Universidade de São Paulo

Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Dinâmica do carbono do solo no agrossistema cana-de-açúcar

Marcelo Valadares Galdos

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba

2007

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

Marcelo Valadares Galdos
Bacharel em International Agricultural Development

Dinâmica do carbono do solo no agrossistema cana-de-açúcar

Orientador:
Prof. Dr. **CARLOS CLEMENTE CERRI**

Tese apresentada para obtenção do titulo de Doutor em Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Galdos, Marcelo Valadares
Dinâmica do carbono do solo no agrossistema cana-de-açúcar / Marcelo Valadares Galdos. - - Piracicaba, 2007.
101 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Cana-de-açúcar 2. Carbono 3. Efeito estufa 4. Matéria orgânica do solo 5. Modelagem de dados 6. Queimada I. Título

CDD 633.61

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Ofereço

À minha avó Ignez, beleza do entardecer

À minha filha Sofia, beleza do amanhecer

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos que...

...me orientaram com paciência e bom humor:
Meu orientador, Carlos Clemente Cerri, e co-orientadores, Carlos Eduardo Cerri e Keith Paustian

...me ajudaram no trabalho de modelagem com eficiência e eficácia:
Mark Easter, Kendrick Killian, Steve Williams

…gentilmente contribuíram com dados de experimentos:
Robert Boddey, Alexandre Resende, Bonnie Ball-Coelho, Rianto Van Antwerpen, Dinailson de Campos, Edgar de Luca, Godofredo Vitti, Tais Leite

... me ajudaram no trabalho de laboratório com competência e profissionalismo:
Luiz Hiroshi, Lílian de Campos , Dagmar Marchesoni, Sandra Nicolete e Felipe Cury

...me deram apoio irrestrito no trabalho de campo na Usina São Martinho:
Mario Gadin, Maurício Simões, Delair Vasconcelos, Marcos Marcari e toda a equipe da Qualidade Agrícola

...me ajudaram a resolver as questões administrativas com presteza e boa vontade:
Mara Casarin, Nancy Amaral, Silvia Maria Zinsly

...tornaram possível a dedicação exclusiva à pesquisa, por meio de bolsa de estudos no Brasil e no exterior:
Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)

...financiaram o projeto, por meio de auxílio à pesquisa:
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)

...contribuíram com sugestões e encorajamento em todas as etapas do trtabalho:
Karina Cenciane, Carol Lisboa, Sandra de Sá, Cindy Iglesias, João Nunes, Chico Fujita, Stoécio Maia, Marcos Siqueira Neto, Susian Martins, Leidivan Frazão, Claudia Brasil, Ciniro Costa Jr., Claudia Neves, Edgar Beauclair, Martial Bernaux, Marcos Bernardes, Marisa Piccolo, Briggite Feigl, Eduardo de Sá Mendonça

...me apoiaram no dia a dia com carinho e compreensão:
Minha querida esposa. Margarete, nossas famílias e amigos.

SUMÁRIO

RESUMO.....6
ABSTRACT.....7
1 INTRODUÇÃO.....8
2 ESTOQUE DO CARBONO DO SOLO SOB CANA-DE-AÇÚCAR COLHIDA COM E SEM QUEIMA
Resumo.....10
Abstract.....10
2.1 Introdução.....11
2.2 Desenvolvimento.....13
2.3 Conclusões.....36
Referências.....37
3 ADAPTAÇÃO DO MODELO CENTURY PARA SIMULAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO DA PALHADA DE CANA-DE-AÇÚCAR
Resumo..... 44
Abstract.....44
3.1 Introdução.....45
3.2 Desenvolvimento.....47
3.3 Conclusões.....57
Referências.....58
4 SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO CARBONO DO SOLO EM CANA COM QUEIMA E SEM QUEIMA
Resumo.....63
Abstract.....63
4.1 Introdução.....64
4.2 Desenvolvimento.....66
4.3 Conclusões.....92
Referências.....93

RESUMO

Dinâmica do carbono do solo no agrossistema cana-de-açúcar

No contexto da atual busca por alternativas ao consumo de combustíveis fósseis, a cultura da cana-de-açúcar tem sido apontada como uma das mais viáveis fontes de combustível renovável a partir da biomassa. A tradicional colheita manual, feita após a queima da palhada para facilitar o corte e o transporte, vem sendo substituída pela colheita mecanizada, sem queima, por razões econômicas, legais e ambientais. Sabe-se que a manutenção da palhada sobre o solo influencia a dinâmica de água, nutrientes e matéria orgânica do solo, mas seus efeitos ainda não são suficientemente conhecidos, principalmente no longo prazo. O objetivo esta pesquisa é simular, através de modelagem matemática, a dinâmica do carbono do solo no agrossistema cana-de-açúcar. Medidas no campo foram efetuadas em uma das áreas a mais tempo sob cultivo de cana-de-açúcar no Brasil, localizada nas terras da Usina São Martinho, em Pradópolis, São Paulo. Foram analisadas duas cronossequências em talhões reformados e plantados com cana há 2, 4, 6 e 8 anos, com e sem queima pré-colheita, em áreas com histórico de cultivo de cana-de-açúcar por cerca de 50 anos. Os efeitos da queima e da manutenção da palhada sobre o carbono total, carbono da matéria orgânica particulada e carbono da biomassa microbiana foram avaliados. As determinações de carbono da biomassa microbiana e da matéria orgânica particulada mostraram-se mais sensíveis à mudança de manejo da palhada do que o carbono total. A área com maior tempo de adoção do sistema de manejo sem queima, oito anos, na camada superficial, apresentou maiores teores de carbono total (30% maior), carbono da biomassa microbiana (2,5 vezes maior), e carbono da matéria orgânica particulada (3,8 vezes maior). O estoque de carbono total, corrigido para diferenças de densidade entre as áreas, foi maior nas áreas sem queima, principalmente na área com oito anos. A aplicação do modelo CENTURY, requereu adaptação para a dinâmica de decomposição da palhada de cana-de-açúcar. Para tanto, o modelo foi testado em cinco áreas diferentes no Brasil e na Austrália, com dados de experimentos de decomposição de palhada. A principal adaptação feita ao modelo CENTURY foi a definição da espessura da camada de palha mais próxima do solo, mais vulnerável à decomposição. Essa camada, que anteriormente era considerada praticamente ilimitada (5.000 g C m^{-2}) no modelo, foi fixada em 110 g C m^{-2}. Esta modificação proporcionou melhora na correlação entre dados medidos e simulados, aumentando o R^2 de 0,79 para 0,93. Uma vez adaptado para simular a decomposição da palhada, o modelo CENTURY foi aplicado na simulação da dinâmica temporal da produção de colmos e do carbono do solo. Foram usados dados de experimentos conduzidos por períodos de 12 meses a 60 anos, provenientes de Goiana e Timbaúba (PE), Brasil; Pradópolis (SP), Brasil; e Mount Edgecombe, Kwazulu-Natal, África do Sul. O modelo CENTURY foi capaz de simular de forma satisfatória a dinâmica temporal do carbono do dos colmos (R^2=0,76) e do solo (R^2 =0,89). Em seguida, o modelo foi usado para fazer predições em longo prazo do estoque de carbono nos dois sistemas de manejo de palhada estudados. As predições realizadas a partir dos dados dos experimentos de campo revelam que a há, em longo prazo, uma tendência de maiores estoques de carbono no manejo sem queima da palhada. Este acréscimo no estoque é condicionado por fatores como condições climáticas, textura do solo, tempo de implantação do sistema sem queima e manejo da adubação nitrogenada.

Palavras-chave: Modelagem; Manejo de cana crua; Estoque de carbono; Biomassa microbiana; Matéria orgânica particulada; Palhada; Liteira; Modelo CENTURY

ABSTRACT

Soil carbon dynamics under sugarcane

Sugarcane has been considered one of the most feasible renewable fuel crops, in the current search for alternatives to fossil fuel. The crop has been traditionally burned to make manual harvest easier, but there has been an increase in the area harvested mechanically and without burning, due to economic, legal and environmental issues. The maintenance of sugarcane litter on the soil affects water, nutrient and organic matter dynamics, but the long term effects of this practice are still not sufficiently understood, especially in the long term. The goal of this work is to simulate, through mathematical modeling, soil carbon dynamics under sugarcane. Soil samples were collected in one of the areas with a long term history of unburned sugarcane in Brazil, at the Sao Martinho farm in Pradopolis, Sao Paulo. Two chronosequences, composed by sugarcane fields that were reformed and planted 2, 4, 6 and 8 years with and without burning, in areas that had been cultivated with sugarcane for close to 50 years. Total carbon, particulate organic matter carbon and microbial biomass carbon were evaluated in the burned and unburned cane plots. The soil microbial biomass carbon and particulate organic matter carbon were more sensitive to litter management changes that total carbon. The area with the longest period of adoption of the unburned management, eight years, had higher content of total carbon (30% higher), microbial biomass carbon (by a factor of 2.5), particulate organic matter carbon (by a factor of 3.8) than the area where the residues were burned. The total carbon stocks, after correction for density differences, were also higher in the unburned treatment, markedly in the area with eight years of green cane management. In order to adapt the CENTURY model to simulate sugarcane litter decomposition, data from five experiments in Brazil and Australia were used. The main adaptation performed in the model was setting the limit for the mass of litter closer to the soil, more vulnerable to decomposition, to 110 gCm^{-2}. This parameter was previously set at a high value, 5.000 gCm^{-2}. This change caused an improvement in the correlation between simulated and observed data, with an R^2 of 0.79 before the change, and 0.93 after the change. Once the changes were made to the model, CENTURY was used to simulate the temporal dynamics of stalk production and soil carbon. Data from experiments with different durations, from 12 months to 60 years, were used. The experiment sites were: Goiana and Timbauba, Pernambuco, Brazil; Pradopolis, Sao Paulo, Brazil; and Mount Edgecombe, Kwazulu-Natal, South Africa. The CENTURY model was able to simulate well the temporal dynamics of the stalk (R^2=0.76) and of the soil carbon (R^2 =0.89). Finally, the model was used to simulate long term scenarios considering the two litter management systems studied. The predictions made from the field experiments data reveal that there is, in the long term, a trend for higher carbon stocks in the unburned system. This increment in stock is conditioned by factors such as climate, soil texture, time of adoption of the unburned system, and nitrogen fertilizer management.

Keywords: Modeling; Green cane management; Carbon stock; Microbial biomass; Particulate organic matter; Trash; Litter; CENTURY model

1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global é uma das mais intensas preocupações da humanidade atualmente. Esse fenômeno extrapolou a escala científica e passou a ser discutido em vários segmentos da sociedade e em todas as partes do planeta. Globalmente são três as fontes principais de gases do efeito estufa (GEE) que causam o aquecimento global: queima de combustíveis fósseis (66% do total das emissões), mudança do uso da terra (14%) e agricultura/pecuária (20%).

Uma das formas para reduzir as emissões de GEE é a substituição dos combustíveis fósseis por biocombustíveis, sobretudo etanol oriundo da cana-de-açúcar. A esse respeito, o Brasil tem grandes vantagens competitivas para exportar esse combustível renovável, uma vez que dispõe de área, solos e climas adequados e principalmente tecnologia desde a produção da cultura ate sua transformação em biocombustível.

A utilização de um combustível renovável como é o caso do etanol não intensifica as conseqüências do aquecimento global, uma vez que praticamente a mesma quantidade de CO2 emitida para a atmosfera via combustão é absorvida na fotossíntese pela cultura subseqüente. Os combustíveis fósseis, formados durante séculos pelos processos geológicos e localizados na subsuperfície, uma vez extraídos e refinados para combustão, emitem quantidades de gases que permanecem na atmosfera exacerbando o efeito estufa.

Já esta devidamente demonstrado que o etanol substitui com vantagem os combustíveis fosseis no que se refere ao aquecimento global. Todavia, é preciso que a produção de etanol seja acompanhada de emprego de tecnologias que reduzam as emissões dos GEE gerados na produção da cana-de-açúcar no campo e no seu beneficiamento na usina. Adicionalmente, os benefícios ambientais serão otimizados caso práticas de manejo conservacionistas (como por exemplo: colheita da cana-de-açúcar sem queima, aplicação racional de fertilizantes e resíduos da agroindústria, plantio direto, etc.) consigam incorporar o carbono anteriormente na forma gasosa presente na atmosfera para forma mais estáveis ligadas a matéria orgânica do solo.

Portanto, o objetivo da presente pesquisa é simular, através de modelagem matemática, a dinâmica do carbono do solo no agrossistema cana-de-açúcar. Foram consideradas as dimensões vertical (profundidade), temporal (tempo de cultivo) e práticas de manejo que incluem a queima ou não da palhada para a colheita da cana-de-açúcar.

Para atender a existência das variações na dimensão vertical coletou-se amostras de solo até 1 m de profundidade, com maior ênfase nos primeiros 20 cm onde ocorrem as maiores variações do estoque de carbono e representa a camada considerada pelos modelos para as simulações. Com relação a dimensão temporal, utilizou-se a estratégia de cronossequência, para condições similares de solo, topografia e clima, a amostragem de áreas sob diferentes tempos de implantação após a reforma do canavial. Já com relação a dinâmica do carbono do solo em função das práticas de manejo, foram comparadas as condições onde a palhada é mantida na superfície do solo e quando é eliminada pelo fogo.

Medidas realizadas no campo foram efetuadas em uma das áreas mais antigas de cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. Resultados de experimentos de longa duração em outros locais do país e em outros paises foram associados para melhor compreensão da dinâmica desse elemento no sistema solo-planta-atmosfera.

Para efetuar as simulações fez-se necessário inicialmente conhecer as características químicas, físicas e biológicas do solo e clima sob condições da cronossequência de cultivo da cana com e sem queima, especialmente amostrada para atingir os objetivos propostos (*Capítulo 2 -Estoque do carbono do solo sob cana-de-açúcar colhida com e sem queima*). Em função dessa nova prática de manejo que resulta na deposição da palhada de cana-de-açúcar na superfície do solo, fez-se necessária a adaptação do modelo de simulação CENTURY e esta etapa consiste no *capítulo 3 "Adaptação do modelo CENTURY para simulação da decomposição da palhada de cana-de-açúcar"*. Finalmente, combinando os resultados oriundos dos dois capítulos mencionados anteriormente, foi possível efetuar a "*Simulação da dinâmica do carbono do solo em cana com queima e sem queima",* descrita em detalhes no *capítulo 4* desta tese de doutoramento.

Os resultados das simulações podem contribuir para o melhor entendimento do comportamento do carbono do solo sob cultivo da cana-de-açúcar e prever potenciais ações mitigadoras dos impactos ambientais tanto para a condução dos cultivos já implantados como para as expansões das áreas de cultivo previstas para o setor.

ESTOQUE DO CARBONO DO SOLO SOB CANA-DE-AÇÚCAR COLHIDA COM E SEM QUEIMA

Resumo

A queima da palhada da cana, para facilitar a colheita e transporte dos colmos, tem sido praticada há séculos no Brasil. Atualmente, por razões econômicas e legais, a colheita da cana-de-açúcar sem queima, com manutenção da palhada sobre o solo, tem crescido. Pouco se sabe, no entanto, sobre os efeitos da presença da palhada na dinâmica do carbono no agrossistema cana-de-açúcar. O seqüestro de carbono tem importância agronômica, ambiental e econômica, no contexto das mudanças climáticas e do chamado "mercado de carbono". O objetivo deste estudo é avaliar o efeito do manejo com e sem queima na dinâmica do carbono no agrossistema cana-de-açúcar, com vistas à mitigação do efeito estufa. Foram utilizadas áreas de cana-de-açúcar e mata nativa na Usina São Martinho em Pradópolis, São Paulo. Duas cronossequências foram analisadas em áreas plantadas com cana há cerca de 50 anos. Os talhões amostrados foram reformados e plantados com cana há 2, 4, 6 e 8 anos, com e sem queima pré-colheita. Uma área de vegetação nativa adjacente às áreas de cana foi amostrada como referência. As áreas estudadas estão localizadas na classe de solo predominante na região, Latossolo Vermelho, de textura argilosa. Foram avaliados os seguintes atributos do solo: pH, densidade aparente, teores de argila, silte e areia, carbono total, carbono da matéria orgânica particulada e carbono da biomassa microbiana. As determinações de carbono da biomassa microbiana e da matéria orgânica particulada foram mais sensíveis à mudança de manejo da palhada do que o carbono total. A área com maior tempo de adoção do sistema de manejo sem queima, oito anos, na camada superficial, apresentou maiores teores de carbono total (30% maior), carbono da biomassa microbiana (2,5 vezes maior), e carbono da matéria orgânica particulada (3,8 vezes maior). O estoque de carbono total, corrigido para diferenças de densidade entre as áreas, foi maior nas áreas sem queima, principalmente na área com oito anos.

Palavras-chave: Seqüestro de carbono; Manejo de cana crua; Matéria orgânica particulada; Biomassa microbiana

CARBON STOCKS UNDER BURNED AND UNBURNED SUGARCANE

Abstract

Burning sugarcane leaves and tops on the standing mature crop has been practiced for centuries in Brazil, in order to facilitate the harvest, transportation and processing of the sugarcane stalks. Currently, due to economic, environmental and legal reasons, the harvest without burning, keeping the residues on the soil, has been increasingly adopted. There is little information, though, about the effects of the addition of sugarcane thrash in the carbon dynamics of the sugarcane crop. Carbon sequestration has economic, agronomic and environmental relevance, in the context of climate change and the "carbon market". The objective of this study is to evaluate the effect of thrash management in carbon dynamics in the sugarcane crop, targeting the mitigation of the greenhouse effect. The study área is located in the São Martinho farm, in Pradópolis, São Paulo, Brazil. Two chronosequences were studied, in plots where sugarcane was planted 2, 4 6 and 8 years ago, with and without pre-harvest burning. An área of native vegetation adjacent to the sugarcane fields was also sampled, as reference. The soil in the

área is classified as a clayey Oxisol. The soil samples were analyzed for pH, bulk density, sand, silt and clay content, total carbon, carbon in the particulate organic matter and microbial biomass carbon. The microbial biomass carbon and the particulate organic matter carbon in the soil were more sensitive to residue management changes than soil total carbon. The area with the longest period of adoption of the unburned management, eight years, had higher content of total carbon (30% higher), microbial biomass carbon (by a factor of 2.5), particulate organic matter carbon (by a factor of 3.8) than the area where the residues were burned. The total carbon stocks, after correction for density differences, were also higher in the unburned treatment, markedly in the area with eight years of green cane management.

Keywords: Carbon sequestration; Green cane management; Particulate organic matter; Microbial biomass

2.1 Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com cerca de 475 milhões de toneladas produzidas na safra 2006/2007, numa área de 6.2 milhões de hectares (CONAB, 2007). Grande parte da área plantada, 3,4 milhões de hectares, está localizada no Estado de São Paulo, onde a cana-de-açúcar é o principal produto agrícola, com participação de 27 % no valor da produção estadual (IEA, 2005). As perspectivas atuais são de grande crescimento neste setor, levando-se em conta, dentre outros fatores, o interesse de diversos países em utilizar o etanol como combustível, no contexto do protocolo de Quioto e de questões geopolíticas e ambientais envolvendo os combustíveis fósseis. O aumento da demanda mundial por álcool combustível tem impulsionado uma grande expansão na área plantada com cana no pais.

No sistema de produção da cana-de-açúcar, a queima da biomassa foliar tem sido uma prática comum, visando facilitar as operações de corte, carregamento e transporte dos colmos. A queima acarreta em emissões de gases como CO_2, CH_4 e N_2O, principais responsáveis pelo efeito estufa. Esta prática também libera fuligem, que causa incômodo e possíveis danos à saúde das populações circunvizinhas da lavoura (CANÇADO, 2006). A política pública de proibição da queima e o desenvolvimento de máquinas colhedoras têm proporcionado um crescimento no Brasil da cana colhida "crua", ou seja, sem queima, com manutenção da palhada no solo. Existem projeções de que 80% da área plantada na região Centro-Sul – onde esta a maior parte da produção – seja colhida sem queima em 2014 (MACEDO ; NOGUEIRA, 2004). Há, no Brasil, conhecimento acumulado no manejo da cultura da cana-de-açúcar baseado na queima de palhada. Por outro lado, por ser relativamente recente a adoção de manejo sem queima da palhada, há

pouca informação disponível. Faz-se necessário, portanto, estudar os efeitos da manutenção da palhada no agrossistema cana-de-açúcar, para desenvolver o manejo agronômico adequado e ambientalmente sustentável.

Estudos recentes têm sinalizado que a manutenção da palhada no solo altera as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Diversos autores têm estudado o efeito da palhada na dinâmica do nitrogênio no agrossistema cana-de-açúcar, enfocando aspectos como imobilização do nitrogênio do solo pela microbiota após a adição de resíduos com alta relação C:N, e a disponibilização do nitrogênio contido na palhada para absorção pela planta (BASANTA et al., 2003, GAVA et al., 2005, MEIER et al., 2006). São reportados efeitos significativos da manutenção da palhada em fatores físicos do solo, como variabilidade espacial da temperatura e umidade (DOURADO-NETO et al., 1999), densidade do solo (TOMINAGA et al., 2002), estabilidade de agregados e na velocidade de infiltração (CEDDIA, 1999, GRAHAM et al. 2002). Em diversos experimentos, uma correlação entre a manutenção da palhada da cana-de-açúcar e o aumento dos teores de carbono total do solo tem sido observada, com influencia de variáveis como tempo de adoção do sistema sem queima, textura do solo e grau de revolvimento do solo na reforma do canavial (GRAHAM et al., 2002, CANELLAS et al., 2003, ROBERTSON, 2003, CERRI et al., 2004).

Outros parâmetros alem do estoque de carbono total podem ser usados para medir o impacto de diferentes manejos de resíduos na matéria orgânica do solo. O carbono da biomassa microbiana, por ter curto período de ciclagem (0,15 anos) proporciona uma rápida resposta as alterações ambientais, sendo considerado um bom indicador de mudanças de manejo do solo (SMITH, 1990, DALAL, 1998). A proporção do carbono da biomassa microbiana no carbono total do solo também é apontada como um indicador sensível para mudanças de manejo do solo (SPARLING, 1992).

A matéria orgânica particulada (MOP), e a parte da material orgânico mais recentemente adicionado ao solo, com grau de decomposição menor, e tamanho maior que 53 um (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1992). Esta fração também tem sido usada como indicador para mudanças de manejo do solo e de resíduos, principalmente por meio da utilização de modelos de simulação da dinâmica da matéria orgânica do solo, pois corresponderia às frações lenta (PARTON et al., 1987), decomponível (VAN VEEN ; PAUL, 1981) e estabilizada (PAUL, 1984).

Este trabalho tem por objetivo comparar a dinâmica do carbono do solo em duas situações: quando a palhada é mantida na superfície do solo, e quando a palhada é eliminada por ocasião da queima pré-colheita. Em complemento, foram avaliados os efeitos da presença ou ausência da palhada na biomassa microbiana e na matéria orgânica particulada do solo.

2.2 Desenvolvimento

2.2.1 Material e Métodos

2.2.1.1 Área de estudo

A área de estudo pertence à Usina São Martinho, localizada no município de Pradópolis (latitude 21°22' Sul, longitude 48°03' Oeste, altitude = 620 m), na região nordeste do Estado de São Paulo, geomorfologicamente denominada de Cuestas Basálticas. O clima, segundo Koppen, é o Aw: tropical com verão chuvoso e inverno seco, com temperatura do mês mais frio superior a 18 ^{o}C (Figura 1). A precipitação média anual é de 1.470 mm e a temperatura média anual é de 22.5^{o}C. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2006), Orthic Ferralsol (FAO, 2006) ou Typic Hapludox (Soil Survey Staff, 1992).

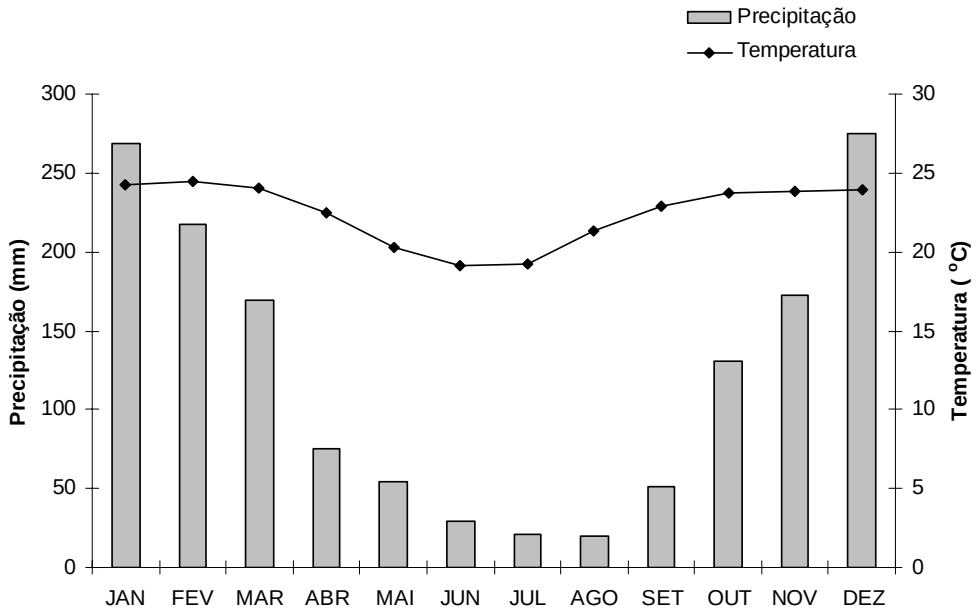

Figura 1 - Médias mensais de precipitação (1937-1998) e temperatura (1943-1998). Dados da Estação Metereológica localizada na Estação Experimental do Instituto Agronômico em Ribeirão Preto, SP

A Usina São Martinho foi escolhida para sediar a área de estudo por ter sido pioneira na tecnologia de colheita mecanizada de cana crua, alem de estar localizada numa área representativa das condições de cultivo de cana no Estado de São Paulo. A Usina São Martinho possui atualmente cerca de 90% da área plantada sob sistema de cana crua, incluindo áreas sem queima há quase duas décadas. Existe, portanto, conhecimento acumulado em relação ao manejo da cana sem queima de palhada, incluindo adaptação de variedades de cana e de equipamento.

2.2.1.2 Plantio, adubação e práticas culturais

A reforma das áreas foi efetuada, ate 2000, por meio das seguintes operações: grade aradora, grade niveladora, subsolador e grade niveladora. Nas áreas reformadas a partir de 2000, a reforma foi realizada no chamado cultivo mínimo, que consiste na aplicação de herbicida seguida pelo uso do subsolador. A adubação utilizada na Usina São Martinho e de 50 kg ha^{-1} N, 125 kg ha^{-1} P e 125 kg ha^{-1} K na cana planta, e 90 kg ha^{-1} N e 120 kg ha^{-1} K nas soqueiras. Foi aplicada vinhaça na dose de 100 m^3 ha^{-1} ano $^{-1}$, por aspersão. Foi aplicada torta de filtro na área total por ocasião da reforma nas áreas reformadas ate 2000, na dose de 200 Mg ha^{-1}. A partir de

2000, a torta de filtro foi aplicada no sulco, na dose de 20 Mg ha^{-1}. O espaçamento entre linhas foi de 1,5 m.

2.2.1.3 Cronossequência estudada

A estratégia utilizada para se estudar a dinâmica temporal do carbono no solo foi a de cronossequência, que consiste de áreas sob condições similares de solo, clima, topografia, variando o tempo de cultivo da cana sob uma dada pratica de manejo. Para cada manejo da palhada da cana (com e sem queima), foram coletadas amostras de solo em talhões com 2, 4, 6 e 8 anos após a reforma do canavial. O histórico anterior de todas os talhões foi cultivo contínuo de cana-de-açúcar por aproximadamente 50 anos com queima da palhada pré-colheita. Foram coletadas amostras de solo de uma área sob vegetação nativa, como referencia para fins de comparação. A área de vegetação nativa onde foram coletadas amostras de solo e um fragmento de mata de área de preservação permanente classificado como Mata Atlântica Ombrófila Semidecídua.

