



Bragantia

ISSN: 0006-8705

editor@iac.sp.gov.br

Instituto Agronômico de Campinas

Brasil

Tolentino, Gilmar; de Oliveira Florentino, Helenice; Pereira Sartori, Maria Márcia  
Modelagem matemática para o aproveitamento da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar  
com menor custo

Bragantia, vol. 66, núm. 4, 2007, pp. 729-735

Instituto Agronômico de Campinas

Campinas, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90866424>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal

Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# METODOLOGIA E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

## MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O APROVEITAMENTO DA BIOMASSA RESIDUAL DE COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR COM MENOR CUSTO <sup>(1)</sup>

GILMAR TOLENTINO <sup>(2)</sup>; HELENICE DE OLIVEIRA FLORENTINO <sup>(3\*)</sup>;  
MARIA MÁRCIA PEREIRA SARTORI <sup>(4)</sup>

### RESUMO

O palhicho derivado da colheita de cana-de-açúcar crua, com a redução gradativa das queimadas nos canaviais, tornou-se foco para os pesquisadores e produtores. As vantagens no recolhimento, na recuperação e no aproveitamento têm mobilizado pesquisadores de universidades, gerentes e diretores de usinas, interessados em encontrar a maneira mais produtiva, econômica e eficaz de realizar esse processo. O recolhimento do palhicho é feito em quatro estágios: primeiro o palhicho é enleirado, depois passado por uma máquina de compactação, posteriormente, acondicionado no caminhão e, finalmente, transportado para o centro de processamento. O estudo da viabilidade de aproveitamento desse resíduo para a geração de energia pode ser feito com base no custo e no balanço de energia, ou seja, a energia gerada por essa biomassa menos a energia consumida no processo. Neste trabalho, é proposto o uso de técnicas matemáticas para auxiliar na escolha das variedades da cana-de-açúcar a serem plantadas a fim de otimizar o balanço de energia da biomassa residual de colheita e minimizar o custo de coleta dessa biomassa do campo para o centro de produção, além de satisfazer as principais necessidades da usina.

**Palavras chave:** modelo matemático, biomassa residual, cana-de-açúcar.

### ABSTRACT

#### MATHEMATICAL MODELING FOR SUGARCANE RESIDUAL BIOMASS EXPLOITATION WITH MINIMUM COST

With the gradual reduction in harvest burning, the straw derived from raw sugarcane harvest has become a focal point for researchers and producers alike. The advantages of retrieving, recovering and using this straw have motivated university researchers and sugar mill managers and directors to find the most productive, economic and efficient way to carry out such process. The retrieval of the straw is done in four phases: first it is joined and later bundled by a compacting machine, it is then loaded into trucks and finally transported to the processing center. The feasibility of using this residue in order to generate energy is linked to the cost and the energy balance, that is, the difference between energy generated by the biomass and the energy used in the process. In this work, it is proposed the use of mathematical techniques to assist in choosing the sugar cane varieties to be planted in order to optimize the residual biomass energy balance and minimize the cost in collecting the biomass and carrying from the field to the production center, in addition to satisfying the main needs of the mill.

**Key words:** mathematical model, residual biomass, sugarcane.

---

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em 27 de dezembro de 2004 e aceito em 9 de maio de 2007.

<sup>(2)</sup> Programa de Pós Graduação em Energia da Agricultura, Fazenda Experimental Lageado, Caixa Postal 237, 18603-970 Botucatu (SP).

<sup>(3)</sup> Departamento de Bioestatística, Instituto de Biociências, UNESP, Distrito de Rubião Júnior S/N, 18618-000 Botucatu(SP). E-mail: helenice@ibb.unesp.br. (\*) Autora correspondente.

<sup>(4)</sup> Departamento de Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP, Av. Eng.º Luiz Edmundo C. Coube, 14-01, 17033-360 Bauru (SP). E-mail: msartori@btu.flash.tv.br

## 1. INTRODUÇÃO

Com a redução gradativa das queimadas nos canaviais, o palhiço derivado da colheita de cana-de-açúcar crua, tornou-se foco para os pesquisadores e produtores. As vantagens no recolhimento, na recuperação e no aproveitamento têm mobilizado pesquisadores de universidades, gerentes e diretores de usinas, interessados em encontrar a maneira mais produtiva, econômica e eficaz para esse manejo (BEEHARRY, 2001; SCHNEIDER et al., 2001; BEEHARRY, 2002).

