

ISSN 1677-9266

**Modelagem como Ferramenta
de Análise para o Uso de Composto
de Lixo Urbano na Cana-de-Açúcar**



República Federativa do Brasil

Fernando Henrique Cardoso
Presidente

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Marcus Vinicius Pratini de Moraes
Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa

Conselho de Administração

Márcio Fortes de Almeida
Presidente

Alberto Duque Portugal
Vice-Presidente

Dietrich Gerhard Quast
José Honório Accarini
Sérgio Fausto
Urbano Campos Ribeiral
Membros

Diretoria Executiva da Embrapa

Alberto Duque Portugal
Diretor-Presidente

Bonifácio Hideyuki Nakasu
Dante Daniel Giacomelli Scolari
José Roberto Rodrigues Peres
Diretores-Executivos

Embrapa Informática Agropecuária

José Gilberto Jardine
Chefe-Geral

Tércia Zavaglia Torres
Chefe-Adjunto de Administração

Kleber Xavier Sampaio de Souza
Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

Álvaro Seixas Neto
Supervisor da Área de Comunicação e Negócios

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 1

ISSN 1677-9266

Modelagem como Ferramenta de Análise para o Uso de Composto de Lixo Urbano na Cana-de-Açúcar

Fábio Cesar da Silva
Alessandra Fabíola Bergamasco
Laércio Luiz Vendite
Marco Antonio Azeredo Cesar
Ariovaldo Faustino Soares da Silva
Carlos Alberto Silva

Campinas, SP
2001

Embrapa Informática Agropecuária
Área de Comunicação e Negócios (ACN)
Av. Dr. André Tosello s/nº
Cidade Universitária "Zeferino Vaz" – Barão Geraldo
Caixa Postal 6041
13083-970 – Campinas, SP
Telefone/Fax: (19) 3789-5743
URL: <http://www.cnptia.embrapa.br>
Email: sac@cnptia.embrapa.br

Comitê de Publicações

Amarindo Fausto Soares
Francisco Xavier Hemerly (Presidente)
Ivanilde Dispato
José Ruy Porto de Carvalho
Marcia Izabel Fugisawa Souza
Suzilei Almeida Carneiro

Suplentes

Fábio Cesar da Silva
João Francisco Gonçalves Antunes
Luciana Alvin Santos Romani
Maria Angélica de Andrade Leite
Moacir Pedroso Júnior

Supervisor editorial: *Ivanilde Dispato*

Normalização bibliográfica: *Marcia Izabel Fugisawa Souza*

Foto da capa: *Maria Augusta Garcia*

Capa: *Intermídia Publicações Científicas*

Editoração eletrônica: *Intermídia Publicações Científicas*

1ª edição

Todos os direitos reservados

Modelagem como ferramenta de análise para o uso de composto de lixo urbano na cana-de-açúcar / Fábio Cesar da Silva ... [et al.] — Campinas : Embrapa Informática Agropecuária, 2001.

27 p. : il. — (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Informática Agropecuária ; 1)

ISSN 1677-9266

1. Modelo matemático. 2. Composto de lixo urbano. 3. Cana-de-açúcar.
I. Silva, Fábio Cesar da. II. Série.

CDD – 630.2118 (21. ed.)

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Material de Métodos	10
Resultados e Discussão	16
Conclusões	24
Agradecimento	25
Referências Bibliográficas	26

Modelagem como Ferramenta de Análise para o Uso de Composto de Lixo Urbano na Cana-de-Açúcar

Fábio Cesar da Silva¹

Alessandra Fabíola Bergamasco²

Laércio Luiz Vendite³

Marco Antonio Azeredo Cesar⁴

Ariovaldo Faustino Soares da Silva⁵

Carlos Alberto Silva⁶

Resumo

O manejo de composto de lixo (CL) oferece um fertilizante alternativo na cana-de-açúcar (possui alto teor de matéria orgânica e nutrientes) e traz ainda uma solução social e ambiental. O objetivo desse estudo é o acompanhamento dos processos de crescimento, maturação e transferência de metais na cana-de-açúcar, afetados pela adição de CL, através de mo-

¹ Eng. Agr., Dr. em Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Caixa Postal 6041, Barão Geraldo, 13083-970 – Campinas, SP. (fcesar@cnptia.embrapa.br)

² Zootecnista, Bolsista Fapesp, Embrapa Informática Agropecúaria. (afb@cnptia.embrapa.br)

³ Prof. Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica da Unicamp, Caixa Postal 6065, 13083-970 – Campinas, SP. (vendite@ime.unicamp.br)

⁴ Prof. Dr., Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição, ESALQ/USP, Caixa Postal 9, 13418-970 – Piracicaba, SP. (maacesar@carpa.ciagri.usp.br)

⁵ M.Sc., Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição, ESALQ/USP, Caixa Postal 9, 13418-970 – Piracicaba, SP. (afssilva@zipmail.com.br)

⁶ Dr. em Solos, Pesquisador da Embrapa Solos, Rua Jardim Botânico 1024, 22460-000 – Rio de Janeiro, RJ. (csilva@cnps.embrapa.br)

delos matemáticos como ferramenta de apoio à decisão. Esse estudo busca uma alternativa mais econômica ao produtor e uma solução governamental para disposição final sustentável do lixo urbano. O Modelo de Crescimento adaptado a esse estudo foi descrito por Teruel (1996), o qual demonstrou maior vigor vegetativo em cana adubada com CL suplementado com PK e nas dosagens 0 e 60 t.ha⁻¹, e o Índice de Área Foliar (IAF) máximo atingido foi mais tardio na cana que recebeu tratamento com CL sem suplementação mineral. Para estudo da curva de maturação da cana-de-açúcar foi ajustado o modelo de Mitscherlich (Udo, 1983). Concluiu-se que houve uma influência da dose de CL no tempo em que a cana atinge o teor mínimo para industrialização (correlação negativa) e a resposta ótima da cultura em acumulação de açúcar ocorreu na combinação do CL com fertilizante P ou K. O modelo de transferência de metais pesados no sistema solo-cana, foi construído com base nos modelos compartmentais (solo, raiz e parte aérea). A translocação de metais foi grande para o cádmio, e a passagem de metais pesados para o caldo da cana foi baixa, não trazendo problemas à sua industrialização ou mesmo seu consumo *in natura*, quando adubada com as dosagens de CL testadas. Os três modelos utilizados nesse estudo mostraram ótimo ajuste e podem servir como base à formulação de normas de uso do CL, podendo estimar quantidades de cada metal em cada parte da planta nos diversos cenários estudados e predizer a resposta em crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Termos para indexação: Modelo matemático; Cana-de-açúcar; Composto de lixo urbano.