2.2.1.4 Coleta e análise de amostras de solo

Efetuou-se a abertura de uma trincheira central de 150 x 150 x 100 cm, cercada por oito mini-trincheiras de 40 x 40 x 40 cm a uma distancia de 20 m entre cada trincheira, em cada talhão amostrado. A coleta na área de mata nativa foi feita com cinco mini-trincheiras posicionadas ao acaso. A localização da trincheira central foi georreferenciada com Global Positioning System (GPS). Em cada mini-trincheira, foi selecionada uma face, na qual foram coletadas amostras nas camadas 0-10; 10-20 e 20-30 cm de profundidade. As amostras para densidade e granulometria foram coletadas na trincheira central nas profundidades de 0-10; 10-20; 20-30; 40-50; 70-80 e 90-100 cm, nas quatro faces da trincheira. Após as medidas de massa e umidade, as amostras de solo foram secas ao ar, homogeneizadas e tamisadas em peneira de 2 mm. As amostras para determinação de C e N totais foram moídas manualmente e tamisadas em peneira de 60 meshes. As amostras para determinação de carbono da biomassa microbiana foram separadas logo após a coleta, e mantidas em câmara fria até a análise.

A análise de pH em H_2O seguiu a metodologia proposta por Anderson e Ingram (1989). A densidade do solo foi determinada pelo método do cilindro volumétrico, descrito por EMBRAPA (1979), utilizando-se cilindros de aço inox com volume interno de 785 cm^3. Após determinado o peso do solo úmido, secou-se o solo em estufa a 105 ^oC e calculou-se a densidade do solo. A análise granulométrica foi realizada pelo método do hidrômetro, segundo Day (1965) e modificado por Gee e Bauder (1986). O carbono total do solo foi determinado em aparelho de combustão seca LECO CN-2000. As amostras de solo foram moídas e peneiradas a 60 mesh para esta análise. O carbono da biomassa microbiana foi estimado pelo método da fumigação-extração - FE (VANCE et al., 1987). As amostras de solo foram peneiradas a 2 mm e incubadas por 24 h a -0,03 MPa na presença de clorofórmio purificado. Em seguida, as amostras fumigadas e seus respectivos controles foram extraídas com K_2SO_4 0,5 M. As amostras foram agitadas por 30 minutos a 142 rpm. O extrato obtido foi centrifugado a 3000 rpm por 10 minutos e filtrado em sistema de seringas de teflon Millipore com tela de silk screen tratada previamente com solução de K_2SO_4 0,5 M. Os extratos foram analisados quanto ao teor de C total pelo método de combustão catalítica a 680º C, no Equipamento TOC 5000 A – Shimadzu. O carbono da biomassa microbiana é dado pela diferença entre os valores obtidos nas amostras fumigadas e nas não fumigadas (testemunhas), utilizando o fator de correção kEC=0.33 (SPARLING et al., 1990). A determinação do carbono da matéria orgânica particulada seguiu a metodologia desenvolvida por Cambardella e Elliott (1992). Dez gramas de solo de cada amostra foram dispersas com 30 mL de hexametafosfato de sódio a 5g L^{-1}, agitando por 15 horas. As amostras dispersas passaram por peneira de 53 um, mantendo-se um fluxo de água. O material retido na peneira, composto de areia e matéria orgânica particulada, foi seco a 50 ^oC por 12 horas, e moído para passar em peneira de 250 um. O carbono desta fração foi determinado por combustão à seco em um aparelho LECO 2000. O estoque de carbono do solo foi calculado para as camadas de 0-10 e 10-20 cm, utilizando o teor de carbono, a profundidade e a densidade aparente do solo de cada camada.

2.2.1.5 Correções para textura e densidade

Há uma correlação positiva entre o teor de carbono do solo e o teor de argila (SCHIMEL et al., 1994, SILVER et al., 2000) e o teor de argila + silte (PARTON et al., 1987, HAO;

KRAVCHENKO, 2007). Para normalizar os resultados neste trabalho, o estoque de carbono da camada 0-20 cm foi corrigido para carbono na fração argila + silte, em todos os pontos da cronossequência conforme descrito na eq.(1), seguindo a proposta de Moraes et al. (1996).

Teor de carbono (corrigido) = teor de carbono (medido) * teor de argila + silte (1)

Considerando-se diferenças de densidade nas áreas estudadas, o calculo do estoque utilizando uma camada fixa acaba por acarretar em uma comparação de diferentes quantidades de solo. No calculo do estoque da camada ate 20cm, foi feita a correção de todas as áreas para uma mesma massa de solo, considerando a densidade da área nativa como referencia, conforme descrito por diversos autores (AYANABA et al., 1976, ELLERT; BETTANY, 1995). Portanto, nos locais onde a densidade for superior à área de referencia, a profundidade usada no calculo do estoque será menor do que 20 cm; onde a densidade for menor que a área de referencia, a profundidade usada no calculo do estoque será maior do que 20 cm.

2.2.1.6 Análise estatística

As variáveis analisadas, para cada profundidade, foram o uso da terra (mata nativa ou cana-de-açúcar após cinqüenta anos de cultivo contínuo); o manejo da palhada da cana-de-açúcar (com e sem queima); e o número de anos após a reforma (2, 4, 6 e 8). Para análise de variância, utilizou-se o procedimento GLM do Programa SAS (SAS, 1997). Realizou-se a análise de comparação de médias por meio do teste Tukey com nível de significância de $P<0,05$.

2.2.2 Resultados

2.2.2.1 Caracterização inicial do solo

A caracterização inicial do solo (Tabelas 1, 2 e 3), com teores de argila, silte e areia, densidade aparente e pH foi efetuada para as profundidades de 0-10; 10-20; 20-30 cm para a área de mata nativa, e nas profundidades de 0-10; 10-20; 20-30; 40-50; 70-80 e 90-100 cm, para cada ponto da cronossequência nos dois tipos de manejo da palhada, com queima e sem queima. A

granulometria e densidade foram obtidas usando amostras retiradas da trincheira central, enquanto o pH foi determinado usando as amostras das mini-trincheiras e trincheiras centrais.

Tabela 1 - Caracterização inicial do solo, com teores de argila, silte e areia, densidade aparente e pH por profundidade, para a área de mata nativa. Os valores entre parênteses são o erro padrão da média

Profundidade	Argila	Silte	Areia	Densidade aparente	pH (H_2O)
Cm	----------	g kg^{-1}	----------	g cm^{-3}	
0-10	748	169	83	0,83 (0,02)	5,61 (0,10)
10-20	792	143	65	0,93 (0,02)	5,48 (0,09)
20-30	802	134	63	0,90 (0,01)	5,46 (0,12)

Tabela 2 - Caracterização inicial do solo, com teores de argila, silte e areia, densidade aparente e pH por profundidade, para cada ponto da cronossequência com colheita com queima. Os valores entre parênteses são o erro padrão da média

Anos após a reforma	Profundidade	Argila	Silte	Areia	Densidade aparente	pH (H_2O)
	cm	----------	g kg^{-1}	----------	g cm^{-3}	
2	0-10	690	126	184	1,10 (0,01)	5,78 (0,06)
2	10-20	693	105	203	1,21 (0,04)	5,65 (0,12)
2	20-30	710	111	180	1,17 (0,03)	5,88 (0,08)
2	40-50	745	106	149	1,00 (0,04)	6,17 (0,24)
2	70-80	737	87	177	0,86 (0,12)	6,43 (0,19)
2	90-100	732	63	205	0,92 (0,04)	6,6 (0,11)
4	0-10	789	154	57	1,18 (0,05)	5,36 (0,07)
4	10-20	765	202	33	1,14 (0,03)	5,40 (0,09)
4	20-30	837	154	9	1,15 (0,02)	5,55 (0,12)
4	40-50	814	154	32	1,04 (0,01)	6,27 (0,02)
4	70-80	815	150	34	0,96 (0,01)	6,31 (0,06)
4	90-100	802	152	47	0,95 (0,01)	6,3 (0,21)
6	0-10	747	220	33	1,12 (0,04)	5,73 (0,04)
6	10-20	765	209	27	1,10 (0,02)	5,77 (0,04)
6	20-30	759	217	24	1,14 (0,02)	5,86 (0,05)
6	40-50	811	128	61	1,09 (0,02)	6,28 (0,13)
6	70-80	814	128	58	1,02 (0,02)	6,39 (0,05)
6	90-100	794	129	77	1,00 (0,01)	6,5 (0,15)
8	0-10	662	177	161	1,04 (0,02)	5,85 (0,09)
8	10-20	681	176	143	1,16 (0,04)	5,98 (0,06)
8	20-30	678	175	148	1,14 (0,04)	6,02 (0,04)
8	40-50	806	127	67	1,00 (0,04)	6,26 (0,16)
8	70-80	832	131	37	0,97 (0,02)	6,31 (0,15)
8	90-100	822	89	89	1,00 (0,01)	6,4 (0,12)

Tabela 3 - Caracterização inicial do solo, com teores de argila, silte e areia, densidade aparente e pH por profundidade, para cada ponto da cronossequência com colheita sem queima. Os valores entre parênteses são o erro padrão da média

Anos após a reforma	Profundidade	Argila	Silte	Areia	Densidade aparente	pH (H_2O)
	cm	---------- g kg^{-1} ----------			g cm^{-3}	
2	0-10	594	220	186	0,97 (0,04)	5,92 (0,11)
2	10-20	567	240	193	1,01 (0,01)	5,86 (0,07)
2	20-30	726	166	108	1,10 (0,02)	5,57 (0,07)
2	40-50	725	166	109	1,03 (0,01)	5,49 (0,11)
2	70-80	745	186	68	0,92 (0,00)	5,84 (0,14)
2	90-100	739	190	71	0,91 (0,02)	6,0 (0,17)
4	0-10	586	63	351	1,24 (0,06)	5,57 (0,10)
4	10-20	577	62	361	1,25 (0,03)	5,72 (0,09)
4	20-30	597	62	341	1,30 (0,03)	5,87 (0,06)
4	40-50	635	61	304	1,13 (0,01)	5,97 (0,14)
4	70-80	620	83	298	1,03 (0,00)	6,05 (0,14)
4	90-100	612	61	327	1,02 (0,01)	6,1 (0,10)
6	0-10	713	184	103	1,16 (0,02)	5,86 (0,07)
6	10-20	765	131	104	1,14 (0,03)	5,80 (0,09)
6	20-30	776	147	78	1,16 (0,01)	5,60 (0,09)
6	40-50	820	111	69	1,08 (0,01)	5,33 (0,28)
6	70-80	813	125	63	0,95 (0,02)	5,64 (0,33)
6	90-100	807	145	48	0,94((0,00)	5,1 (0,20)
8	0-10	738	174	89	1,05 (0,06)	5,39 (0,06)
8	10-20	750	159	91	1,06 (0,03)	4,92 (0,14)
8	20-30	850	134	16	1,06 (0,02)	5,03 (0,10)
8	40-50	867	133	0	0,98 (0,01)	4,98 (0,11)
8	70-80	827	103	69	0,94 (0,01)	5,39 (0,25)
8	90-100	801	103	97	0,92 (0,01)	5,3 (0,14)

A análise granulométrica do solo mostrada nas tabelas 1, 2 e 3 mostra a predominância de textura argilosa nas áreas estudadas. Todas as áreas estudadas se enquadram na classe de granulometria argilosa. Apesar das as áreas selecionadas apresentarem-se em topografia semelhante, se enquadrarem na mesma classe textural – argilosa - e na mesma classe de solo - Latossolo Vermelho - houve variação significativa da granulometria, principalmente entre as áreas com quatro anos após a reforma. A área com quatro anos após a reforma e manejo sem queima da palhada se destaca das outras áreas por seu alto teor de areia (Tabela 1). Na média das profundidades de 0-10 e 10-20 cm, esta área apresenta teor de areia de 360 g kg^{-1}, enquanto todas as demais áreas tem valores menores que 200 g kg^{-1}.

2.2.2.2 Teor de carbono total do solo

Houve diminuição do teor de carbono do solo após aproximadamente 50 anos de cultivo contínuo de cana, em relação a condição da mata nativa, na camada superficial (Tabela 4). O teor de carbono na área de mata na camada de 0-10 cm foi de 30,12 g kg^{-1}, enquanto os teores nas áreas de cana variaram de 15,60 a 23,30 g kg^{-1}. Considerando-se uma média das áreas de cana, o teor de carbono na camada de 0-10 foi 36% menor do que na área de mata nativa. Nas áreas de cana, o teor de carbono total foi maior no manejo sem queima, após oito anos da reforma, nos primeiros 10 cm de solo, mas não na camada de 10-20 cm. Na área com oito anos após a reforma, o teor de C da área com queima foi 30% menor do que na área sem queima, na camada superficial. O efeito do manejo nos teores de carbono total foi mais evidente na camada superficial, de 0-10 cm, como esperado, uma vez que a palhada não foi incorporada, mas depositada sobre o solo.

Tabela 4 - Teores de carbono total, carbono da matéria orgânica particulada e carbono da biomassa microbiana nas áreas de mata nativa, cana com queima e sem queima, 2, 4, 6 e 8 anos após a reforma, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. Os valores entre parênteses são o erro padrão. Letras diferentes na mesma coluna, para cada profundidade, indicam diferença estatística a 5% de significância

Anos após a reforma	Carbono total	Carbono da matéria orgânica particulada	Carbono da biomassa microbiana
	g kg^{-1}		mg kg^{-1}
	Mata nativa - camada 0-10 cm		
-	30,12 (2,02) a	19,08 (1,25) a	618
	Cana com queima - camada 0-10		
2	17,80 (0,48) de	3,89 (0,21) de	144
4	20,47 (0,28) bcd	4,60 (0,66) cde	252
6	20,07 (0,43) cd	6,99 (0,59) bc	201
8	16,57(0,45) e	2,44 (0,09) e	166
	Cana sem queima - camada 0-10		
2	21,47 (0,82) bc	8,73 (0,75) b	309
4	15,60 (0,30) e	5,62 (0,33) cd	153
6	19,84 (0,68) cd	7,05 (0,34) bc	376
8	23,30 (0,91) b	9,27 (1,64) b	412
	Mata nativa - camada 10-20 cm		
-	17,83 (1,04) ab	7,13 (1,17) ab	268
	Cana com queima - camada 10-20 cm		
2	17,09 (0,50) ab	3,84 (0,27) cde	169
4	19,43 (0,44) a	4,13 (0,36) cde	170
6	18,49 (0,44) ab	5,97 (0,43) abc	149
8	15,40 (0,52) bc	1,97 (0,10) e	180
	Cana sem queima - camada 10-20 cm		
2	19,52 (1,16) a	7,57 (0,63) a	187
4	13,74 (0,60) c	3,30 (0,19) ed	131
6	16,78 (0,56) abc	4,96 (0,29) bcd	243
8	18,70 (0,95) ab	7,28 (1,17) a	265

2.2.2.3 Teor de carbono da biomassa microbiana do solo

Os maiores valores de carbono da biomassa microbiana (C_{BM}) estão na camada superficial, em todas as áreas de cana, assim como na área de mata nativa (Tabela 4). Os teores de C_{BM} nas áreas de cana foram menores do que na mata nativa, cerca de 50 anos após a conversão (Tabela 4). O teor na área de mata nativa da camada superficial foi 618 mg kg^{-1}, enquanto o teor na área de cana variou de 144 a 412 mg kg^{-1}. Na camada de 10-20 cm, os teores das áreas cultivadas com cana foram menores, mas a diferença foi menor, principalmente na área com oito anos sem queima após a reforma (265 mg kg^{-1}), com teor próximo ao da mata nativa (268 mg kg^{-1}). Considerando-se somente as áreas de cana, o C_{BM} foi maior no sistema sem queima, com exceção da área de quatro anos, nas duas camadas estudadas (0-10 e 10-20 cm). O

teor de C_{BM} na área após oito anos foi 2,5 vezes maior do que na área de mesma idade, com queima na camada superficial (0-10 cm). Na camada 10-20 cm, o C_{BM} foi 1,5 vezes maior na área de cana crua do que na área de manejo com queima.

2.2.2.4 Teor de carbono da matéria orgânica particulada do solo

O teor de carbono da matéria orgânica particulada (C_{MOP}) do solo da mata nativa foi maior do que nas áreas de cana, tanto a 0-10 cm quanto a 10-20 cm, após cerca de 50 anos de cultivo contínuo de cana-de-açúcar (Tabela 4). Os maiores teores estão na camada superficial, o que era esperado, uma vez que a adição de material orgânico foi feita a partir da deposição de palhada sobre o solo, sem incorporação. Os teores da área sem queima foram maiores do que nas áreas com queima, principalmente na área com oito anos após a reforma a 10 cm, com 2,44 g kg^{-1} no tratamento com queima e 9,27 g kg^{-1} no tratamento sem queima.

2.2.2.5 Proporção do carbono da biomassa microbiana sobre o carbono total e do carbono da matéria orgânica particulada sobre o carbono total

As proporções entre o carbono da biomassa microbiana e carbono da matéria orgânica particulada e carbono total, para cada ponto da cronossequência e cada manejo da palhada, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, são apresentadas na Tabela 5. Na camada de 0-10 cm, o carbono da biomassa microbiana representa 2,05% do carbono total na mata nativa. Após aproximadamente 50 anos de cultivo contínuo, a média das áreas com cana-de-açúcar e de 1,27% do carbono total. O carbono da biomassa microbiana nas áreas com queima representa de 0,99 a 1,19 % (camada de 0-10 cm) e 0,83 a 1,37 % (camada de 10-20 cm) do carbono total. Nas áreas sem queima, o carbono da biomassa microbiana representa de 1,51 a 2,11 % (camada de 0-10 cm) e de 1,19 a 1,62 % (camada de 10-20 cm) do carbono total, evidenciando o efeito de aumento desta fração em áreas onde com manutenção da palhada sobre o solo.

As áreas de cana sem queima tiveram, de maneira geral, uma maior proporção do carbono total na forma de carbono da matéria orgânica particulada do que as áreas sem queima. A proporção de C_{MOP} no carbono total, na média das quatro áreas com queima foi 23,5% (0-10 cm) e 22,2% (10-20 cm), enquanto a média das áreas sem queima foi 38% (0-10 cm) e 32,8% (10-20 cm). A diferença foi maior nas áreas com maior tempo após a reforma, oito anos. O carbono da

matéria orgânica particulada nestas áreas representou 40% do carbono total no manejo sem queima, e 15% no manejo com queima, na camada 0-10 cm, com proporções semelhantes na camada 10-20 cm.

Tabela 5 - Proporção entre o carbono da matéria orgânica particulada e o carbono total e entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono total nas áreas de mata nativa, cana com queima e sem queima, 2, 4, 6 e 8 anos após a reforma nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm

Anos após a reforma	**Carbono da matéria orgânica particulada / Carbono total**	**Carbono da biomassa microbiana / Carbono total**
	----------%----------	
	Mata nativa - camada 0-10 cm	
-	63,33	2,05
	Cana com queima – camada 0-10	
2	21,87	0,81
4	22,49	1,23
6	34,83	1,00
8	14,71	1,00
	Cana sem queima – camada 0-10	
2	40,67	1,44
4	36,04	0,98
6	35,55	1,89
8	39,79	1,77
	Mata nativa - camada 10-20 cm	
-	39,97	1,51
	Cana com queima - camada 10-20 cm	
2	22,47	0,99
4	21,26	0,87
6	32,30	0,81
8	12,80	1,17
	Cana sem queima - camada 10-20 cm	
2	38,79	0,96
4	24,02	0,96
6	29,56	1,45
8	38,91	1,42

2.2.2.6 Estoque de carbono total do solo

O estoque de carbono foi calculado a partir do teor de carbono total (Tabela 4) e da densidade aparente do solo (Tabelas 1, 2 e 3), para cada profundidade estudada. Primeiramente, calculou-se o estoque de carbono sem correção por densidade ou textura, para a profundidades de 0-20 cm (Figura 2). As duas áreas onde houve diferença estatística entre os dois manejos de palhada foram aos 4 e 8 anos após a reforma. Na área de quatro anos após a reforma, o manejo

com queima apresentou maiores valores do que na área sem queima, em contraste a área de oito anos, onde o estoque foi menor na área com queima.

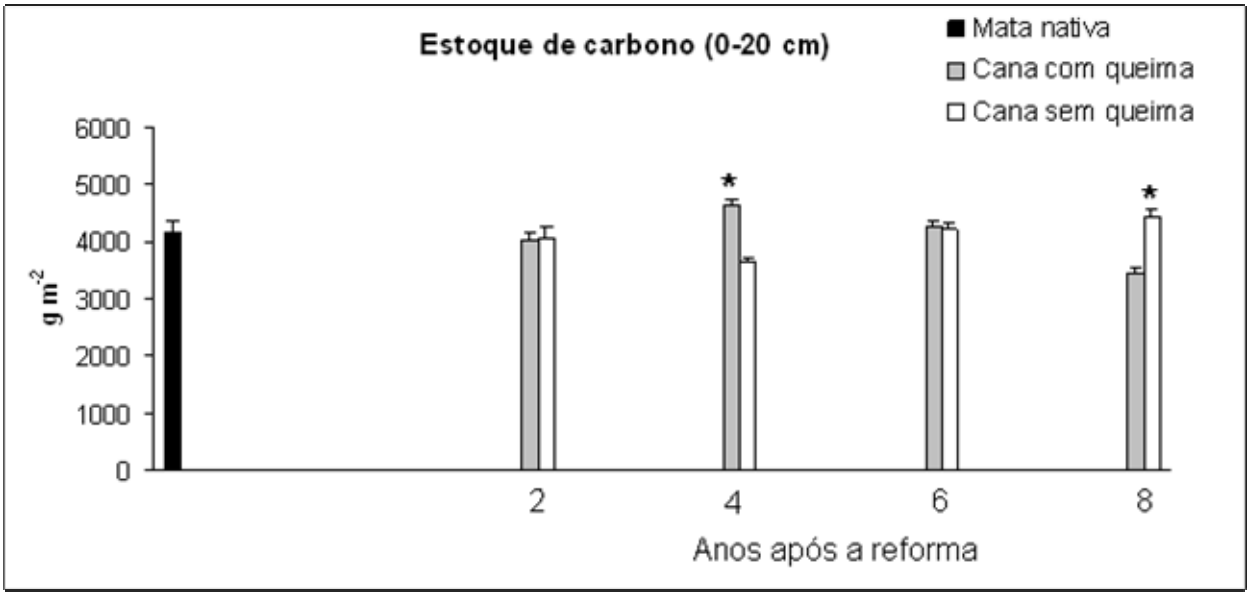

Figura 2 - Estoque de carbono do solo na profundidade de 0-20 cm, na mata nativa e nas áreas de cana, dois, quatro, seis e oito anos após a reforma, sem correção para textura e densidade. O asterisco indica que houve diferença estatística a 5% de significância entre os tratamentos com e sem queima, para cada ponto da cronossequência. O erro padrão está representado pelas linhas verticais acima das barras

Uma vez que o estoque de carbono esta diretamente relacionado ao teor de silte e argila, foi calculado o estoque de carbono nesta fração (Figura 3), buscando obter uma melhor comparação entre as áreas estudadas. Quando foi efetuada a correção por textura, o estoque de carbono na área de quatro anos após a reforma foi maior na área sem queima, assim como na área de oito anos após a reforma.

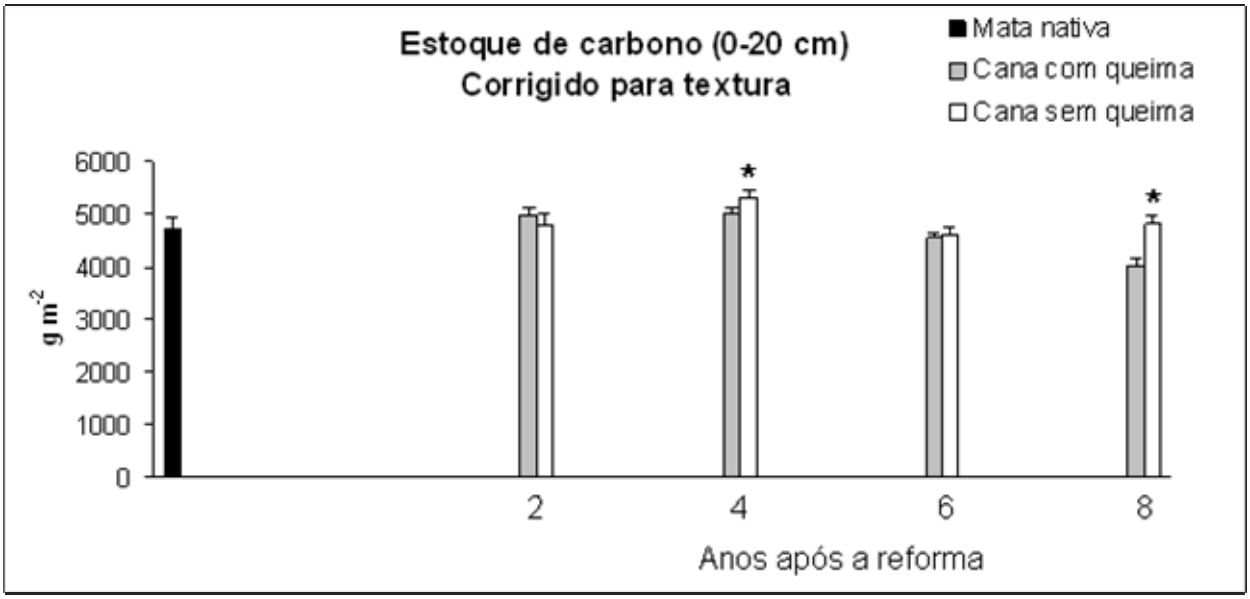

Figura 3 - Estoque de carbono do solo na profundidade de 0-20 cm na mata nativa e nas áreas de cana, dois, quatro, seis e oito anos após a reforma, na fração silte + argila. O asterisco indica que houve diferença estatística a 5% de significância entre os tratamentos com e sem queima, para cada ponto da cronossequência. O erro padrão está representado pelas linhas verticais acima das barras

Uma vez confirmado o efeito significativo da granulometria no resultado de estoque de carbono do solo, a área de quatro anos após a colheita foi eliminada da discussão, pois a comparação com as demais áreas seria prejudicada pelo efeito da diferença de distribuição granulométrica (Tabelas 2 e 3).

Para assegurar que a comparação de estoques entre os diferentes manejos de palhada e tempos após a reforma fosse realizada em uma mesma massa, efetuou-se a correção por densidade. O estoque de carbono corrigido por densidade é apresentado na Figura 4. O estoque de carbono foi maior nas áreas de dois e oito anos após a reforma, mas não na área com seis anos após a reforma.

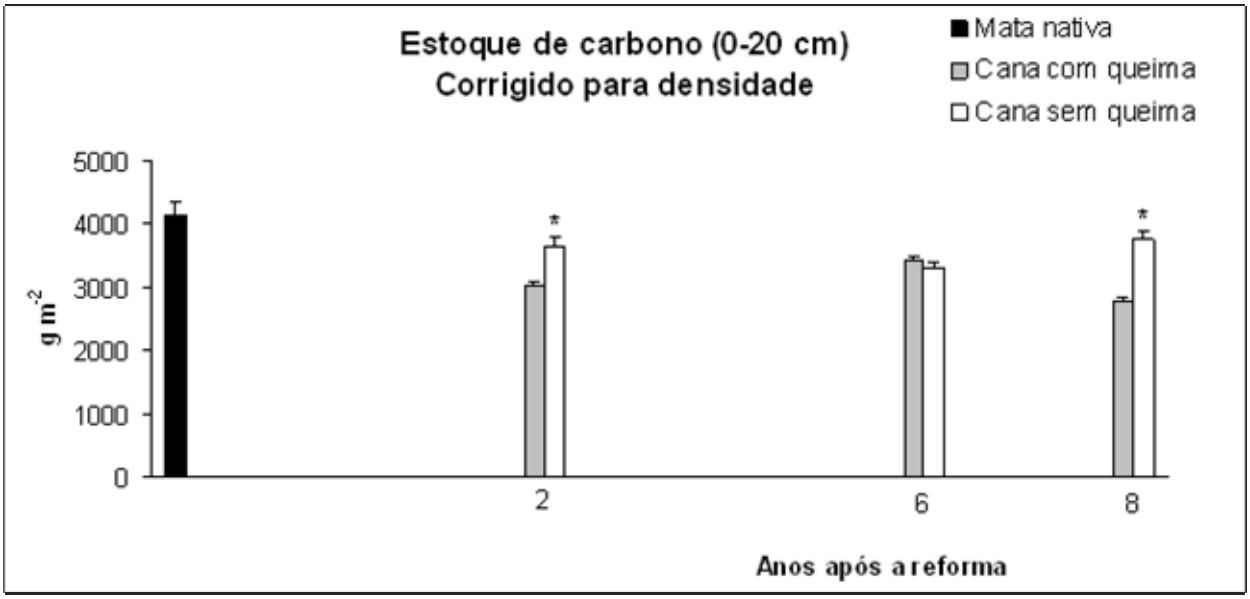

Figura 4 - Estoque de carbono do solo na profundidade de 0-20 cm na mata nativa e nas áreas de cana, dois, seis e oito anos após a reforma, com correção para densidade. O asterisco indica que houve diferença estatística a 5% de significância entre os tratamentos com e sem queima, para cada ponto da cronossequência. O erro padrão está representado pelas linhas verticais acima das barras

A tendência de maiores estoques nas áreas com dois e oito anos após a reforma se repete na avaliação do estoque de carbono com correção por densidade nas profundidades de 0-10, 0-20, 0-50 e 0-100 cm (Figura 5). Ao comparar o estoque acumulado ate a profundidades de 0-50 cm (Figura 6) e 0-100 cm (Figura 7), com correção pela última camada, o efeito da manutenção da palhada no estoque do solo fica mais evidente na área de oito anos após a reforma, em todas as profundidades.