O aumento das exportações do açúcar, a criação de veículos bicomustíveis e a alta do petróleo fizeram o álcool hidratado ganhar espaço no mercado, promovendo ampliação gradativa na produção de cana-de-açúcar, e por consequência, o aumento de palhiço nas lavouras tem sido inevitável.

Segundo CRUZ (2002), mesmo com a prorrogação da lei do fim da queimada de cana para 2030, a mecanização da colheita cresce a cada safra, acumulando o palhiço no solo.

Sem as queimadas e com maior acúmulo de palhas sobre o solo, criam-se condições favoráveis para o aparecimento da cigarrinha da raiz e também o atraso da brota da cana, comprometendo assim a próxima safra.

Conforme SARTORI et al. (2001), na tentativa de minimizar o impacto ambiental e as influências causadas na produtividade e, conseqüentemente, no lucro das empresas sucroalcooleiras, pesquisadores têm persistido na escolha da variedade que derive palhiços com maior poder calorífico e com baixo custo de coleta, sem perder as características de produção. Somente assim seria viável o aproveitamento desse resíduo para co-geração de energia.

A escolha certa da variedade de cana-de-açúcar para o plantio não é tarefa fácil, pois depende de um conjunto de informações fundamentais sobre os fatores agrônômicos e industriais, bem como da interação de todos os fatores bióticos, abióticos, administrativos e econômicos (PMGCA, 1999). Os dados do palhiço podem ser mais uma opção para escolha das variedades, pois possibilitam melhores resultados econômicos e auxiliam na utilização desse resíduo no sistema de produção de energia da usina.

Segundo SARTORI et al. (2001) a escolha de variedades para o plantio da cultura de cana-de-açúcar pode ser auxiliada por modelos matemáticos de otimização. Com o aproveitamento do palhiço, além do potencial energético dessa biomassa, têm-se como vantagens as questões ambientais, a manutenção de empregos e a projeção de vida

limitada para os recursos energéticos de fontes naturais (EID et al., 1998). Uma das grandes dificuldades ainda encontrada para o aproveitamento desse resíduo, porém, está na parte econômica. Além do fator custo, a viabilidade desse aproveitamento está ligada também ao balanço de energia, pois segundo RIPOLI (2002), o processo envolve o uso de quatro tipos de máquinas, as quais consomem energia em forma de combustíveis derivados do petróleo.

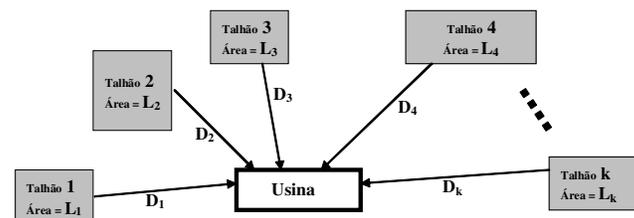
O objetivo aqui é propor o uso de técnicas matemáticas para auxiliar na escolha das variedades da cana-de-açúcar a serem plantadas a fim de otimizar a energia do palhiço e minimizar o custo de coleta dessa biomassa, além de satisfazer as principais necessidades da usina. A coleta do palhiço consiste no recolhimento desse resíduo no campo e transporte do campo para o centro de produção.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. O problema de minimização do custo da coleta da biomassa residual da cana-de-açúcar

O problema consiste em determinar quais das  $n$  variedades  $i$  devem ser plantadas nos  $k$  talhões  $j$  de medida  $L_j$  (ha) e distância  $D_j$  (km) do centro de produção ( $j=1,2,\dots,k$ ), conforme esquematização da figura 1, e oferecer o menor custo possível para a coleta do palhiço a ser aproveitado para co-geração de energia. A produção de sacarose ser superior ou igual à demanda da usina.

