

# METODOLOGIA E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

## MODELOS DE MINIMIZAÇÃO DE BIOMASSA RESIDUAL<sup>(1)</sup>

MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI<sup>(2,3)</sup>; HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO<sup>(2,4)</sup>

### RESUMO

No Brasil, a biomassa residual do cultivo de cana-de-açúcar é representada por folhas, palhas, ponteiros e frações de colmo que somam uma produção aproximada de 108 milhões de toneladas por ano; quantidade que permitiria a produção de 10,2 MWh de energia. Existem muitas cultivares como opção de plantio resultantes de programas de melhoramento visando à resistência a pragas, a doenças e à adaptação ao tipo de solo, cuja escolha é feita em virtude da produtividade física, bem como da produção de sacarose. Essa seleção pode ser auxiliada por modelos de otimização, visando minimizar a quantidade de resíduo de colheita, com ou sem imposições sobre a quantidade de energia obtida da biomassa. Pode, também, ser auxiliada pela maximização da quantidade de energia da biomassa residual com imposições sobre a quantidade de resíduo a ser gerada. A decisão sobre qual modelo deve ser usado é determinada pelo administrador da empresa com auxílio de alguns critérios. O objetivo deste trabalho é apresentar três modelos e o lucro alcançado com o uso da energia gerada por essa biomassa. Os resultados indicaram o modelo III, que prevê a maximização da geração de energia pela biomassa na escolha de cultivares, considerando a área disponível para o plantio, a produção de sacarose e a produção de biomassa em quatro anos de cultivo. O lucro obtido com o uso desse modelo foi calculado em 939 US\$/ha.ano.

**Palavras-chave:** resíduo de colheita, otimização, cana-de-açúcar.

### ABSTRACT

#### MODELS OF MINIMIZATION OF RESIDUAL BIOMASS

In Brazil, the residual biomass of the sugarcane cultivation is represented by leaves, straw, tips and stalk fractions that together represent a production of about 108 million tons per year. Such amount could allow the production of 10.2 MWh of energy. There are many sugarcane cultivars resulting from improvement programs seeking resistance to pests, diseases and adaptation to the soil type. Their choice is made in function of the physical productivity as well as the sucrose production. That selection can be aided by optimization models, seeking to minimize the amount of crop residue with or without impositions about the amount of obtained energy from the biomass. It can also be aided by the maximization of the amount of energy of the residual biomass with impositions on the amount of residue to be generated. The decision on which model should be used is determined by the company administrator. Such decision can be made with aid of some approaches. The objective of this work is to present the profit in the use of the energy generated by that biomass as a decision criteria in the choice of the models. The results indicated the model III, that foresees the maximization of energy generation from the biomass with choice of cultivars taking into account the available area for the plantation, the sucrose production and the biomass production in four years of cultivation. The profit with the use of that model was calculated as being 939 US\$/ha.year.

**Key words:** crop residue, optimization, sugarcane.

---

<sup>(1)</sup> Trabalho apresentado no XXIV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, Belo Horizonte (MG), em 2001. Recebido para publicação em 5 de dezembro de 2001 e aceito em 31 de julho de 2002.

<sup>(2)</sup> Departamento de Bioestatística, Instituto de Biociências/UNESP, Caixa Postal 510, 18608-080 Botucatu (SP).

<sup>(3)</sup> Projeto financiado pelo CNPq.

<sup>(4)</sup> Auxílio-Pesquisa da FAPESP.

## 1. INTRODUÇÃO

Confirma-se na literatura que o manejo adequado de uma lavoura canavieira se inicia pela correta escolha das variedades, caso contrário, pode comprometer a produtividade e a lucratividade da empresa (PMGCA, 1999). Existe, portanto, uma busca contínua de novas variedades em função da vida relativamente curta da maioria das variedades comerciais (BRIEGER, 1978) e da possibilidade de obtenção de uma que supere as usuais. Mesmo assim, a escolha certa para o plantio não é tarefa fácil, pois depende de um conjunto de informações fundamentais sobre os fatores agronômicos e industriais, bem como da interação de todos os fatores bióticos, abióticos, administrativos e econômicos (PMGCA, 1999).

Os dados de biomassa residual podem ser mais uma opção para escolha das variedades, porque possibilitam melhores resultados econômicos e auxiliam na implantação desse resíduo no sistema de produção.

Na tentativa de minimizar o impacto ambiental e as influências causadas na produtividade e, conseqüentemente, na lucratividade das empresas alcooleiras, pesquisadores têm persistido na escolha da variedade que gere menor quantidade de resíduos, sem perder as características de produção, o que, muitas vezes, pode ser feito com auxílio da programação matemática. A otimização é importante ferramenta matemática utilizada, sobretudo, na área sucroalcooleira.

