem proposta seria o uso de pesos para os desvios, isto é, caso se optasse por abrir mão do cumprimento da meta integralmente em função de outra meta para qual se desejasse atribuir maior prioridade, a atribuição de pesos poderia indicar o quanto se estaria disposto a flexibilizar o cumprimento da meta considerada menos prioritária.

Por exemplo, caso houvesse interesse em flexibilizar, ou melhor, cumprir parcialmente meta orçamentária (p_3), uma vez que, provavelmente, as metas relacionadas às demandas técnico-operacionais dificilmente poderiam deixar de cumpridas, bastaria atribuir um maior peso para os desvios negativos de POL (n_1) e fibra (n_2).

Contudo, conforme os resultados identificados a partir dos testes computacionais realizados nesta investigação, a modelagem proposta permitiu minimizar todos os objetivos definidos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao contrário das modelagens convencionais baseadas no processo de otimização, cujo processo de obtenção de solução é bem mais rígido e o atendimento a todas as demandas pode se tornar inviável, a técnica *goal programming* permite tomar decisões dentro de certos limites de variação, o que normalmente lhe confere maior proximidade com a realidade do processo de gestão e isso, por sua vez, pode tornar o modelo destinado ao suporte da tomada de decisão bem mais eficiente.

Diante dos resultados observados nesta pesquisa científica, pode-se concluir que a metodologia abordada apresentou grande potencial como ferramenta matemática voltada para auxiliar os gestores na tomada de decisões relacionadas às demandas técnico-operacionais (POL,

fibra e diversificação varietal) e financeiras (cumprimento do orçamento de custos previstos) de empresas do setor sucroenergético.

Adicionalmente, cabe destacar que o modelo pesquisado também pode trazer benefícios do ponto de vista logístico, pois, dentre as restrições propostas foi considerada a necessidade de se cultivar apenas uma variedade de cana por talhão, o que facilita consideravelmente o manejo relacionado tanto ao plantio quanto à colheita.

Assim, espera-se que os resultados desta pesquisa possam ser somados aos resultados de outras investigações de natureza correlata e, dessa forma, tenha-se contribuído para a produção do conhecimento científico relacionado ao processo de seleção otimizada de variedades de cana e, ainda, para o planejamento econômico e ambiental necessários e demandados por empresas sucroenergéticas.

REFERÊNCIAS

ANSARI, S. L.; BELL, J. E.. **Target costing**: the next frontier in strategic cost management. Chicago-IL: Irwin Professional Publishing, 1997.

BORGES, P. C. A.; SILVA, S. M.; ALVES, T. C.; TORRES, A. E.. Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia. **REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 10, n. 2, p. 23-36, jul./dez. 2016. Disponível em: <<http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/239>>. Acesso em: 30 jun. 2018.

BRAGA JÚNIOR, R. L. do C.; LANDELL, M. G. A.; SILVA, D. N. da; BIDOIA, M. A. P.; SILVA, T. N. da; TOMAZINHO JÚNIOR, J. R.; Silva, V. H. P. da. Censo varietal IAC no Brasil - safra 2016/17 e na região centro-sul - safra 2017/18. **Revista Canavieiros**, Sertãozinho, n. 140, ano 11, p. 40-57, fev. 2018. Disponível em: <<http://revistacanaieiros.com.br/imagens/pdf/09f565a3c66e3938ab965b0e8378b66f.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2018.

BRASIL. **Boletim Mensal dos Biocombustíveis**: divulgação dos resultados do censo varietal IAC 2016. 105 ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Departamento de Biocombustíveis. Novembro/2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138769/1732805/Boletim+DBio+n%C2%BA+105+nove+mbro+de+2016.doc/5ffe2880-3d0b-437c-b754-aabd8356c8e1>>. Acesso em: 22 maio 2018.

COELHO, A. P.; BETTIO, J. V. T.; DALRI, A. B.; FISCHER FILHO, J. A.; FARIA, R. T. de; PALARETTI, L. F.. Application of artificial neural networks in the prediction of sugarcane juice Pol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.23, n.1, p.9-15, jan. 2019. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br/revista/v23n01/v23n01a02.pdf>>. Acesso em: 24 dez. 2018.

COOPER, R.; CHEW, W. B.. Control tomorrow's cost today's designs. **Harvard Business Review**, Boston, v.74, n. 4, p. 88-97, jan.-fev. 1996. Disponível em: <<https://hbr.org/1996/01/control-tomorrows-costs-through-todays-designs>>. Acesso em 19 jun. 2018.

COOPER, R.; SLAGMULDER, R.. **Targeting costing and value engineering**. Strategies in confrontational cost management series. Montvale-NJ: Institute of Management Accountants (IMA), 1997.

JONES, D., TAMIZ, M. **Practical goal programming, international series in operations research and management science**. ed. 141. New York: Springer, 2010.

JUNQUEIRA, R. DE A. R.; MORABITO, R.. Abordagens de otimização para a programação e sequenciamento das frentes de colheita de cana-de-açúcar. **Gest. Prod.**, São Carlos, v.24 n.2, p. 407-422, abr./jun. 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/gp/v24n2/0104-530X-gp-0104-530X1882-16.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2018.

