

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O ESTUDO DA
TRANSFERÊNCIA DE METAIS PESADOS NO SISTEMA
SOLO - CANA DE AÇÚCAR SOB ADUBAÇÃO DE
COMPOSTO DE LIXO URBANO**

L.L. VENDITE¹ F. C. da SILVA², A. F. BERGAMASCO²

⁽¹⁾ UNICAMP - IMECC - CAIXA POSTAL 6065

13083 - 970 CAMPINAS (SP)

e-mail: vendite@ime.unicamp.br

⁽²⁾ EMBRAPA - CNPTIA - CAIXA POSTAL 6041

13083 - 970 CAMPINAS (SP)

e-mail: fcesar@cnptia.embrapa.br

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA O ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE METAIS PESADOS NO SISTEMA SOLO - CANA DE AÇÚCAR SOB ADUBAÇÃO DE COMPOSTO DE LIXO URBANO

L.L. VENDITE¹ F. C. da SILVA², A. F. BERGAMASCO²

⁽¹⁾ UNICAMP - IMECC - CAIXA POSTAL 6065
13083 - 970 CAMPINAS (SP)
e-mail: vendite@ime.unicamp.br

⁽²⁾ EMBRAPA - CNPTIA - CAIXA POSTAL 6041
13083 - 970 CAMPINAS (SP)
e-mail: fcesar@cnptia.embrapa.br

RESUMO

Neste trabalho foi construído um modelo matemático compartimental para descrever o problema da transferência dos metais pesados no sistema solo-planta que ocorre no acúmulo de lixo urbano e que está trazendo sérios riscos ambientais e sociais, através de seu uso como adubo da cana-de-açúcar. Para tanto, foram coletados, analisados e interpretados dados de teores totais e disponíveis de metais pesados (Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Zn, Mn, Fe e Ni) nos solos (LV, PV, B, PL e TR), adubados com doses de composto de lixo (00, 25, 50 e 100 t.ha⁻¹) e incubados em 5 épocas (0, 16, 32, 64 e 150 dias) em condição controlada. Já em outro ensaio, cultivou-se cana-de-açúcar em 4 solos (LV, PV, PL e B), avaliando-se a disponibilidade de metais pesados (Cd, Ni, Pb e Cu) no solo, raiz e parte aérea da planta cultivada em vasos com aplicações de CL, também em condição controlada.

No primeiro conjunto de dados, com estudos feitos da disponibilidade no tempo, foram conseguidas as primeiras conclusões assim como valores do parâmetro de decaimento do metal necessário ao modelo matemático proposto. No segundo conjunto de dados foram analisados a transferência dos metais no sistema solo-planta para identificação do metal disponível que chegará a parte comestível da cana-de-açúcar (quando o produto final se destinar a alimentação humana ou animal) ou a parte processável (quando se destinar à indústria), cujos valores serviram como base à estimativa das taxas de passagem do metal pelos compartimentos (parâmetros do modelo). Esses dados foram utilizadas para validação dos modelos matemáticos, os quais permitiram previsões, estudo do comportamento dos metais e servirão de base à futuras recomendações de uso do CL como fertilizante.

Foi concluído, através de análises estatísticas, que as dinâmicas dos teores totais e disponíveis dos metais no tempo foram dependentes do tipo de solo, principalmente devido aos teores de óxido de Fe e Al, teores de argila e pH dos solos e os mais preocupantes são Terra Roxa Estruturada e Brunizem. Quanto a translocação de metais, foi grande para o Cd (para a parte aérea), ao contrário dos elementos Pb, Cu, Ni e Zn. As maiores concentrações absorvidas pela raiz foram encontradas em plantas cultivadas em solo PL. Quanto a taxa de decaimento, o metal que apresentou maior meia vida no solo foi o Fe, limitando assim a aplicação do CL. O modelo de transferência de metal pesado ajustado, pode ser utilizado para explicar o comportamento dos metais estudados nesses tipos de solo, e estimar teores que chegarão à qualquer parte da planta para qualquer dosagem de metal adicionada ao solo em forma de CL, assim como definição de pontos críticos, como o tempo em que as concentrações de metais são maiores em cada compartimento.