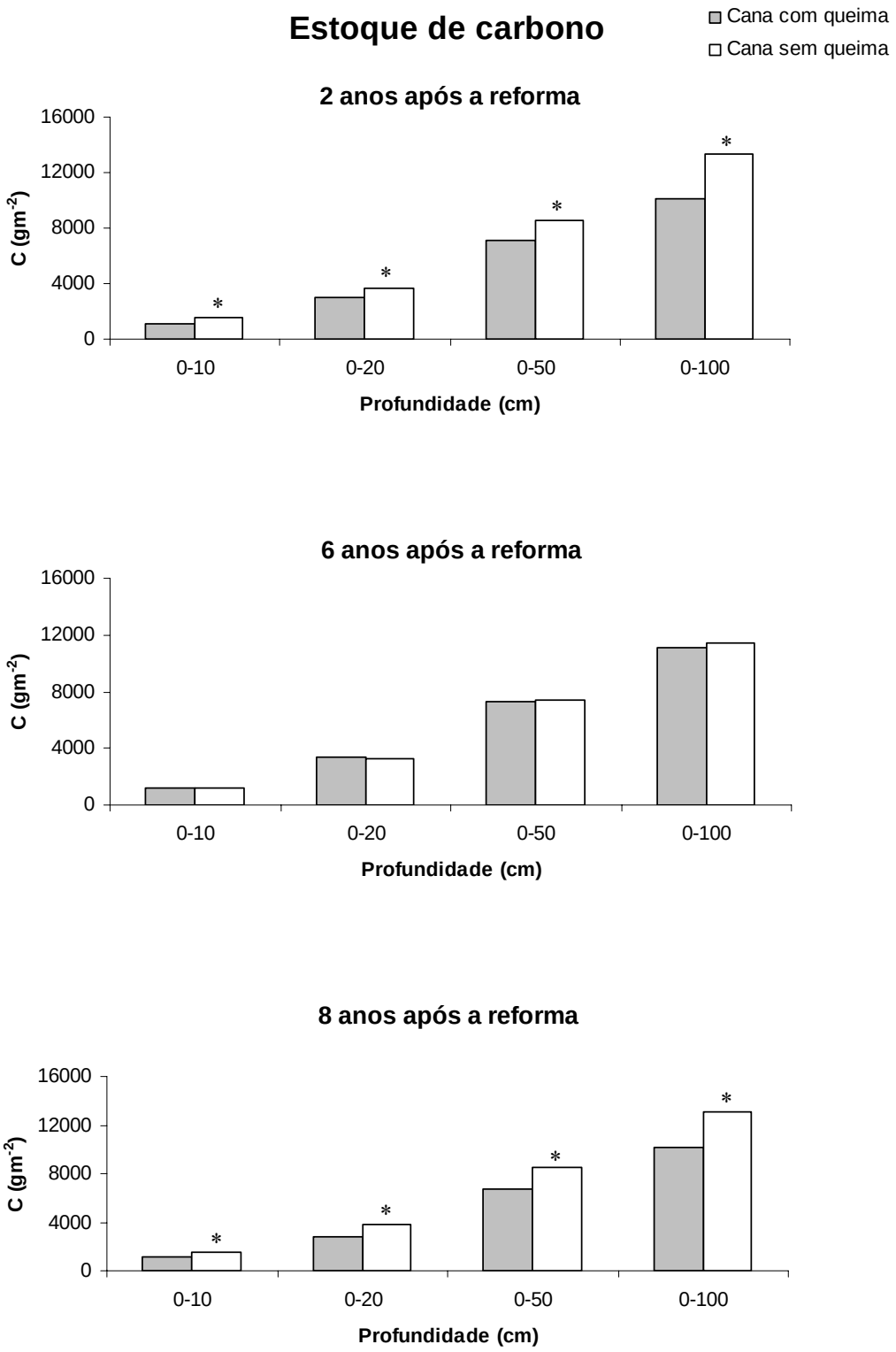

Figura 5 - Estoque de carbono do solo nas profundidades de 0-10, 0-20, 0-50 e 0-100 cm nas áreas de cana-de-açúcar com dois, seis e oito anos após a reforma, com correção por densidade. O asterisco indica que houve diferença estatística a 5% de significância entre os tratamentos com e sem queima

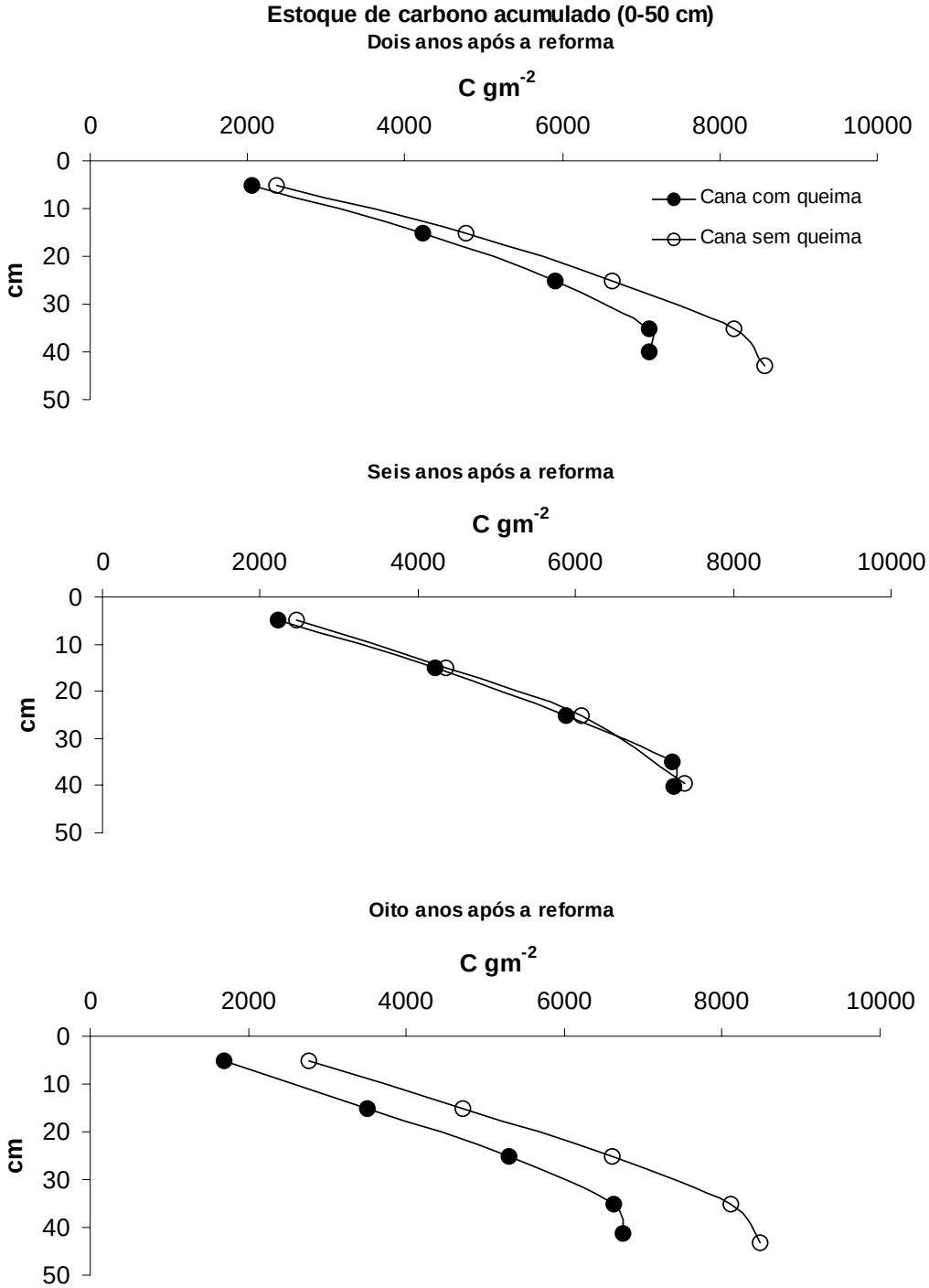

Figura 6 - Estoque de carbono acumulado ate a profundidade de 50 cm, nas áreas de cana, dois, seis e oito anos após a reforma, nos manejos com e sem queima, corrigido para densidade

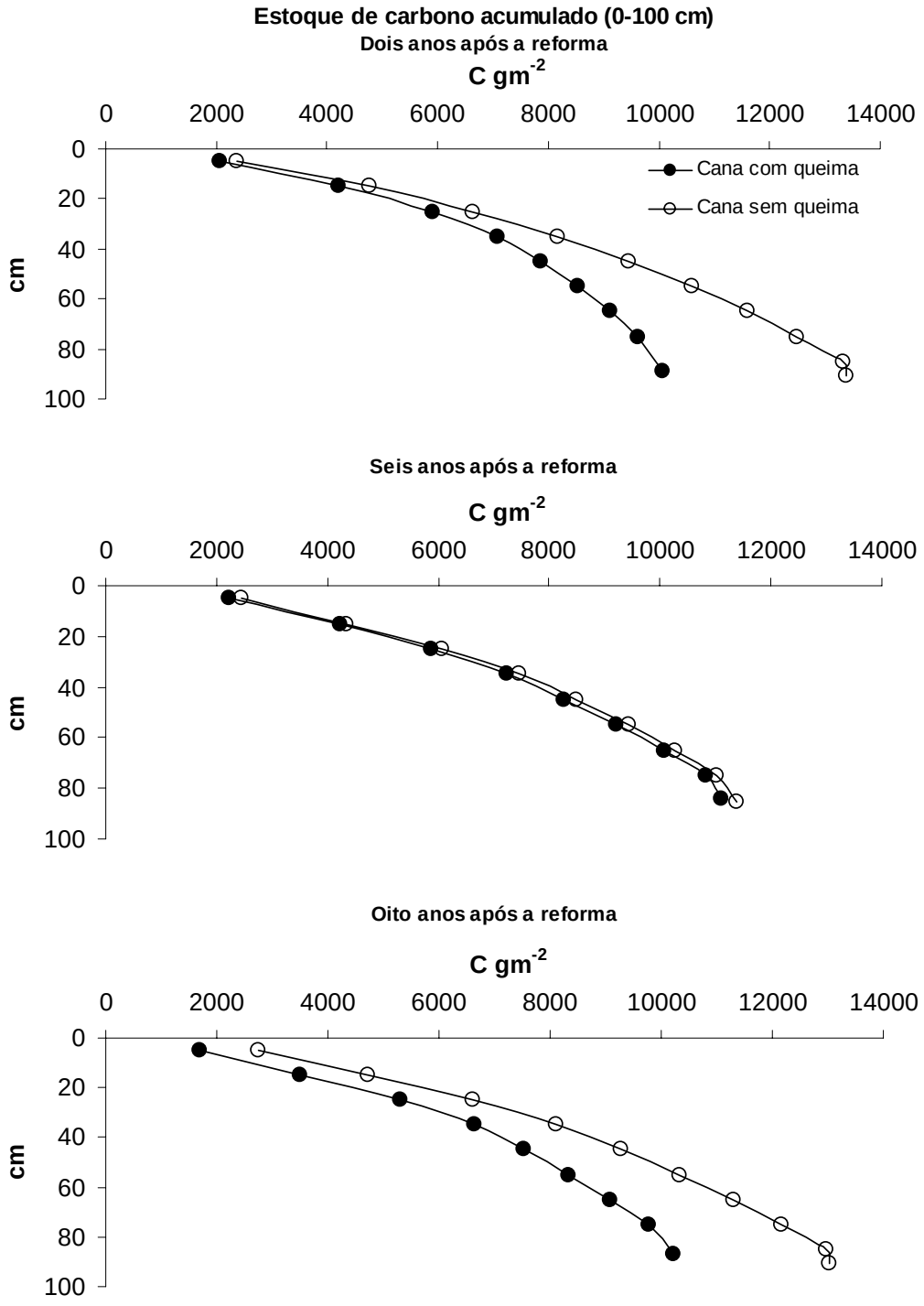

Figura 7 - Estoque de carbono acumulado ate a profundidade de 100 cm, nas áreas de cana, dois, seis e oito anos após a reforma, nos manejos com e sem queima, corrigido para densidade

2.2.3 Discussão

2.2.3.1 Caracterização inicial do solo

A metodologia da cronossequência foi usada neste trabalho para facilitar o estudo da dinâmica temporal do carbono do solo, como alternativa a amostragens ao longo do tempo na mesma área. A maior vantagem desta metodologia, especialmente em estudos de médio e longo prazo, é a praticidade de uma só época de amostragem. Entretanto, a variabilidade espacial de atributos do solo, comum em áreas agrícolas, pode ser um fator limitante na utilização deste método. Neste trabalho, um dos pontos da cronossequência teve que ser eliminado, devido á variação granulométrica entre as áreas, uma vez que o teor de argila e silte influenciam a ciclagem e armazenagem da matéria orgânica do solo.

2.2.3.2 Teor de carbono total do solo

O cultivo do solo com cana-de-açúcar na Usina São Martinho por cerca de cinqüenta anos causou estoques de carbono total menores nas áreas com cana do que área de mata nativa. Osher et al. 2003 mediram carbono do solo 12-26 % menor em áreas com mais de cinqüenta anos de cultivo de cana-de-açúcar no Havaí do que em áreas de vegetação nativa adjacentes. Leite et al. (2003) descrevem estoques de carbono em áreas com 70 anos de cultivo intensivo 36 a 56% menores do que em área de Mata Atlântica adjacente ao experimento. Em áreas de cana-de-açúcar com queima da palhada, o teor de carbono na camada 0-10 cm decresceu de 40-50 g kg^{-1}, para 17 g kg^{-1}, em um solo mais arenoso, e para 33 g kg^{-1} em um solo mais argiloso, após 20 a 30 anos de cultivo contínuo (DOMINY et al, 2002). Em experimento em área de cana com queima por trinta anos em um Argissolo Amarelo, textura média/ argilosa, houve redução no teor de carbono do solo na camada superficial de 21,2 g kg^{-1} na mata nativa para 12,2 g kg^{-1} (MAIA ; RIBEIRO, 2004). Davidson e Ackerman (1993) relatam 30% de perdas de carbono do solo, 20 anos após a conversão de floresta em cultivo de cana-de-açúcar. Silva et al. (2006), descrevendo um estudo com cana conduzido no formato de cronossequência, observaram um decréscimo acentuado no carbono total do solo logo após a conversão da vegetação nativa para cana, seguido

por um gradativo aumento. No entanto, os teores após 25 anos de cultivo de cana ainda eram inferiores aos da condição nativa, medidos em uma área de mata adjacente ao canavial.

Diversos estudos tem indicado a tendência de aumento do potencial de seqüestro de carbono no solo no sistema sem queima. Este aumento e condicionado por fatores como condições climáticas, textura do solo, tempo de implantação do sistema sem queima e manejo da adubação nitrogenada. A tendência de maior teor de carbono total no tratamento sem queima, é menos consistente do que nas frações C_{BM} e C_{MOP} da matéria orgânica. Em experimento de longo prazo, comparando áreas com e sem queima por 55 anos em um Cambissolo Háplico, Canellas et al. (2003) reportam 22,34 g kg^{-1} C no sistema de cana crua e 13,13 g kg^{-1} nas áreas em que a cana foi queimada para colheita, na camada de 0-20 cm. Wood (1991), em experimentos com cana crua na Austrália, mediu teores de carbono em área com queima cerca de 20% mais baixos do que na área sem queima a partir de dois anos após a mudança no manejo, com essa diferença mantendo-se constante pelo restante do ciclo (mais três anos). Vallis et al. (1996) descrevem em experimento com 12 anos de duração na Austrália, um aumento lento no estoque de carbono de áreas sem queima, enquanto o estoque da área com queima ficou constante. Razafambielo et al. (2006) descrevem teores 15% maiores em um estudo comparando áreas sem e com queima em Pradópolis, após seis anos, na camada 10 cm. Há experimentos, no entanto, nos quais a correlação positiva entre manutenção da palhada sobre o solo e o teor de carbono do solo não e clara. Em experimento de curta duração (12 meses) no Estado de Pernambuco, não houve diferença estatística no carbono total (BLAIR et al., 1998). Neste mesmo trabalho, os autores não encontraram diferença estatística nos teores de carbono total e carbono lábil na camada superficial de experimentos nas regiões de Ayr e Tully, na Austrália. Blair et al. (2000), em experimento na região de Mackay, na Austrália, reportam que o teor de carbono total da camada 0-10 cm após quatro anos foi menor na área sem queima do que na com queima, apesar do teor de carbono lábil ter sido maior na área de cana crua. Os autores apresentam com possível explicação o fato de que a palhada neste caso não foi queimada na planta, mas depositada sobre o solo e depois queimada. Haveria assim uma queima mais lenta, com maior deposição de carbono na forma de carvão, que poderia influencia o teor de carbono das amostras analisadas. Robertson (2003) descreve diferenças significativas no teor de carbono a 10 cm em áreas com 4 a 6 anos de colheita sem queima, mas não em áreas com 1 a 2 anos de manejo de cana crua. Em experimento de longo prazo na Africa do Sul, no qual o teor de carbono só foi maior na camada 0-10 cm após

60 anos de manejo sem queima, em relação ao manejo com queima de cana-de-açúcar, enquanto não houve diferença estatística nas camadas de 10-20 e 20-30 cm (GRAHAM et al., 2001).

Outro fator que pode influenciar a dinâmica do carbono em longo prazo é o grau de revolvimento do solo durante a reforma do canavial. O presente experimento se limita a um ciclo de plantio, corte, rebrota e cortes subseqüentes, sem incluir uma posterior reforma. Parte do carbono estocado por meio do manejo sem queima pode ser perdido durante a reforma do canavial (que geralmente ocorre a cada seis anos), quando do solo e preparado para o plantio do próximo ciclo por meio de aração, gradagem e subsolagem. A correlação positiva entre o grau de distúrbio do solo por praticas de cultivo e o aumento da mineralização do carbono do solo tem sido confirmada em diversos estudos. A destruição de agregados pelo cultivo do solo expõe material orgânico à ação dos microorganismos decompositores (PAUSTIAN et al., 1997, SIX et al., 2002). Alem disso, o cultivo do solo na reforma do canavial, quando há pouca cobertura vegetativa, pode causar perdas significativas de solo, e conseqüentemente, de matéria orgânica (SPAROVEK; SCHNUG, 2001). Thorburn et al. (1999) mostraram um aumento constante no carbono total do solo a 20 cm, em um período de 15 anos (dois ciclos completos) nas áreas sem queima, e um declínio nas áreas com queima. No entanto, a diferença foi relativamente pequena, de 2 g kg^{-1}. Ocorreu uma reforma neste período, com revolvimento do solo por meio de aração e gradagem. Resende et al. (2006) também observaram um pequeno aumento, de 2,5 g kg^{-1}, no teor de carbono do solo a 10 cm, após quinze anos de cultivo sem queima, com uma reforma no oitavo ano do experimento.

2.2.3.3 Teor de carbono da biomassa microbiana do solo

Os resultados da determinação de carbono da biomassa microbiana indicam que esta fração da matéria orgânica é sensível as alterações no uso do solo e no manejo da palhada, com declínio do teor de C_{BM} na conversão de mata para cana-de-açúcar, e aumento do teor de C_{BM} com a manutenção da palhada, principalmente após oito anos sem queima. Dominy et al. (2002) descrevem resultados de um experimento na Austrália que corroboram este trabalho, com menor teor de carbono microbiano em áreas com 20 a 30 anos de cultivo de cana-de-açúcar, comparado a uma área de mata nativa adjacente. Suman et al. (2006) mediram carbono da biomassa microbiana em solo cultivado com cana, comparando o monocultivo e a consorciação com trigo,

milho, batata, e diversas leguminosas. Na área plantada somente com cana, o carbono da biomassa microbiana do solo, um ano após o plantio, foi de 198 mg kg^{-1} (0-15 cm), valor próximo aos valores de 157 a 211 mg kg^{-1} obtidos nas áreas de cana com queima deste experimento a 20 cm.

O aumento no teor de carbono da biomassa microbiana, principalmente na camada superficial do solo em áreas sem queima e com a manutenção da palhada sobre o solo tem sido observado em diversos experimentos (WOOD, 1991, SUTTON et al., 1996). O tempo de adoção do sistema sem queima pode ser um fator relevante, como destacado por Robertson (2003), em experimento no qual houve aumento significativo do teor de carbono da biomassa microbiana a 10 cm em áreas com 4 a 6 anos de colheita sem queima, mas não em áreas com 1 a 2 anos de manejo de cana crua. Graham et al. (2001) descrevem aumento significativo do carbono da biomassa microbiana ate 30 cm em área de manejo sem queima em relação ao manejo com queima, em experimento com duração de 60 anos na África do Sul. Neste mesmo experimento, só houve diferença no teor de carbono total na camada superficial (0-10 cm), o que comprova que o carbono microbiano e um indicador mais sensível a mudanças de manejo do que o carbono total. Em um estudo com a manutenção e queima de resíduos de sorgo, o carbono da biomassa microbiana foi mais sensível ao manejo de resíduos da cultura do que o carbono total, com um aumento de 15% no C_{BM} nas áreas onde a palhada foi mantida sobre o solo por cinco anos em relação a onde foi queimada, enquanto o carbono total teve um aumento de 8% (SAFFIGNA et al., 1989). Em estudo comparando áreas de plantio direto e convencional, Leite et al. (2004) reportam que o carbono da biomassa microbiana foi mais sensível às mudanças no manejo do solo do que o teor de carbono total, servindo como indicador das fases iniciais do processo de degradação do solo.

2.2.3.4 Teor de carbono da matéria orgânica particulada do solo

Neste trabalho, houve declínio do carbono da matéria orgânica particulada com a conversão de floresta a cultura da cana-de-açúcar, após cerca de cinqüenta anos de cultivo contínuo. Silva et al. (2006), usando o método descrito em Cambardella e Elliot (1992) na determinação de matéria orgânica particulada em um Latossolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar, descreveram um acentuado declínio inicial do teor de C_{MOP} após a conversão de floresta

para cana, seguido por um aumento gradativo, mas sem alcançar os mesmos teores iniciais após 25 anos de cultivo contínuo.

Assim como observado no C_{BM}, a manutenção da palhada sobre o solo causou um aumento significativo no C_{MOP}. Este aumento foi mais consistente do que o aumento no estoque de carbono total. Ao avaliarem os efeitos de longo prazo do plantio direto nas propriedades do solo, Bayer et al. (2006) observaram um aumento do C_{MOP} no sistema de plantio direto, em comparação ao sistema de cultivo convencional, mas não houve diferença no estoque de carbono total entre os tratamentos. Skjemstad et al. (2006) analisaram amostras de solo comparando duas frações de carbono lábil, o carbono orgânico particulado, obtido por fracionamento físico (CAMBARDELLA; ELLIOT, 1992), e o carbono lábil obtido por oxidação com $KmnO_4$ (BLAIR et al., 1995), O C_{MOP} foi mais sensível a mudanças no manejo e uso da terra, mostrando ser um bom indicador de qualidade do solo.

2.2.3.5 Proporção dos teores de carbono da biomassa microbiana sobre o carbono total e do carbono da matéria orgânica particulada sobre o carbono total

Os valores de C_{BM}/CT descritos neste trabalho estão dentro da faixa descrita na literatura para percentagem do carbono da biomassa microbiana no carbono orgânico, de 1 a 4% (ANDERSON e DOMSCH, 1989, SPARLING, 1992). Em um Podzólico Vermelho Amarelo comparando cultivo convencional e plantio direto, Leite et al. (2003) encontraram valores de C BM/C total de 1,7 a 2,6% na camada 0-10 cm e de 1,8 a 2,4% na camada 10-20 cm. Suman et al. (2006) em estudo com cana-de-açúcar, descrevem a proporção de 2,7 a 3,3% de carbono da biomassa microbiana sobre o carbono total.

O declínio da proporção de carbono da biomassa microbiana no carbono total com a conversão de mata nativa para cana-de-açúcar foi descrito em Dominy et al. (2002). Os autores descrevem um declínio da proporção de carbono da biomassa no carbono total de 2,4-2,6% na mata nativa para 1,3-1,5% nas áreas de cana, após de cultivo contínuo por 20 a 30 anos. Isto pode ser explicado pelo fato de que a fração mais facilmente metabolizável da matéria orgânica e perdida mais facilmente com a conversão de um ambiente nativo para um sistema cultivado.

Pikul et al. (2007) usaram a relação C_{MOP}/CT para avaliar diversos manejos do solo. Foi observado um aumento de 19 e 37% na relação C_{MOP}/CT, em comparando com a área de cultivo

convencional em áreas com 4 e 10 anos de plantio direto, respectivamente. Estes resultados dão suporte a afirmação de que a relação C_{MOP}/CT é um indicador sensível a mudanças no manejo de resíduos vegetais no solo. Este parâmetro, portanto, pode ser útil no estudo da dinâmica do carbono no sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar.

2.2.3.6 Estoque de carbono total do solo

Assim como observado no teor de carbono total, o efeito da manutenção da palhada no aumento do estoque de carbono total foi mais evidente na área com mais tempo de adoção do sistema sem queima (oito anos). A área com dois anos após a reforma também apresentou estoque mais alto de carbono, mas não houve diferença no estoque de carbono total na área com seis anos após a reforma. Apesar de ter havido a preocupação em selecionar áreas homogêneas para o estudo da cronoseqência, houve diferenças de granulometria, aporte de resíduos orgânicos e práticas culturais, por se tratar de um estudo em áreas de produção. Outro fator que precisa ser considerado em estudos futuros é o aporte de carbono na forma de carvão, que pode ser significativo em áreas com queima de biomassa vegetal (BRODOWSKI, 2005). O estoque de carbono das áreas com queima pode ter incluído carbono proveniente da queima da palhada, que não foi quantificado neste estudo.

A maior parte dos artigos que tratam da dinâmica da matéria orgânica do solo em diferentes sistemas de manejo da palhada apresenta resultados na forma de teores de carbono, e não de estoque. No entanto, o estoque de carbono e uma conceito mais útil na avaliação do impacto de diferentes manejos na dinâmica da matéria orgânica do solo, pois se trata de uma medida de massa de carbono em um determinado volume de solo. Como o estoque e função da concentração de carbono e da densidade aparente, fatores como a compactação causada pelo tráfego de veículos e o revolvimento do solo por implementos, que afetam a densidade do solo, podem mascarar os resultados. A correção para a mesma massa, efetuada pela correção por densidade com o solo da mata nativa como referencia, foi importante para isolar o efeito do aporte de palhada na dinâmica da matéria orgânica do solo.

2.3 Conclusões

A conversão de uma área em equilíbrio para área cultivada com cana-de-açúcar, com distúrbio periódico do solo – reforma, tratos culturais – causa a redução dos teores de carbono total, carbono da biomassa microbiana e carbono orgânico particulado, principalmente na camada superficial do solo.

As determinações de carbono da biomassa microbiana e da matéria orgânica particulada foram mais sensíveis a mudança de manejo da palhada do que o carbono total.

A área com maior tempo de adoção do sistema de manejo sem queima apresentou maiores teores de carbono total, carbono da matéria orgânica particulada e carbono da biomassa microbiana em relação a área com queima.

E importante avaliar, em futuros trabalhos, o efeito da reforma na dinâmica do carbono do solo, pois parte dos benefícios da manutenção da palhada no solo pode ser perdida ao revolver o solo, acelerando a oxidação da matéria orgânica e favorecendo a erosão.

Referências

ANDERSON, T.H.; DOMSCH, K.H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. **Soil Biology and Biochemistry,** Oxford, v. 21, p. 471-479, 1989.

ANDERSON, J.M.; INGRAM, J.S.I. **Tropical soil biology and fertility:** a handbook of methods. Wallingford: CAB International, 1989. 171 p.