A coleta do palhiço é feita com auxílio de quatro máquinas diferentes, assim, o processo pode ser dividido em quatro estágios: primeiro o palhiço é enleirado (por um ancinho enleirador); posteriormente, compactado (por uma máquina de compactação); depois é acondicionado no caminhão, ou seja carregado (por uma garra carregadora) e, finalmente, transportado para o centro de processamento (por caminhões apropriados).



**Figura 1.** Diagrama representando os talhões de 1 a  $k$ , de medidas  $L_j$  (ha) e distâncias  $D_j$  (km) do centro de produção ( $j=1,2,\dots,k$ ), considerando que o centro de processamento do palhiço está localizado na usina.

O custo por m<sup>3</sup> para os três primeiros estágios (enleirar, compactar e carregar o palhicho da variedade i) Cpv<sub>i</sub>, em US\$/m<sup>3</sup>, é calculado da seguinte forma:

$$Cpv_i = \frac{Cpt}{V_i}$$

Sendo: Cpt o custo por tonelada para enleirar, compactar e colocar o palhicho no caminhão, em US\$/t, e V<sub>i</sub> é o volume ocupado por uma tonelada do palhicho da variedade i depois de compactado, em m<sup>3</sup> t<sup>-1</sup>.

O custo por hectare para os três primeiros estágios de coleta da biomassa da variedade i, pode ser calculado, em US\$/ha, da seguinte forma:

$$CECC_i = Q_i Cpv_i \quad (1)$$

Sendo: Q<sub>i</sub> - uma estimativa do volume do palhicho produzido pela variedade i por hectare de cana, m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

O custo (C<sub>Dj</sub>) para percorrer a distância D<sub>j</sub>, em km, entre o talhão j e o centro de processamento do palhicho, em US\$, é determinado da seguinte forma:

$$C_{Dj} = D_j C_o P$$

Sendo: C<sub>o</sub> - o consumo de combustível do caminhão a ser usado no transporte (L/km) e P - o preço do combustível em US\$/L.

O custo do quarto estágio do processo de coleta, ou seja, o custo para transportar o palhicho da cana da variedade i produzido no talhão j pode ser calculado, em US\$/ha, da seguinte forma:

$$CT_{ij} = \left( \frac{Q_i}{V_c} \right) C_{Dj} \quad (2)$$

Sendo: V<sub>c</sub> - o volume disponível do caminhão (m<sup>3</sup>).

Pode-se observar que o valor  $\left( \frac{Q_i}{V_c} \right)$  é o número de vezes que o caminhão necessita percorrer do talhão j ao centro de processamento para transportar o palhicho gerado pela variedade i.

Assim, o custo de coleta do palhicho gerado pela cana da variedade i plantada no talhão j, CC<sub>ij</sub>, pode ser obtido pela soma dos custos CECC<sub>ij</sub> (custo para enleirar, compactar e carregar esse palhicho) e CT<sub>ij</sub> (custo para transportar o palhicho da variedade i produzido no talhão j), ou seja, a soma de (1) e (2):

$$CC_{ij} = CECC_{ij} + CT_{ij} \quad (3)$$

## 2.2. O problema de otimização do balanço de energia da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar

O problema consiste em determinar quais das n variedades i devem ser plantadas nos k talhões j

de medida L<sub>j</sub> (ha) e distância D<sub>j</sub> (km) do centro de produção (j=1,2,...,k), que ofereçam um balanço ótimo da energia da biomassa residual de colheita, devendo satisfazer as demandas da usina.

A energia da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar de variedade i (EB<sub>i</sub>), é calculada pela fórmula:

$$EB_i = E_{c_{Bi}} P_{Bi} \quad (4)$$

Sendo: o índice i = 1,...,n referente às variedades a serem plantadas e j = 1,...,k referente aos talhões, EB<sub>i</sub> a energia estimada para biomassa residual de colheita da variedade i, em MJ/ha, E<sub>c<sub>Bi</sub></sub> a energia calorífica do resíduo de colheita da variedade i (MJ/t), P<sub>Bi</sub> é a estimativa da quantidade de palhicho gerada em um hectare da variedade i, em t/ha.