LIMA, A. D. de. **Modelos matemáticos aplicados a problemas na cultura da cana-de-açúcar e no aproveitamento da energia da biomassa**. 2006. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade do Estado de São Paulo, Botucatu, 2006. Disponível em: <http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90515/lima_ad_me_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 22 jun. 2018.

LORIZOLA, G. M.; CAPITANI, D. H. D.. Análise do modelo estrutura-conduta-desempenho do setor sucroenergético brasileiro. **Nucleus**, Ituverava, v.15, n.2, p.383-399, out. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3738/1982.2278.2920>>. Acesso em: 05 dez. 2018.

MORAES, S. L. de; MASSOLA, C. P.; SACCOCCIO, E. M.; SILVA, D. P. da; GUIMARÃES, Y. B. T.. Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, São Paulo, v.1, n. 4, p.58-73, abr. 2017. Disponível em: <<http://revistainovacao.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/37/33>>. Acesso em: 30 jun. 2018.

PEREA, L. A.; BIAGGIONI, M. A. M.; SERAPHIM, O. J.. Avaliação de sistemas de manejo do palhicho de cana-de-açúcar no campo e na indústria. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 27, n. 1, p. 89-102, 2012. Disponível em: <<http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/423/220>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

PEREIRA, S. C., MAEHARA L., MACHADO C. M. M., FARINAS, C. S.. 2G Ethanol from the whole sugarcane lignocellulosic biomass. **Biotechnology for Biofuels**, Londres, v. 8, p.1-16, mar. 2015. Disponível em: <<https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-015-0224-0>>. Acesso: 30 jun. 2018.

RAIZER, A. J.; BRAGA JÚNIOR, R. L. do C.; SELEGATO, S. M.. Índices de eficiência no uso de variedades de cana-de-açúcar. **RPA News - cana & indústria**, Ribeirão Preto, ano 12, n. 151/152, p. 25-29, jul./ago. 2013. Disponível em: <<http://revistarpanews.com.br/edicoes/151/IDEANews151e152FinalGraficaWeb.pdf>>. Acesso em: 22 maio 2018.

RAMOS, R. P.; ISLER, P. R.; FLORENTINO, H. de O.; JONES, D.; NERVIS, J. J.. An optimization model for the combined planning and harvesting of sugarcane with maturity considerations. **African Journal of Agricultural Research**, [S. l.], v. 11, n. 40, p. 3950-3958, oct. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11441>>. Acesso em: 21 dez. 2018.

ROMERO, C. **Handbook of critical issues in goal programming**. ed. 1. Oxford: Elsevier,1991.

SAKURAI, M.. **Gerenciamento integrado de custos**. São Paulo: Atlas, 1997.

SANTOS, D. F. L.; SOUZA, C. A. F.; FARINELLI, J. B. de M.; SILVA, B. L. da; HORITA, K..Análise econômica da produção de cana-de-açúcar em diferentes pacotes tecnológicos. **Revista Estudo & Debate**, Lajeado, v. 25, n. 2, p. 262-283, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.22410/issn.1983-036X.v25i2a2018.1816>>. Acesso em: 26 dez. 2018

SANTOS-ROCHA, M. S. R.; PRATTO, B.; ALMEIDA, R. M. R. G.; CRUZ, A. J. G.. Otimização de parâmetros operacionais do pré-tratamento da palha de cana-de-açúcar. **Scientia Plena**, São Cristovão, v. 13, n. 3 p. 1-16, mar. 2017. Disponível em: <<https://scientiaplena.emnuvens.com.br/sp/article/view/3581/1683>>. Acesso em: 30 jun. 2018.

SILVA, D. M. da; SILVA, J. A. da; MORAES, M. da S.; NASCIMENTO, A. L. S.; SANTOS, L. B. dos. Monitoramento dos parâmetros de processamento da cana-de-açúcar crua: um estudo de caso em uma usina do sudoeste goiano. **GTS - Gestão, Tecnologia e Sustentabilidade**, [S.l.], v. 1, n. 1, p.1-12, jun. 2018. Disponível em: <<http://www.faengrv.com.br/gts/index.php/revistagts/article/view/11>>. Acesso em: 21 dez. 2018.

TROMBETA, N. de C.; CAIXETA FILHO, J. V.. Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na região centro-sul do brasil: indicadores agroindustriais. **Rev. Econ. Sociol. Rural**, Brasília, v. 55, n. 3, p. 479-496 , jul./set. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550304>>. Acesso em: 24 dez. 2018.

URIBE, R. A. M.; GAVA, G. J. de C.; KÖLLN, O. T.; SAAD, J. C. C.. Estimativa do acúmulo de fitomassa da soqueira de cana-de-açúcar fertirrigada com doses de n-fertilizante utilizando modelo de simulação. **Irriga**, Botucatu, edição especial, p.126-139, 2016. Disponível em: <<http://energia.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/1859>>. Acesso em: 30 jun. 2018.