AYANABA, A.; TUCKWELL, S.B.; JENKINSON, D.S. The effects of clearing and cropping on the organic reserves and biomass of tropical forest soils. **Soil Biology and Biochemistry,** Oxford, v. 8, p. 519-525, 1976.

BASANTA, M.V.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDTB, K.; BACCHIB, O.O.S.; OLIVEIRA, J.C.M.; TRIVELIN, P.C.O.; TIMM, L.C.; TOMINAGA, T.T.; CORRECHEL, V.; CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; MACEDO, L.F. Management effects on nitrogen recovery in a sugarcane crop grown in Brazil. **Geoderma,** Amsterdam, v. 116, p. 235–248, 2003.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; GIASSON, E. Tillage effects on particulate and mineral-associated organic matter in two tropical Brazilian soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 37, p. 389-400, 2006.

BLAIR, J.G.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 46, p. 1459-1466, 1995.

BLAIR, G.J.; CHAPMAN, L.; WHITBREAD, A.M.; BALL-COELHO, B.; LARSEN, P.; TIESSEN, H. Soil carbon changes resulting from sugarcane trash management at two locations in Queensland, Austrália, and in North-East Brasil. **Australian Journal of Soil Research,** Collingwood, v. 36, p. 873-881, 1998.

BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Austrália. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 55, p. 183-191, 2000.

BRODOWSKI, S.; AMELUNG, W.; HAUMAIER, L.; ABETZ, C.; WOLFGANG, Z. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 128, p. 116-129, 2005.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of América Journal,** Madison, v. 56, p. 777-783, 1992.

CANCADO, J.E.D.; SALDIVA, P.H.N.; PEREIRA, L.A.A.; LARA, L.B.L.S; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L.A.; ARBEX, M.A.; ZANOBETTI, A.; BRAGA, A.L.F. The impact of sugar cane-burning emissions on the respiratory system of children and the elderly. **Environmental Health Perspectives,** Research Triangle Park, v. 114, n. 5, p. 725-729, May 2006.

CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhiço e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 27, p. 935-944, 2003.

CEDDIA, M.B.; ANJOS, L.H.C. dos; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L.A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo podzólico amarelo no Estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 34, p. 1467-1473, 1999.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; FELLER, C.; CAMPOS, D. C.; DE LUCA, E. F.; ESCHENBRENNER, V. **Canne à sucre et sequestration du carbone**. Paris: Academie d'Agriculture de France, Séance du 17 mars, 2004. 15 p.

CONAB. **Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar 2006/2007 :** Terceiro levantamento – Novembro 2006. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2006. 9 p.

DALAL, R. C. Soil microbial biomass - what do the numbers really mean? **Australian Journal of Experimental Agriculture,** Collingwood**,** v. 38, p. 649-665, 1998.

DAVIDSON, E.A.; ACKERMAN, I.L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. **Biogeochemistry,** Dordrecht**,** v. 20, p. 181–193, 1993.

DAY, P. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965, v. 1, p. 545-566.

DOMINY, C.S.; HAYNES, R.J.; VAN ANTWERPEN, R. Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soils. **Biology and Fertility of Soils,** Heidelberg, v. 36, p. 350-356, 2002.

DOURADO-NETO, D.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M. State-space approach for the analysis of soil water content and temperature in a sugarcane crop. **Scientia Agricola,** Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1215-1221, 1999. Suplemento.

ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science,** Ottawa, v. 75, p. 529-538, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de método de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa, 1979. 390p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. 1999 **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Embrapa Produção de Informação, 1999, 412 p.

FOOD and AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. Guidelines for soil description. 4th ed. (Revised). Rome: FAO, 2006. 109 p.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W. Urea and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 40, n. 7, p. 689-695, 2005.

GEE, C.W.; BAUDER, J.W. Particle size analysis. In: KLUTE, A.(Ed**.). Methods of soil analysis.** Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.404-409.

GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; MEYER, J.H. Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. **European Journal of Soil Science,** Oxford, v. 53, p. 589-598, 2002.

GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; ZELLES, L.E.; MEYER, J.H. Long-term effects of green cane harvesting versus burning on the size and diversity of the soil microbial community. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association,** Mount Edgecombe**,** v. 75, p. 228-234, 2001.

HAO, X.; KRAVCHENKO, A.N. Management practice effects on surface soil total carbon: differences along a textural gradient. **Agronomy Journal,** Madison, v. 99, p. 18-26, 2007.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Valor da Produção Agropecuária do Estado de São Paulo.** Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=1577>. Acesso em 11 jan. 2005.

LEITE, L.F.C.; SA MENDONCA, E. de.; MACHADO, P.L.O.A.; MATOS, E.S. Total C and N storage and organic carbon pools of a Red-Yellow Podzolic under conventional and no tillage at the Atlantic Forest Zone, south-eastern Brazil. **Australian Journal of Soil Research,** Collingwood, v. 41, p. 717-730, 2003.

LEITE, L.F.C.; SA MENDONCA, E. de; MACHADO, P.L.O.A.; FERNANDES FILHO, E.I.; NEVES, J.C.L. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the Century model. **Geoderma,** Amsterdam, v. 120, p. 283-295, 2004.

MACEDO, I. DE C.; NOGUEIRA, L.A.H. Avaliação da expansão da produção de etanol no Brasil. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Julho 2004. 71 p.

MAIA, J.L.T.; RIBEIRO, M.R. Cultivo contínuo da cana-de-açúcar e modificações químicas de um argissolo amarelo fragipanico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasilia, v. 39, p. 1127-1132, 2004.

MEIER, E.A.; THORBURN, P.J.; WEGENER, M.K.; BASFORD, K.E. The availability of nitrogen from sugarcane trash on contrasting soils in the wet tropics of North Quensland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems,** Dordrecht, v. 75, p. 101-114, 2006.

MORAES, J.F.L. de; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondonia, Brazil. **Geoderma,** Amsterdam, v. 70, p. 63-81, 1996.

OSHER, L.J.; MATSON, P.A.; AMUNDSON, R. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii. **Biogeochemistry,** Dordrecht, v. 65, p. 213-232, 2003.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. **Soil Science Society of América Journal**, Madison, v. 51, p. 1173-1179, 1987.

PAUL, E.A. Dynamics of organic matter in soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 76, p. 275-285, 1984.

PAUSTIAN, K.; COLLINS, H.P.; PAUL, E.A. Management controls on soil carbon. In PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E.T.; COLE, C.V. (Ed.) Soil organic matter in temperate agroecosystems: long-term experiments in North América. Boca Raton: CRC press, 1997. p. 15-49.

PIKUL Jr., J.L.; OSBORNE, S.; ELLSBURY, M.; RIEDELL, W. Particulate organic matter and water-stable aggregation of soil under contrasting management. **Soil Science Society of América Journal,** Madison, v. 71, n. 3, p. 766-776, 2007.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHES, B.; LARRE-LARROUY, M.C.; DE LUCA, E.F.; LAURENT, J.Y.; CERRI, C.C.; FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 115, p. 285-289, 2006.

RESENDE, A.S.; XAVIER, R.P.; OLIVEIRA, O.C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.JR.; BODDEY, R.M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. **Plant and Soil,** Dordrecht, v. 281, p. 339-351, 2006.

ROBERTSON, F. **Sugarcane trash management:** consequences for soil carbon and nitrogen - Final Report to the CRC for Sustainable Sugar Production of the project Nutrient Cycling in Relation to Trash Management. Townville: CRC for Sustainable Sugar Production, 2003. 39p.

SAFFIGNA, P.G.; POWLSON, D.S.; BROOKES, P.C.; THOMAS, G.A. Influence of sorghum residues and tillage on soil organic matter and soil microbial biomass in an Australian vertisol. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 21, p. 759-765, 1989.

SAS**. SAS/STAT Software:** changes and enhancements through release 6.12. Cary: SAS Institute, 1997. 1167p.

SCHIMEL, D.S.; BRASWELL, B.H.; HOLLAND, E.A.; MCKEOWN, R.; OJIMA, D.S.; PAINTER, T.H.; PARTON, W.J.; TOWNSEND, A.R. Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. **Global Biogeochemical Cycles,** Washington, v. 8, p. 279-293, 1994.

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R.; CARVALHO, F.G.; SILVA, V.N.; SILVA, L.E.S.F. Impact of sugarcane cultivation on soil carbon fractions, consistence limits and aggregate stability of a Yellow Latosol in Northeast Brasil. **Soil & Tillage Research**, 2006. Available online 4 October 2006 doi:10.1016/j.still.2006.09.002

SILVER, W.L.; NEFF, J.; MCGRODDY, M.; VELDKAMP, E.; KELLER, M.; COSME, R. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian Forest ecosystem. **Ecosystems**, New York, v. 3, p. 193-209, 2000.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEF, K.; OGLE, S.M.; SA, J.C.DE M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils- Effects of no-tillage. **Agronomie**, Paris, v. 22, p. 755-775, 2002.

SKJEMSTAD, J.O.; SWIFT, R.S.; McGOWAN, J.A. Comparison of the particulate organic carbon and permanganate oxidation methods for estimating labile soil organic carbon. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood , v. 44, p. 255-263, 2006.

SMITH, J. L.; PAUL, E.A. The significance of soil microbial biomass estimations. In: BOLLAG, J. M., STOTZKY, G. (Ed.). **Soil and Biochemistry**, New York: Marcell Dekker, 1990, p. 357-396.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**, 5th ed. Blacksburg: Pocahontas Press, 1992. 556 p.

SPARLING, G.P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Soil Research,** Collingwood, v. 30, p. 195-207, 1992.

SUMAN, A.; LAL, M.; SINGH, A.K.; GAUR, A. Microbial biomass turnover in India subtropical soils under different sugarcane intercropping systems. **Agronomy Journal,** Madison, v. 98, p. 698-794, 2006.

SUTTON, M.R.; WOOD, A.W.; SAFFIGNA, P.G. Long term effects of green cane trash retention on Herbert River soils. In: **Sugarcane:** research towards efficient and sustainable production**.** (Ed.) WILSON, J.R.; HOGARTH, D.M.; CAMPBELL, J.A.; GARSIDE, A.L. Brisbane: CSIRO Division of Tropical Crops and Pastures, 1996. p. 178-180.

THORBURN, P.J.; PROBERT, M.E.; LISSON, S.; WOOD, A.W.; KEATING, B.A. Impacts of trash retention on soil nitrogen and water: an example from the Australian sugarcane industry. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association**, Mount Edgecombe, v. 72, p. 75-79, 1999.

TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; TIMM, L.C. Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane field. **Australian Journal of Soil Research,** Collingwood, v. 40, p. 605-614, 2002.

VALLIS, I.; PARTON, W.J.; KEATING, B.A.; WOOD, A.W. Simulation of the effects of trash and N fertilizer management on soil organic matter levels and yields of sugarcane. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, p.115-132, 1996.

VAN VEEN, P.; PAUL, E.A. Organic carbon dynamics in grassland soils. 1. Background information and computer simulation. **Canadian Journal of Soil Science,** Ottawa**,** v. 61, p. 185-201, 1981.

VANCE, E.D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry,** Oxford, v. 19, p. 703-707, 1987.

WOOD, A.W. Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in north Queensland. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 69-85, 1991.

ADAPTAÇÃO DO MODELO CENTURY PARA SIMULAÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO DA PALHADA DE CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

Devido ao aumento na demanda mundial por biocombustíveis, a área cultivada com cana-de-açúcar para produção de álcool esta se expandindo. Por razões ambientais e econômicas, a maior parte das novas áreas será colhida mecanicamente sem queima da palhada, no sistema chamado de cana crua, onde se forma uma camada de palha sobre o solo. Este aporte periódico de material orgânico afeta as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, assim como a produção vegetal e a ciclagem de nutrientes. Portanto, é importante entender o processo de decomposição da palhada da cana-de-açúcar, que é controlado pelo clima, a qualidade dos resíduos e a biota. A modelagem é uma ferramenta que pode ser usada no estudo das interações entre estes fatores. O modelo CENTURY tem sido bastante usado em estudos da dinâmica da matéria orgânica do solo, mas ainda não havia sido utilizado na simulação da decomposição da palhada de cana-de-açúcar. Neste trabalho, o modelo CENTURY foi testado em cinco áreas diferentes no Brasil e na Austrália, com dados de experimentos de decomposição de palhada. A distinção de dois compartimentos teóricos na palhada, com diferentes taxas de decomposição foi um fator relevante nas simulações. Originalmente, o modelo tinha um compartimento de palhada imediatamente disponível para decomposição com um valor alto, 5.000 gCm^{-2}. Por meio de um processo de otimização de parâmetros, a espessura da camada de palha mais próxima do solo, mais vulnerável a decomposição, foi fixada em 110 gCm^{-2}. Após esta alteração, os valores simulados em todos os experimentos foram próximos aos valores medidos, contribuindo para a eficácia do modelo CENTURY no estudo de padrões de decomposição da palhada de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Modelagem; Resíduos vegetais; Liteira; Carbono; Modelo CENTURY

ADAPTATION OF THE CENTURY MODEL FOR THE SIMULATION OF SUGARCANE TRASH DECOMPOSITION

Abstract

Due to the worldwide increase in demand for biofuels, the área cultivated with sugarcane is expected to increase. For environmental and economic reasons, a large part of the áreas are being harvested without burning, in a system where the residues are left on the soil surface as a mulch layer, called green cane management. This periodical input of residues affects soil physical, chemical and biological properties, as well as plant growth and nutrition. Therefore, it is important to understand the process of decomposition of sugarcane litter, which is controlled by climate, residue quality, and the biota. Modeling is a tool that can be used to study the interactions between the factors controlling decomposition. The CENTURY model has been used extensively in soil organic dynamics studies, but not in sugarcane litter decomposition. In this work, the CENTURY model was tested in five different sites in Brazil and Austrália, in litter decomposition experiments. The differentiation of two pools in the litter, with different decomposition rates, was found to be a relevant factor in the simulations made. Originally, the model had a basically unlimited layer of mulch directly available for decomposition, 5.000 g C m^{-2}. Through a parameter optimization process, the thickness of the mulch layer closer to the soil,

more vulnerable to decomposition, was set to 110 g C m^{-2}. By changing the layer of mulch at any given time available for decomposition, the sugarcane residues decomposition simulations where close to measured values, contributing to making the CENTURY model a tool for the study of sugarcane litter decomposition patterns.

Keywords: Modeling; Plant residues; Litter; Carbon; CENTURY model

3.1 Introdução

Há um crescente interesse no desenvolvimento e utilização de combustíveis alternativos, devido a questões econômicas, ambientais e geopolíticas. O etanol, um combustível derivado da biomassa vegetal, e uma das alternativas mais viáveis na substituição de combustíveis fosseis, tanto como aditivo quanto na substituição à gasolina (MARRIS, 2006, GOLDEMBERG, 2007). O etanol pode ser produzido a partir de diversas fontes de biomassa, como milho, beterraba, cana-de-açúcar, e mais recentemente, a partir de celulose. A cana-de-açúcar, devido ao crescimento vigoroso, a eficiência fotossintética, e um sistema de processamento que inclui o uso de resíduos na geração de energia, tem o melhor balanço energético dentre as culturas atualmente usadas para a produção de etanol (MACEDO, 1998). Há, devido ao aumento da demanda interna e externa, perspectivas de expansão significativa nas áreas regiões produtoras de cana-de-açúcar.

A queima da palhada para facilitar a colheita e o transporte de colmos tem sido praticada há séculos. Devido a questões agronômicas, ambientais e econômicas, a colheita manual da cana-de-açúcar tem sido gradualmente substituída pelo sistema chamado de cana crua, com a colheita mecanizada e a manutenção da palhada sobre o solo. O sistema de cana crua acarreta na deposição de grandes quantidades de resíduos após cada colheita, de 10 a 20 Mg ha^{-1} de matéria seca com uma relação C:N em torno de 100. Esta camada de palha formada sobre o solo afeta todo o agrossistema da cana-de-açúcar, influenciando a produtividade, o manejo de fertilizantes, a erosão do solo e a dinâmica da matéria orgânica do solo. O impacto da manutenção da palhada sobre o solo tem sido estudado com ênfase em crescimento e ciclagem de raízes (BALL-COELHO, 1992, ALVAREZ et al., 2000, GRAHAM et al., 2002) dinâmica do nitrogênio do solo (BASANTA et al., 2003, MEIER et al., 2006), redução na erosão hídrica (CEDDIA et al. 1999), temperatura e umidade do solo (WOOD, 1991, DOURADO-NETO et al., 1999), densidade aparente do solo (TOMINAGA et al., 2002), estabilidade de agregados (GRAHAM et al., 2002),

seqüestro de carbono (YADAV et al., 1994, CERRI et al., 2004b, RESENDE et al., 2006), e efeitos alopáticos (SAMPIETRO et al., 2006, VIATOR et al., 2006).

A decomposição da palhada é um fator determinante na dinâmica da matéria orgânica do solo. Uma vez que há uma serie de complexas interações entre fatores bióticos e ambientais, a modelagem pode ser uma ferramenta importante no estudo dos efeitos da presença da palhada no agroecossistema cana-de-açúcar. O modelo PASTIS foi usado no estudo da decomposição de resíduos de trigo (GARNIER et al., 2003), centeio e canola (FINDELING et al., 2007). Ma et al. (1999) compararam o desempenho de diferentes modelos na simulação da decomposição de trigo, milho, milheto, sorgo e girassol. A decomposição da palhada de cana-de-açúcar foi simulada por Thorburn et al. (2001), com enfoque na dinâmica de nitrogênio, utilizando o modelo APSIM-N.

O modelo CENTURY (PARTON, 1987) tem sido usado na simulação da decomposição de resíduos agrícolas e da serapilheira em florestas (PARTON et al., 1994). O modelo CENTURY foi inicialmente desenvolvido para simular a dinâmica da matéria orgânica no sistema solo-planta em pradarias da América do Norte (PARTON et al., 1987, 1988, COLE et al., 1989), mas tem sido utilizado em pastos, culturas anuais e florestas em diversas regiões do mundo, incluído os trópicos (SANFORD, 1991, CERRI et al., 2004b, LEITE et al., 2004). No entanto, o modelo CENTURY não havia sido usado na simulação da decomposição da palhada de cana-de-açúcar. O objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência do modelo CENTURY na simulação da decomposição da palhada de cana-de-açúcar, e fazer as modificações necessárias para otimizar a simulação. Para estudar a decomposição da palhada de cana-de-açúcar em diferentes condições de solo e de clima, o modelo CENTURY foi utilizado para simular dados de dois experimentos no Brasil, o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, e cinco experimentos na Austrália, um país pioneiro no sistema de cana crua, onde a maior parte da cana é colhida sem queima.

3.2 Desenvolvimento

3.2.1 Material e métodos

3.2.1.1 Experimentos

A Tabela 1 contem a descrição dos locais estudados neste trabalho. Os dois experimentos no Brasil são localizados em Pradópolis, São Paulo, e Goiana, Pernambuco. O experimento em Pradópolis foi descrito em detalhe em Cerri et al. (2004). O estudo de decomposição foi iniciado a partir da colheita da primeira cana soca, em 1999. O experimento em Goiana, localizado a 30 km da Costa Atlântica, foi descrito por Ball-Coelho et al. (1993). O estudo de decomposição foi iniciado em 1987, a partir da colheita da primeira cana soca.

Os experimentos na Austrália foram descritos por Robertson (2003). As áreas de estudo estão localizadas em três diferentes zonas climáticas da costa leste da Austrália: Harwood (sudeste), Mackay (centro-leste) e Tully (nordeste). Em Harwood e Mackay, duas épocas de colheita foram estudadas - colheita precoce, em julho/agosto, e colheita tardia, em novembro/dezembro. O experimento em Tully foi colhido no final da temporada de colheita.

Tabela 1 - Características dos experimentos simulados

Local	**Coordenadas**	**Precipitação anual (mm)**	**Método de coleta**	**Fonte**
Harwood, Austrália	29,50 S, 153,20 L	1021	Quadrantes de 1,12 m^2	Robertson (2003)
Mackay, Austrália	21,10 S, 149,07 L	1668	Quadrantes de 1,12 m^2	Robertson (2003)
Tully, Austrália	17,56 S, 145,56 L	4067	Quadrantes de 1,12 m^2	Robertson (2003)
Pradópolis, Brasil	21,37 S, 48,05 O	1560	Anéis de 0,70 m^2	Cerri et al. (2004)
Goiana, Brasil	7,50 S, 35,00 O	1741	Subparcelas de 1,22 m^2	Ball-Coelho et al. (1993)

3.2.1.2 Descrição do modelo CENTURY

O modelo CENTURY simula a decomposição da matéria orgânica do solo e o fluxo de C, N, P e S em diferentes compartimentos do sistema solo/planta/atmosfera (PARTON et al., 1987). A estrutura geral do modelo é apresentada na Figura 1. O modelo tem diferentes submodelos de produção vegetal para pastagens, culturas e florestas, ligados a um submodelo de solo e ciclagem de nutrientes (PARTON et al., 1994, PAUSTIAN et al., 1997, KIRSCHBAUM; PAUL, 2002). O modelo inclui dois compartimentos de liteira (metabólico e estrutural) e três compartimentos de matéria orgânica do solo (ativo, lento e passivo), com diferentes taxas de decomposição potencial. A fração ativa inclui a biomassa microbiana e seus metabólitos, com rápida ciclagem (escala de anos); a fração lenta consiste em matéria orgânica do solo parcialmente estabilizada com tempo de ciclagem intermediário (escala de décadas); e o compartimento passivo representa material recalcitrante com tempo de ciclagem de longo prazo (escala de séculos). Os dois compartimentos da liteira e a fração ativa são separados em superficial e do solo, enquanto as frações passiva e lenta são localizadas somente no solo. Os parâmetros que controlam as taxas de decomposição e fluxos de C e N entre os diversos compartimentos são influenciados por fatores como temperatura, umidade, qualidade da liteira, textura do solo e atividades de manejo.

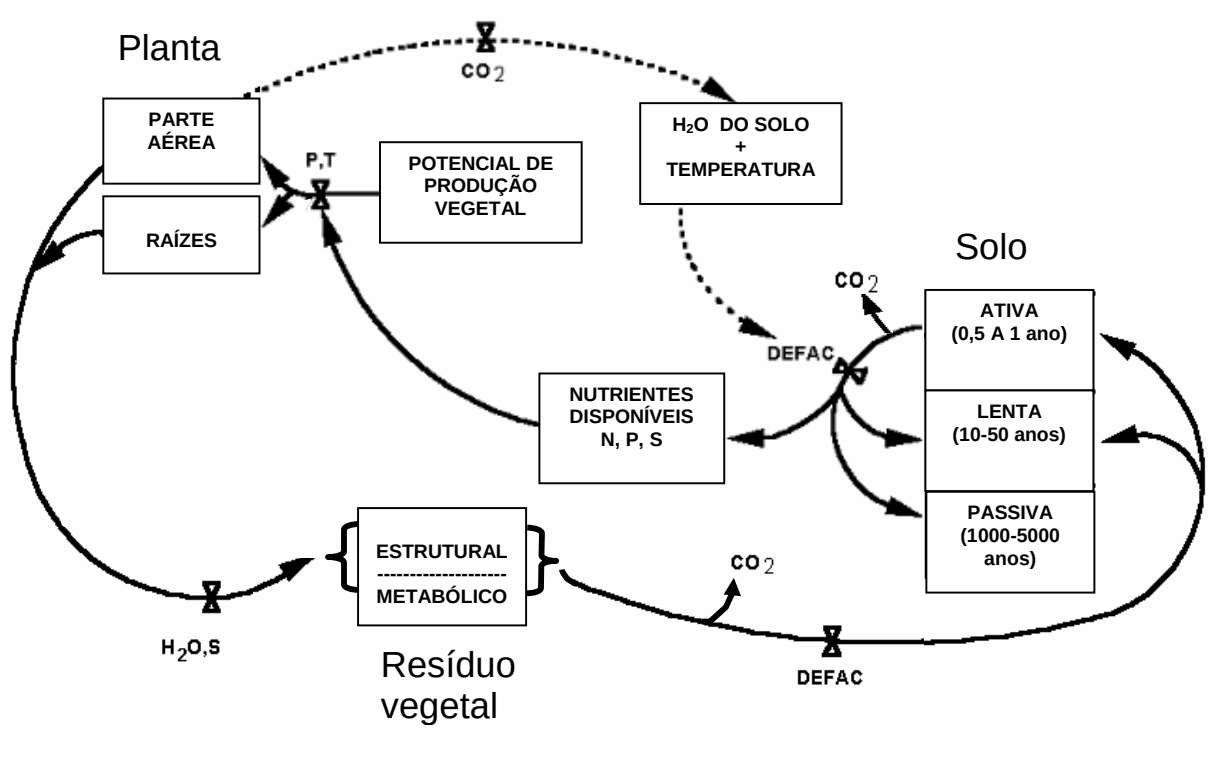

Figura 1 - Diagrama com fluxos entre compartimentos do modelo CENTURY. P= Precipitação; T= Temperatura; DEFAC = fator de decomposição. Adaptado de Metherell et al. (1993)

3.2.1.3 Decomposição da liteira no modelo CENTURY

A massa inicial da liteira é um dos fatores que influencia sua taxa de decomposição. O fator de decomposição (k) diminui significativamente com o aumento da massa da liteira em experimentos de decomposição de resíduos vegetais (DOUGLAS et al., 1980, STOTT et al., 1990, DAHIYA et al., 2001).

O modelo conceitual de dois compartimentos da liteira foi adotado para as simulações (Figura 2). A parte dos resíduos em maior contato com o solo é decomposta mais rapidamente, por várias razões: maior contato com os microrganismos do solo; possibilidade das hifas dos fungos decompositores de absorver nitrogênio do solo; maior disponibilidade de água na parte inferior da palhada. O conceito de dois compartimentos na liteira também faz parte de outros modelos de ciclagem de nutrientes, como o APSIM (THORBURN, 2001), o EXPERT-N (PRIESACK et al., 2006), e o $PASTIS_{mulch}$.(FINDELING et al., 2007).

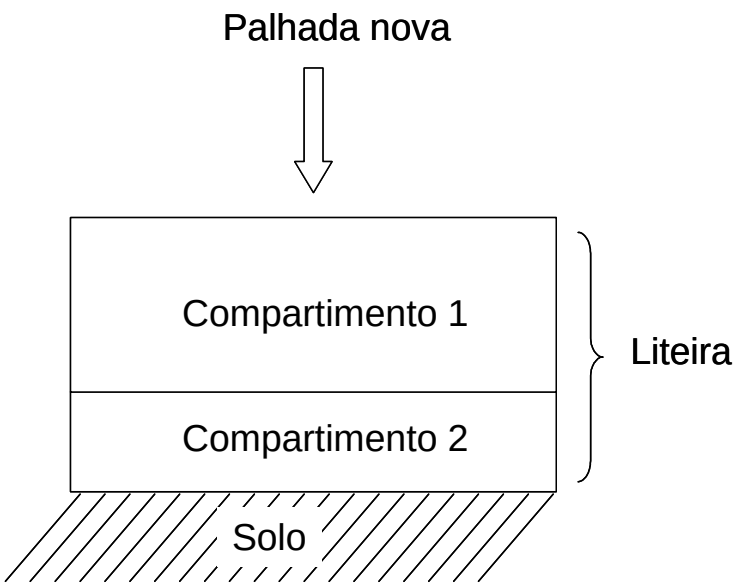

Figura 2 - Diagrama do modelo conceitual da subdivisão da liteira em dois compartimentos. O compartimento 1 é onde ocorre a deposição de palhada nova. O compartimento 2 é a camada mais próxima do solo, mais prontamente disponível para decomposição

As situações simuladas neste trabalho são experimentos de campo com decomposição de liteira, com medições iniciais seguidas por 3 a 11 coletas de palhada no período de um ano após a colheita. No modelo CENTURY, a deposição de palhada foi simulada por meio da função OMAD (Organic Matter Addition). Os parâmetros de entrada para OMAD são gramas de carbono por metro quadrado, teor de lignina, e relação C:N. No modelo CENTURY, os resíduos vegetais da parte aérea e das raízes são divididos em compartimentos estrutural e metabólico, em função da relação lignina: N. Quanto maior esta relação, maior a alocação para o compartimento estrutural, que tem taxa de decomposição menor do que o compartimento metabólico.

A composição da palhada de cana-de-açúcar foi descrita em vários experimentos de decomposição de liteira (Tabela 2). Para as simulações realizadas neste trabalho, fixou-se o teor de carbono em 44%, a relação C:N em 110 e o teor de lignina em 6.5%.