Palavras-chave: Composto de lixo, Cana-de-açúcar, Modelo matemático, Meio ambiente

I. 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 rápido aumento dos lixos urbanos decorrentes do crescimento populacional e da rápida urbanização. As opções para o emprego de resíduos como o lixo, são várias, destacando-se a simples deposição em aterros, a incineração, o bombeamento para os oceanos e a descarga em rios, não sendo, no entanto, essas alternativas indicadas sob a ótica ambiental (Melo et al., 1997).

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 F, 1993), pois estes são fontes de nutrientes e de matéria orgânica. Mas, se por um lado a utilização de CL como adubo é uma alternativa viável à médio prazo, por outro lado 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 ao homem (Kabata - Pendias & Pendias, 1986).

Uma abordagem moderna de Ciência do Solo para a questão da reciclagem de resíduos, apoiada em tecnologia de computação, que fundamenta-se no conceito de sistema (visão sistêmica) e que caso de uso agrícola de composto de lixo urbano, é a procura de grandes tendências em termos de processos-chave para elucidar a transferência de espécies químicas no

sistema solo-planta-atmosfera, com uma preocupação com o todo do agrossistema, buscando-se a obtenção de modelos mais gerais que descrevam fenômenos e que possam prever os riscos ambientais envolvidos. Para tanto, considera-se que no processo de transferência de metais pesados existem compartimentos por onde ocorrem as taxas de passagem do material. Neste sistema de estudo encontramos os compartimentos solo e planta (dividida em raiz e parte aérea), que sofrem interferência de diversos fatores externos como a estrutura do solo (teores de argila, óxido e pH), tempo de decaimento do metal, quantidade de metal aplicada ao solo, etc., que devem ser incluídos no estudo desse processo. Gardner (1960), Cowan (1965) e Philip (1966), foram os primeiros a reconhecer o sistema solo-planta-atmosfera como um todo, um contínuo físico no qual a dinâmica dos diferentes processos de transferência ocorrem interdependentemente.

Uma outra questão, não menos relevante, é que nos países desenvolvidos, caso dos Estados Unidos e países da Europa, já existe legislação definindo, ainda de maneira relativamente grosseira, o que seja um composto de lixo urbano para fins de comercialização; dispõe também de legislação regulamentando as formas de aplicação no solo. No Brasil e em outros países em desenvolvimento ainda não há legislação à respeito da qualidade do CL para fins de comercialização e tampouco normas que orientem sua taxa de aplicação ao solo como fertilizante.

A informatização de processos de suporte à decisões sobre o uso do CL nas diversas culturas e, em especial, pelo emprego de Modelos Matemáticos em cana-de-açúcar, podem minimizar riscos ambientais, minimizar os custos de produção e proporcionar maior sustentabilidade do planejamento agrícola, pois maximiza o uso dos recursos naturais e reciclagem de fontes orgânicas no solo, sem prejudicar o ambiente. Isso ocorre porque os modelos permitem visualizar, por simulação numérica, as melhores opções de taxas, áreas e de uso do composto sobre a produtividade, sem causarem impactos negativos ao ambiente via criação de vários cenários alternativos.

II. O MODELO E A SUA INTERPRETAÇÃO

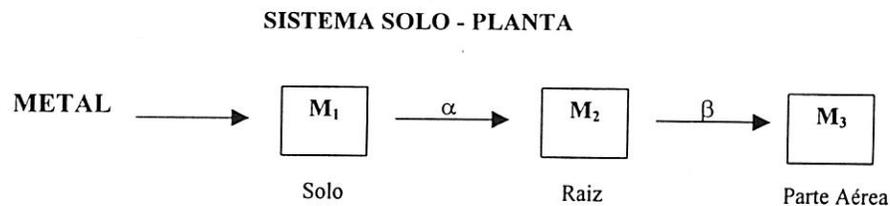
Na modelagem matemática do sistema solo-planta, foi construído um primeiro modelo de transferência de metais pesados, com base nos modelos compartimentais, para o qual foi necessário a criação de hipóteses suplementares em relação as taxas de passagem do metal pesado pelos compartimentos, os quais foram: o solo, a raiz e a parte aérea (colmos mais folhas). Esse modelo ainda exige um aprimoramento, pois é apenas uma primeira formulação