Modeling as Analysis Tool for the Use of Urban Waste Compost in the Sugar Cane

Abstract

The waste compost (WC) management offers an sugar cane alternative fertilizer (possess high text of organic matter and nutrients) and still brings a social and environment solution. The study objective is accompaniment of the growth and maturation processes, and heavy metals transference in sugar cane under WC addition, through mathematical models as tool help to the decision. This study searchs a more economic alternative to the producer and a governmental solution for sustainable final disposal of the urban waste. The Growth Model suitable to this study was described for Teruel (1996), which demonstrated to greater vegetative vigor in sugar cane WC fertilization supplemented with PK and 0 and 60 t.ha⁻¹ doses, and the maximum Leaf Area Index (LAI) was more delayed in the sugar cane without mineral suplementation. For sugar cane curve maturation study, the Mitscherlich Model was adjustment (Udo, 1983). It was concluded that there was waste compost dose influence in the time where the sugar cane reaches the minimum amount for industrialization (negative correlation) and the excellent response in sugar accumulation occurred in the waste compost with P or K combination. The Heavy Metal Transportation Model in the soil-cane system was build compartmental models basis. The metal translocation was great for cadmium, and the transference of heavy metals for sugar cane juice was low, not bringing problems to industrialization or in natura consumption, when fertilized

with the tested amounts WC. The three models used in this study showed excellent fitness and can serve as basis to the WC norms formularization, being able to estimate amounts of each metal in each plant part in the diverse scenes studied and to predict the response in sugar cane growth and development.

Index terms: *Mathematical models; Sugar cane; Urban waste compost.*

Introdução

Os resíduos urbanos (lixos), quando acumulados, causam diversos prejuízos à população em geral e ao meio ambiente, tornando-se assim um problema governamental que está se agravando devido ao crescimento populacional e a rápida urbanização. Uma maneira de solucionar esse problema é através da compostagem do lixo domiciliar, do qual origina-se o composto de lixo (CL), sendo o uso na agricultura a melhor opção para sua disposição final, como fertilizante e/ou condicionador das propriedades físicas do solo (Egreja Filho, 1993), pois estes são fontes de nutrientes e de matéria orgânica (Cravo, 1995). Mas devemos estar atentos para o fato de que este CL pode vincular metais pesados, fator limitante de seu uso, pois podem entrar gradualmente e acumular-se na cadeia alimentar chegando até o homem (Kabata-Pendias, 1986).

O manejo ambiental na cultura da cana-de-açúcar vem exigindo a previsão do comportamento em produção e risco ambiental em vários níveis de controle na lavoura canavieira, desde formas de manipulação do solo, profundidade e densidade de plantio, irrigação, controle da maturação, pragas e doenças, etc.

Uma ferramenta importante para descrever o processo evolutivo da cultura da cana de açúcar é a construção de Modelos Matemáticos que possibilitem o estudo de sistemas reais complexos, os quais exigem modelos com integração coerentes, banco de dados contendo informações experimentais e edafo-climáticas, além do potencial genético da cultura (Bassanezi & Ferreira Junior, 1988). A informatização de processos de suporte a decisões, em especial pelo emprego de Modelos Matemáticos, podem minimizar riscos ambientais, reduzindo os custos de produção e proporcionar maior sustentabilidade do planejamento agrícola, pois maximiza o uso dos recursos naturais sem prejudicar o ambiente. Além disso, esses modelos têm contribuído para um melhor conhecimento dos mecanismos fisiológicos para avaliações qualitativas e quantitativas dos sistemas de plantio (Barbieri, 1993).

Os modelos de crescimento das plantas se esforçam para simular a produção fotossintética e a partição dos fotossintetizados para o crescimento, o armazenamento e a respiração (Barbieri, 1993). A pesquisa da

fotoossíntese é refletida em sofisticados modelos, os quais existem para predizer a fotoossíntese pelos dados da elevação solar, geometria das folhas, penetração da luz, taxa individual da fotoossíntese, etc., cuja estratégia depende da visão e dos objetivos do autor desse modelo.

O objetivo desse estudo foi descrever modelos matemáticos que expliquem o desenvolvimento do Índice de Área Foliar (IAF) da cana-de-açúcar, do comportamento dos teores de sacarose durante a maturação da cana-de-açúcar e ainda que expliquem a passagem dos metais pesados pelo sistema solo-cana, sob adubação de CL em combinação com suplementos P e K, predizendo as melhores épocas para se realizar o corte da cana, melhor dose de CL e melhor suplementação PK a ser aplicada, minimizando custos de produção e melhorando a qualidade dos solos.

Material e Métodos

Foram realizados três experimentos, sendo dois em condições controladas no Rio de Janeiro, RJ e um ensaio de campo em Piracicaba, SP, com cana-de-açúcar, adubando-a com CL. O primeiro experimento foi necessário ao estudo do decaimento dos teores de metais pesados no solo, fornecendo valores para a construção do modelo matemático de transferência de metal pesado no sistema solo-cana; o segundo experimento foi necessário ao estudo da passagem do metal pesado do solo para a planta (raiz e parte aérea), e o terceiro forneceu valores de IAF para o modelo de crescimento e teores de sacarose (Pol%) para o modelo de maturação da cana-de-açúcar.

Nos experimentos 1 e 2, os solos foram separados em classes de acordo com os teores de óxidos de Fe e Al, teor de argila e pH, com objetivo do estudo da interferência desses fatores nas concentrações de metais pesados e na construção dos modelos matemáticos, simulando-se modelos dentro de variáveis homogêneas. As classes de solos foram: Classe A para solos com argila<35%, óxidos Fe/Al <12% e pH água<5,3 e Classe B, solos com argila>35%, óxidos Fe/Al>12% e pH água>5,3. O experimento 3 foi realizado em solo Terra Roxa Estruturada apenas.