Tabela 2 - Teor de carbono, relação C:N e teor de lignina da palhada de cana-de-açúcar. O teor de lignina foi determinado por detergente ácido. n.d. = não disponível

Carbono %	Relação C:N	Lignina %	Fonte
38,8	86	n.d.	Ball Coelho et al. (1993)
45	97	7,5	Oliveira et al. (1999)
39-45	94	4,4	Oliveira et al. (1999b)
n.d.	72	n.d.	Caldeira (2002)
43	139	7,3	Campos (2003)
44,4	171	2,7	Spain e Hodgen(1994)
44,1-45	80-117	n.d.	Robertson (2003)

Um a vez que as condições climáticas têm influência direta na decomposição da palhada, utilizou-se os registros de precipitação mensal e de temperatura media máxima e mínima mensais para os períodos de estudo em cada experimento simulado (Figura 3). O ponto inicial de cada gráfico corresponde ao mês de colheita, no qual a palhada é depositada sobre o solo. O regime de precipitação varia bastante entre as áreas, com chuvas bem distribuídas e de baixo volume em Harwood, altos volumes de precipitação em Tully e estações seca e úmida bem definidas em Goiana e Pradópolis.

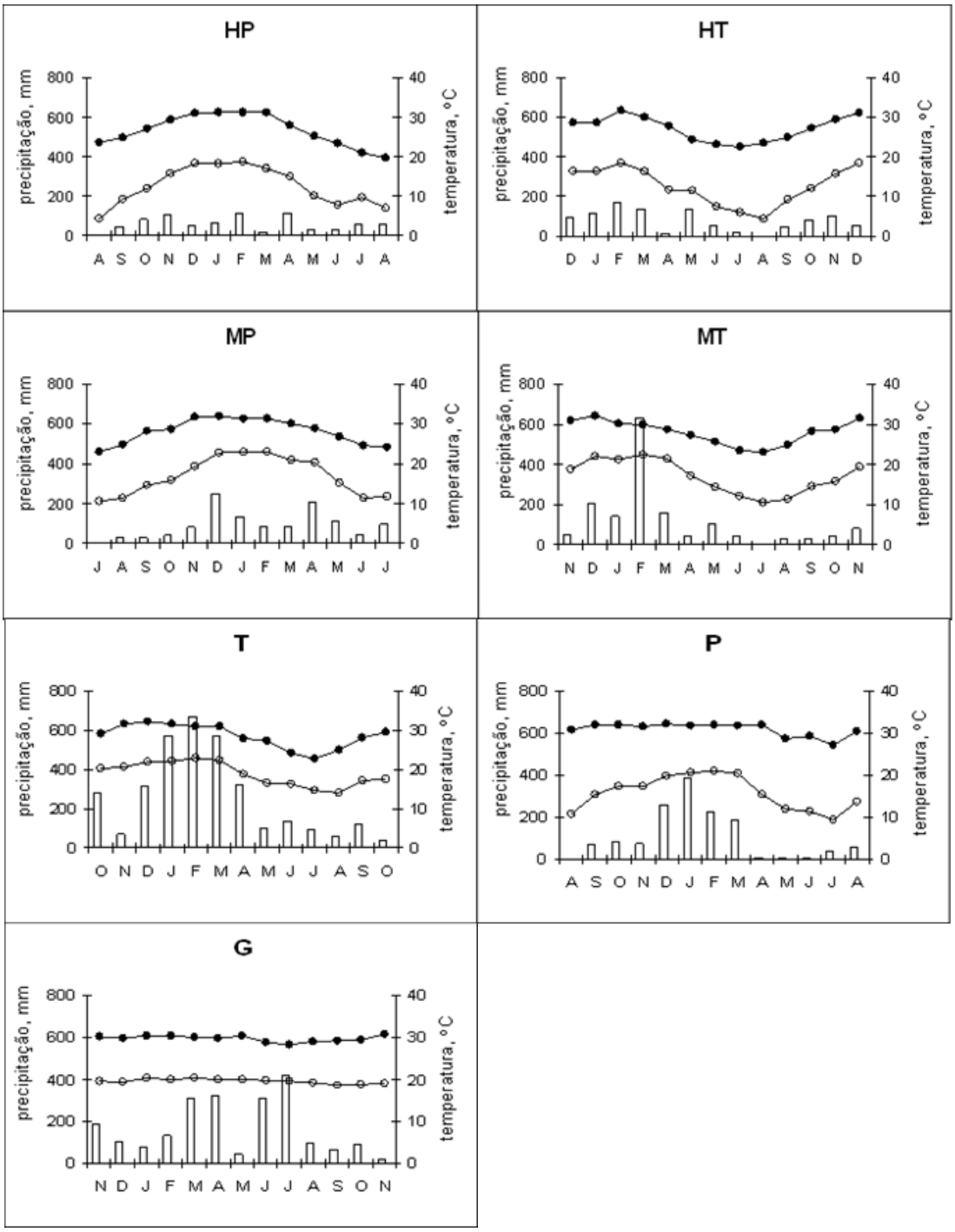

Figura 3 - Precipitação mensal em mm (barras verticais), temperatura mínima media mensal (○) e temperatura máxima média mensal (●) em °C nos 12 primeiros meses após a colheita para cada experimento: Harwood – colheita precoce (HP), Harwood – colheita tardia (HT), Mackay - colheita precoce (MP), Mackay - colheita tardia (MT), Tully (T), Pradópolis (P), e Goiana (G)

3.2.2 Resultados

3.2.2.1 Otimização do compartimento mais próximo da superfície do solo

O parâmetro do modelo CENTURY que representa a massa de liteira que esta mais vulnerável a decomposição é o *strawmax*. O valor padrão de 5.000 g C m^{-2} é alto, considerando-se o aporte médio de palhada de 4.400 a 8.800 g C m^{-2} a cada colheita. O valor de 5000 g C m^{-2} para limite de decomposição equivale a considerar que 60-100% da palhada seria uniformemente decomposta imediatamente após o aporte de resíduos sobre o solo. Portanto, foram testados limites para o compartimento mais próximo do solo mais coerentes com as observações de campo. Os valores testados para cana-de-açúcar foram de 50 a 120 g C m^{-2}, faixa que abrange resultados de experimentos na literatura, alem do valor padrão de 5.000 g C m^{-2} (Tabela 3). Uma vez que o modelo CENTURY funciona com uma escala mensal de tempo, e os valores medidos foram coletados em intervalos irregulares, os valores simulados foram interpolados usando uma função linear, para obter estimativas diárias, para melhor comparação entre valores medidos e simulados. Em todos os experimentos, a mudança de um *strawmax* alto, de 5.000 g C m^{-2}, para valores na faixa de 50 -120 g C m^{-2} proporcionou um melhor ajuste entre valores medidos e simulados, o que foi evidenciado pelos menores valores da raiz quadrada do erro médio (RMSE). Ao considerar todos os experimentos, o *strawmax* de 110 g C m^{-2} (2,5 Mg ha^{-1} de matéria seca de palhada) proporcionou o menor RMSE. Este valor corresponde a 12,5 a 25% do aporte de palhada por ocasião da colheita. Este valor foi, portanto, fixado para as simulações realizadas com os dados de cada experimento.

Tabela 3 - Número de amostragens (n) após a amostragem inicial, e raiz quadrada do erro médio (RMSE) usando diferentes valores de strawmax (g C m^{-2}) para cada experimento, e com dados de todos os experimentos

Experimento		**RMSE**								
		Strawmax (g C m^{-2})								
	n	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	**100**	**110**	**120**	**5.000**
Harwood (Precoce)	9	68,58	51,34	36,88	25,33	18,60	18,48	22,38	27,34	67,67
Harwood (Tardia)	9	86,15	67,46	51,10	37,59	28,04	24,44	28,00	35,04	91,13
Mackay (Precoce)	9	71,52	53,88	38,88	26,09	16,75	13,66	16,61	21,69	68,77
Mackay (Tardia)	11	166,78	141,82	119,14	98,71	80,43	64,16	49,88	37,99	80,99
Tully	8	59,71	43,25	32,96	29,59	31,25	35,07	39,32	43,16	62,74
Pradópolis	4	139,33	109,86	82,63	57,97	36,62	21,72	22,22	34,59	186,78
Goiana	3	80,75	56,22	35,83	24,21	28,24	41,18	55,83	70,33	186,40
TODOS	53	105,23	85,20	68,04	53,91	43,32	36,91	35,05	36,96	97,70

3.2.2.2 Correlação entre valores medidos e simulados da palhada de cana-de-açúcar

A correlação entre os valores medidos e simulados de todos os experimentos foi melhor com o *strawmax* otimizado do que com o parâmetro original de *strawmax* (Figura 4).

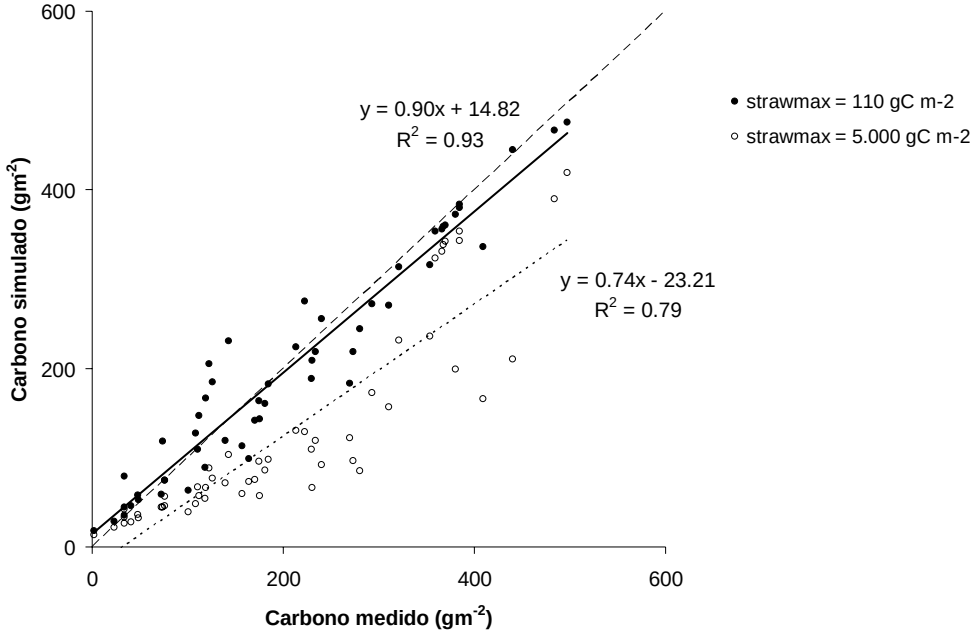

Figura 1 - Correlação entre valores de carbono da palhada medidos e simulados utilizando o valor original, 5.000 g C m^{-2} (○), e o valor otimizado 110 g C m^{-2} (●) de *strawmax* para os dados de todos os experimentos. Linhas de regressão: 1:1 (tracejada), *strawmax* original (pontilhada) e *strawmax* otimizado (sólida)

3.2.2.3 Decomposição em função do tempo

Os valores medidos e simulados de carbono da palhada obtidos nos primeiros 12 meses após a colheita são mostrados na Figura 4. O valor de 110 g C m^{-2} para *strawmax* foi usado para todos os experimentos e comparado ao valor anteriormente usado no CENTURY, de 5.000 g C m^{-2}. A simulação levando em conta o modelo conceitual de dois compartimentos, com o limite do compartimento 1 otimizado, possibilitou um melhor resultado de ajuste entre valores medidos e simulados. A tendência geral foi de subestimação da palhada quando strawmax foi 5.000 g C m^{-2} ao longo do período estudado. No entanto, os valores simulados da palhada remanescente após 12 meses, tanto nas simulações com parâmetro otimizado quanto não otimizado foram próximos aos valores medidos. A quantidade remanescente de palhada cerca de doze meses após a colheita foi, em média, de 22% da quantidade inicial.

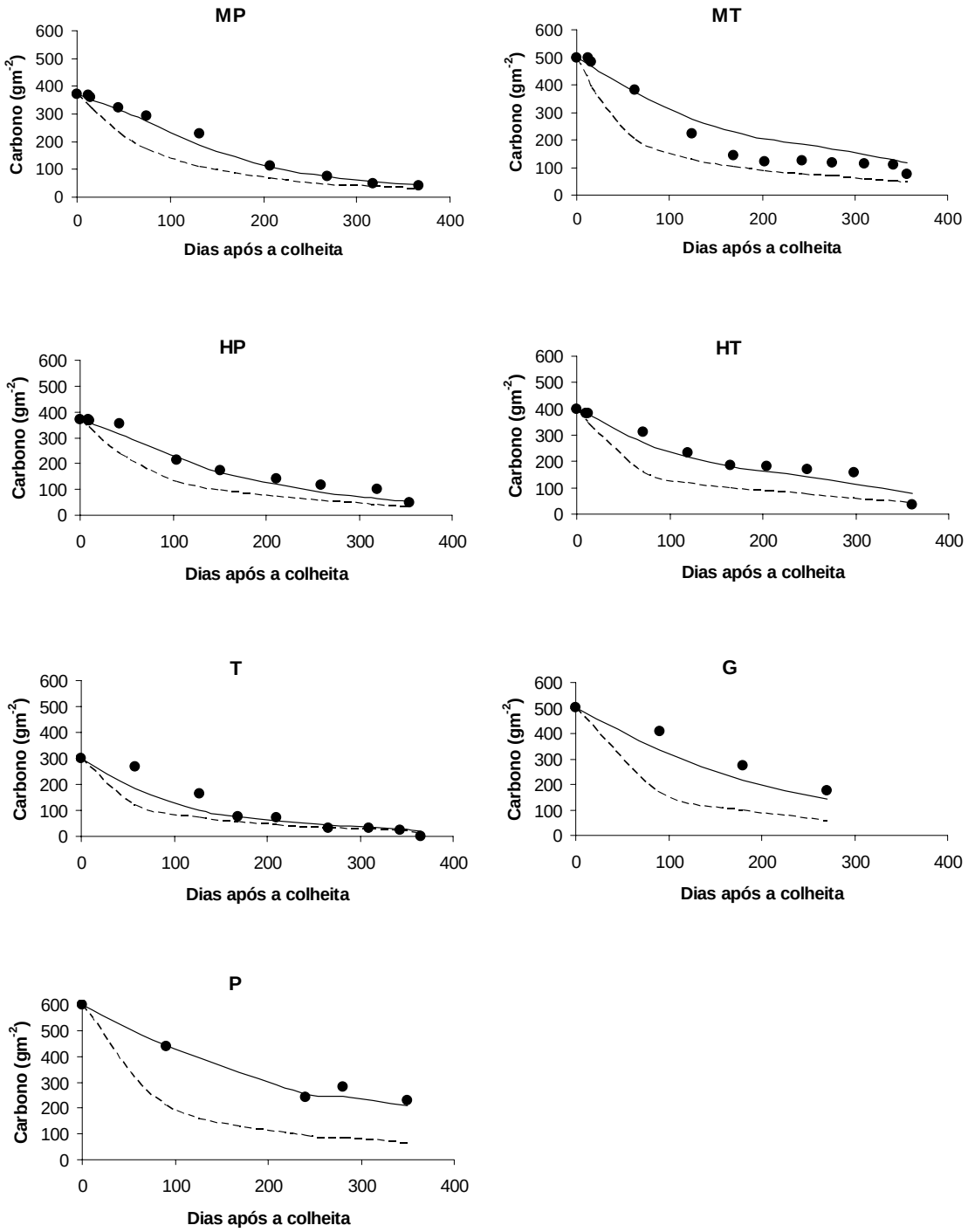

Figura 4 - Palhada de cana-de-açúcar em função do número de dias após a colheita, com valores medidos (■) e simulados usando o valor original de strawmax, 5.000 g C m-2 (linhas tracejadas) e o valor otimizado de *strawmax*, 110 g C m^{-2} (linhas contínuas), para os experimentos em Harwood – colheita precoce (HP), Harwood – colheita tardia (HT), Mackay - colheita precoce (MP), Mackay - colheita tardia (MT), Tully (T), Pradópolis (P), e Goiana (G)

3.2.3 Discussão

Ao definir-se uma camada da palhada mais próxima do solo com maior taxa de decomposição, os resultados das simulações foram mais próximos aos valores medidos. Thorburn (2001) descreve a otimização do modulo de resíduos vegetais do modelo APSIM. Nas simulações iniciais, usando parâmetros padrão, houve a tendência de superestimar a decomposição da palhada. Quando a massa de palhada mais próxima do solo foi definida por meio de testes de sensibilidade, e a decomposição foi limitada a esta camada, a correlação entre valores medidos e simulados melhorou significativamente, de um R^2 de 0,79 para um R^2 de 0,93.

A massa de palhada de cana-de-açúcar remanescente 12 meses após a colheita nas simulações foi similar quando houve a otimização do parâmetro strawmax e quando não houve. A média dos valores medidos de palhada remanescente, 22%, coerente com valores citados por Spain e Hodgen (1994), de 19%. Portanto, o maior benefício da otimização do parâmetro de strawmax foi uma descrição mais acurada da dinâmica temporal da decomposição da palhada ao longo de 12 meses após a colheita.

Uma correta simulação da dinâmica temporal da quantidade de palhada sobre o solo tem importância no estudo dos efeitos da palhada na dinâmica de nutrientes e de água, e seus efeitos na produção vegetal. Um dos maiores benefícios da manutenção da palhada, principalmente em regiões com déficit hídrico, é a maior retenção de umidade do solo, o que pode afetar significativamente a produção vegetal (BALL-COELHO, 1992, RESENDE et al., 2006). A dinâmica do nitrogênio na palhada, também é afetada pela massa presente ao longo do ano. A decomposição da palhada tem relevância em diversos processos, como a volatilização de N aplicado sobre a palhada na forma de adubo, a lixiviação de N liberado da palhada, a absorção de N pela planta e a imobilização de N pela microbiota decompositora (BASANTA et al., 2003).

3.3 Conclusões

Nas simulações com o modelo CENTURY, o modelo conceitual de dois compartimentos foi mais apropriado do que o de um compartimento para descrever a dinâmica da decomposição da palhada da cana-de-açúcar em áreas do Brasil e da Austrália.

A massa de 110 g C m^{-2}, que corresponde a aproximadamente 2,5 Mg ha^{-1} de material seca de palhada, foi o valor otimizado para as áreas estudadas, correspondente à massa de palhada imediatamente disponível para decomposição.

Com as modificações feitas no submodelo de palhada, o modelo CENTURY foi uma ferramenta eficaz na simulação da decomposição da palhada de cana-de-açúcar no período de até doze meses após a colheita.

Referências

ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C; NOGUEIRA, M.C.S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Scientia Agricola,** Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 653-659, 2000.

BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugarcane. **Plant and Soil,** Dordrecht, v. 142, p. 297-305, 1992.

BALL-COELHO, B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Residue management effects on sugarcane yield and soil properties in northeastern Brazil. **Agronomy Journal,** Madison, v. 85, p. 1004-1008, 1993.

BASANTA, M.V.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDTB, K.; BACCHIB, O.O.S.; OLIVEIRA, J.C.M.; TRIVELIN, P.C.O.; TIMM, L.C.; TOMINAGA, T.T.; CORRECHEL, V.; CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; MACEDO, L.F. Management effects on nitrogen recovery in a sugarcane crop grown in Brazil. **Geoderma,** Amsterdam, v. 116, p. 235–248, 2003.

CALDEIRA, D.S.A. **Palhada residual de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) colhida mecanicamente (sem queima prévia):** manejo, fertilização, influência no perfilhamento e produtividade da cultura**.** 2002. 94 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2002.

CAMPOS, D.C. de. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o seqüestro de carbono.** 2003. 103 p. Tese (Doutorando em Agronomia - Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CEDDIA, M.B.; ANJOS, L.H.C. dos; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L.A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo podzólico amarelo no Estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 34, p. 1467-1473, 1999.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; FELLER, C.; CAMPOS, D. C.; DE LUCA, E. F.; ESCHENBRENNER, V. **Canne à sucre et sequestration du carbone**. Paris: Académie d'Agriculture de France, Séance du 17 mars, 2004. 15 p.

CERRI, C.E.P.; PAUSTIAN, K.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.L.; MELILLO, J.M.; CERRI, C.C. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the CENTURY model. **Global Change Biology,** Oxford, v. 10, p. 815-832, 2004.

COLE, C.V.; STEWART, J.W.B.; OJIMA, D.S.; PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S. Modeling land use effects of soil organic matter dynamics in the North American Great Plains. In: CLARHOLM, M.; BERGSTROM, L. (Ed.). **Ecology of arable land** Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1989. p. 89-98.

DAHIJA, R.; MALIK, R.S.; JHORAR, B.S.; DAHIJA, J.B. Organic mulch decomposition kinetics in semiarid environment at bare and crop field conditions. **Arid Land Research and Management,** Basingstoke, v. 15, p. 49-60, 2001.

DOUGLAS, C.L. Jr.; ALLMARAS, R.R.; RASMUSSEN, P.E.; RAMING, R.E.; ROAGER, N.C. Jr. Wheat straw composition and placement effects on decomposition in dryland agriculture of the Pacific Northwest. **Soil Science Society of América Journal,** Madison, v. 44, p. 833-837, 1980.

DOURADO-NETO, D.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M. State-space approach for the analysis of soil water content and temperature in a sugarcane crop. **Scientia Agricola,** Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1215-1221, 1999. Suplemento.

FINDELING, A.; GARNIER, P.; COPPENS, F.; LAFOLIE, F.; RECOUS, S. Modelling water, carbon and nitrogen dynamics in soil covered with decomposing mulch. **European Journal of Soil Science,** Oxford**,** v. 58, n. 1, p. 196-206, 2007.

GARNIER, P.; NEEL, C.; AITA, C.; RECOUS, S.; LAFOLIE, F.; MARY, B. Modelling carbon and nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation. **European Journal of Soil Science,** Oxford, v. 54, p. 555–568, Sept. 2003.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science,** Washington**,** v. 315, p. 808-810, 2007.

GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; VAN ANTWERPEN, R. Size and activity of the soil microbial biomass in the row and inter-row of a sugarcane field under burning and green cane harvesting. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association,** Mount Edgecombe, v. 76, p. 186-195, 2002.

LEITE, L.F.C.; SA MENDONCA, E. de; MACHADO, P.L.O.A.; FERNANDES FILHO, E.I.; NEVES, J.C.L. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the Century model. **Geoderma,** Amsterdam, v. 120, p. 283-295, 2004.

MA, L.; PETERSON, G.A.; AHUJA, L.R.; SHERROD, L.; SHAFFER, M.J.; ROJAS, K.W. Decomposition of surface crop residues in long-term studies of dryland agroecosystems. **Agronomy Journal,** Madison, v. 91, p. 401-409, 1999.

MACEDO, I. de C. Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996). **Biomass and Bioenergy,** Oxford, v. 14, n. 1, p. 77-81, 1998.

MARRIS, E. Sugar cane and ethanol: Drink the best and drive the rest. **Nature**, London, v. 444, p. 670-672, dec 2006.

MEIER, E.A.; THORBURN, P.J.; WEGENER, M.K.; BASFORD, K.E. The availability of nitrogen from sugarcane trash on contrasting soils in the wet tropics of North Quensland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems,** Dordrecht, v. 75, p. 101-114, 2006.

METHERELL, A.K.; HARDING, L.A.; COLE, C.E.; PARTON, W.J. CENTURY soil organic matter model: agroecosystem version 4.0. Fort Collins: Colorado State University, 1993. v.1. (GPSR. Technical Report, 4).

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; PENATTI, C.P. Degradação da palhada de cana-de-açúcar. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 56, p. 803-809, 1999.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; PENATTI, C.P.; PICOLLO, M.C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 34, p. 2359-2362, 1999.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. **Soil Science Society of América Journal**, Madison, v. 51, p. 1173-1179, 1987.

PARTON, W.J.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Dynamics of C, N, P, and S in grassland soils: a model. **Biogeochemistry,** Dordrecht, v. 5, p. 109-131, 1988.

PARTON, W.J.; OJIMA, D.S.; COLE, C.V.; SCHIMEL, D.S. A general model for soil organic matter dynamics: sensitivity to litter chemistry, texture and management. In: BRYANT, R.B.; ARNOLD, R.W. (Ed.) **Quantitative modeling of soil farming processes**, Madison: Soil Science Society of América, 1994. (SSSA Special Publication, 39) p.147-167.

PRIESACK, E.; GAYLER, S.; HARTMANN, H.P. The impact of crop growth sub-model choice on simulated water and nitrogen balances. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 75, p. 1-13, July 2006.

RESENDE, A.S.; XAVIER, R.P.; OLIVEIRA, O.C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.JR.; BODDEY, R.M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. **Plant and Soil,** Dordrecht, v. 281, p. 339-351, 2006.

ROBERTSON, F. **Sugarcane trash management: consequences for soil carbon and nitrogen** - Final report of the project Nutrient Cycling in Relation to Trash Management. Townville: CRC for Sustainable Sugar Production, 2003. 39 p.

SAMPIETRO, D.A., VATTUONE, M.A., ISLA, M.I. Plant growth inhibitors isolated from sugarcane (*Saccharum,* Piracicaba *officinarum*) straw. **Journal of Plant Physiology**, Jena, v. 163, p. 837-846, 2006.

SANFORD, R.L.J.; PARTON, W.J.; OJIMA, D.S.; LODGE, D.J. Hurricane effects on soil organic matter dynamics and forest production in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico: results of the simulation modeling. **Biotropica**, New Orleans, v. 23, p. 364-372, 1991.

SPAIN, A.V.; HODGEN, M.J. Changes in the decomposition of sugarcane harvest residues during the decomposition as a surface mulch. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 17, p. 225-231, 1994.

STOTT, D.E.; STROO, H.F.; ELLIOTT, L.F.; PAPENDICK, R.I.; UNGER, P.W. Wheat residue loss from fields under no-till management. **Soil Science Society of América Journal,** Madison, v. 54, p. 92-98, 1990.

THORBURN, P.J.; PROBERT, M.E.; ROBERTSON, F.A. Modelling decomposition of sugar cane surface residues with APSIM-Residue. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 70, p. 223-232, 2001.

TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; TIMM, L.C. Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane field. **Australian Journal of Soil Research,** Collingwood, v. 40, p. 605-614, 2002.

TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W.; GAVA, G.J.C.; SARRIES, G.A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 26, n. 3, p. 636-646, 2002.

UNICA, 2006 Disponível em <http://www.portalunica.com.br/portalunicaenglish/?Secão=statistics> Acesso em 04 abril 2007.

VIATOR, R.P.; JOHNSON, R.M.; GRIMM, C.C.; RICHARD Jr., E.P. Allelopathic, autotoxic, and hormetic effects of postharvest sugarcane residue. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 1526-1531, 2006.

YADAV, R. L.; PRASAD, S. R.; SINGH, R; SRIVASTAVA, V. K. Recycling sugarcane trash to conserve soil organic carbon for sustaining yields of successive ratoon crops in sugarcane. **Bioresource Technology**, Essex, v. 49, p. 231-235, 1994.

WOOD, A.W. Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in north Queensland. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 69-85, 1991.

SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO CARBONO DO SOLO EM CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO O MODELO CENTURY

Resumo

Atualmente, há uma tendência para a expansão da área plantada com cana-de-açúcar devido ao aumento da demanda mundial por biocombustíveis, por razoes econômicas, ambientais e geopolíticas. Apesar de a cana-de-açúcar ser tradicionalmente colhida com queima da palhada, o chamado sistema de "cana crua", sem queima e com a manutenção da palhada sobre o solo tem sido progressivamente adotado. O acumulo e decomposição de palhada é controlado principalmente por fatores bióticos, ambientais e da qualidade dos resíduos em complexas interações, tornando a modelagem uma ferramenta útil no estudo destes processos. A abordagem utilizada neste trabalho foi a de parametrizar o modelo CENTURY para a cultura da cana-de-açúcar por meio de dados de literatura, simular a dinâmica temporal da produção de colmos e do carbono do solo, validando o modelo por meio de dados de experimentos, e fazer predições em longo prazo da dinâmica do carbono do solo. O enfoque principal do estudo foi a comparação entre os manejos com e sem queima da palhada para a colheita, mas o efeito na dinâmica do carbono do solo.da adubação mineral e da aplicação de resíduos orgânicos também foi avaliado. As simulações foram realizadas com dados de experimentos com diversas durações, de 12 meses a 60 anos, em Goiana, e Timbaúba, Pernambuco, Brasil; Pradópolis, São Paulo, Brasil; e Mount Edgecombe, Kwazulu-Natal, África do Sul. O modelo CENTURY foi capaz de simular de forma satisfatória a dinâmica temporal do carbono do dos colmos (R^2=0,76) e do solo (R^2 =0,89). As predições realizadas a partir dos dados dos experimentos de campo revelam que a há, em longo prazo, uma tendência de maiores estoques de carbono no manejo sem queima da palhada. Este acréscimo no estoque é condicionado por fatores como condições climáticas, textura do solo, tempo de implantação do sistema sem queima e manejo da adubação nitrogenada.