A energia consumida no processo de coleta do palhicho da cana de variedade i, plantada no talhão j (ET<sub>Bij</sub>) é dada pela soma de energia consumida para enleirar e compactar (E<sub>ECi</sub>), carregar (E<sub>Ci</sub>) e transportar (E<sub>Tij</sub>) essa biomassa.

$$ET_{Bij} = E_{ECi} + E_{Ci} + E_{Tij} \quad (5)$$

As energias consumidas, em MJ/ha, para enleirar e compactar (E<sub>ECi</sub>), carregar (E<sub>Ci</sub>) e transportar o palhicho da cana de variedade i plantada no talhão j (E<sub>Tij</sub>), são calculadas conforme as equações (6), (7) e (8).

$$E_{ECi} = EG_{EC} P_{Bi} \quad (6)$$

$$E_{Ci} = EG_C P_{Bi} \quad (7)$$

$$E_{Tij} = EG_T D_j \frac{Q_i}{V_c} \quad (8)$$

Sendo: EG<sub>EC</sub> - energia consumida pelas máquinas, sob a forma de combustível, para enleirar e compactar o resíduo por unidade massa (MJ/t); EG<sub>c</sub> - energia consumida pela máquina para carregar o resíduo por unidade de massa (MJ/t); EG<sub>T</sub> - energia consumida pelo caminhão em forma de combustível para o transporte dos resíduos (MJ/km); V<sub>i</sub> - volume de palhicho da variedade i produzido por unidade área (m<sup>3</sup>/ha) e V<sub>c</sub> - capacidade de carga do caminhão (m<sup>3</sup>).

O balanço de energia (BE<sub>ij</sub>) do processo de coleta dos resíduos de colheita da cana de variedade i plantada no talhão j é a diferença entre a energia gerada pela biomassa residual da cana de variedade i (4) e a energia consumida no processo de coleta do palhicho da cana de variedade i, plantada no talhão j (5), conforme equação (9).

$$BE_{ij} = EB_i - ET_{Bij} \quad (9)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Modelo matemático para o problema de minimização do custo de coleta da biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar

Considerando  $X_{ij}$  a quantidade, em hectare, de cana da variedade  $i$  a ser plantada no talhão  $j$ , o seguinte modelo é proposto para o problema de minimização do custo de coleta da biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar, definido na seção 2.1:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CC_{ij} X_{ij} \quad (10)$$

$$\text{Sujeito a} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i X_{ij} \geq \bar{P} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = L_j \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (12)$$

$$X_{ij} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1, 2, \dots, k \quad (13)$$

Sendo:  $i = 1, 2, \dots, n$  o índice referente às variedades;  $j = 1, 2, \dots, k$  o índice referente aos talhões;  $\bar{P}$  a demanda média de sacarose da usina;  $A_i$  a estimativa de produção de sacarose da cana de variedade  $i$  (t/ha) e  $L_j$  a área do talhão  $j$ ;  $CC_{ij}$  calculado pela equação (3).

A função objetivo (10) minimiza o custo total de coleta do palhicho gerado na colheita.

A restrição (11) garante a demanda de açúcar fermentescível, as restrições (12) garantem que toda a área destinada para plantio nos talhões seja usada e as restrições (13) garantem a não-negatividade das variáveis.

O modelo foi formulado usando técnicas de otimização e pode ser resolvido por métodos de programação linear (LASDON, 1970; LUENBERGER, 1984).

#### 3.2. Modelo matemático para o problema de otimização do balanço de energia da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar

Considerando  $X_{ij}$  a quantidade, em ha, de cana da variedade  $i$  a ser plantada no talhão  $j$ , o seguinte modelo é proposto para o problema de otimização do balanço de energia da biomassa residual de colheita, definido na seção 2.2:

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k BE_{ij} \quad (14)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i X_{ij} \geq \bar{P} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = L_j, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (16)$$

$$X_{ij} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (17)$$

Sendo:  $i = 1, 2, \dots, n$  o índice referente às variedades;  $j = 1, 2, \dots, k$  o índice referente aos talhões;  $\bar{P}$  = a demanda média de sacarose da usina;  $A_i$  = a produtividade de sacarose da variedade  $i$  por hectare (t/ha) e  $L_j$  = a área do talhão  $j$ .

A função-objetivo (14) determina o balanço ótimo de energia do processo.