Experimentos

Experimento 1 – Incubação CL/solo

Esse experimento foi conduzido por incubação com 4 doses de CL (0, 25, 50 e 100 t.ha⁻¹ em base úmida), em 5 tipos de solos (LV, PL, B, PV e TR), 2 profundidades (0-20 cm e 20-40 cm), e em 5 períodos de incubação (0, 16, 32, 64 e 100 dias). Foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, totalizando 200 tratamentos. A montagem do experimento se deu em ambiente fechado a uma temperatura média de 23°C, com controle de teor de umidade através de diferença de peso.

Experimento 2 – Cultivo em casa de vegetação

O experimento 2 foi conduzido em casa de vegetação, onde os tratamentos consistiram de 4 solos (LV, PV, PL e B) incubados com CL enriquecido com 5 níveis de metais pesados, os quais se encontram apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Doses de metais pesados adicionados ao composto de lixo.

Metal	Níveis (ppm)				
	1	2	3	4	5
Cd	0	2	4	6	8
Ni	0	50	100	200	300
Cu	0	50	100	200	300
Pb	0	100	200	300	400

O CL foi aplicado em uma dose para todos os tratamentos (10% em relação ao peso seco), onde primeiramente foi aquecido com metais pesados utilizando soluções de sais de Cd, Cu, Ni, Pb e Zn, nas formas Cd(NO₃)₂.4H₂O, Cu(NO₃)₂.3H₂O, Ni(NO₃)₂.6H₂O, Pb(NO₃)₂ e Zn(NO₃)₂.4H₂O, respectivamente.

Experimento 3 – Teste de campo

No experimento 3 foi realizado um ensaio em campo, adubando-se a cana-de-açúcar com 4 dosagens de CL (0, 30, 60 e 90 t.ha⁻¹), combinados ou não com os suplementos minerais P e K, constituindo assim, 16 tratamentos. Foram realizadas 3 determinações, a primeira aos 120 dias, a

segunda aos 180 e a terceira aos 240 dias, onde foram colhidas amostras de folhas, para determinação de matéria seca, contagem do número de colmos, pesagem, etc. Através dessas medidas foi possível o cálculo da área foliar e do índice de área foliar (IAF), que foi o parâmetro utilizado para descrever o crescimento da cana-de-açúcar através do modelo matemático.

Análises e obtenção dos dados

Foram realizadas as seguintes determinações laboratoriais (Embrapa, 1979) a partir de amostras dos Experimentos 1 e 2:

- a) pH em CaCl_2 ($0,01 \text{ mol.L}^{-1}$);
- b) teor disponível de metais pesados (Cd, Cu, Ni e Pb), usando-se o extrator Mehlich 1 e determinação feita por espectrometria de plasma de emissão atômica – ICP;
- c) teor total de metais pesados (Cd, Cu, Ni e Pb), pelo uso de extrator “água-régia” (Nieuwenhuize et al., 1991) e determinação feita em ICP.

As determinações de área foliar (AF), em m^2 , e índice de área foliar (IAF), em m^2/m^2 (m^2 de área foliar/ m^2 de área do terreno), foram realizadas para cada tratamento do Experimento 3, através das seguintes equações:

- a) $\text{AF} (\text{m}^2) = (\text{área da amostra} * \text{peso total das folhas})/\text{peso de uma amostra};$
- b) $\text{IAF} (\text{m}^2/\text{m}^2) = \text{área foliar de uma cana} (\text{m}^2) * \text{perfilhos} (\text{m}^2).$

As determinações dos parâmetros tecnológicos para estudo da maturação da cana-de-açúcar foram obtidas a partir do caldo extraído (CE) e do bagaço fibroso da prensa (Cesar & Silva, 1993):

- a) Brix % CE, determinado por refratometria a $20^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ (Scheneider, 1979);
- b) Pol % CE, dosado pelo método de Schmitz sem diluição, segundo ICUMSA (Scheneider, 1979);
- c) Pureza aparente do CE, calculada pela relação entre a Pol % CE/ Brix % CE x 100;
- d) Peso úmido do bagaço fibroso da prensa (PBU), através da pesagem do resíduo fibroso;

- e) Peso seco do bagaço fibroso da prensa (PBS), obtido através da pesagem do resíduo fibroso seco;
- f) Açúcares Redutores % CE (AR % CE), expresso em glicose, dosados pelo método colorimétrico de Somogyi & Nelson, conforme descrito por Cesar & Silva (1993);
- g) Cinzas % CE, pelo método do rafinômetro de Buse-Tödt-Gollnow (Browne & Zerban, 1941);
- h) P₂O₅, expresso em mg/L, determinado pelo método colorimétrico (Delgado & Cesar, 1984);
- i) Açúcares Totais % CE (AT % CE), expressos em glicose;
- j) Pol % Cana = Pol % CE x (0,9428 - 0,010469 x F).

Modelos matemáticos

Modelo de crescimento da cana-de-açúcar adubada com CL

A variável de crescimento ajustada foi o índice de área foliar (IAF), que é um ótimo indicativo de crescimento e produtividade da cana-de-açúcar, pois após a germinação inicia-se o desenvolvimento das folhas, que são as responsáveis diretas pela transformação da energia solar em energia química através da fotossíntese (Barbieri, 1993).

Com os dados de temperaturas máxima e mínima calculou-se os valores de graus-dia para cada período de 24 horas, pelas seguintes equações (Inman-Bamber, 1993):

a) Para T_m > T_b:

$$GD = \frac{(T_{máx} + T_m)}{2} - T_b$$

b) Para T_m ≤ T_b:

$$GD = \frac{(T_{máx} - T_b)^2}{(T_{máx} - T_m)^2} \cdot 2$$

Onde,

GD = graus-dia

T_{máx} = temperatura máxima

T_m = temperatura mínima

T_b = temperatura base

A equação do modelo de crescimento proposto por Teruel (1996), é a seguinte:

$$IAF = e^a * (\sum GD)^b * e^c * \sum GD$$

Onde,

IAF = Índice de área foliar (m^2/m^2)

a , b e c = parâmetros do modelo

$\sum GD$ = somatório de graus-dia

Esse modelo foi ajustado utilizando-se o procedimento não linear do SAS (SAS..., 1990), fornecendo-se valores dos IAF (Experimento 3) para cada somatório de graus-dia, resultando em valores de parâmetros para cada um dos 16 tratamentos.