Palavras-chave: Modelagem; Estoque de carbono; Manejo de cana crua; Cana sem queima; Palhada

SIMULATION OF SOIL CARBON DYNAMICS UNDER SUGARCANE WITH THE CENTURY MODEL

Abstract

There is currently a trend for the expansion of the area cropped with sugarcane, driven by an increase in the world demand for biofuels, due to economical, environmental and geopolitical issues. Although sugarcane is traditionally harvested by burning dried leaves and tops, the so called green cane management, with unburned, mechanized harvest, has been progressively adopted. The accumulation and decomposition of plant litter is mainly controlled the complex interaction between biological, environmental and residue quality factors, making modeling an important tool for understanding there processes. The approach taken in this work was to parameterize the CENTURY model for the sugarcane crop using literature data, to simulate the

temporal dynamics of stalk production and soil carbon, validating the model through field experiment data, and finally to make predictions in the long term regarding soil carbon dynamics. The main focus of this work was the comparison between the burned and unburned litter management systems, but the effect on soil carbon stocks of mineral fertilizer and organic residue applications were also evaluated. The simulations were performed with data from experiments with different durations, from 12 months to 60 years, in Goiana and Timbauba, Pernambuco, Brazil; Pradopolis, Brazil; and Mount Edgecombe, Kwazulu-Natal, South Africa. It was possible to simulate the temporal dynamics of stalks (R^2=0.76) and soil carbon (R^2 =0.89). The predictions made with the model using the field experiment data reveal the there is, in the long term, a trend for higher soil carbon stocks, with the unburned management. This increase is conditioned by factors such as climate, soil texture, time of adoption of the unburned system, and nitrogen fertilizer management.

Keywords: Modeling; Carbon stock; Green cane management; Unburned sugarcane; Litter

4.1 Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), gramínea originária da Nova Guiné, foi uma das primeiras culturas a serem adaptadas ao cultivo em larga escala (BRANDES, 1956). A cana-de-açúcar e uma planta C4, com alta eficiência na conversão de radiação solar em biomassa. A cana é cultivada comercialmente em mais de 70 países, onde são colhidos anualmente quase 20 milhões de hectares, principalmente nas regiões situadas entre as latitudes 35°N e 35°S (NICKELL, 1977, FAOSTAT, 2007). Os maiores produtores são o Brasil, a Índia e a China, com 33, 18 e 7% da produção mundial em 2005, respectivamente (FAOSTAT, 2007). Alem da produção de açúcar, a cana e utilizada na produção de etanol, uma promissora fonte de energia alternativa em paises com disponibilidade de recursos de produção agrícola como terra agriculturável e água (GOLDENBERG, 2007). Atualmente, há uma tendência para a expansão da área plantada com cana-de-açúcar devido ao aumento da demanda mundial por biocombustíveis, por razoes econômicas, ambientais e geopolíticas.

A queima das folhas e ponteiros secos para facilitar a colheita da cana-de-açúcar é uma pratica comum, representando 11% dos resíduos vegetais queimados anualmente no mundo (IPCC, 1995). A queima acarreta em emissões de gases como CO_2, CH_4 e N_2O, principais responsáveis pelo efeito estufa. Esta prática também libera fuligem, que causa incômodo e possível dano à saúde das populações circunvizinhas a lavoura (CANÇADO, 2006). Aspectos legais, econômicos e ambientais têm proporcionado um crescimento no Brasil do sistema

chamado de “cana crua”. Neste sistema, a cana-de-açúcar é colhida sem queima e a palhada é deixada sobre o solo após a colheita, criando uma camada de resíduo vegetal de alta relação C/N, que pode acarretar em mudanças na brotação, perfilhamento e crescimento da cana-de-açúcar (BALL-COELHO, 1993, ALVAREZ et al., 2000), dinâmica do nitrogênio do solo (WOOD, 1991, TRIVELIN et al., 2002, BASANTA et al., 2003, e GAVA et al., 2005), erosão hídrica (CEDDIA et al. 1999), temperatura e umidade do solo (WOOD, 1991, TOMINAGA et al., 2002), densidade do solo (TOMINAGA et al., 2002) e estabilidade de agregados (GRAHAM et al., 2002).

Diversos estudos têm indicado a tendência de aumento do potencial de seqüestro de carbono no solo no sistema sem queima. Este aumento é condicionado por fatores como condições climáticas (ROBERTSON, 2001), textura do solo (SILVER et al., 2000), tempo de implantação do sistema sem queima e manejo da adubação nitrogenada (GRAHAM et al., 2002). Parte do carbono estocado por meio do manejo sem queima pode ser perdida durante a reforma do canavial (que geralmente ocorre a cada seis anos), quando o solo é preparado para o plantio do próximo ciclo por meio de aração, gradagem e subsolagem (RESENDE et al., 2006). A correlação positiva entre o grau de distúrbio do solo por praticas de cultivo e o aumento da mineralização do carbono do solo tem sido confirmada em diversos estudos. A destruição de agregados pelo cultivo do solo expõe material orgânico à ação dos microorganismos decompositores (PAUSTIAN et al., 1997, SIX et al., 2002). Além disso, o preparo do solo na reforma do canavial, quando há pouca cobertura vegetativa, pode causar perdas significativas de solo, e conseqüentemente, de matéria orgânica (SPAROVEK; SCHNUG, 2001).

A modelagem pode ser uma importante ferramenta na simulação da dinâmica de nutrientes em sistemas agrícolas. Utilizando modelos, é possível estudar o efeito em longo prazo de diferentes praticas de adubação e preparo do solo, alem do manejo dos resíduos agrícolas, na dinâmica de nutrientes no solo, na planta e na atmosfera. Dentre os diversos modelos de dinâmica de nutrientes disponíveis, o modelo CENTURY (PARTON et al., 1987) se destaca por sua flexibilidade e robustez. Utilizando dados de experimentos de longo prazo sob diferentes manejos (floresta, pastagens e culturas anuais) em diferentes condições climáticas, Smith et al. (1997) compararam nove modelos de simulação da matéria orgânica do solo: Candy, CENTURY, Daisy, DNDC, ITE, NCSOIL, RothC, SOMM e Verbene. Os autores concluíram que o modelo CENTURY simulou corretamente a dinâmica da matéria orgânica em todas as condições

estudadas. O modelo CENTURY foi inicialmente desenvolvido para similar a dinâmica da matéria orgânica no sistema solo-planta em áreas de pradarias da América do Norte (COLE et al., 1989, PARTON et al., 1987, 1988), mas tem sido utilizado em áreas de pastagens, culturas anuais e perenes, e florestas em varias regiões do mundo (SANFORD et al., 1991, MOTOVALLI et al., 1995, CERRI et al., 2004b).

O objetivo deste trabalho é usar o modelo CENTURY para estudar o efeito da manutenção da palhada de cana-de-açúcar na dinâmica temporal do carbono do solo. A abordagem utilizada neste trabalho foi a de parametrizar o modelo CENTURY para a cultura da cana-de-açúcar por meio de dados de literatura, simular a dinâmica temporal da produção de colmos e do carbono do solo, validando o modelo por meio de dados de experimentos, e finalmente fazer predições da dinâmica do carbono do solo em longo prazo. O enfoque principal do estudo foi a comparação entre os manejos com e sem queima da palhada para a colheita, mas o efeito na dinâmica do carbono do solo.da adubação mineral e da aplicação de resíduos orgânicos também foi avaliado.

4.2 Desenvolvimento

4.2.1 Material e métodos

4.2.1.1 Experimentos de campo

Foram simulados dados de experimentos com diferentes durações, de 12 meses a 60 anos, em diferentes condições climáticas, de solo, de adubação e de aporte de material orgânico. Segue uma breve descrição de cada experimento simulado neste trabalho.

Experimento em Goiana

O experimento em Goiana foi descrito por Ball-Coelho et al. (1993). A área de estudo esta localizada na Usina Maravilhas, no município de Goiana, situado na Zona da Mata de Pernambuco (7°30’S e 35°00’O). A precipitação anual é de 1716 mm, e a temperatura media anual é de 24,8 ^{o}C. O solo foi classificado como Podzólico Vermelho Amarelo latossólico

(atualmente Argissolo Vermelho Amarelo), com 860 g kg^{-1} de areia, 80 g kg^{-1} de argila, densidade aparente de 1,41 g cm^{-3} e pH em água de 4,5. O experimento foi implantado com o plantio da cana em 1985 em uma área com histórico de longo prazo de cultivo da cultura. O delineamento experimental foi o de blocos inteiramente casualizados, com dois tratamentos (com queima e sem queima) e três repetições. A cana planta foi colhida sem queima 15 meses após o plantio, depositando-se a palhada sobre o solo. A cana soca foi colhida 12 meses após a brotação. A adubação de plantio foi 63 kg N ha^{-1} na forma de NH_4SO_4, 120 kg K ha^{-1} como KCl e 65 kg P ha^{-1} como superfostato. Os colmos, ponteiros e folhas foram pesados e analisados para determinação de matéria seca e teor de carbono. As amostras de solo foram coletadas em três ocasiões, em 1, 6 e 12 meses após a brotação da cana soca. As profundidades de amostragem foram 0-7,5, 7,5-15 e 15-30 cm. Uma vez que o modelo CENTURY considera a profundidade de 0-20 cm nas simulações, foi feita uma media ponderada para os valores de carbono do solo medidos. A determinação de carbono do solo foi feita por combustão seca.

Experimento em Timbaúba

O experimento foi instalado na Usina Cruangi em Timbaúba, Pernambuco (08º02' S, 35º55'O) e foi descrito por Resende et al. (2006). A usina esta situada na zona de transição entre a Mata Atlântica e o Agreste, numa área com alta variabilidade nos padrões de precipitação. A precipitação media anual é de 1261 mm e a temperatura media anual e de 24,3 ^{o}C. O solo é classificado como Luvissolo Crômico Órtico, com 200 g kg^{-1} de areia, 550 g kg^{-1} de argila, densidade aparente de 1,38 g cm^{-3} e pH em água de 6,6. O delineamento experimental foi um fatorial 2x2x2, com os seguintes tratamentos: com e sem queima da palhada, com e sem aplicação de adubo nitrogenado e com e sem aplicação de vinhaça. O espaçamento entre as linhas de plantio foi de 1,25 m. A área havia sido cultivada com cana-de-açúcar por pelo menos 150 anos antes do inicio do experimento. Nos tratamentos com aplicação de nitrogênio, aplicou-se 80 kg N ha^{-1} na forma de uréia. A adubação de plantio foi de 80 kg K ha^{-1} como KCl, 74 kg P ha^{-1} como superfosfato e 50 kg ha^{-1} de "fritted trace elements" (FTE). A cana soca foi adubada com KCl na dose de 80 kg K ha^{-1}.

Experimento em Pradópolis

Este estudo foi descrito no capítulo 2 desta tese. A área estudada pertence à Usina São Martinho, localizada em Pradópolis, São Paulo (21°22' S, 48°03' O). A vegetação nativa da área é classificada como Mata Atlântica Ombrófila Semidecídua. A precipitação media anual é de 1,560 mm, e a temperatura media anual é de 22,9^{o}C. O solo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico, com 145 g kg^{-1} de areia, 693 g kg^{-1} de argila, densidade aparente de 1,12 g cm^{-3} e pH em água de 5,7. A estratégia utilizada para se estudar a dinâmica temporal do carbono no solo foi a de cronossequência, que consiste de áreas sob condições similares de solo, clima, topografia, variando o tempo de cultivo da cana sob uma dada pratica de manejo. Para cada manejo da palhada da cana (com e sem queima), foram coletadas amostras de solo em talhões com 2, 4, 6 e 8 anos após a reforma e plantio do canavial. O histórico anterior de todas os talhões foi cultivo contínuo de cana-de-açúcar por aproximadamente 50 anos, com queima da palhada antes da colheita. A adubação de plantio foi 50 kg ha^{-1} N, 125 kg ha^{-1} P e 125 kg ha^{-1} K no plantio, e 90 kg ha^{-1} N e 120 kg ha^{-1} K anualmente na cana soca. Houve aplicação anual de vinhaça na dose de 100 m^{3} ha^{-1}, por aspersão. No plantio, foi aplicada torta de filtro em área total na dose de 100 Mg ha^{-1} de matéria seca. As amostras de solo foram coletadas em julho de 2004 nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, e foram analisadas para carbono total por combustão seca.

Experimento em Mount Edgecombe

Este experimento esta situado na "South African Sugar Association Experiment Station", próximo a Durban, em KwaZulu-Natal, África do Sul (31° 04' L 29° 43' S). Este experimento foi descrito em detalhes por Van Antwerpen et al. (2001). Este é o mais longo experimento com diferentes manejos de palhada da cana-de-açúcar em andamento. Os dados simulados neste trabalho referem-se ao período de 1940 a 2000. A media de precipitação anual é de 950 mm, e a temperatura media anual é de 20,4 ^{o}C. O solo da área é classificado como Vertissolo, com 390 g kg^{-1} de areia, 450 g kg^{-1} de argila, densidade aparente de 1,17 g cm^{-3} e pH em água de 5,3. Os tratamentos simulados neste trabalho foram: colheita sem queima, com manutenção da palhada sobre o solo, e cana com queima, com manutenção das ponteiros sobre o solo. Estes tratamentos foram subdivididos em parcelas com adubação mineral e parcelas sem adubação mineral, em um

delineamento de parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os tratamentos simulados neste trabalho, com queima e sem queima da palhada, foram subdivididos em parcelas com e sem adubação nitrogenada. Nos tratamentos que incluíram adubação, foram aplicados 140 kg N ha^{-1}, 20 kg P ha^{-1} e 140 kg K ha^{-1} por ano. A reforma da área para plantio foi convencional ate cerca de 1970, quando se passou a adotar o cultivo mínimo, com revolvimento do solo somente na linha de plantio. Do inicio do experimento ate 1966, a cultura foi colhida com 24 meses; após 1966 e ate 1987, a cana foi colhida entre 15 e 20 meses; e após 1987, a cana foi colhida com 12 meses. Amostras de solo na profundidade de 0-20 cm foram coletadas no período de 1945 a 1998, e analisadas para carbono orgânico por oxidação úmida com dicromato (WALKLEY; BLACK, 1934).

4.2.1.2 Descrição do modelo CENTURY

O modelo se divide em submodelos, que tratam das seguintes áreas: matéria orgânica do solo; balanço hídrico, lixiviação e temperatura do solo; e produção da planta. A Figura 1 ilustra o funcionamento do modelo, com os fluxos de nutrientes entre os diversos compartimentos do sistema solo-planta-atmosfera.

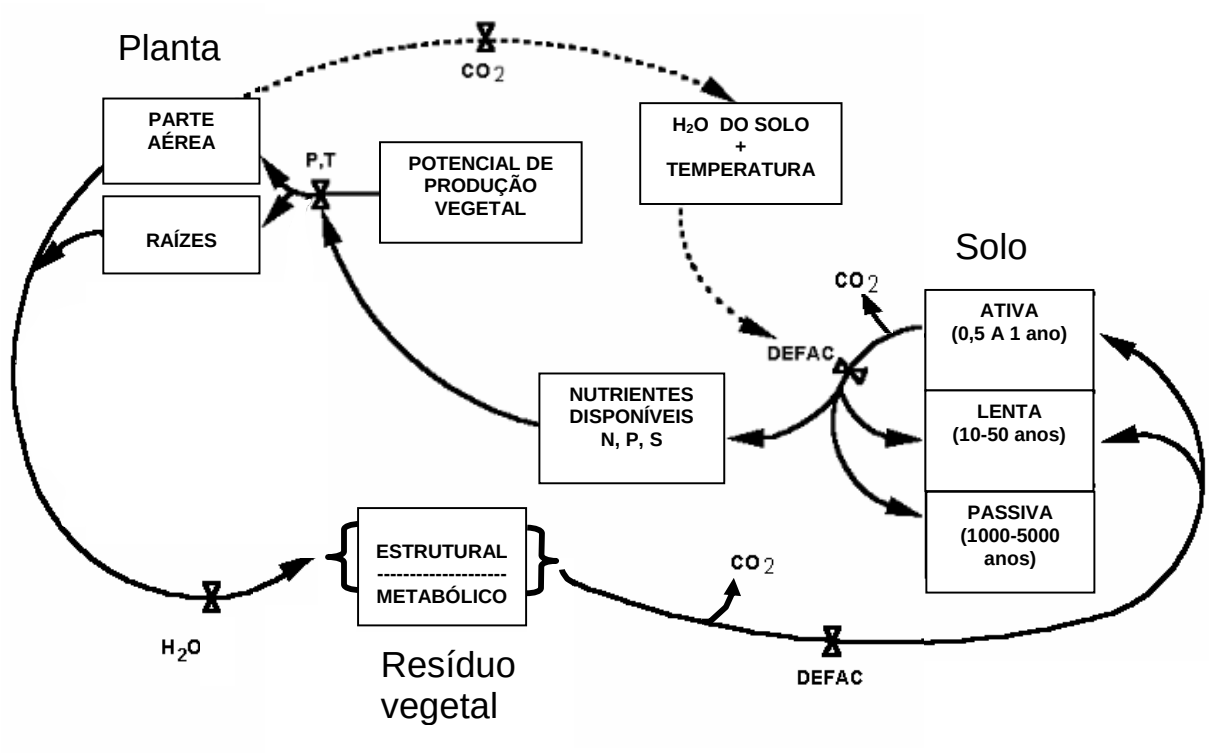

Figura 1 - Diagrama com fluxos entre compartimentos do modelo CENTURY. P= Precipitação; T= temperatura; DEFAC = fator de decomposição. Adaptado de Metherell et al. (1993)

Submodelo de matéria orgânica do solo

O submodelo de matéria orgânica do CENTURY divide a matéria orgânica do solo na camada de 0-20 cm em três frações: ativa, lenta e passiva. Esta divisão tem sido usada na maior parte dos modelos de dinâmica de nutrientes desenvolvidos (JENKINSON; RAYNER, 1977, JENKINSON, 1990, VAN VEEN; PAUL, 1981, e TRUMBORE, 1993). A fração ativa inclui a biomassa microbiana e seus produtos metabólicos e possui tempo de ciclagem de meses a anos. A fração lenta inclui material vegetal mais resistente (mais rico em lignina) e produtos metabólicos microbianos já estabilizados no solo, com tempo de ciclagem de décadas. A fração passiva inclui matéria orgânica estabilizada física e quimicamente, com tempo de ciclagem de séculos.

Submodelo de balanço hídrico, lixiviação e temperatura do solo

Este submodelo calcula a evaporação e transpiração mensal, a perda de água no solo, o conteúdo de água nas camadas do solo e o fluxo de saturação de água entre as camadas do solo. A temperatura média mensal do solo na camada superficial é calculada em função da temperatura média do ar e da biomassa.

Submodelo de produção da planta

O modelo CENTURY simula a produção vegetal com parâmetros estabelecidos para a maioria das principais culturas (milho, soja, trigo, sorgo, etc.) e em ecossistemas de pradarias, florestas e savanas. A produção máxima anual da parte aérea e das raízes é calculada em função da precipitação anual, sem limitações de nutrientes. São estimadas a concentração mensal de C e N no material vivo e morto da parte aérea das plantas, das raízes vivas, e da liteira dividida em parte estrutural e metabólica, e o estoque residual do solo.

4.2.1.3 Inicialização do modelo

Os dados de entrada necessários para utilização do modelo CENTURY incluem: fatores climáticos - precipitação mensal e temperatura média mensal máxima e mínima; dados de solo: descrição da capacidade de drenagem, distribuição granulométrica, teor inicial de matéria orgânica, pH; dados sobre o manejo da área estudada - rotações de culturas, tratos culturais, adubação mineral e orgânica, aplicação de resíduos orgânicos, irrigação.

Efetuou-se a simulação da dinâmica do carbono do solo sob mata nativa para todos os experimentos, por um período de 7000 anos, para obterem-se as condições de equilíbrio entre os compartimentos do solo. Em todos os casos, assumiu-se que houve conversão direta de mata nativa para cana-de-açúcar, sem passar por outras culturas intermediárias.

4.2.1.4 Parametrização do modelo CENTURY para a cultura da cana-de-açúcar

Produção de biomassa

Quando não fornecido no experimento, o teor de carbono da biomassa da parte aérea da cana-de-açúcar foi considerado 44%, de acordo com analises feitas por Spain e Hodgen (1994) e Robertson (2003). O teor de água nos colmos maduros usado foi de 70% (BULL; GLAZIOU, 1975). O crescimento máximo diário da cana-de-açúcar em matéria seca reportado em experimentos varia de 40 a 48 g m^{-2} (BULL; GLASZIOU, 1975, THOMPSON, 1978, e MUCHOW et al., 1994). Com base nestes valores, o potencial máximo de crescimento mensal foi fixado em 600 g C m^{-2} $mês^{-1}$. Nos experimentos em Goiana e Timbaúba, onde houve déficit hídrico significativo, o potencial de crescimento no tratamento sem cobertura do solo foi reduzido em 25 %, de acordo com experimentos na região enfocando o efeito da umidade do solo no crescimento da parte aérea da cana-de-açúcar (KOFFLER et al., 1986).

Efeito da temperatura no crescimento vegetativo

Com base na literatura citada na Tabela 1, os parâmetros para temperatura ótima e máxima para o crescimento vegetativo da cana de açúcar foram fixados em 30 e 45 ^{o}C, respectivamente. O efeito da temperatura no crescimento é representado na Figura 2, fundamentado em dados para gramíneas C4 (CHRISTIE; DETLING, 1982) e nas temperaturas ótima e máxima para cana-de-açúcar.

Tabela 1 - Temperatura mínima, máxima e ótima para o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar

Referências	**Temperatura, °C**		
	Mínima	**Máxima**	**Ótima**
Bacchi ; Souza, 1977	18	-	-
Blackburn, 1984	20	38	30
Clements et al., 1952	-	-	30
Falconier; Bassereau, 1975	25	38	30-34
Hunsigi, 1993	21	-	30-32
Keating et al., 1999	9	45	32
Machado, 1987	21	38	30-34

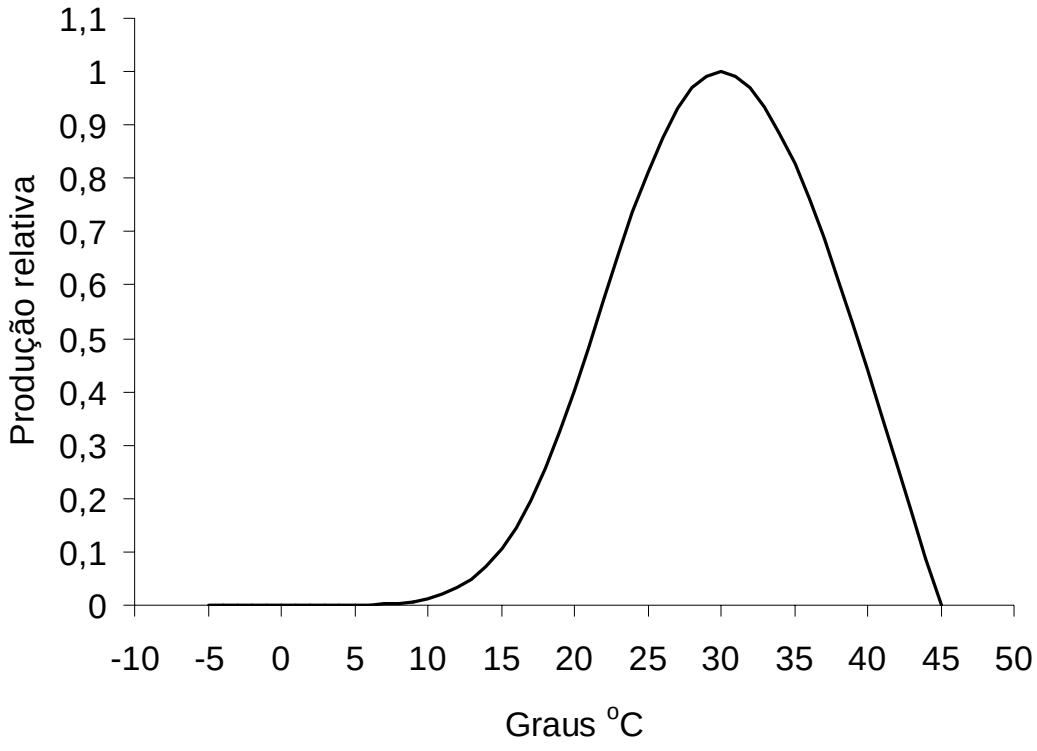

Figura 2 - Crescimento relativo da cana-de-açúcar em função da temperatura do ar (°C)

Fogo para despalha

A queima da palhada geralmente precede a colheita manual. Neste sistema, após o uso do fogo, a parte não queimada dos ponteiros é cortada e deixada sobre o solo. Os parâmetros do fogo usado na queima da palhada para facilitar a colheita foram baseados em experimentos de campo (BALL-COELHO et al., 1993, MITCHEL et al., 2000, BASANTA et al., 2003), nos quais 85% da matéria seca da palhada (folhas e ponteiros) da cana é removida pelo fogo, e 80% do nitrogênio presente na palhada seria perdido com a queima. No modelo CENTURY, estes parâmetros foram incluídos no arquivo "fire.100", que controla a remoção de material orgânico em superfície e o retorno de nutrientes ao solo por meio da queima.

Colheita da cana-de-açúcar

A proporção de matéria seca alocada para os colmos na época da colheita varia de 60 a 85%, sendo influenciada por estresse hídrico, temperatura, variedade e disponibilidade de nutrientes (SINGLES, 2005). Neste trabalho, a proporção de colmos na matéria seca área foi fixada em 60% em experimentos com baixos aportes de insumos e 80 % quando houve aplicação de altas doses de insumos. A cana-de-açúcar é colhida pelo corte dos colmos na base, próximo a superfície do solo, deixando aproximadamente 1% do colmo no campo, contabilizado como perdas de colheita (FURLANI NETO et al., 1984, PEIXOTO e DELGADO, 1988). A proporção de raízes na biomassa total foi fixada em 18%, com base no trabalho de Smith et al. (2005). Não há consenso sobre a proporção das raízes que morrem logo após a colheita. Alguns autores sugerem que todo o sistema radicular e substituído logo após a colheita, e que a cana soca desenvolve um novo sistema radicular (BAVER et al. 1962, BLACKBURN, 1984). Maestre (1985) relata que 76 a 94% das raízes nos primeiros 30 cm de solo havia senescido aos 120 dias após a colheita dos colmos. Outros autores afirmam que parte do sistema radicular permanece ativo após a colheita dos colmos, principalmente as raízes mais profundas (EVANS, 1938, GLOVER, 1968). Ball-Coelho et al. (1992) relatam a senescência de 17% das raízes nas duas primeiras semanas após a colheita. Neste trabalho, assume-se que todo o sistema radicular na camada de 0-20 (considerada no modelo) é substituído por um novo sistema radicular proveniente da soca. No modelo CENTURY, os parâmetros de colheita são fixados no arquivo

“harv.100”, que contém as frações de biomassa vegetal da parte aérea e de raízes que são afetadas pela colheita.

Fixação biológica de nitrogênio na cana-de-açúcar

Um vez que a exportação de nitrogênio pela colheita dos colmos é relativamente alta - entre 80 e 100 kg N ha^{-1} - uma diminuição nos estoques de N do solo no longo prazo seria esperada nas regiões onde a aplicação de nitrogênio na forma de adubo é baixa (BODDEY et al., 2003). No entanto, isto não tem ocorrido, o que tem motivado pesquisas sobre a fixação biológica de nitrogênio na cultura de cana-de-açúcar (DOBEREINER, 1961; RUSCHEL et al., 1978, PURCHASE, 1980). Por meio da técnica de abundancia natural, Boddey et al. (2001) concluíram que ate 60% do nitrogênio absorvido pela cultura sem adubação mineral nitrogenada seria provido pela fixação biológica de nitrogênio, principalmente por bactérias diazotróficas associativas do solo e endofíticas. O potencial de fixação biológica de nitrogênio é definido no modelo CENTURY por meio do parâmetro *snfxmx*, expresso em gramas de nitrogênio fixado por gramas de carbono fotossintetizado na planta. Considerando-se os valores máximos de fixação biológica de nitrogênio descritos na literatura, 20g N ha^{-1} (DOBEREINER, 1997) e a produção de carbono da biomassa na parte aérea de ate 6000 g m^{-2} (SILVA; COSTA, 2004), o valor de *snfxmx* foi fixado em 0.003. Esta função só é ativada no programa quando há limitação de nitrogênio para o crescimento da cultura.