que descreve a transferência de metais pesados no sistema solo-planta, onde interferem variáveis do ambiente que não foram consideradas nessa primeira etapa. Essas adaptações serão feitas de forma gradual para melhorar o desempenho e as áreas de atuação deste modelo, tornando-o o mais próximo possível da realidade.

2.1 O MODELO

No presente estudo consideramos um simples modelo determinístico de equações diferenciais lineares para descrever a dinâmica da disponibilidade de cada metal (Cd, Cu, Ni e Pb) no solo e o grau de absorção desse metal pela raiz. Para isso foram considerados três compartimentos: o compartimento M_1 que denota o solo, M_2 que denota a raiz e M_3 que denota a parte aérea. Em relação a plantação da cana-de-açúcar (colmo e folhas) as variáveis que interferem no processo são: tipo de solo (óxidos de ferro e alumínio, argila, pH), metal pesado, intemperismos. Para o estudo da interferência do tipo de solo, eles foram divididos em dois grupos de acordo com seus teores de argila, óxidos e pH, ficando no grupo A os solos do tipo LV e B, que possuem maiores teores de argila e óxidos, e no grupo B, os solos PL e PV, com menores teores de argila e óxidos. Sendo que os modelos foram analisados em cada um destes grupos em separado.

DIAGRAMA DOS COMPARTIMENTOS



O MODELO PROPOSTO:

$$\begin{aligned}
 dM_1/dt &= -\lambda.M_1 - \alpha.M_1 \\
 dM_2/dt &= +\alpha.M_1 - \beta.M_2 \\
 dM_3/dt &= +\beta.M_2
 \end{aligned}$$

onde,

$M_1 \rightarrow$ concentração do metal pesado no solo no instante t ;

$M_2 \rightarrow$ concentração do metal pesado na raiz no instante t ;

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

$\lambda \rightarrow$ velocidade do decaimento do metal pesado (taxa constante);

$\alpha \rightarrow$ taxa de translocação do metal do solo para a raiz (taxa de absorção da raiz);

$\beta \rightarrow$ taxa de translocação do metal da raiz à parte aérea, que é proporcional a taxa de absorção da raiz.

E com as seguintes condições iniciais:

$$M_1(0) = C \quad M_2(0) = 0 \quad e \quad M_3(0) = 0$$

Sendo C a Quantidade do metal no composto de lixo enriquecido (mg/kg)

O problema de identificação consiste em determinar os parâmetros do sistema compartimental. Resolvendo o sistema proposto encontramos,

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

$$M_2(t) = \frac{\alpha \cdot C}{\beta - (\lambda + \alpha)} \left(e^{-(\lambda+\alpha)t} - e^{-\beta t} \right) \quad e$$

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

2.2 AS LIMITAÇÕES DO MODELO

O modelo considera que o M possui um caminho unidirecional, desprezando pequenas perdas ou retornos que podem ocorrer com o metal ao longo desse caminho: CL – solo – raiz – parte aérea da planta.

b) O modelo considera também que no momento zero (inicial) não havia concentrações de metais pesados em nenhum dos compartimentos com exceção do solo que recebe uma dose de fertilizante no tempo inicial.

- c) Não considera, ainda, as diferenças físicas (velocidade, temperatura etc) nas diferentes partes de cada compartimento (como por exemplo, diferenças entre as camadas do solo, diferenças entre o colmo e as folhas etc).
- d) O modelo utilizado foi um modelo contínuo com entrada fixa, não considerando a existência de uma entrada variável, apenas entrou M quando houve aplicação do fertilizante.