Modelo de maturação da cana-de-açúcar

Foi utilizado o modelo de Mitscherlich para descrever o processo de maturação da cana-de-açúcar adubada com CL (Udo, 1983), o qual apresenta crescimento rápido da porcentagem em peso de sacarose da cana-de-açúcar (Pol % cana), seguido de um decréscimo mais lento. A representação matemática do modelo é:

$$Y = A \cdot [-10^{-C(X+B)}] \cdot 10^{-K(X+B)^2}$$

Onde,

Y = porcentagem de sacarose contida na cana-de-açúcar (Pol % da cana);

X = época de determinação do Pol % da cana (mês);

K = fator de prejuízo;

A, B e C = parâmetros da função.

Modelo de transferência de metal pesado no sistema solo-planta

Foi construído um modelo de transferência de metais pesados, com base nos modelos compartimentais (Bassanezi & Ferreira Júnior, 1988), e considerando-se um simples modelo determinístico de equações diferenciais lineares para descrever a dinâmica da disponibilidade de cada metal

no solo e o grau de absorção desse metal pela raiz. Para isso foram considerados três compartimentos, solo, raiz e parte aérea da cana-de-açúcar. O modelo proposto é o seguinte:

$$dM_1/dt = - \lambda \cdot M_1 - \alpha M_1$$

$$dM_2/dt = + \alpha \cdot M_1 - \beta \cdot M_2$$

$$dM_3/dt = + \beta \cdot M_2$$

Onde,

M_1 → concentração do metal pesado no solo no instante t ;

M_2 → concentração do metal pesado na raiz no instante t ;

M_3 → concentração do metal pesado na parte aérea da cana-de-açúcar no instante t ;

λ → velocidade do decaimento do metal pesado (taxa constante);

α → taxa de translocação do metal do solo para a raiz (taxa de absorção da raiz);

β → taxa de translocação do metal da raiz à parte aérea, que é proporcional a taxa de absorção da raiz.

Condições iniciais: $M_1(0) = C$; $M_2(0) = 0$ e $M_3(0) = 0$, onde C = composto de lixo enriquecido com metais pesados (mg/kg).

Para determinação dos parâmetros foram usados modelos em termos das variáveis M_1 , M_2 e M_3 :

Solução 1: $M_1(t) = C \cdot e^{-(\lambda + \alpha)t}$

Solução 2: $M_2(t) = \frac{\alpha \cdot C}{\beta - (\lambda + \alpha)} \cdot [e^{-(\lambda + \alpha)t} - e^{-\beta t}]$

Solução 3: $M_3(t) = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot C}{\beta - (\lambda + \alpha)} \cdot \left[\left(\frac{1}{\beta} \right) e^{-\beta t} - \left(\frac{1}{\lambda} + \alpha \right) e^{-(\lambda + \alpha)t} \right] + \frac{\alpha \cdot C}{\lambda + \alpha}$

Solução 4: $\chi = \frac{(\ln(C) - \ln(M_1))}{t}$, onde $\lambda + \alpha = \chi$

Solução 5: $\beta = \frac{(\lambda + \alpha) M_2 + \alpha \cdot C \cdot e^{-(\lambda + \alpha)t}}{M_2 + \alpha \cdot C \cdot t}$

Resultados e Discussão

Modelo de crescimento

Os modelos de crescimento da cana-de-açúcar, com o valor dos parâmetros obtidos para cada tratamento foram simulados e estão demonstrados na Fig. 1. O vigor vegetativo mais elevado foi encontrado em cana adubada com CL suplementado com PK e nas dosagens de 0 e 60 t.ha⁻¹, com o IAF atingindo valores entre 7,5 e 9,5 m²/m², sendo que com um somatório de menos de 400 GD já ocorreu um IAF maior que 4, o suficiente para interceptar pelo menos 95% da radiação solar e o IAF se mantém maior que 4 por um maior período (maior que 250 dias) na cana sem aplicação de CL, apenas PK. O IAF máximo atingido foi mais precoce na cana que recebeu tratamento com CL e com alguma suplementação, ficando esse ponto máximo em torno dos 90 dias (aproximadamente 600 GD).

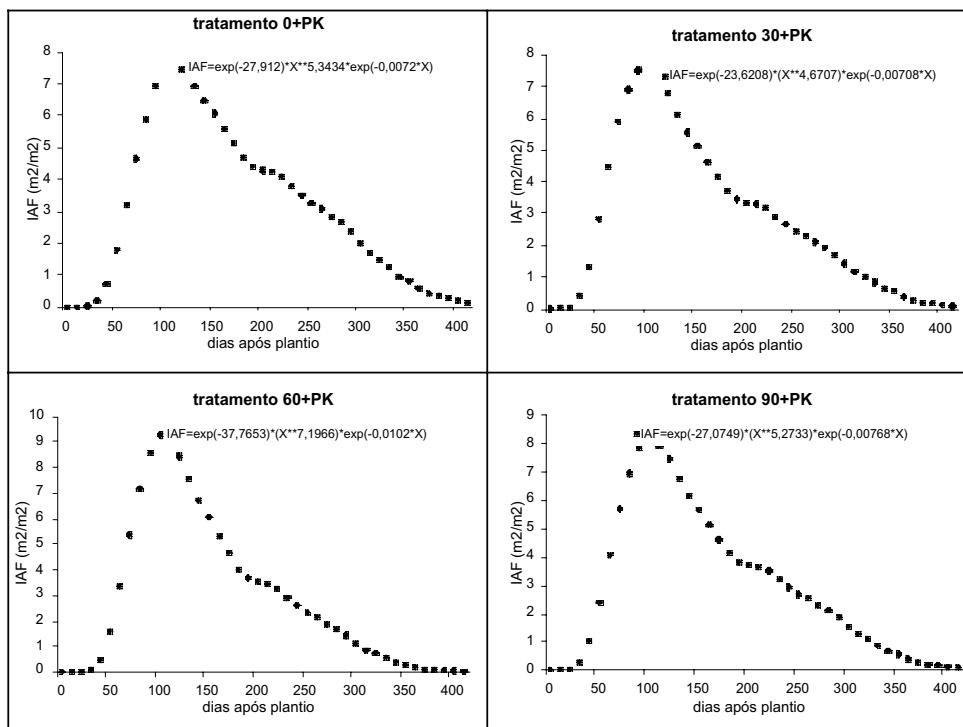


Fig. 1. Modelo de crescimento da cana-de-açúcar para os tratamentos de 0, 30, 60 e 90 t.ha⁻¹ de CL suplementados com PK