Nitrogênio de deposição atmosférica

A deposição atmosférica anual de nitrogênio usada no modelo foi de 0,28 g m^{-2}, com base em dados medidos em uma região canavieira no Estado de São Paulo (BORTOLETO JUNIOR, 2004). A deposição atmosférica anual total (úmida e seca) pode ser incluída no modelo CENTURY como uma função da precipitação, ou como uma quantidade fixa anual, definida para cada local estudado, no parâmetro *epnfa(1)*, no arquivo “site.100”. A opção utilizada neste trabalho foi a de fixar a deposição atmosférica úmida e seca em 28 g m^{-2} de nitrogênio por ano.

Reforma do canavial

A cana-de-açúcar é uma gramínea perene que precisa ser replantada em média a cada seis anos. O período de renovação da área é chamado de reforma, quando se faz o preparo do solo para o próximo ciclo da cultura. As duas principais técnicas de reforma são a reforma convencional e o cultivo mínimo. Na reforma convencional, ocorre o cultivo do solo em área total, utilizando gradagem, aração e, em alguns casos, subsolagem. Na cultivo mínimo, o revolvimento do solo so acontece na linha de plantio, e a cana soca é eliminada com o uso de herbicida. No modelo CENTURY, as práticas de cultivo do solo são parametrizadas no arquivo "cult.100", onde são definidos as frações de biomassa da parte aérea, raízes e liteira incorporadas ao solo, e o efeito da prática de cultivo na decomposição da matéria orgânica do solo, com base na profundidade de cultivo e o grau de revolvimento do solo. Nos experimentos simulados neste trabalho, foi usada a opção de maior intensidade de distúrbio do solo na reforma convencional, o "cult K". No cultivo mínimo, foram usados o "cult HERB", que simula a aplicação de herbicida, e o "cult ROWCANE", opção criada especificamente para simular o revolvimento do solo na linha de plantio, e a incorporação dos resíduos vegetais da cana soca.

Aplicação de resíduos orgânicos

Em certas regiões é comum a aplicação de resíduos do processamento industrial do açúcar (torta de filtro) e do álcool (vinhaça), tanto para a disposição destes resíduos quanto por sua função como aporte de nutrientes, matéria orgânica e água. A aplicação de resíduos orgânicos é efetuada no modelo CENTURY por meio da função *omad* ("organic matter addition"), onde se define a época de aplicação, a dose aplicada e a composição dos resíduos. As características da torta de filtro usada nas simulações foram obtidas em analises efetuadas nos experimentos e em dados de literatura: 228 g kg^{-1} de C, 12 g kg^{-1} de N, e 16% de lignina (ORLANDO FILHO et al., 1991). A composição da vinhaça foi baseada na analise feita por Dematte et al.(2004), com 11,56 g L^{-1}de C e 0,42 g L^{-1} de N. Uma vez que a vinhaça e aplicada na forma liquida, utilizou-se o recurso *irri* no modelo CENTURY, de irrigação, para aplicar o devido volume de água juntamente com a matéria orgânica e nutrientes da vinhaça.

4.2.2 Resultados

4.2.2.1 Simulação da produção de biomassa da parte aérea e de colmos.

Experimento em Goiana

O carbono da biomassa aérea, medido aos três, seis, nove e doze meses após a brotação, foi significativamente maior no tratamento sem queima (Figura 3). Como não foi realizado controle de ervas daninhas, houve crescimento significativo dessas plantas invasoras na área com queima, que teriam competido com a cana por água e nutrientes. Na área sem queima, a camada de palha mantida sobre o solo reduziu a infestação de ervas daninhas, assim como propiciou maior umidade do solo por meio da diminuição da evaporação e aumento da infiltração.

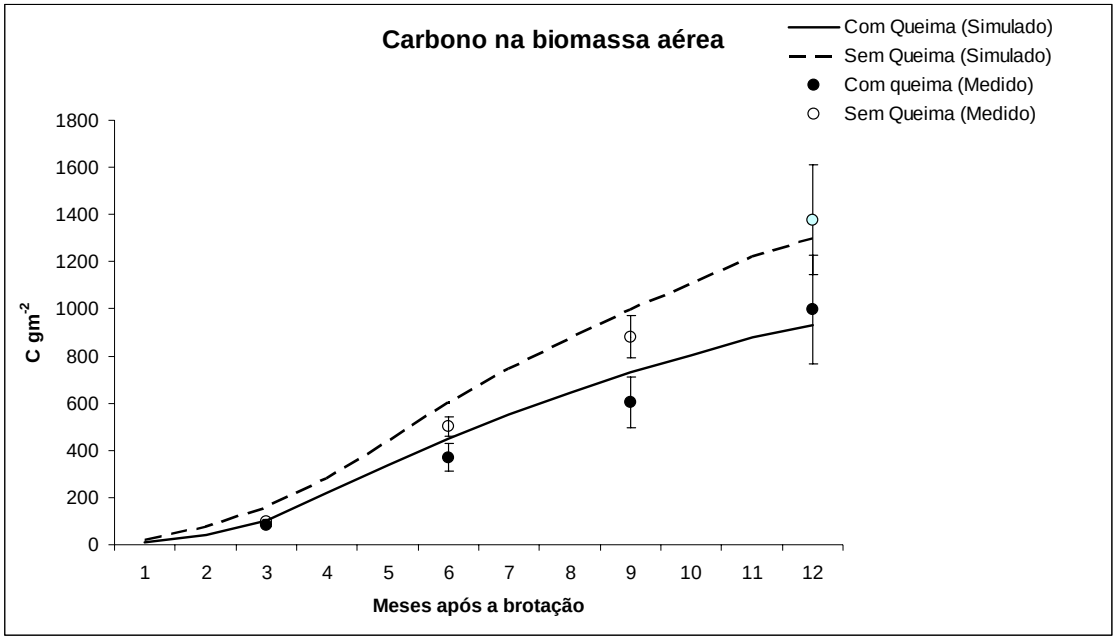

Figura 3 - Carbono na biomassa da parte aérea da cana-de-açúcar medido nos manejos com e sem queima, em g m^{-2}. As barras verticais representam o erro padrão

O carbono do colmo foi medido na colheita da cana planta, realizada sem queima, e na colheita da cana soca, tanto no sistema com queima, quanto no sem queima (Tabela 2). A produção de colmos no sistema de cana sem queima foi substancialmente maior do que no sistema com queima, na primeira soca. Os valores simulados de carbono dos colmo na época da colheita foram próximos aos valores medidos, com diferenças em torno de 3% na cana planta sem queima e na primeira soca nos tratamentos com e sem queima.

Tabela 2 - Valores medidos e simulados do carbono dos colmos (g m^{-2}) na época da colheita da cana planta no sistema com queima e na colheita da primeira soca nos sistemas com e sem queima. A diferença entre valores medidos e simulados é apresentada na forma de percentagem

Situação	**Carbono dos colmos**		**Diferença**
	g m^{-2}		**%**
	Medido	**Simulado**	
Cana planta, com queima	848	874	-3,0
Primeira soca, com queima	565	578	-2,2
Primeira soca, sem queima	820	794	3,2

Experimento em Timbaúba

No experimento em Timbaúba, avaliou-se a produção de colmos em função do manejo da palhada (com queima e sem queima), da adubação nitrogenada (com e sem aplicação de adubo nitrogenado) e do aporte de resíduos industriais de cana (com e sem aplicação de vinhaça). A adubação nitrogenada, o manejo sem queima e as aplicações de vinhaça tiveram efeitos positivos na produção de carbono dos colmos (Figura 3). Houve um aumento de 25% na produção de cana ao longo de um período de 16 anos no sistema de cana crua. Estas tendências foram bem representadas na simulações efetuadas com o modelo CENTURY, que também representou adequadamente a dinâmica temporal da produção, com declínio progressivo e flutuações causadas pelas condições climáticas.

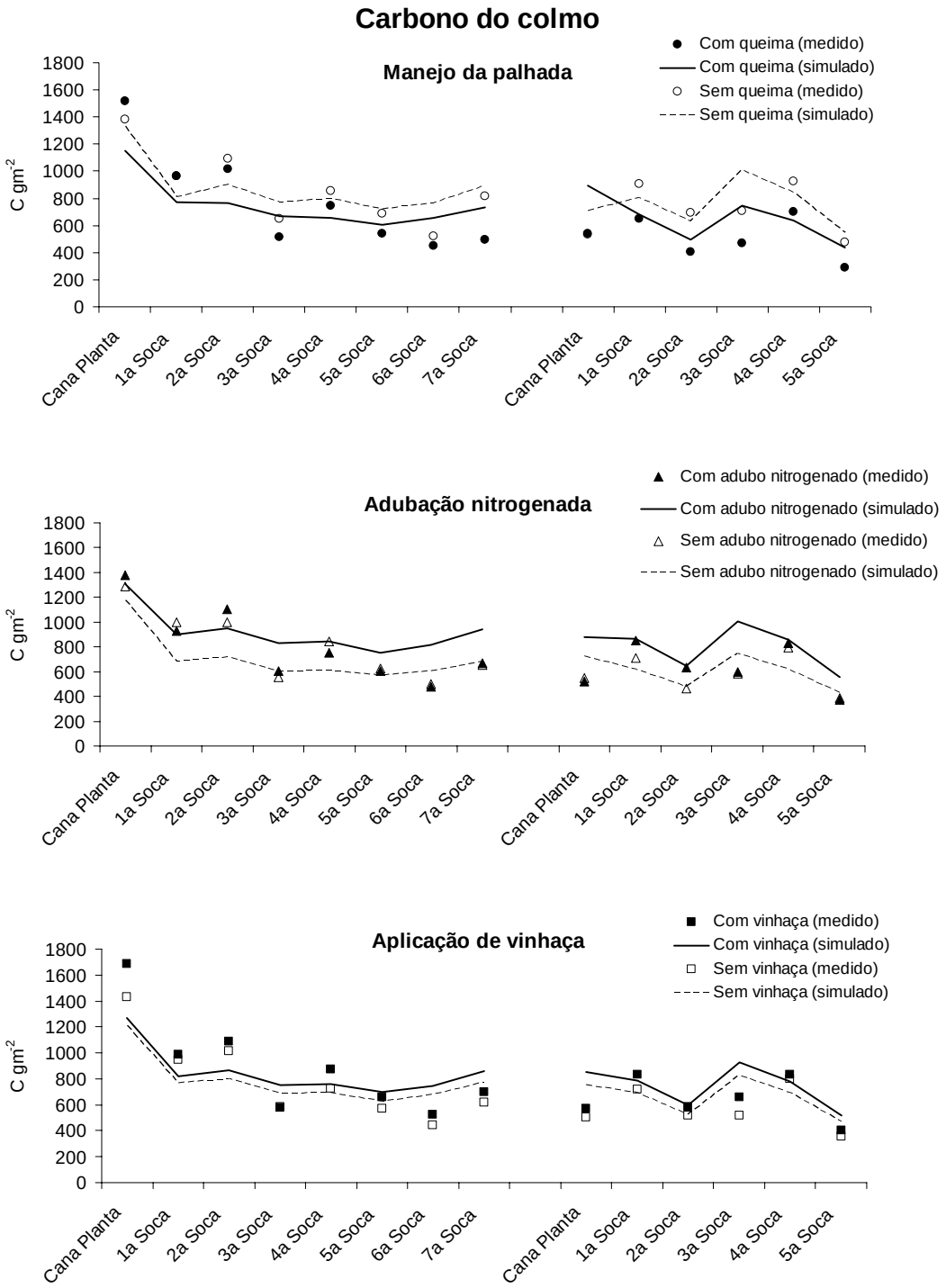

Figura 3 - Carbono do colmo medido e simulado em dois ciclos de cana-de-açúcar, com e sem queima da palhada, com e sem aplicação de adubo nitrogenado, com e sem aplicação de vinhaça

Experimento em Pradópolis

A produção de colmos foi medida anualmente, por ocasião da colheita. As áreas com oito anos após a reforma foram selecionadas para a simulação da produção de colmos (Figura 4). A simulação da produção de colmos na época da colheita seguiu a tendência apresentada pelos valores medidos, de uma queda inicial nos primeiros anos do ciclo, seguido por uma estabilização na produção. Neste caso, o efeito do manejo da palhada na produção, com maior produção na cana com queima, principalmente nos primeiros anos não foi refletido na simulação do modelo, que apresentou valores similares de produção na área com queima e sem queima.

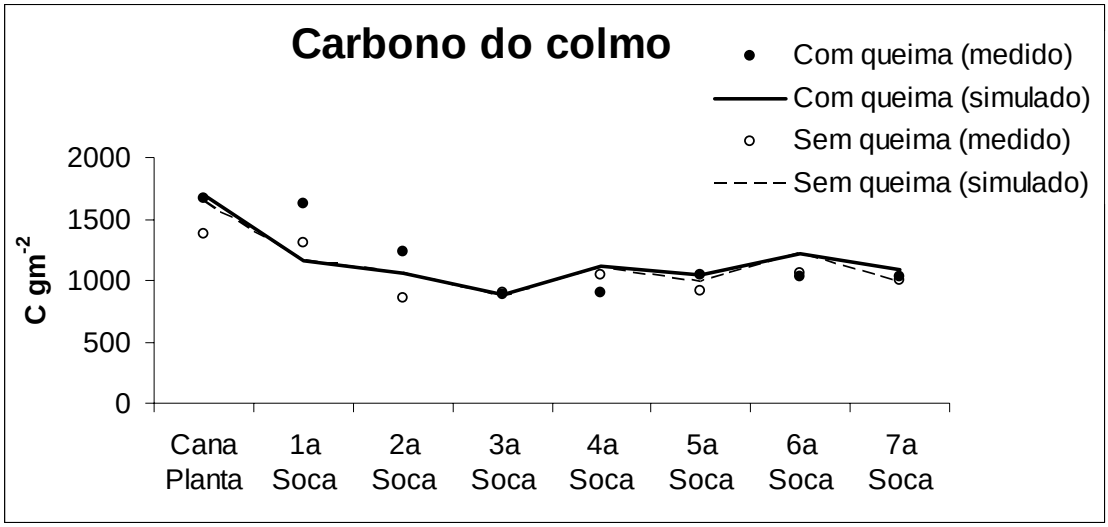

Figura 4 - Carbono do colmo medido e simulado nas áreas com oito anos após a reforma e plantio, nos sistemas de colheita com e sem queima

Experimento em Mount Edgecombe

O estoque de carbono dos colmos, medida a cada colheita no período de 1942 a 2000, mostrou tendência de maiores valores no sistema de cana sem queima, principalmente nas parcelas que não receberam adubação mineral (Figura 5). Esta diferença, no entanto, não foi destacada na simulação do modelo. Todavia, o modelo foi capaz de simular o comportamento geral da produção de colmos no período estudado.

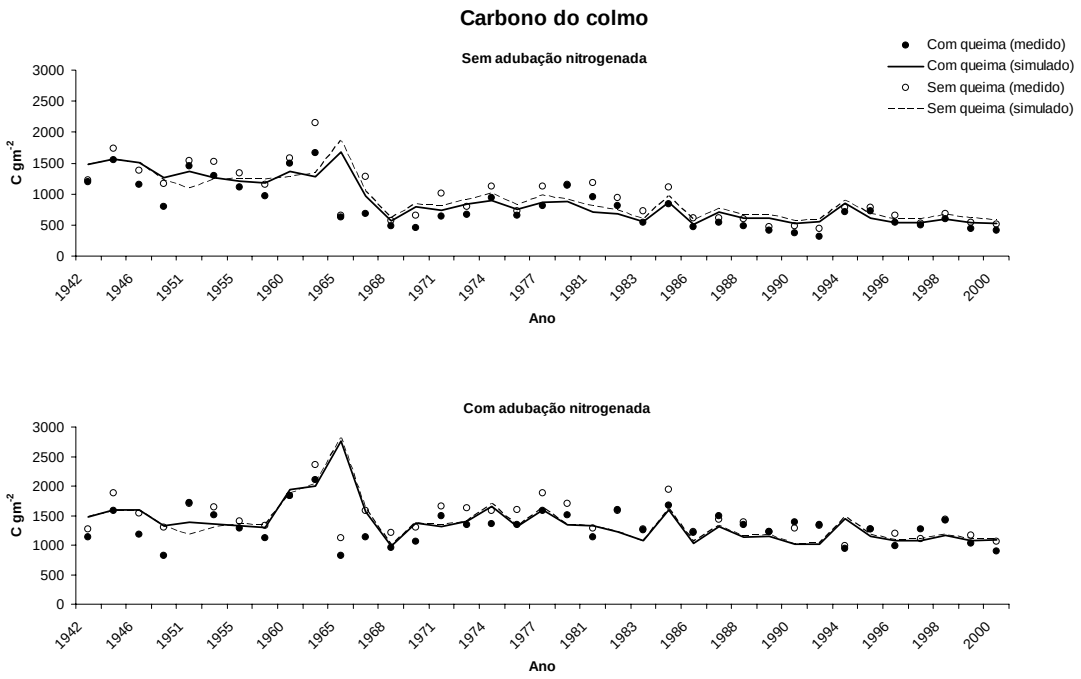

Figura 5 - Carbono do colmo nas áreas com e sem queima, com e sem adubação mineral, no período de 1942 a 2000

A regressão linear entre valores medidos e simulados de carbono do colmo resultou em R^2 de 0,76 (Figura 6). Considerando-se que o modelo CENTURY não é um modelo especificamente de produção vegetal, Conclui-se que o resultado é satisfatório para o objetivo em questão, simular a dinâmica temporal do carbono do solo.

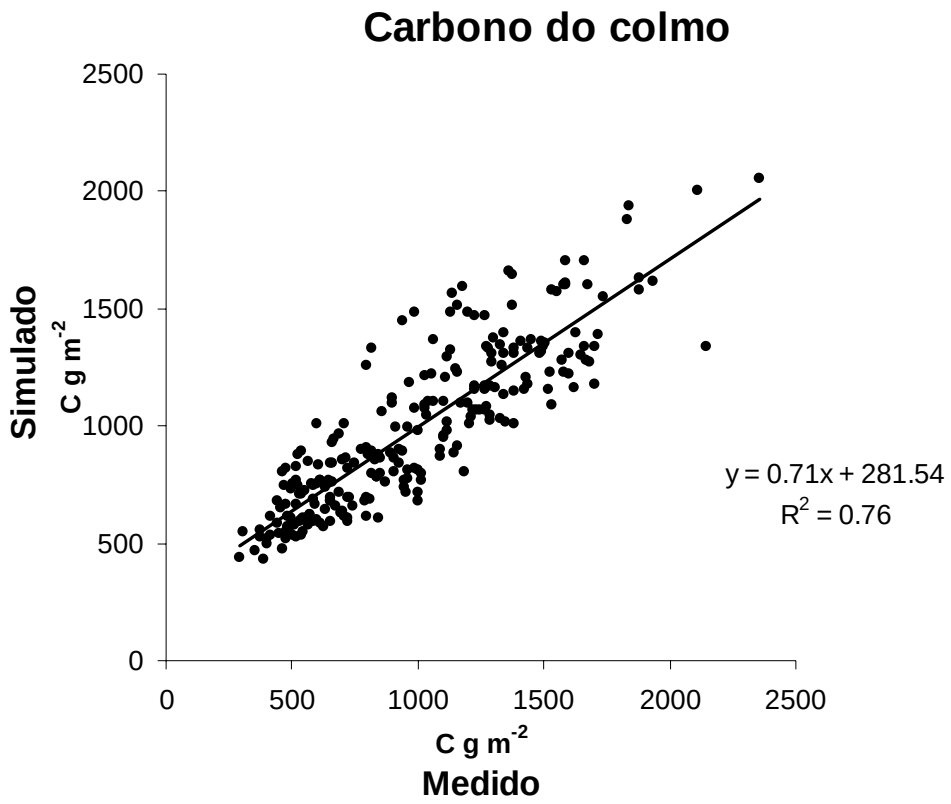

Figura 6 - Regressão linear entre valores medidos e simulados do carbono do colmo de 247 amostragens de colmo dos experimentos estudados

4.2.2.2 Simulação da dinâmica do carbono do solo

Experimento em Goiana

Os resultados da simulação da dinâmica do carbono no primeiro ano a implantação do experimento (Tabela 3) apresentam valores simulados bem próximos aos medidos, com diferença menor que 8% em todos os casos, como era de se esperar. No período estudado, de 12 meses, os valores de carbono do solo variaram pouco, do inicio ao fim do experimento, assim, como na comparação dos manejos com e sem queima da palhada.

Tabela 3 - Valores medidos e simulados do carbono do solo (g m^{-2}) em três épocas de amostragem nos sistemas com e sem queima. A diferença entre valores medidos e simulados é apresentada na forma de percentagem

Manejo da palhada	Meses após a colheita	Carbono do solo, g m^{-2}		
		Medido	Simulado	Diferença, %
Com queima	1	2000	2045	-2,2
	6	2061	2054	0,3
	12	2028	2021	0,3
Sem queima	1	2009	2052	-2,2
	6	1970	2118	-7,5
	12	2181	2118	2,9

Experimento em Pradópolis

A tendência de maiores estoques de carbono na área com oito anos sem queima foi refletida na simulação (Figura 7). O aparente aumento do estoque no tratamento com queima e a diminuição no tratamento sem queima nas áreas com quatro anos após a reforma podem estar mais relacionados as diferenças granulométricas do que a manutenção da palhada no solo (vide Capítulo 2). A área com quatro anos após a reforma e manejo sem queima da palhada se destaca das outras áreas por seu alto teor de areia 356 g kg^{-1}, enquanto o teor médio de areia das áreas estudadas na área em Pradópolis é de 145 g kg^{-1}.

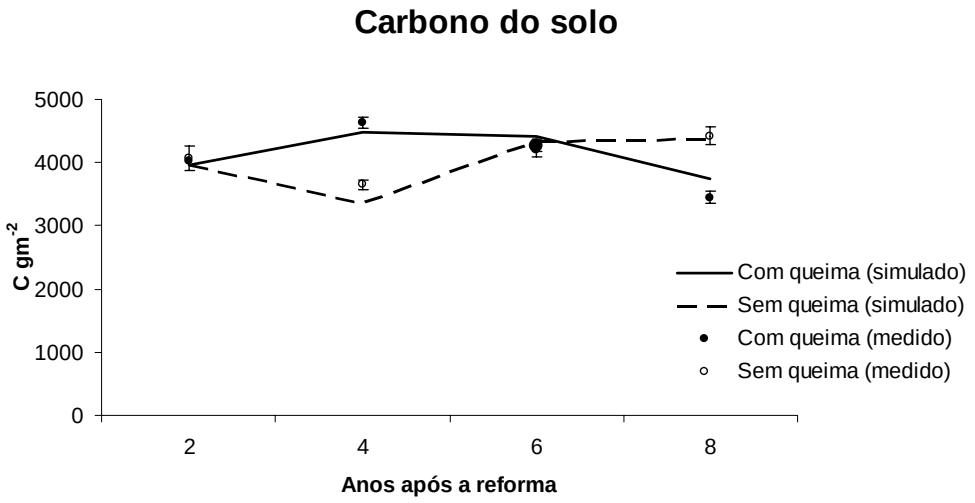

Figura 7 - Carbono do solo medido e simulado em áreas com dois, quatro, seis e oito anos após a reforma, nos sistemas de colheita com e sem queima. Barras verticais representam o erro padrão

Experimento em Timbaúba

O modelo CENTURY foi capaz de simular razoavelmente bem os estoques de carbono do solo após 16 anos de experimento, nos tratamentos com e sem queima, com e sem aplicação de adubo nitrogenado, e com e sem aplicação de vinhaça (Figura 9). As tendências apresentadas nos dados medidos foram refletidas nas simulações, com maiores estoques de carbono do solo nos tratamentos sem queima da palhada, com aplicação de adubo nitrogenado e com aplicação de vinhaça.

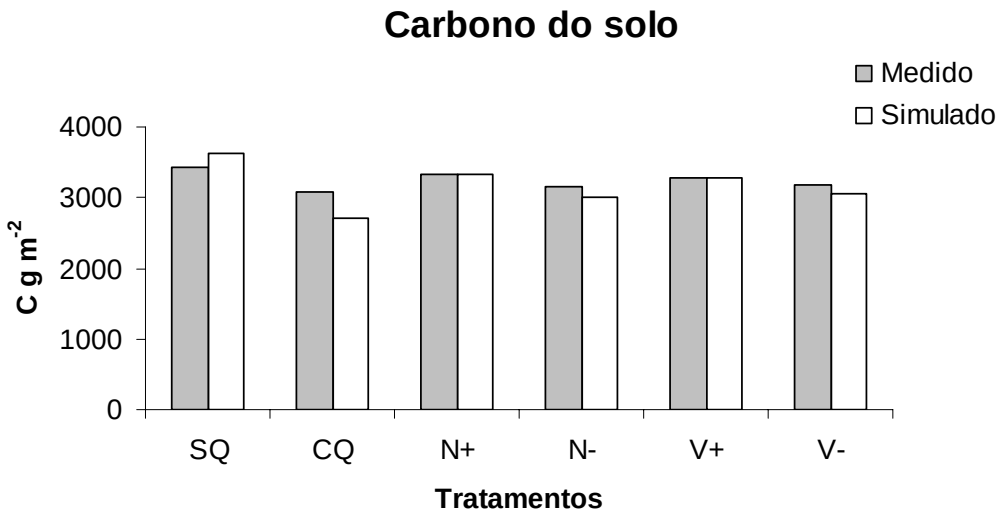

Figura 9 - Carbono do solo (g m^{-2}) medido e simulado no final do experimento, após 16 anos com os seguintes tratamentos: com queima (CQ), sem queima (SQ), com aplicação de fertilizante nitrogenado (N+), sem aplicação de fertilizante nitrogenado (N-), com aplicação de vinhaça (V+) e sem aplicação de vinhaça (V-)

Experimento em Mount Edgecombe

O modelo CENTURY foi capaz de simular com exatidão a dinâmica temporal do estoque de carbono ao longo de 60 anos neste experimento. A manutenção da palhada proporcionou maiores estoques, principalmente no tratamento sem aplicação de adubo nitrogenado. Em ambos os tratamentos, houve declínio dos estoques de carbono no período estudado em relação aos estoques iniciais, mas o declínio foi menor nas áreas sem queima, em ambos os manejos de adubação.