2.3. ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS

Para estimativa dos parâmetros do modelo proposto (α , β e λ) foram utilizados os dados reais obtidos nos experimentos 1 e 2, realizando-se um ajuste não linear pelo procedimento PROC NLIN do SAS (Statistical Analysis System) aos modelos compartimentais, realizando-se iterações até a convergência dos parâmetros.

Os ajustes não lineares para estimativa dos parâmetros foram realizadas para cada concentração de metal adicionada ao solo, que é o valor C do modelo, isto é, quantidade do metal existente no composto de lixo mais a quantidade de metal adicionada ao composto de lixo em forma de solução (CL enriquecido). Além disso, esse ajuste foi realizado para cada grupo de solo (A e B) e para cada metal (Cd, Cu, Ni e Pb).

Como os dados obtidos no Experimento 1 (M_1 , M_2 e M_3) foram coletados após 60 dias de plantio, o valor do "t" para ajuste dos modelos aos dados reais foi 0,1644 anos, e como primeiro passo, foram determinados valores para $\lambda + \alpha$, através da solução para M_1 :

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

Considerando-se:

$$\lambda + \alpha = \chi$$

Resolvendo:

$$\chi = \frac{(\ln(C) - \ln(M_1))}{t}$$

Após obtidos os valores de χ ($\chi = \lambda + \alpha$) para cada C, em cada grupo de solo (A e B) e para cada metal pesado estudado, chegou-se, através da resolução de um sistema, a um modelo de M_3 em função da variável M_2 , o qual foi ajustado no programa SAS, a partir dos valores já descritos anteriormente e, a partir de valores reais de M_2 e M_3 , para estimativa do parâmetro α .

Usando os valores encontrados para M_2 e M_3 ,

Então:

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

$$\left(M_3 - \frac{\alpha.C}{\lambda + \alpha}\right) [\beta - (\lambda + \alpha)] = \alpha.C.e^{-\beta.t} - \frac{\alpha.\beta.C.e^{-(\lambda + \alpha).t}}{\lambda + \alpha}$$

Resolvendo o sistema:

$$[\beta - (\lambda + \alpha)] \left[M_2 + M_3 - \frac{\alpha.C}{(\lambda + \alpha)} \right] = \alpha.C.e^{-(\lambda + \alpha).t} \left(1 - \frac{\beta}{(\lambda + \alpha)} \right)$$

$$\frac{\alpha.C}{(\lambda + \alpha)} - M_2 - M_3 = \frac{\alpha.C.e^{-(\lambda + \alpha).t}}{(\lambda + \alpha)}$$

$$M_3 = \left(\frac{\alpha.C}{\lambda + \alpha} \right) (1 - e^{-(\lambda + \alpha).t}) - M_2$$

Após estimados os valores de α , resolve-se a equação de M_2 , isolando-se β para estimativa desse parâmetro em função de valores reais de M_2 . Assim,

$$[\beta - (\lambda + \alpha)] M_2 = \alpha.C.e^{-(\lambda + \alpha).t} - \alpha.C.e^{-\beta.t}$$

Usando-se uma aproximação para $e^{-\beta.t} \approx 1 - \beta.t$, tem-se:

$$[\beta - (\lambda + \alpha)] M_2 - \alpha.C.e^{-(\lambda + \alpha).t} = \alpha.C.(1 - \beta.t)$$

$$\beta.M_2 - (\lambda + \alpha).M_2 - \alpha.C.e^{-(\lambda + \alpha).t} = \alpha.C - \alpha.C.\beta.t$$

Logo

$$\beta = \frac{(\lambda + \alpha).M_2 + \alpha.C.e^{-(\lambda + \alpha).t}}{M_2 + \alpha.C.t}$$

III. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E DISCUSSÕES

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, utilizando-se as soluções 1, 2 e 3 para determinação de 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.