SUPARAPORN (1991) desenvolveu um modelo de programação linear para determinar a produção necessária de algumas culturas em fazendas da região de Changwat Sukhothai. Esse modelo foi comparado com o plano de produção atual. Além de mostrar-se apto a determinar a produção necessária das culturas, apresentou como resultado um aumento de 318,37% na renda líquida.

Na tentativa de maximizar a renda líquida do setor agrícola em unidades sucroalcooleiras, SOFFNER et al. (1993) criaram um modelo de programação linear que se mostrou apto a descrever e simular o sistema agrícola de uma empresa produtora de açúcar e álcool. Embora os resultados tenham sido satisfatórios, não se considerou a redução dos resíduos.

Para maximizar o lucro dos produtores de cana-de-açúcar, com base nos rendimentos e custos de produção, BRUNORO e LEITE (1999) desenvolveram um modelo de otimização apto a mensurar a redução do custo total unitário de produção em função do

planejamento da quantidade e distribuição de variedades para as sub-regiões próximas a usina.

CHAUDHRY et al. (1996) e SINGELS et al. (1999) desenvolveram modelos de otimização para avaliar a irrigação na cultura de cana-de-açúcar, os quais auxiliaram de forma direta na decisão de utilizar ou não a irrigação nessa cultura. DANTAS-NETO (1994) e PEREIRA MENDES (1996) desenvolveram modelos para otimização do padrão de cultivo, em áreas irrigadas, com base nas respostas das culturas à água.

Observa-se em SARTORI et al. (2001) que a escolha de variedades para o plantio da cultura de cana-de-açúcar pode ser auxiliada por modelos matemáticos de otimização que minimizam a quantidade de resíduo de colheita ou maximizam a energia contida nesses resíduos. Além do potencial energético dessa biomassa, contam a favor dessa energia as questões ambientais, a manutenção de empregos e a projeção de vida limitada para os recursos energéticos de fontes naturais (EID et al., 1998). Esses modelos podem ser mais bem explorados com a análise de novos critérios de decisão, como o custo de coleta da biomassa residual de colheita.

## 2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS

### 2.1. Modelo I

Com o primeiro modelo pretende-se minimizar a biomassa residual em função da escolha de variedades (2.1.1) que são adaptáveis ao tipo de solo, tendo como restrição a área disponível para plantio (2.1.2) e a produção de sacarose no mínimo igual à produção média entre as variedades pré-selecionadas (2.1.3). Esse modelo permite escolher a variedade, a área a ser destinada para o plantio e a previsão de produção de pol e de biomassa residual.

$$\sum_{i=1}^n A_i x_i \quad (2.1.1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \geq b \quad (2.1.2)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \geq b\bar{\alpha} \quad (2.1.3)$$

$$x_i \geq 0 \quad (2.1.4)$$

em que:

$i = 1, 2, \dots, n$  as variedades que fazem parte do sistema;

$A_i$ : a quantidade de biomassa residual para cada variedade  $i$  em hectare;

$x_i$ : a área em hectare a ser determinada para cada variedade  $i$ ;

$b$ : a área em hectare disponível para o plantio;

$\alpha_i$ : a produção de pol em t/ha para a variedade  $i$ ;

$\bar{\alpha}$ : a média de produção de pol entre as variedades pré-selecionadas.

### 2.2. Modelo II

O segundo modelo consiste em minimizar a biomassa residual pela escolha de variedades (2.2.1), adaptáveis ao tipo de solo, tendo como restrição, além da área disponível de plantio (2.2.2) e da produção de sacarose no mínimo igual à produção média entre as variedades pré-selecionadas (2.2.3), a média de produção de energia disponível nessa biomassa (2.2.4). Esse modelo tem como resultado a escolha da variedade, a área a ser destinada para o plantio de cada variedade, a previsão de produção de sacarose e de biomassa residual e a produção de energia dessa biomassa.

$$\sum_{i=1}^n A_i x_i \quad (2.2.1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = b \quad (2.2.2)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \geq b\bar{\alpha} \quad (2.2.3)$$

$$\sum_{i=1}^n \beta_i x_i \geq b\bar{\beta} \quad (2.2.4)$$

$$x_i \geq 0 \quad (2.2.5)$$

em que:

$i = 1, 2, \dots, n$  as variedades que fazem parte do sistema;

$A_i$ : a produtividade média do resíduo de colheita para variedade  $i$ , em t.ha<sup>-1</sup>;

$x_i$ : a variável que determina a área para o plantio da variedade  $i$ , em hectare;

$b$ : a área total disponível para plantio, em hectare;

$\bar{\alpha}$ : a produtividade média de pol.ha<sup>-1</sup>, entre as variedades, t.ha<sup>-1</sup>;

$\alpha_i$ : a produtividade média de pol.ha<sup>-1</sup> para variedade  $i$ , t.ha<sup>-1</sup>;

$\bar{\beta}$ : a produção média de energia, entre as variedades, em kJ.ha<sup>-1</sup>;

$\beta_i$ : a produção média de energia para variedade  $i$ , kJ.ha<sup>-1</sup>.