A restrição (15) garante a demanda de açúcar fermentescível, as restrições (16) garantem que toda a área destinada para plantio nos talhões seja usada e as (17) garantem a não-negatividade das variáveis.

O modelo foi formulado usando técnicas de otimização e pode ser resolvido por métodos de programação linear (LASDON, 1970; LUENBERGER, 1984).

#### 3.3. Modelo matemático para otimizar simultaneamente o custo de coleta e o balanço de energia da biomassa residual da colheita da cana-de-açúcar

Levando-se em consideração os modelos matemáticos anteriores, seções 3.1 e 3.2, propõe-se um modelo matemático multiobjetivo, o qual busca determinar quais variedades que ao mesmo tempo minimiza o custo de coleta e maximiza o balanço de energia da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CC_{ij} X_{ij} \text{ e}$$

$$\text{Sujeitos a} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i X_{ij} \geq \bar{P}$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = L_j \quad j = 1, 2, \dots, k$$

$$X_{ij} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \text{ e } j = 1, 2, \dots, k$$

No que segue, é proposta uma técnica matemática para resolução deste problema.

Fazendo:

$$C(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k CC_{ij} X_{ij}$$

$$E(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k BE_{ij} X_{ij}$$

$$F(X) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k A_i X_{ij}$$

sendo  $X = (X_{11}, X_{12}, \dots, X_{nk})$ .

Define-se  $X$  factível como  $X \in \{X \text{ tais que } F(X) \geq \bar{P}, \sum_{i=1}^n X_i = L_j, X_{ij} = 0 \text{ onde } i=1, \dots, n \text{ e } j=1, \dots, k\}$

Podê-se escrever os modelos de minimização de custos e maximização de balanço de energia, seções 3.1 e 3.2, na forma:

Min  $C(X)$  sujeito a  $X$  factível

e Max  $E(X)$  sujeito a  $X$  factível

Suponha que exista:  $X = X_{E_{\max}}$  tal que Max  $E(X) = E(X_{E_{\max}}) = E_{\max}$  e

$X = X_{C_{\min}}$  tal que Min  $C(X) = C(X_{C_{\min}}) = C_{\min}$ , em que  $X_{C_{\min}}$  e  $X_{E_{\max}}$  são factíveis.

Para todo  $X$  factível tem-se que:  $E(X) \leq E_{\max}$  e  $C(X) \leq C_{\min}$ . Portanto:

$$E(X_{C_{\min}}) \leq E_{\max}$$

$$C(X_{E_{\max}}) \leq C_{\min}$$

Considere agora que existe  $X_b$  factível tal que:

$$C_{\min} \leq C(X_b) \leq C(X_{E_{\max}}) \text{ e } E(X_{C_{\min}}) \leq E(X_b) \leq E_{\max}.$$

Assim, pode-se determinar  $X_b$  que maximiza o balanço de energia da biomassa, com um custo não superior a um valor fixo  $C$ , tal que  $C_{\min} \leq C \leq C(X_{E_{\max}})$ . Para isso, basta resolver o problema:

$$\text{Max } E(X) \text{ sujeito a } \{X \text{ factível e } C(X) \leq C\} \quad (18)$$

Dessa forma, tendo um montante para investimento no aproveitamento do resíduo, pode-se determinar quais variedades devem ser plantadas para obter um balanço ótimo de energia da biomassa com um custo não superior a esse montante. Da mesma forma, pode-se também determinar quais variedades devem ser plantadas com um balanço de energia da biomassa superior ou igual a um valor pré-estabelecido  $E$ , tal que  $E(X_{C_{\min}}) \leq E \leq E_{\max}$ , a fim de minimizar o custo e satisfazer a demanda da usina. Basta resolver o problema:

$$\text{Min } C(X) \text{ sujeito a } \{X \text{ factível e } E(X) \geq E\} \quad (19)$$

Assim, usando (18) ou (19) resolve-se, por técnicas de programação linear, o problema visando a dois objetivos, ou seja, diminuir o custo de coleta e aumentar o balanço de energia da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar.