O comportamento de cada metal, simulado para C_1 (nível 1 de adição de metal ao solo), 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 ($t=2$), observa-se uma queda rápida do teor de metal no compartimento solo, um valor máximo no comportamento do 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.

ANÁLISE DOS PONTOS CRÍTICOS

a) A quantidade de metal pesado em todos os solos tende a extinção, ou seja $M_i = 0$ é assintoticamente estável;

A curva para os teores de Pb nos solos da classe A possui uma rápida queda, chegando a extinção antes de 200 dias após ser adubado, e nos solos da classe B, essa queda é mais lenta, ficando entre 200 dias e 1 ano após a adubação.

Já o metal Ni, possui uma queda acentuada apenas quando o solo é adubado com nível 1, chegando este teor a extinção no compartimento solo antes de um ano após a adubação, enquanto que nos outros níveis, esse tempo ultrapassa os 3 anos (queda muito lenta), assim como o Cádmiio nos níveis 4 e 5 dos solos da classe B, e o restante chega a zero após 400 dias aproximadamente.

Para o Cobre, a queda de M_1 foi mais lenta quando utilizado o nível 5 nos solos da classe B, chegando a zero próximo de 600 dias após adubação, nos níveis 1, próximo aos 200 dias e nos demais próximo aos 365 dias.

b) Se $\alpha \cdot M_1 = \beta \cdot M_2$ então M_2 alcança o valor máximo

$$\frac{M_2}{M_1} = \frac{\alpha}{\beta} \Rightarrow \frac{\alpha}{\beta} = \frac{\frac{\alpha \cdot C}{\beta - (\lambda + \alpha)} \cdot (e^{-(\lambda + \alpha)t} - e^{-\beta t})}{C \cdot e^{-(\lambda + \alpha)t}}$$

$$1 - \frac{\beta - (\lambda + \alpha)}{\beta} = e^{[-\beta + (\lambda + \alpha)]t}$$

Então, o tempo (t^*) onde ocorre o maior valor de metal na raiz da planta é dado por:

$$t^* = \frac{\ln\left(\frac{\beta}{\lambda + \alpha}\right)}{-\beta + \alpha + \lambda}$$

Através do valor encontrado podemos analisar os metais pelo máximo teor que vai alcançar na raiz da planta, e a partir desse instante há um decaimento na quantidade de metal existente na raiz. Quanto ao teor de Chumbo, não ocorre diferença significativa entre os níveis, sendo que o ponto máximo ocorre, em média, aos 49 dias após a adubação para os solos da classe A e aos 60 dias para os solos classe B.

Para o Níquel, os solos B mostraram um crescimento mais lento de metal na raiz, sendo que o ponto máximo ocorreu, em média, aos 234 dias, com teor de 30% do Ni adicionado ao solo em forma de CL enriquecido; e nos solos A, 128 dias, com teor máximo de 32%. Os menores valores estão nos níveis um, mas os teores de M_2 não são diretamente proporcionais aos níveis. Nos níveis 1, esses teores na raiz chegam a zero próximo aos 500 dias, enquanto que nos outros níveis, ultrapassam os 3 anos.

Também para o metal Cd, os solos B mostraram um crescimento mais lento, e a média do tempo para M_2 atingir o ponto máximo é 156 dias, e para os solos A é de 120 dias, cujo ponto máximo é de 26% para ambos os solos. Nos níveis 1 ocorre uma maior velocidade de transferência de Cd para a raiz, chegando ao ponto máximo em 48 dias nos solos A e 85 nos solos B, e em todos os casos, M_2 só chega a zero após aproximadamente 2 anos, e isso quer dizer que ao final do ciclo de cana de ano e meio (18 meses), ainda existiria metal disponível para a parte aérea.