### 2.3. Modelo III

Com o terceiro modelo é possível maximizar a produção de energia da biomassa residual em função da escolha de variedades (2.3.1), que são adaptáveis ao tipo de solo, impondo restrições sobre a área disponível para o plantio (2.3.2), a produção de sacarose (2.3.3) e a produção de biomassa em quatro anos de cultivo (2.3.4). Os resultados são a escolha da variedade e da área a ser destinada para o plantio, a previsão de produção de pol e de biomassa residual e também a produção de energia dessa biomassa.

$$\sum_{i=1}^n B_i x_i \quad (2.3.1)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = b \quad (2.3.2)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \geq b\bar{\alpha} \quad (2.3.3)$$

$$\sum_{i=1}^n \mu_i x_i \leq b\bar{\mu} \quad (2.3.4)$$

$$x_i \geq 0 \quad (2.3.5)$$

em que:

$i = 1, 2, \dots, n$  as variedades que fazem parte do sistema;

$B_i$ : o PECEI (produção de energia calorífica inferior (SARTORI, 2001) da biomassa residual de colheita para a variedade  $i$ , em kJ.ha<sup>-1</sup>;

$x_i$ : a variável que determina a área para o plantio da variedade  $i$ , em hectare;

$b$ : a área disponível para plantio, em hectare;

$\bar{\alpha}$ : a produção média de pol, em t.ha<sup>-1</sup>;

$\alpha_i$ : a produção média de pol.ha<sup>-1</sup> para a variedade  $i$ , em t.ha<sup>-1</sup>;

$\bar{\mu}$ : a produção média de biomassa residual de colheita, em t.ha<sup>-1</sup>;

$\mu_i$ : a produção média de biomassa residual de colheita para a variedade  $i$ , t.ha<sup>-1</sup>;

### 3. CRITÉRIO DE DECISÃO

Utilizou-se como critério de decisão o lucro alcançado com a venda da energia gerada com a biomassa, o qual é obtido pela diferença entre o preço de venda (Pv) da energia produzida a partir da biomassa residual de colheita de cana verde e o custo total (CT) de sua produção. Deve-se determinar esse lucro para cada modelo, que será comparados e avaliados de acordo com as necessidades da empresa.

O preço de venda é dado pela expressão:  $Pv = Br/Q \times P$ , em que: Br é a quantidade em toneladas de biomassa residual, determinada com base nas variedades escolhidas pelos modelos matemáticos; Q é a quantidade em tonelada de biomassa residual usada para gerar um MWh de energia, e P é o preço, em dólar, para produção dessa energia.

O custo total (CT) é dado pela soma dos custos de enfiamento (Ce), de carregamento (Cc) e de transporte (Ct), ou seja:  $CT = Ce + Cc + Ct$ .

Esse critério auxilia na escolha, dentre os modelos propostos, de qual deve ser usado para definir a variedade de cana-de-açúcar e a área a ser plantada, a fim de atender às necessidades da usina, respeitando as questões ambientais (não praticar a queima na pré-colheita) e evitar a redução da faixa de lucro da empresa ou proporcionar aumento.

### 4. APLICAÇÃO

Apresenta-se a seguir uma aplicação dessa técnica matemática para os dados obtidos em SARTORI (2001), com o custo total analisado sobre dados de biomassa<sup>(5)</sup> enfiada pela máquina JS-90. Para o cálculo do preço de venda usou-se  $Q = 0,5 \text{ t/MWh}$  e  $P = 26 \text{ US\$/MWh}$ .

Como a biomassa residual difere em cada ano de desenvolvimento da cultura ou corte (SARTORI, 2001),

utilizaram-se dados de quatro cortes da cultura para cada variedade, obtendo como resultado final (Pv-CT), em US\$/ha.ano, o valor médio para os quatro primeiros cortes da cultura.