Outra técnica que pode ser usada para a resolução do modelo multiobjetivo é reescrever o

modelo com uma única função, colocando pesos para os objetivos originais, da seguinte forma:

$$\text{Min } (W_1 C(X) - W_2 E(X)) \text{ sujeito a } \{X \text{ factível}\}$$

Sendo  $W_1$  e  $W_2$ , os pesos associados, respectivamente, aos objetivos de minimização do custo de coleta do palhico e maximização do balanço de energia residual. Esses pesos devem ser escolhidos de acordo com as necessidades da usina ou a preferência do gestor do processo. O sinal de subtração aparece na função objetivo para transformar o problema de maximização em minimização.

### 3.4. Aplicação dos modelos matemáticos

Os modelos propostos foram implementados computacionalmente usando a subrotina de Programação Linear do programa MATLAB 6.1.0.450 (R 12) (THE MATHWORKS INC. (1992)) em microcomputadores Pentium IV com 128 MB de RAM e 20 GB de disco rígido, pertencentes ao Laboratório Científico de Informática (LCI) do Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências, UNESP, Botucatu (SP).

#### 3.4.1. Dados agrônômicos

Os dados aplicados aos modelos foram cedidos por uma Usina na região de Botucatu no Estado de São Paulo. São dados de cinco variedades (RB 72454, RB 806043, SP791011, RB855113 e RB 855536); oito talhões e as distâncias dos talhões à usina, conforme se verificam nas tabelas 1 e 2. A produtividade de biomassa residual de colheita e a energia disponível para cada variedade, foram determinadas em experimentos, em quatro cortes conforme, SARTORI et al (2001). Os dados de produtividade de sacarose de cada variedade foram cedidos pela Universidade Federal de São Carlos (SP). A energia gasta pelos maquinários foi calculada conforme RIPOLI (1991).

**Tabela 1.** Área e distância do talhão ao centro de processamento da biomassa residual de colheita

Talhão	Área ha	Distância km
1	22,17	4,5
2	18,29	4,0
3	53,15	3,5
4	72,04	4,5
5	55,72	3,0
6	17,05	2,0
7	54,9	2,0
8	80,5	2,5

**Tabela 2.** Produtividade de biomassa residual de colheita, energia gerada pela biomassa residual, produtividade de sacarose e estimativa do volume de biomassa por unidade de área para cada variedade de cana-de-açúcar

Variedade	Descrição da variedade	Biomassa residual massa úmida t ha <sup>-1</sup>	Quantidade de energia da biomassa MJ ha <sup>-1</sup>	Produção de sacarose t ha <sup>-1</sup>	Volume por área m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
1	RB 72454	23,73	47576,10	15,26	807,12
2	RB 806043	21,00	35263,83	14,48	590,95
3	RB 855536	26,90	59501,45	16,95	818,30
4	SP791011	24,10	47657,03	15,80	814,58
5	RB855113	29,90	69080,06	17,53	994,34

### 3.4.2. Resolução dos problemas

Os resultados verificados com os modelos das seções 3.1 e 3.2, de custo e balanço de energia, estão mostrados nas tabelas 3 e 4.

A partir dos resultados das tabelas 3 e 4 têm-se:

$$C_{\min} = 30589.30 \text{ US\$} \quad \text{e} \quad E_{\max} = 23943210 \text{ MJ}$$

Usando a técnica proposta na seção 3.3 obtém-se:

$$C(X_{E_{\max}}) = 36350.10 \text{ US\$}$$

$$E(X_{C_{\min}}) = 2052540 \text{ MJ}$$

Tomando os valores C e E tais que:

$$C_{\min} \leq C \leq C(X_{E_{\max}}) \quad \text{e} \quad E(X_{C_{\min}}) \leq E \leq E_{\max}$$

Uma sugestão é tomar C e E na forma (ponto médio do intervalo):

$$C = \frac{C_{\min} + C(X_{E_{\max}})}{2} = \text{US\$}33469.70$$

$$E = \frac{E(X_{C_{\min}}) + E_{\max}}{2} = 22234320 \text{ MJ}$$

**Tabela 3.** Resultados obtidos usando o modelo de custo de coleta da biomassa residual da cana-de-açúcar

Variedades a serem plantada	Talhão	Área ha
RB 806043	1	22,17
	2	18,29
	3	31,57
	4	72,04
RB 855536	3	21,58
	5	55,72
	6	17,05
	7	54,9
	8	80,5