Modelo de maturação da cana-de-açúcar

Os valores iniciais dos parâmetros a , b , c e k , do modelo de Mitscherlich foram retirados da literatura (Udo, 1983), e seus valores, após a convergência do modelo para cada dose de composto de lixo, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valor dos parâmetros a , b , c e k do Modelo:

$$Y = A \cdot \left[-10^{-C(X+B)} \right] \cdot 10^{-K(X+B)^2}, \text{ para as doses de composto de lixo.}$$

Dose de CL $t.ha^{-1}$	a	b	c	K
00	103,1291	-4,00816	0,01349	0,00256
30	22,35398	-6,510503	0,14639	0,002602
60	15,99507	-15,6346	-280,4677	0,001123
90	19,30716	-5,963554	0,1773	0,001545

As Fig. 2, 3, 4 e 5, demonstram bem o comportamento da sacarose, durante o desenvolvimento da cana-de-açúcar, através do Modelo de Mitscherlich, para adubação com 0, 30, 60 e 90 $t.ha^{-1}$ de CL, testadas neste estudo em solo Terra Roxa Estruturada. Observando-se o comportamento dos resíduos obtidos através do ajuste desse modelo, confirma-se a condição ideal que requer sinais alternados em curtos intervalos de tempo, mostrando uma homogeneidade de variância e ausência de pontos discrepantes.

Foram determinados os pontos críticos do modelo de Mitscherlich que são importantes, pois permitem a escolha da melhor época para o corte da cana com base no teor máximo de sacarose no caldo, e sabendo-se que a partir desse ponto o teor de sacarose irá decrescer, reduzindo lucros. Esses pontos foram determinados a partir do Teorema de Rolle (Udo, 1983) e estão descritos na Tabela 3, assim como os coeficientes de determinação do modelo (R^2) e a época aproximada onde o modelo atinge o teor de 13% de sacarose (teor mínimo para industrialização), para cada dose de CL.

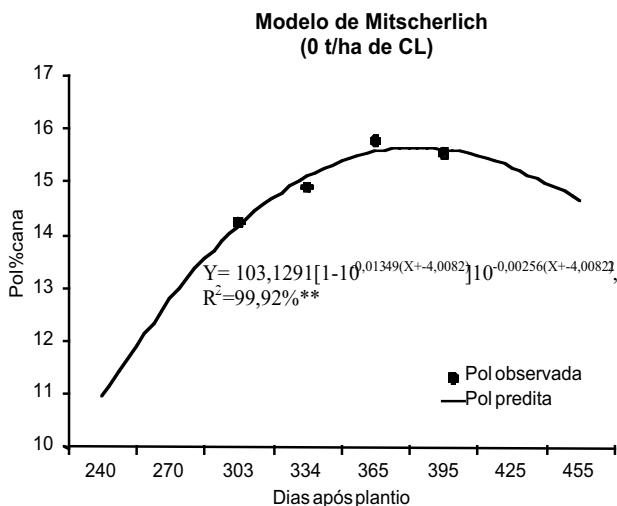


Fig. 2. Modelo de Mitscherlich ajustado para a maturação da cana-de-açúcar em tratamento sem adubação de CL (**significativo a 1% no teste F).

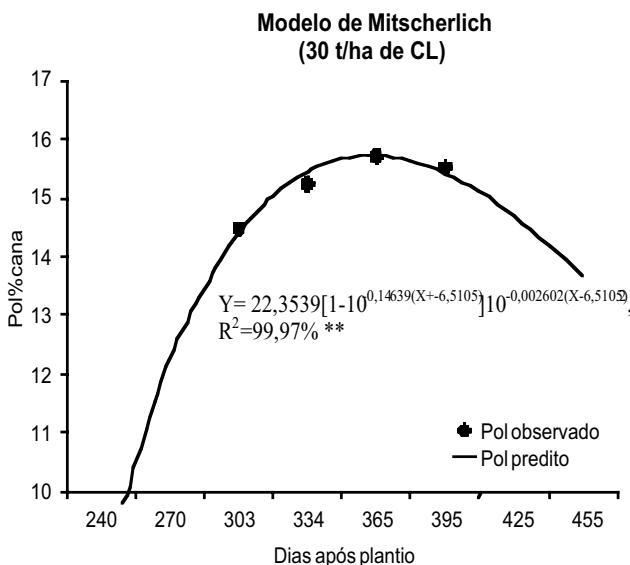


Fig. 3. Modelo de Mitscherlich ajustado para maturação da cana-de-açúcar adubada com 30 t.ha⁻¹ de CL, base úmida (**significativo a 1% de probabilidade no teste F).

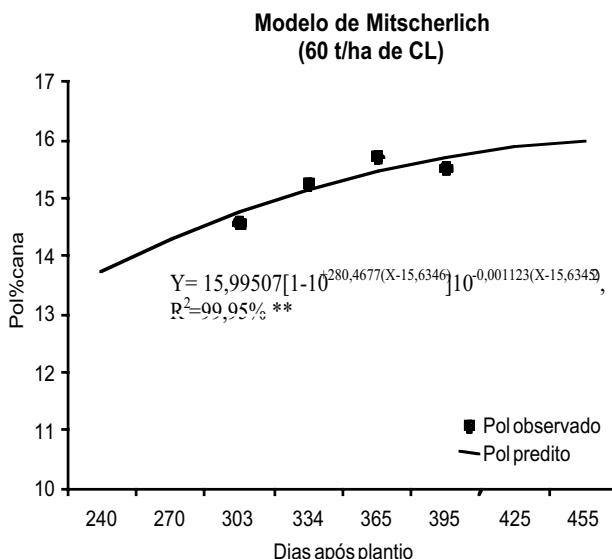


Fig. 4. Modelo de Mitscherlich ajustado para maturação da cana-de-açúcar adubada com 60 t.ha⁻¹ de CL, em base úmida (**significativo a 1% de probabilidade no teste F).