Os resultados apresentados nos quadros 1, 2 e 3, foram determinados com base no poder calorífico inferior. O menor valor de produção de biomassa residual total foi de 533.345,42 t, do modelo I; de 580.007,46 t do modelo II, e de 602.898,29 t do modelo III para quatro cortes da cultura, originando 436.512; 461.777 e 461.814 toneladas de pol, e gerando 1.243,37; 1.443,65 e 1.498,69 TJ de energia, respectivamente, para os três modelos estudados (Quadros 1, 2 e 3).

Os resultados demonstram que, dentre as cinco variedades propostas, as duas escolhidas pelo modelo II e III são as mesmas, RB72454 e RB855113, diferindo, no entanto, na quantidade a ser plantada (Quadros 2 e 3). Isso pode ter ocorrido por causa da variação da produção de energia em virtude da variedade (SARTORI, 2001).

O modelo I seleciona duas variedades, RB835486 e RB72454 (Quadro 1); a variedade RB72454 é a mesma escolhida pelos modelos II e III. Portanto, se analisados globalmente, os três modelos escolheram três variedades que diferem em decorrência da opção de aproveitamento do resíduo de colheita para a produção de energia. Na tentativa de avaliar melhor os resultados obtidos pelos modelos, possibilitando sua utilização para a escolha correta de variedades, utilizou-se o critério de decisão proposto na seção anterior.

Os custos para as operações de enfiamento, carregamento e transporte para os modelos I, II e III estão mostrados nos quadros 4, 5 e 6. Nota-se que o custo total sofre influência do tipo de modelo, uma vez que a produção de biomassa residual varia em função da escolha da variedade.

**Quadro 1.** Área, produção de pol, produção de energia e quantidade de resíduo para cada variedade escolhida pelo modelo I

Variedades	Área ha	Pol t	Energia TJ	Resíduo t
SP791011	0	0	0	0
RB835486	3.254	225.150	594,27	272.726,49
RB72454	2.746	211.362	649,10	260.618,93
RB855113	0	0	0	0
RB855536	0	0	0	0
Exigências	6.000	436.512	-	-
Resultados	6.000	436.512	1.243,37	533.345,42

(<sup>5</sup>) Os dados de biomassa em US\$/t foram obtidos no Informativo do Centro de Tecnologia da Copersucar, de 1998.

**Quadro 2.** Área, produção de pol, energia disponível e quantidade de resíduo para cada variedade escolhida pelo modelo II

Variedades	Área	Pol	Energia	Resíduo
	ha	t	TJ	t
SP791011	0	0	0	0
RB835486	0	0	0	0
RB72454	5.573	428.917	1.317,21	528.873,08
RB855113	427	32.860	126,44	51.134,38
RB855536	0	0	0	0
Exigências	6.000	436.512	1.141,52	-
Resultados	6.000	461.777	1.443,65	580.007,46

**Quadro 3.** Área, produção de pol, energia disponível e quantidade de resíduo para cada variedade escolhida pelo modelo III

Variedades	Área	Pol	Energia	Resíduo
	ha	t	TJ	t
SP791011	0	0	0	0
RB835486	0	0	0	0
RB72454	4.655	358.240	1.100,16	441.725,66
RB855113	1.345	103.574	398,53	161.172,63
RB855536	0	0	0	0
Exigências	6.000	436.512	-	602.898,29
Resultados	6.000	461.814	1.498,69	602.898,29

**Quadro 4.** Custos de enfardamento, carregamento, transporte, por variedade selecionada no modelo I

Operações	Custo por variedade		Custo por operação
	RB835486	RB72454	
	US\$		US\$
Enfardamento	2.372.720	2.267.385	4.640.105
Carregamento	545.453	521.238	1.066.691
Transporte	1.063.633	1.016.414	2.080.047
Custo/variedade	3.981.806	3.805.037	-
Custo total	-	-	7.786.843

**Quadro 5.** Custos de enfardamento, carregamento, transporte, por variedade selecionada no modelo II

Operações	Custo por variedade		Custo por operação
	RB72454	RB855113	
	US\$		US\$
Enfardamento	4.601.196	444.869	5.046.065
Carregamento	1.057.746	102.269	1.160.015
Transporte	2.062.605	199.424	2.262.029
Custo/variedade	7.721.547	746.562	-
Custo Total	-	-	8.468.109

**Quadro 6.** Custos de enfiamento, carregamento, transporte, por variedade selecionada no modelo III

Operações	Custo por variedade		Custo por operação
	RB72454	RB855113	
	US\$		US\$
Enfiamento	3.843.013	1.402.202	5.245.215
Carregamento	883.452	322.345	1.205.797
Transporte	1.722.730	628.573	2.351.303
Custo/variedade	6.449.195	2.353.120	-
Custo Total	-	-	8.802.315