Para o Cu, o tempo onde houve o ponto máximo cresceu com o aumento da dosagem de metal, variando de uma média de 52 dias até 90 dias. Nos níveis 1, o decaimento da curva de M_2 foi mais rápido, chegando a zero próximo aos 365 dias, enquanto que para o restante, ficou próximo aos 600 dias. O ponto máximo de M_2 para o metal Cu fica em média 45% de C com exceção dos níveis 4 e 5 (A) que ficam em torno de 27% de C.

c) O valor de M_3 se estabiliza em $\frac{\alpha.C}{\lambda + \alpha}$

Entre os níveis de Chumbo adicionado ao CL e utilizados como adubos, não foram encontradas diferenças significativas através dos modelos quanto ao comportamento deste metal na parte aérea da cana-de-açúcar, cujo teor cresce com o aumento desse e em todos eles, quando a cana completa um ano de idade, o teor de Pb na parte aérea (M_3), já está praticamente estabilizado, o que corresponde, na classe de solo A, que o teor de M_3 vai permanecer em torno de uma média de 19% do teor de Pb adicionado ao solo (C), e para os solos da classe B, de 35% de C. A diferença entre os solos da classe A e B, é que os solos B proporcionam uma maior translocação do metal para a parte aérea, e suas curvas de M_1 e M_2 possuem quedas mais lentas.

Já no Níquel, não há grande diferença no comportamento desse metal quando comparados os solos A e B, mas deve ser tomado muito cuidado, pois o teor de Ni na parte aérea, quando se estabiliza, fica em torno de 99% do teor adicionado ao solo (CL enriquecido) para todos os níveis, mostrando uma alta mobilidade desse metal no sistema. Mas, com exceção do nível 1 (A e B), ele só chega a esse valor na parte aérea, isto é, só se estabiliza, após aproximadamente 3 anos que adubado (após o corte da cana soca). Quando aplicado o nível 1, o crescimento de M_3 é rápido, se estabilizando próximo a 400 dias, isto é, quando está no momento de corte, o teor de Ni na raiz é quase 99% de 2,0588 mg/kg de Ni adicionado ao solo.

A quantidade de Cd na parte aérea da cana, nos níveis 1 dos solos A e B, foi bem baixo, em torno de 4% do teor de Cd adicionado (C), nos níveis 2 do solo A, e 4 e 5 dos solos B, esse teor na parte aérea chega a 99% de C, enquanto que no restante, fica em torno de 50% do teor adicionado. O tempo onde M_3 se estabiliza nesse valor, fica em torno de 2 anos, e para os níveis 4 e 5 dos solos B, ultrapassam os 3 anos (crescimento lento).

O teor de Cu na parte aérea é preocupante, pois ele se estabiliza, com exceção dos níveis 4 e 5 dos solos da classe A, próximo a 99% do teor adicionado (C), ficando esses outros dois, em torno de 60% de C. E o cuidado deve ser maior ainda, pois esse compartimento atinge esses altos teores, onde se estabilizam, próximo aos 365 dias após adubação, que é a época de corte da cana-de-açúcar.

Para melhor visualização dos resultados discutidos, os teores dos pontos críticos médios para cada metal estão descritos abaixo na Tabela 4, onde, a partir dela, podem ser estipulados limites e tempos de aplicação do CL, e ainda, permite comparação entre os metais.

TABELA 4. Médias dos Pontos Críticos estimados através dos modelos matemáticos, valores importantes na formulação de normas de uso de CL

Metal	“t” onde M₁ vai a extinção	“t” onde M₂ é máximo	(% de C) onde é M₂ máximo	“t” onde M₃ se estabiliza	(% de C) onde é M₃ máximo
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%

Através dessa Tabela 4, comparando-se os metais, nota-se que o metal mais móvel no sistema solo-planta através de análise dos modelos ajustados, é o Níquel, seguido do Cobre, e o menos móvel foi o Chumbo, chegando na parte aérea uma média de 99%, 92% e 27% dos metais adicionados, respectivamente. Mas, deve ser observado que a velocidade dessa mobilidade do metal é muito importante, pois é feito o corte na cana aproximadamente aos 365 ou 540 dias, e o metal que já se encontra em teor total na planta, ou próximo a ele (estabilizado), é o Pb e o Cu. Então, apesar do Ni ser o mais móvel, ele é também o mais lento, o que nos permite concluir, que em termos de metal na cana-de-açúcar, a maior preocupação é com o Cobre, que além de muito móvel, possui também uma velocidade alta de passagem.