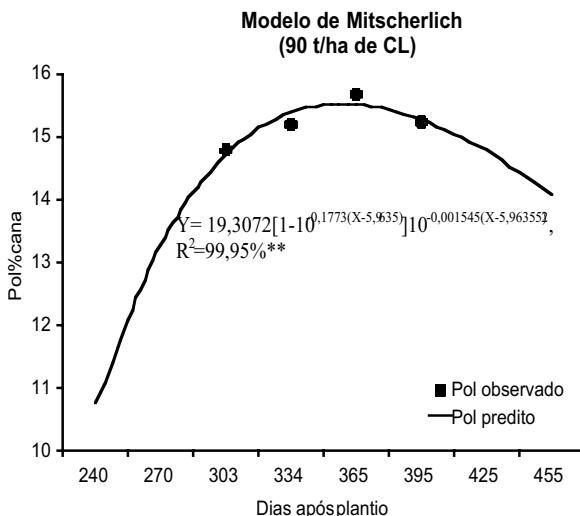


Fig. 5. Modelo de Mitscherlich ajustado para maturação da cana-de-açúcar adubada com 90 t.ha⁻¹ de CL, em base úmida (**significativo a 1% de probabilidade no teste F).

Tabela 3. Valores de produção máxima de sacarose ($Y_{\text{máx}}$) e a respectiva época ($X_{\text{máx}}$); coeficientes de determinação (R^2); e época (X) em que o modelo atinge o teor mínimo para industrialização (13% de Pol).

Dose de CL (t.ha ⁻¹)	R^2 (%)	<i>Modelo de Mitscherlich: $Y = A \cdot [1 - 10^{-(C(X+B)}] \cdot 10^{-K(X+B)^2}$</i>		
		$Y_{\text{máx}}$ (% de Pol)	$X_{\text{máx}}$ (dap*)	X (Y=13% Pol)
0	99,92	15,56	396	260 dap
30	99,97	15,71	366	265 dap
60	99,95	15,99	468	Nd**
90	99,95	15,51	363	245 dap

*Dias após o plantio. **Não determinado.

O Coeficiente de Determinação (R^2) é um importante fator na avaliação de adequacidade do modelo em relação ao fenômeno observado. Quando R^2 é um valor alto, o modelo faz melhores estimativas e é adequado aos pontos observados, porque sendo os desvios pequenos, estes pontos estarão em consonância com o modelo proposto. Por outro lado, um R^2 reduzido não permite estimativas confiáveis, quer pela alta variabilidade da resposta medida ou pelo fato do modelo testado não ser adequado à dispersão de resultados observados (Sampaio, 1998). De acordo com esse estudo, observa-se que o modelo de Mitscherlich possui altos coeficientes de determinação, indicando ser um modelo adequado ao estudo da curva de maturação da cana-de-açúcar adubada com composto de lixo urbano.

Na análise gráfica de resíduos, também importante parâmetro de adequacidade do modelo, pode ser observado o comportamento dos resíduos obtidos através do ajuste desse modelo, confirmando a condição ideal, que requer sinais alternados em curtos intervalos de tempo, mostrando uma homogeneidade de variância e ausência de pontos discrepantes.

Através do estudo dos pontos críticos desse modelo, pode ser observado que com a maior dosagem de CL estudada (90 t.ha⁻¹) ocorre a maior precocidade da cana (menor tempo para se atingir o ponto máximo), mas, nessa dosagem de CL, ocorre o menor teor de sacarose (15,51 % de Pol).

Assim, os modelos são importantes ferramentas para se chegar a valores de sacarose e datas ideais de corte, de acordo com o interesse do produtor e disponibilidade de adubos e fertilizantes.

Também pode ser observado na Tabela 3, a data aproximada (dias após o plantio) em que o modelo atinge o teor de sacarose de 13% (X onde Y=13%Pol), que é o valor mínimo adequado à industrialização de sacarose da cana adequado à industrialização. Nota-se uma influência da dose de CL no tempo para atingir o valor mínimo de referência, isto é, quanto maior a dose de CL aplicado na cana-de-açúcar, menor o tempo para se atingir esse valor desejável de sacarose.

O Modelo de Mitscherlich teve um bom ajuste, com exceção da dosagem de 60 t.ha⁻¹, onde sua convergência foi difícil, exigindo a fixação de um dos parâmetros (*k*) para convergência do modelo com apenas 3 deles (*a*, *b* e *c*). Esse modelo apresentou altos coeficientes de determinação (Tabela 3), e pontos críticos reais, com exceção da dose de 60 t.ha⁻¹ onde o tempo estimado para atingir a produção máxima foi muito elevado, chegando a quase 16 meses.

Modelo de transferência de metal pesado no sistema solo-planta

Com os valores dos parâmetros α , β e λ , foram realizadas simulações para cada nível de metal aplicado ao solo (C), em cada grupo de solo, e para cada metal, determinando-se valores preditos de M_1 , M_2 e M_3 em várias épocas (t), para estimativa do comportamento do metal pesado nas diferentes partes da cana-de-açúcar durante o tempo (Fig. 6 a 9).

O comportamento de cada metal, simulado para C_1 (nível 1 de adição de metal ao solo), e C_5 (nível 5) nos solos do grupo A, para os teores de M_1 , M_2 e M_3 , desde o momento da aplicação do CL enriquecido (t= 0), até 2 anos após essa aplicação (t=2), pode ser observado nas Figuras 6, 7, 8 e 9, onde nota-se uma queda rápida do teor de metal no compartimento solo, uma parábola no comportamento do metal na raiz, começando do zero, com a presença de um ponto máximo (tempo onde é máximo o teor de metal na raiz), e um crescimento do teor de metal no compartimento parte aérea da cana-de-açúcar, ficando este teor, após um determinado tempo, constante.