**Quadro 7.** Custo total (CT), preço de venda de energia (Pv) produzida pela biomassa residual de colheita em quatro cortes e lucro, para os modelos I, II e III

Modelos	CT	Pv	Lucro	Lucro
		US\$		US\$/ha.ano
Modelo I	7.786.843	27.733.961	19.947.119	831
Modelo II	8.468.109	30.068.354	21.600.245	900
Modelo III	8.802.315	31.350.710	22.548.396	939

Verifica-se no quadro 7 o custo total (CT), o preço de venda (Pv) e o lucro (Pv-CT) para cada modelo. Com relação ao lucro, pode-se observar que os modelos II e III apresentam melhores resultados, tendo como alternativa a produção de energia elétrica com base na biomassa.

Em termos de porcentagem, observa-se que na escolha de variedades feita pelo modelo II é produzido 8,75% mais biomassa que pelo modelo I, no entanto, apresenta aumento no lucro anual por hectare de 8,30%. Comparando o modelo III com I e II, os aumentos foram, respectivamente, de 13% e 4,34% no lucro e 13,04% e 3,95% na produção de biomassa.

## 5. CONCLUSÕES

1. A avaliação dos modelos, realizada com base no critério de lucro de produção de energia, confirmou a viabilidade econômica dessa produção a partir da biomassa residual de colheita. Ressalta-se a importância de estudos de coleta desse material sem o processo de enfiamento, pois este consome cerca de 60% do lucro de produção.

2. Verificou-se, nos três modelos, que a produção de energia de biomassa residual das variedades escolhidas geraram lucro para a empresa de cana-de-açúcar.

5. Com o critério de decisão utilizado, o modelo III apresentou o melhor resultado, proporcionando lucro de 939 US\$/ha.ano.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRIEGER, F. Situação do melhoramento da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. In: 50 anos de Estação Experimental de Piracicaba. Campinas: Instituto Agrônomo, 1978, p.82.
- BRUNORO, J.A.B.; LEITE, C.A.M. Escolha ótima de variedades de cana-de-açúcar por meio de programação matemática. *Revista Ceres*, Viçosa, v.46, n.264, p.111-124, 1999.
- CHAUDHRY, F.H.; LEME, E.J.A; CAMP, C.R.; SADLER, E.J.; YODER, R.E. Optimal irrigation scheduling of sugar cane by net profit maximization through dynamic programming. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE. San Antonio, USA: St Joseph, 1996. p.1122-1127.
- DANTAS-NETO, J. *Modelos de decisão para otimização do padrão de cultivo, em áreas irrigadas, baseados nas funções de resposta das culturas à água*. 1994. 134f. Tese (Doutorado em Irrigação) - Faculdade de Ciências Agrônomicas - UNESP, Botucatu.
- EID, F.; CHAN, K.; PINTO, S.S. Tecnologia e co-geração de energia na indústria sucroalcooleira paulista: uma análise da experiência e dificuldades de difusão. *Informações Econômicas*, São Paulo, v.28, n.5, 1998.
- PEREIRA MENDES, A.R. *Programação matemática aplicada à otimização de padrões de culturas irrigadas*. 1996. 128f. Dissertação (Mestrado em Irrigação) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

- PMGCA. Programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Biotecnologia Vegetal, 1999.
- SARTORI, M.M.P. *Otimização da produção de energia e biomassa do resíduo de colheita em variedades de cana-de-açúcar*. 2001. 121f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP, Botucatu.
- SARTORI, M.M.P.; FLORENTINO, H.O.; BASTA, C.; LEÃO, A.L. Determination of the optimal quantity of crop residues for energy in sugarcane crop management using linear programming in variety selection and planting strategy. *Energy*, Elsevier, n.26, p.1031-1040, 2001.
- SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C.N.; SCHMIDT, E.J.; HOGARTH, D.M. Evaluating strategies for scheduling supplementary irrigation of sugarcane in South Africa. In: CONFERENCE OF THE AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 5., 1999, Townsville, Australia. *Proceedings...* Townsville: PK Editorial Services, 1999. v.1, p.219-226.
- SOFFNER, R.K.; MILAN, M.; RIPOLI, T.C.C. Gerenciamento global de sistema agrícola em unidades sucroalcooleiras através de programação linear. *Stab - Açúcar, álcool e subprodutos*, Piracicaba, v.11, n.5, p.16-19, 1993.
- SUPARAPORN, S. Crop production planning for increasing farmers' income. In: CHANGWAT SUKHOTHAI. 1991. Bangkok, Thailand. *Proceedings...* Bangkok, Thailand, [s.n.], 1991. p.104.