Observando ainda a Tabela 4, nota-se que 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 (quantidade de metal no CL enriquecido em mg/kg).

IV. CONCLUSÃO

Quanto ao teor de metal no solo, através de análise pelo modelo matemático de transferência de metais pesados, o mais preocupante é o Ni, pois, com exceção do nível 1, demora aproximadamente 3 anos para este teor ser extinto do solo (atingindo assim a cana soca), e o que possui decaimento mais rápido é o Chumbo;

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; Na parte aérea, o metal que chegou em maior quantidade foi o Ni, seguido do Cu, 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;

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, a passagem da maioria dos metais pelos compartimentos foi mais lenta, assim como a queda de seus teores no solo e na raiz.

Em síntese, pode ser concluído através desse projeto, que a utilização do composto de lixo como adubo para a cana-de-açúcar é uma ótima alternativa do ponto de vista econômico, pois possui alto teor de nutrientes essenciais à ela, além de estar contribuindo ao meio ambiente, mas devem ser tomados alguns cuidados e estabelecidos limites quanto ao seu uso agrícola devido aos metais pesados que podem contaminar a cana-de-açúcar e chegar até nós. Esses limites devem levar em conta o tipo de solo (teor de argila e óxidos e pH), composição do composto de lixo e ainda, quantidades, formas de aplicação deste e manejo da cultura. O modelo matemático aqui descrito pode servir como base à formulação dessas normas de uso, podendo estimar quantidades de cada metal em cada parte da planta nos diversos cenários estudados.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLOWAY, B.J. Soil Processes and the Behavior of metals. In: ALLOWAY, B.J, ed. Heavy Metals in Soil. Glasgow: Blackie and Son, 1990. p. 107-108.
- BERTON, R. S. Utilização agrícola do composto do lixo urbano. Relatório Final à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico, 1995, 76p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo, Rio de Janeiro. **Manual de Métodos de Análises de Solo**. Rio de Janeiro, 1979. 227p.
- ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Land Application of Municipal Study. Cincinnati, 1983. 432p.
- MACHADO, E. C. **Um modelo matemático fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.)**. Campinas, 1981. 115p. (Mestrado – Instituto de Biologia/UNICAMP).
- MALAVOLTA, E. Elementos de Nutrição Mineral de Plantas. São Paulo. **Agronômica Ceres**, 1980. Cap. 6, p. 130-205.
- MARCHIOLI, A. C. C.; CHITOLINA, J. C.; GROSSI, D. B. M.; WEBER, O. L. DOS S.; LAVORENTI, A. Extração sequencial de metais pesados de composto de lixo urbano de duas usinas de compostagem da grande São Paulo. In: **Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e**

Nutrição de Plantas, 23. Resumos. Universidade Federal de Lavras, Caxambu, MG, 1998, p.830.

MELO, W. J.; SILVA, F. C.; MARQUES, M. O.; BOARETO, A. E. Critérios para o uso de resíduos sólidos urbanos na agricultura e impactos ambientais. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, Rio de Janeiro, 1997.

O'LEARY, G. J. A **Review of three sugarcane simulation models in their prediction of sucrose yield**. Proc. South African Sugar Technol. Association. África do Sul, 1999. 73p.

REICHARDT, K. **Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. Fundação Cargil. 4ª edição. 445p., 1985.

ZUNINO, H. & MARTIN, J. P. Metal binding organic macromolecules in soil: I. Hypothesis interpreting the role of soil organic matter in the translocation of metal ions from rocks to biological systems. **Soil Science**, 123:65-76, 1977.