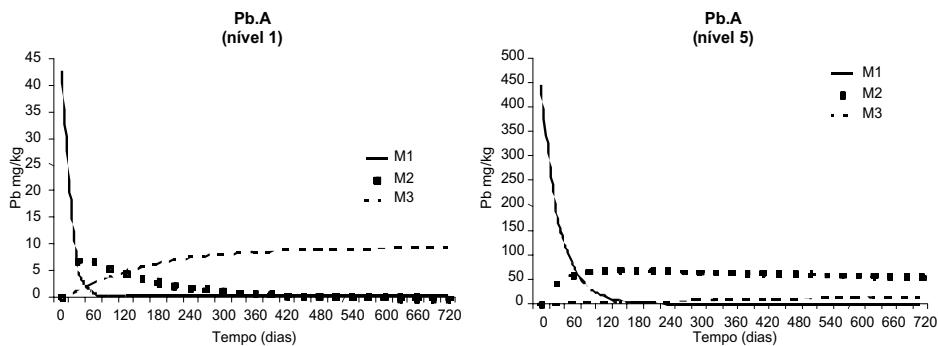


Fig. 6. Modelo de Transferência de Metal Pesado para o Pb em solos A, sob adubação de 0 t.ha⁻¹ de CL (nível 1) e de 90 t.ha⁻¹ de CL (nível 5).

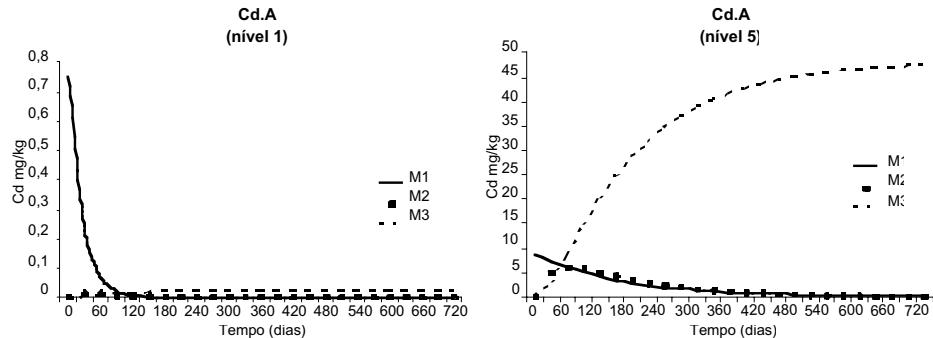


Fig. 7. Modelo de Transferência de Metal Pesado para o Cd em solos A, sob adubação de 0 t.ha⁻¹ de CL (nível 1) e de 90 t.ha⁻¹ de CL (nível 5).

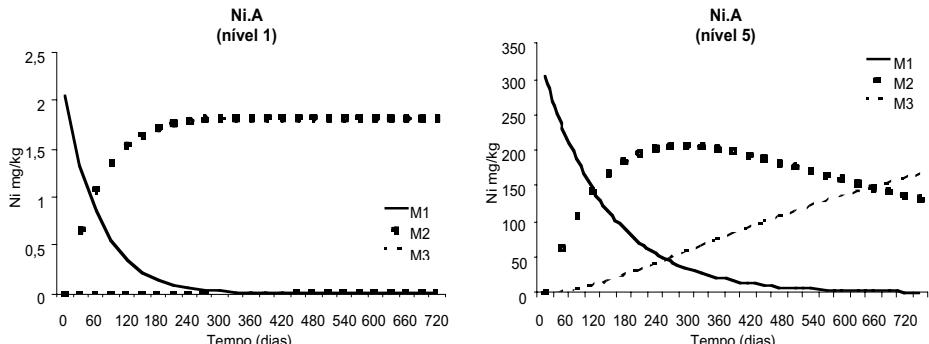


Fig. 8. Modelo de Transferência de Metal Pesado para o Ni em solos A, sob adubação de 0 t.ha⁻¹ de CL (nível 1) e de 90 t.ha⁻¹ de CL (nível 5).

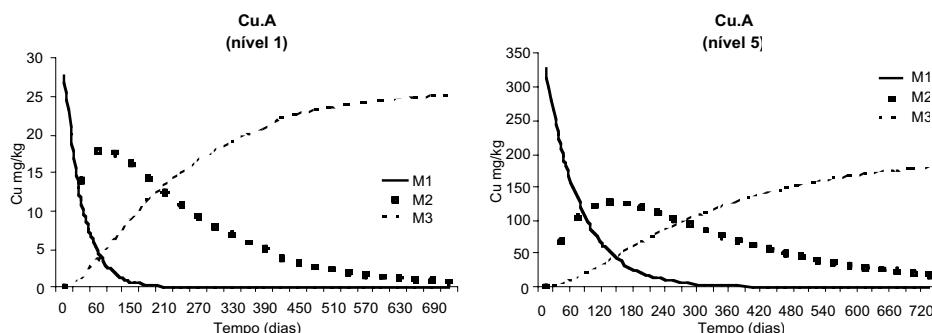


Fig. 9. Modelo de Transferência de Metal Pesado para o Cu em solos A, sob adubação de 0 t.ha⁻¹ de CL (nível 1) e de 90 t.ha⁻¹ de CL (nível 5).

Na Tabela 4 pode-se visualizar os pontos críticos obtidos através do modelo de transferência de metais pesados para cada metal estudado.

Tabela 4. Médias dos pontos críticos estimados através dos modelos matemáticos, valores importantes na formulação de normas de uso de CL.