Custo mínimo = 30589.30US\$

**Tabela 4.** Resultados obtidos usando o modelo de balanço de energia do aproveitamento da biomassa residual da colheita de cana-de-açúcar

Variedades a serem plantadas	Talhão	Área ha
RB855113	1	22,17
	2	18,29
	3	53,15
	4	72,04
	5	55,72
	6	17,05
	7	54,9
	8	80,5

Balanço de energia ótimo = 23943210 MJ

Utilizando estes valores nos modelos (18) e (19) determina-se respectivamente, os valores mostrados nas tabelas 5 e 6.

**Tabela 5.** Resultado obtido no modelo matemático de balanço de energia com um custo C preestabelecido

Variedades a serem plantadas	Talhão	Área ha
RB 806043	1	22,17
	2	9,75
	4	72,04
	2	8,54
RB855113	3	53,15
	5	55,72
	6	17,05
	7	54,9
	8	80,5

Máximo balanço de energia = 21236630MJ com custo = US\$33469,70

**Tabela 6.** Resultado no modelo matemático de custo mínimo de coleta da biomassa residual com um balanço de energia E preestabelecido

Variedades a serem plantadas	Talhão	Área ha
RB 806043	1	22,17
	4	43,47
RB855113	2	18,29
	3	53,15
	4	28,56
	5	55,72
	6	17,05
	7	54,9
	8	80,5

Custo mínimo = 34531,06US\$ com balanço de energia = 22234320MJ

#### 4. CONCLUSÕES

1. Os modelos propostos permitem otimizar o balanço de energia da biomassa residual de colheita da cana-de-açúcar e minimizar o custo de transferência desta biomassa do campo para o centro de processamento de forma satisfatória.

2. Uma das vantagens da técnica proposta para resolução dos modelos, é o fato de poder trabalhar fixando um teto para o custo, ou dependendo do interesse da empresa, com uma estimativa para o valor do balanço de energia gerada pelo palhico.

3. Além do fator econômico, com o aproveitamento da biomassa residual da colheita de cana-de-açúcar para geração de energia, a empresa colabora com a preservação do meio ambiente e ao mesmo tempo, valoriza seus produtos no Brasil e no exterior.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro dos órgãos: FAPESP (Proc. 06/02476-9 e Proc. 04/08993-0), FUNDUNESP e Pró-Reitoria de Pesquisa da UNESP (PROPe).

#### REFERÊNCIAS

BEEHARRY, R.P. Strategies for augmenting sugarcane biomass availability for power production in Mauritius. **Biomass & Bioenergy**, New York, v. 20, p. 421-429, 2001.

BEEHARRY, R.P. Carbon balance of sugarcane bioenergy systems. **Biomass & Bioenergy**, New York, v. 20, p.361-370, 2002.

CRUZ, D.M. Fim da Queimada é prorrogada até 2030. **JornalCana**, Ribeirão Preto, p.44, Dezembro 2002.

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: Instituto de Economia Agrícola, v.28, n.5, 1998.

LASDON, L.S. Optimization theory for large systems. New York: Macmillan, 1970. 523 p.

LUENBERGER, D.G. Linear and Nonlinear Programming. Reading: Addison Wesley, 1984. 516 p.

PMGCA. Programa de melhoramento genético da cana-de-açúcar. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Biotecnologia Vegetal, 1999.

RIPOLI, T.C. **Utilização do material remanescente da colheita de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) - Equacionamento dos balanços energético e econômico.** 1991. 150 f. Tese (Livro Docência em Agronomia) - ESALQ, USP, Piracicaba, 1991.

RIPOLI, M.L.C. **Mapeamento do palhico enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) e do seu potencial energético.** 2002. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - ESALQ, USP, Piracicaba, 2002.

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**, Amsterdam, v.26, n.11, p.1031-1040, 2001.

SCHNEIDER, L.C.; KINZIG, A.P.; LARSON E.D.; SOLÓRZANO, L.A. Method for spatially explicit calculations of potential biomass yields and assessment of land availability for biomass energy production in Northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.84, p. 207-226, 2001.