Metal	"t" onde $M_1 \rightarrow 0$	"t" onde M_2 é máximo	M_2 máximo (% de C)	"t" onde M_3 estabiliza-se	M_3 máximo (% de C)
Cd	600 dias	138 dias	26	>600 dias	55
Cu	400 dias	181 dias	41	<365 dias	92
Ni	3 anos	55 dias	31,3	>600 dias	99
Pb	200 dias	75 dias	14,5	<365 dias	27

Conforme Tabela 4, o metal que apresenta maior ponto máximo na raiz em relação ao teor adicionado é também o Cobre, com uma média de 41%, no tempo médio de 75 dias, mas o que cresce mais rápido na raiz é o Pb, o qual, em média aos 55 dias, chega ao seu teor máximo, que fica em torno de 15% do nível adicionado ao solo; e o metal mais lento é ainda o Ni, que chega ao ponto máximo em média aos 180 dias com o teor máximo de 31% de C.

Conclusões

1. O vigor vegetativo mais elevado, segundo o modelo de crescimento, foi encontrado em cana-de-açúcar adubada com CL suplementado com PK e nas dosagens de 0 e 60 t.ha⁻¹.
2. O IAF máximo atingido foi mais tardio na cana que recebeu tratamento com CL sem suplementação mineral, conforme descreveu o modelo de crescimento, ficando esse ponto por volta de 120 dias (aproximadamente 800 GD).
3. Segundo o modelo de Mitscherlich, não houve atraso na maturação da cana-de-açúcar pela adição de composto de lixo urbano. Pelo contrário, houve uma influência da dose de CL no tempo em que a cana atinge o teor mínimo para industrialização, que é de 13% de Pol, isto é, quanto maior a dose de CL aplicado na cana-de-açúcar, menor o tempo para se atingir esse valor desejável de sacarose.
4. A resposta ótima da cultura em acumulação de açúcar dos colmos ocorreu na combinação do composto de lixo com fertilizante (P ou K).
5. De acordo com o resultado do modelo de maturação, com a dose de 90 t.ha⁻¹ de CL, há a redução do tempo para se atingir o ponto máximo, antecipando a maturação da cana-de-açúcar tratada com altas dosagens de CL, mas o teor de sacarose reduz com esse aumento.
6. O Modelo de Mitscherlich apresentou bom ajuste em todas as dosagens de CL testadas, com exceção da dosagem de 60 t.ha⁻¹, onde esse modelo não convergiu com os 4 parâmetros, sendo necessário a fixação de um deles para haver a convergência.
7. Segundo o modelo de transferência de metal pesado, quanto ao teor de metal no solo o mais preocupante é o Ni, pois com exceção do nível 1, demora aproximadamente 3 anos para ser extinto do solo (atingindo assim a cana soca), e o que possui decaimento mais rápido é o Chumbo.
8. Quanto ao teor na raiz, o Cobre é o que apresenta maior ponto máximo, mas o que atinge esse ponto mais rápido é o Pb, e o que demora mais a atingi-lo é, também, o Ni.

9. Na parte aérea o metal que chegou em maior quantidade foi o Ni, e por último o Pb, mas o metal que mostrou o crescimento mais acentuado foi o Pb, chegando próximo a seu máximo antes do momento de corte da cana, quando analisado o modelo matemático.
10. Quanto a interferência dos teores de argila, óxidos e pH do solo na transferência desses metais no sistema, notou-se que nos solos classificados como B, com maior poder tampão, a passagem da maioria dos metais pelos compartimentos foi mais lenta, assim como a queda de seus teores no solo e na raiz.
11. Os modelos matemáticos aqui descritos podem servir como base à formulação de normas de uso do CL, podendo estimar quantidades de cada metal em cada parte da planta nos diversos cenários estudados e predizer o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Agradecimento

À Fapesp pelo auxílio aos projetos com processos n^{os} 98/06439-2 e 99/07341-9.

Referências Bibliográficas

BARBIERI, V. **Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*):** um modelo matemático-fisiológico de estimativa. 1993. 142 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BASSANEZI, R. C.; FERREIRA JUNIOR, W. C. **Equações diferenciais com aplicações.** São Paulo: Ed. Harbra, 1988. 572 p.

BROWNE, J.; ZERBAN, F. W. **Physical and chemical methods of sugar analysis.** 3. ed. New York: John Wiley, 1941. 1353 p.

CESAR, M. A. A.; SILVA, F. C. da. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a indústria sucroalcooleira.** Piracicaba: CALQ, 1993. 107 p.

CRAVO, M. S. **Composto de lixo urbano como fonte de nutrientes e metais pesados para alface.** 1995. 135 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

DELGADO, A. A.; CESAR, M. A. A. Determinação de fosfatos em caldo e mosto de cana-de-açúcar. **STAB-Açúcar e Álcool e Subprodutos,** Piracicaba, v. 3, n. 2, p. 42-45, 1984.

EGREJA FILHO, F. B. **Avaliação da ocorrência de distribuição química de metais pesados na compostagem de lixo domiciliar urbano.** 1993. 176 f. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 1979. 227 p.

INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, v. 36, p. 41-51, 1993.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 1986. 315 p.

NIEUWENHUIZE, J.; POLEY-VOS, C. H.; AKKER, A. van den; DELFT, van. Comparison of microwave and convention extraction techniques for the determination of metals in soil, sediment and sludge samples by atomic spectrometry. **Analyst**, v. 116, p. 347-351, 1991.

SAMPAIO, I. B. M. **Estatística aplicada à experimentação animal**. Belo Horizonte: Fundação de Ensino e Pesquisa em Medicina Veterinária e Zootecnia, 1998. 221 p.

SCHENEIDER, F. (Ed.). **Sugar analysis methods**. Peterborough: ICUMSA, 1979. 256 p.

SILVA, F. C.; BERGAMASCO, A. F.; VENDITE, L. L.; CESAR, M. A. A. C.; SILVA, A. F. S. **Avaliação de modelos de crescimento da cana-de-açúcar sob adubação de composto de lixo urbano**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2001. 6 p. (Comunicado Técnico da Embrapa Informática Agropecuária). No prelo.

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide: statistics** version 6. 4. ed. Cary, N.C., 1990. 168 p.

TERUEL, D. A. **Modelagem do índice de área foliar de cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos**. 1996. 93 f. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

UDO, M. C. T. **Estudo de funções que se ajustam à maturação da cana-de-açúcar**. 1983. 74 p. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.



Informática Agropecuária

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA,
PECUÁRIA E ABASTECIMENTO