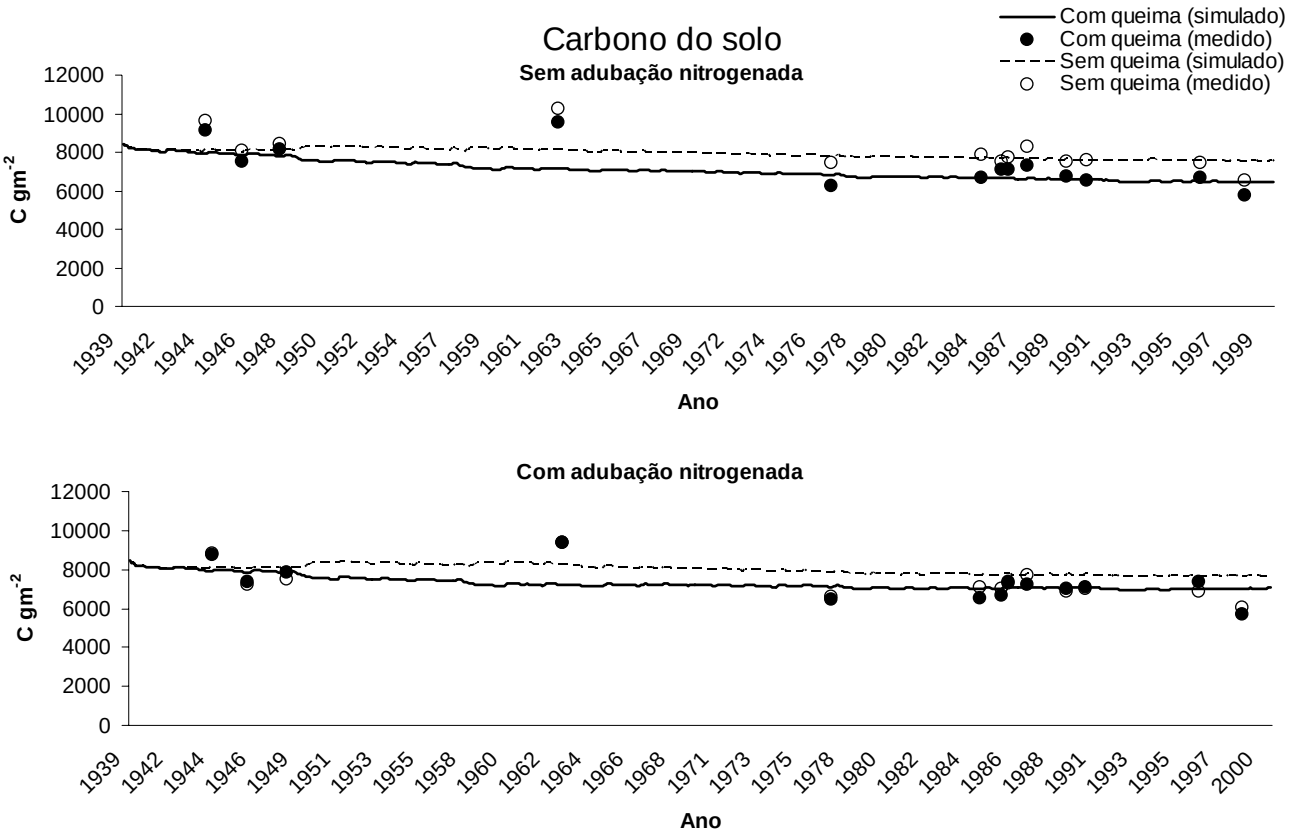

Figura 10 - Carbono do solo (g m^{-2}) medido e simulado ao longo de 60 anos, nos sistemas de colheita com e sem queima, com e sem adubação nitrogenada

De uma forma geral, considerando-se 72 amostragens de todos os experimentos, o modelo CENTURY foi capaz de simular de forma satisfatória (R^2 = 0,89) a dinâmica temporal do carbono do solo sob diferentes manejos de palhada, adubação e resíduos orgânicos (Figura 11).

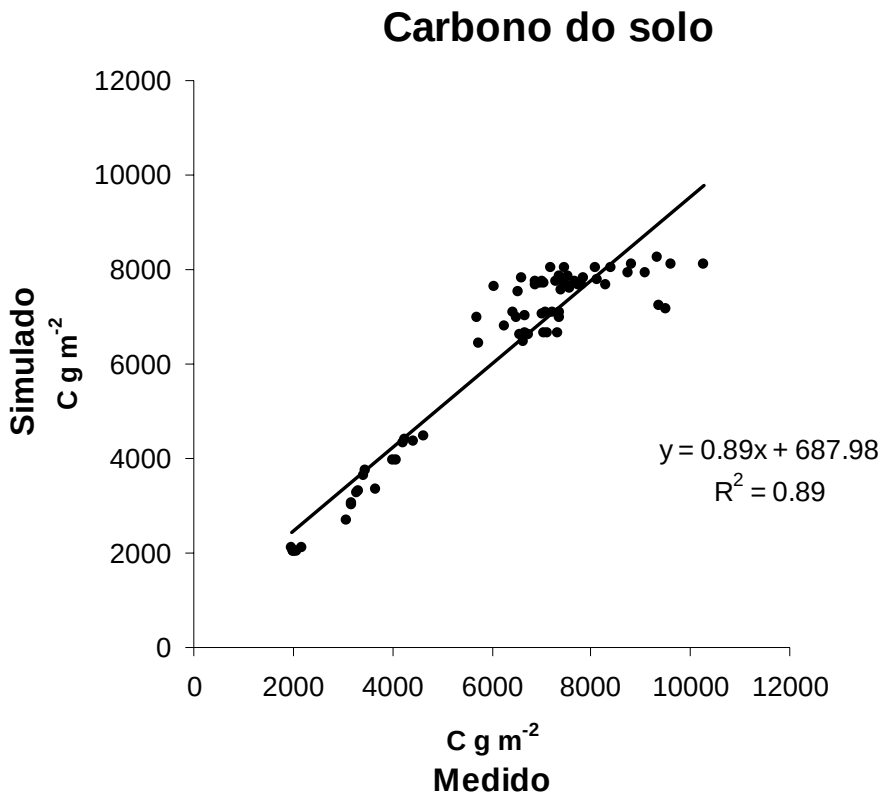

Figura 11 - Regressão linear entre valores medidos e simulados do carbono do solo de 72 amostras de solo dos experimentos estudados

4.2.2.3 Predição do estoque de carbono em longo prazo

Uma vez que as simulações da dinâmica temporal do carbono do solo foram coerentes com os valores medidos nos períodos estudados, efetuou-se a simulação da dinâmica do carbono do solo pelo período de 100 anos a partir do ponto final de cada experimento (Figura 12). Buscou-se, assim, avaliar o impacto dos manejos estudados nos experimentos no longo prazo. Fixaram-se como ponto inicial da simulação as áreas de manejo com queima, em todos os experimentos. Manteve-se a adubação mineral e aplicação de resíduos da agroindústria na mesma

dose e freqüência de aplicação usada nos experimentos, variando-se somente o manejo da palhada. A medias de longo prazo de temperatura máxima e mínima mensal e de precipitação mensal foram usadas nas simulações efetuadas.

A manutenção da palhada sobre o solo propiciou maiores estoques de carbono do que a queima da palhada, em todos as simulações. A diferença foi maior no experimento em Goiana, com o dobro do estoque na área sem queima após 100 anos de simulação. O aumento no estoque no cenário com manejo de cana crua foi de cerca de 80% nas áreas de Timbaúba e Pradópolis. Em relação ao valor inicial de estoque de carbono, a tendência geral foi de manutenção do estoque no manejo com queima e aumento gradativo no manejo sem queima, pelo aporte periódico de material orgânico no sistema de cana crua. A simulação efetuada com os dados do experimento em Mount Edgecombe mostrou declínio no estoque em ambos os tratamentos, ainda que o declive na área sem queima fosse menos acentuado. No final da simulação, o estoque de carbono da área sem queima foi cerca de 10 % maior do que na área com queima da palhada.

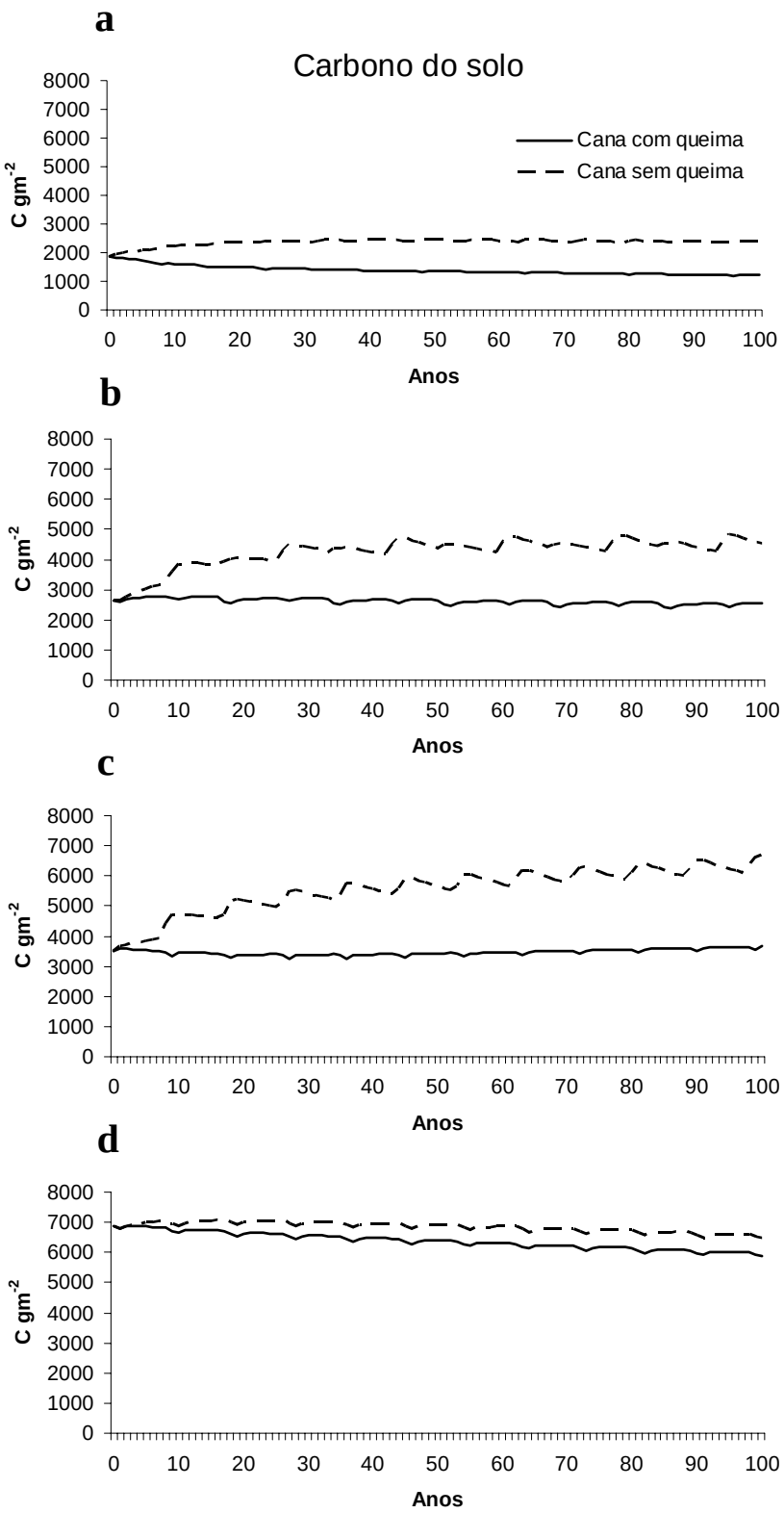

Figura 12 - Simulação da dinâmica temporal do carbono do solo no período de 100 anos a partir do final dos experimentos em Goiana (a), Timbaúba (b), Pradópolis (c) e Mount Edgecombe (d)

4.2.3 Discussão

4.2.3.1 Simulações da produção de biomassa da parte aérea total e de colmos

O impacto da manutenção de palhada na produção de cana pode ser positivo ou negativo, devido à interação entre diferentes fatores climáticos, biológicos e químicos. Alvarez e Castro (1999) compararam o crescimento da parte aérea da cana-de-açúcar colhida crua e queimada, no primeiro e segundo anos de rebrota. No primeiro ano, não houve diferença entre os tratamentos com e sem queima no crescimento da parte aérea, enquanto no segundo ano, a cana com queima produziu mais biomassa. Diversos autores relatam maior produção no manejo com queima da cana (VEIGA et al., 1962, BASANTA et al., 2003, CAMPOS, 2003). Um dos fatores que podem influenciar a menor produção no sistema sem queima e a imobilização do nitrogênio aplicado como adubo pelos microrganismos decompositores da palhada (BASANTA et al., 2003, GAVA et al., 2005). Outros fatores citados na literatura são o atraso na brotação da cana-de-açúcar (HARDMAN et al., 1985), uma vez que a temperatura do solo é menor quando há a camada de palha e perdas de mais de 40% do nitrogênio aplicado superficialmente, pela volatilização do nitrogênio amoniacal causada pela presença de urease na palhada (WOOD, 1991).

Por outro lado, o aumento na produção de colmos tem sido relatado em experimentos com cana sem queima. Wood (1991) descreve um aumento médio na produção de cana de 10 Mg por hectare quando houve manutenção da palhada no solo em experimentos na Austrália. Nos experimentos simulados neste trabalho, o efeito positivo da palhada na produção parece ter sido mais evidente nas áreas com maior déficit hídrico, Goiana e Timbaúba (Tabela 2, Figura 3). Ball Coelho et al. 2003, no estudo de Goiana, descrevem maior umidade do solo, devido ao aumento espaço de microporos, por maior atividade de raízes e de fungos no tratamento sem queima. Tominaga et al. (2002) descrevem experimento em Piracicaba com cana-de-açúcar no qual se verificou maior umidade do solo no tratamento sem queima, comparando-se com o tratamento com queima e com a testemunha em solo descoberto. Thorburn et al. (2002), simulando a produção de colmos no experimento em Mount edgecombe com o modelo APSIM, concluíram que a maior produção de cana no sistema sem queima estava ligada a maior umidade do solo neste tratamento. Pode-se concluir que a maior retenção de água quando há a manutenção da palhada sobre o solo é uma vantagem em termos de potencial de produção de colmos,

principalmente em áreas de cana não irrigada onde ocorre déficit hídrico na etapa de crescimento vegetativo da cultura.

As simulações realizadas no presente trabalho, em que o modelo explicou 79% da variação da produção de colmos, foram satisfatórias, uma vez que o submodelo de planta tem como função simular o aporte de material vegetal no solo na forma de palhada e raízes e a absorção de nutrientes e água pela planta, com ênfase nos efeitos na matéria orgânica do solo. Vallis et al. (1996) simularam a produção de biomassa nos colmos e na parte aérea em experimentos com cana-de-açúcar na Austrália, usando o modelo CENTURY. Na avaliação de um período de 16 anos, houve uma superestimação no primeiro ciclo (5 anos) e valores simulados próximos aos medidos na fase final do experimento. As tendências de decréscimo de produção ao longo dos anos e maiores valores nas áreas sem queima foram detectadas nas simulações. O modelo CENTURY não é considerado um modelo de produção vegetal, mas um modelo de dinâmica de nutrientes no solo com um módulo de produção vegetal. No caso específico da cana-de-açúcar, há modelos que têm por objetivo avaliar a produção vegetal, baseando-se principalmente em varáveis climáticas, fisiológicas e de manejo fertilizantes, como o APSIM-Sugarcane (KEATING et al., 1999); CANEGRO (INMAN-BARBER, 1991) e QCANE (LIU; KINGSTON, 1994).

4.2.3.2 Simulação da dinâmica do carbono do solo

Diversos estudos têm indicado a tendência de aumento do potencial de seqüestro de carbono no solo no sistema sem queima. Canellas et al. (2003) avaliaram o efeito da queima e manutenção da palhada em longo prazo em Campos de Goytacazes, Rio de Janeiro. Os autores compararam o estoque de carbono de duas áreas adjacentes com 55 anos de cultivo de cana de açúcar, com e sem queima da palhada. O teor de carbono da área sem queima na camada de 0-20 cm, foi 22,34 g kg^{-1}, enquanto o teor de carbono da área com queima foi de 13,13 g kg^{-1}. Razafimbelo et al. (2006), em outro estudo na Usina São Martinho, em Pradópolis, descreve um aumento no estoque de carbono após 6 anos com o sistema sem queima, de 15% em relação ao sistema com queima. O aumento do estoque de carbono com maior aporte de palhada de cana-de-açúcar, no entanto, é condicionado por fatores como condições climáticas (ROBERTSON, 2001), textura do solo (CERRI et al., 2004a) e tempo de implantação do sistema sem queima

(GRAHAM et al., 2002). Parte do carbono estocado por meio do manejo sem queima pode ser perdido durante a reforma do canavial (que geralmente ocorre a cada seis anos), quando do solo e preparado para o plantio do próximo ciclo por meio de aração, gradagem e subsolagem (RESENDE, 2006).

A diferença no estoque de carbono do solo entre os manejos com e sem queima da palhada da cana-de-açúcar e mais evidente no longo prazo. No curto prazo, frações da matéria orgânica como carbono da biomassa microbiana (WOOD, 1991, SUTTON et al., 1996, GRAHAM et al., 2001) e carbono lábil (BLAIR et al, 1998, 2000) são mais sensíveis a manutenção da alhada do que o estoque de carbono total.

Thorburn et al. (2002) simularam o teor de carbono do solo no experimento de Mount Edgecombe, usando o modelo APSIM-Sugarcane. Os valores simulados refletiram a tendência de declínio do carbono do solo no longo prazo, com menor taxa de diminuição no sistema sem queima, em concordância com os resultados apresentados neste trabalho com simulações pelo modelo CENTURY.

Vallis et al. (1996), simulando a dinâmica temporal do carbono do solo em áreas de cana-de-açúcar na Austrália com o modelo CENTURY, obtiveram valores simulados próximos aos medidos. O modelo foi capaz de simular as principais características dos dados: estoques constantes de carbono do solo em áreas onde houve queima da palhada; um aumento progressivo no estoque de carbono do solo no sistema de cana crua; e um decréscimo no estoque de carbono no período de reforma e replantio, entre os dois ciclos avaliados.

4.2.3.3 Predição do estoque de carbono em longo prazo

Nas simulações do impacto futuro do manejo da palhada, vários fatores podem ter influído na dinâmica do carbono ao longo de 100 anos. Fica evidente que as áreas que receberam maior aporte de insumos, tanto minerais quanto orgânicos (Timbaúba e Pradópolis) apresentaram altas taxas de aumento de estoque no sistema sem queima. Outro fator relevante, o estoque inicial de carbono, é exemplificado no experimento em Mount Edgecombe, que não apresentou aumento de estoque. Embora com altos insumos, este experimento já tinha altos estoques iniciais, em torno de 7000 g m^{-2}. É possível que estes altos valores de estoque de carbono já estejam próximos a capacidade deste determinado solo de estocar carbono, considerando-se suas características

químicas e físicas (SIX et al., 2002). Outro fator que pode ser levado em conta é a granulometria. O menor impacto da manutenção da palhada na área em Goiana pode estar ligado ao baixo teor de argila, 80 g kg^{-1}, enquanto a alta taxa de aumento no teor de estoque na área em Pradópolis, pode estar ligado ao alto teor de argila, 670 g kg^{-1}.

Vallis et al. (1996), comparando diversas doses de adubo nitrogenado os manejos com e sem queima da palhada da cana-de-açúcar, estimaram que a manutenção da palhada da cana-de-açúcar no solo aumentaria a matéria orgânica em 40% em um período de 60 a 70 anos. Estes resultados são coerentes com a tendência de aumento no estoque de carbono no sistema de cana crua apresentada nas simulações efetuadas no presente estudo.

4.3 Conclusões

Pode-se afirmar que o sistema de colheita sem queima propicia maiores estoques de carbono ao longo prazo do que o sistema com queima da palhada. A dinâmica temporal do estoque de carbono é influenciada por fatores como estoque inicial, granulometria do solo, adubação mineral e aporte de resíduos orgânicos. O modelo CENTURY é capaz de simular as tendências gerais na dinâmica temporal produção de colmos, apesar de não ser desenhado para a simulação da produção vegetal.

O modelo CENTURY é eficiente na simulação da dinâmica temporal do estoque de carbono, influenciada por diferentes manejos de palhada, adubação e aporte de resíduos orgânicos. O modelo pode ser uma ferramenta usada na predição do efeito de diferentes manejos na dinâmica temporal do estoque de carbono em longo prazo. Pode-se fazer uso desta função do modelo no estudo de hipóteses de pesquisa e na recomendação de práticas de manejo do solo e de resíduos ambiental e agronomicamente sustentáveis.

Referências

ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R.C; NOGUEIRA, M.C.S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Scientia Agricola,** Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 653-659, 2000.

BACCHI, O.O.S.; SOUZA, J.A.G.C. Minimum threshold temperature for sugarcane growth. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, São Paulo, v. 16, p. 1733-1742, 1977.

BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugarcane. **Plant and Soil,** Dordrecht, v. 142, p. 297-305, 1992.

BALL-COELHO, B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Residue management effects on sugarcane yield and soil properties in northeastern Brazil. **Agronomy Journal,** Madison, v. 85, p. 1004-1008, 1993.

BASANTA, M.V.; DOURADO-NETO, D.; REICHARDTB, K.; BACCHIB, O.O.S.; OLIVEIRA, J.C.M.; TRIVELIN, P.C.O.; TIMM, L.C.; TOMINAGA, T.T.; CORRECHEL, V.; CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; MACEDO, L.F. Management effects on nitrogen recovery in a sugarcane crop grown in Brazil. **Geoderma,** Amsterdam, v. 116, p. 235–248, 2003.

BAVER, L.D.; BRODIE, H.; TANIMOTO, T.; TROUSE, A.C. New approaches to the study of cane root systems. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, Kwashukela, v. 11, p. 248-253, 1962.

BLACKBURN, F. **Sugar-cane**. New York: Longman, 1984. 414 p.

BLAIR, G.J.; CHAPMAN, L.; WHITBREAD, A.M.; BALL-COELHO, B.; LARSEN, P.; TIESSEN, H. Soil carbon changes resulting from sugarcane trash management at two locations in Queensland, Austrália, and in North-East Brasil. **Australian Journal of Soil Research,** Collingwood, v. 36, p. 873-881, 1998.

BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Austrália. **Soil and Tillage Research,** Amsterdam, v. 55, p. 183-191, 2000.

BODDEY, R.M.; POLIDORO, J.C.; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Use of the ^{15}N natural abundance technique for the quantification of the contribution of N_2 fixation to grasses and cereals. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 28, p. 889-895, 2001.

BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R.; REIS, V. Endophytic nitrogen fixation in sugarcane: present knowledge and future applications. **Plant and Soil,** Dordrecht, v. 252, p. 139-149, 2003.

BORTOLETTO JÚNIOR, M.J. **Características hidrogeoquímicas e processos erosivos mecânicos e químicos nas bacias de drenagem dos rios Tiete e Piracicaba**. 2002. 202 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

BRANDES, E.W. Origin, dispersal and use in breeding of the Melanesian garden sugarcanes and their derivatives, *Saccharum, Piracicaba officinarum L*. **Proceedings of the Congress of International Sugar-Cane Technologists**, New Delhi, v. 9, p. 709-750, 1956.

BULL, T.A.; GLASZIOU, K.T. Sugar cane. In: EVANS, L.T. **Crop physiology**. Cambridge: Cambridge University Press, 1975. p. 51-72.

CANCADO, J.E.D.; SALDIVA, P.H.N.; PEREIRA, L.A.A.; LARA, L.B.L.S; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L.A.; ARBEX, M.A.; ZANOBETTI, A.; BRAGA, A.L.F. The impact of sugar cane-burning emissions on the respiratory system of children and the elderly. **Environmental Health Perspectives,** Research Triangle Park, v. 114, n. 5, p. 725-729, May 2006.

CEDDIA, M.B.; ANJOS, L.H.C. dos; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L.A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo podzólico amarelo no Estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 34, p. 1467-1473, 1999.

CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; FELLER, C.; CAMPOS, D. C.; DE LUCA, E. F.; ESCHENBRENNER, V. **Canne à sucre et sequestration du carbone**. Paris: Académie d'Agriculture de France, Séance du 17 mars, 2004. 15 p.

CERRI, C.E.P.; PAUSTIAN, K.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.L.; MELILLO, J.M.; CERRI, C.C. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the CENTURY model. **Global Change Biology,** Oxford, v. 10, p. 815-832, 2004.

CHRISTIE, E.K.; DELTING, J.K. Analysis of interferences between C(3) and C(4) grasses in relation to temperature and soil nitrogen supply. **Ecology**, Ithaca, v. 63, p. 1277-1284, 1982.

CLEMENTS, H.F.; SHIGEURA, H.; AKAMINE, E.K. Factors affecting the growth of sugar cane. **University of Hawaii Agricultural Experiment Station Technical Bulletin,** Honolulu, v. 18, 90 p., 1952.

COLE, C.V.; STEWART, J.W.B.; OJIMA, D.S.; PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S. Modeling land use effects of soil organic matter dynamics in the North American Great Plains. In: CLARHOLM, M.; BERGSTROM, L. (Ed.). **Ecology of arable land.** Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1989. p. 89-98.

DEMATTE, J.A.M.; GAMA, M.A.P.; COOPER, M.; ARAUJO, J.C.; NANNI, M.R.; FIORIO, P.R. Effect of fermentation residue on the spectral reflectance properties of soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, p. 187-200, 2004.

DOBEREINER, J. Nitrogen-fixing bacteria of the genus Beijerinckia Derx in the rhizosphere of sugar cane. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 15, 211-216, 1961.

DOBEREINER, J. Biological nitrogen fixation in the tropics: social and economic contributions. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 29, p. 771-774, 1997.

DOURADO-NETO, D.; TIMM, L.C.; OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M. State-space approach for the analysis of soil water content and temperature in a sugarcane crop. **Scientia Agricola,** Piracicaba, v. 56, n. 4, p. 1215-1221, 1999. Suplemento.

EVANS, H. Studies on the absorbing surface of sugar-cane root systems. I. Method of study with some preliminary results. **Annals of Botany**, Oxford, v.2, p. 159-182, 1938.

FAOSTAT. (2007). **FAO Statistical databases**. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/340/default.aspx>. Acesso em 11 jan. 2007.

FAUCONIER, R.; BASSEREAU, D. **La cana de azucar.** Barcelona: Blume, 1975. 433 p.

FURLANI NETO, V.L.; FERNANDES, J.; STOLF, R.; COLETTI, J.T. Perdas no campo pelo sistema de corte mecanizado com canas inteiras amontoadas. **Saccharum,** Piracicaba, v. 33, n. 7, p. 30-33, jul./ago. 1984.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W. Uréia and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** Brasília, v. 40, n. 7, p. 689-695, 2005.

GLOVER, J. The behaviour of the root system of sugar cane at and after harvest. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association,** Mount Edgecombe, v. 42, p. 133-135, 1968.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science,** Washington**,** v. 315, p. 808-810, 2007.

GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; ZELLES, L.E.; MEYER, J.H. Long-term effects of green cane harvesting versus burning on the size and diversity of the soil microbial community. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association,** Mount Edgecombe**,** v. 75, p. 228-234, 2001.

GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; MEYER, J.H. Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. **European Journal of Soil Science,** Oxford, v. 53, p. 589-598, 2002.

HARDMAN, J.M.; TILLEY, L.G.W.; GLANVILLE, T. Agronomic and economic aspects of various farming systems for sugar cane in the Bundaberg district. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, Townsville, v. 7, p. 147-153, 1985.

HUNSIGI, G. **Production of sugarcane**. New York: Springler-Verlag, 1993. 245 p.

INMAN-BAMBER, N.G.A. Growth model for sugar-cane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. **South African Journal of Plant and Soil,** Dordrecht, v. 8, p. 93-99, 1991.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change in 1994**: radiative forcing of climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 339 p.

JENKINSON, D.S. The turnover of organic carbon and nitrogen in the soil. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v. 329, p. 361-368, 1990.

JENKINSON, D.S.; RAINER, J.H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. **Soil Science**, Philadelphia, v. 123, p. 298-305, 1977.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modeling sugarcane production systems. I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 61, p. 253-271, 1999.

KOFFLER, N.F.; LIMA, J.F.W.F.; LACERDA, M.F.; SANTANA, J.F.; SILVA, M.A. da. **Caracterização edafo-climática das regiões canavieiras do Brasil –** Pernambuco. Piracicaba: Planalsucar, 1986. 78 p.

LIU, D. L.; KINGSTON, G. QCANE: A simulation model of sugarcane growth and sugar accumulation. In: ROBERTSON, M. J. (Ed.). **Research and modeling approaches to assess sugarcane production opportunities**. St. Lucia: University of Quensland, 1994. p. 25-29.

MACHADO, E.C. Fisiologia de produção de cana de açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.) **Cana-de-açúcar:** cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v.1, cap. 1, p. 56-87.

METHERELL, A.K.; HARDING, L.A.; COLE, C.E.; PARTON, W.J. CENTURY soil organic matter model: agroecosystem version 4.0. Fort Collins: Colorado State University, 1993. v.1. (GPSR. Technical Report, 4).

MITCHELL. R.D.J; THORBURN, P.J.; LARSON, P. Quantifying the immediate loss of nutrients when sugarcane residues are burnt. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, Townsville, v. 22, p. 206-211, 2000.

MOTAVALLI, P.P.; PALM, C.A.; PARTON, W.J.; ELLIOT, E.T.; FREY, S.O. Soil pH and organic C dynamics in tropical forest soils: evidence from laboratory and simulation studies. **Soil Biology and Biochemistry,** Oxford, v. 27, p. 1589-1599, 1995.

MUCHOW, R.C.; SPILLMAN, M.F.; WOOD, A.W.; THOMAS, M.R. Radiation interception and biomass accumulation in a sugarcane crop grown under irrigated tropical conditions. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 45, p. 37-49, 1994.

NICKELL, L.G. Sugarcane. In: ALVIM, P.de.T.; KOZLOWSKI, T.T. (Ed.) **Ecophysiology of Tropical Crops**. New York: Academic Press, 1977. chap. 4, p. 89-110.

PARTON, W.J.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Dynamics of C, N, P, and S in grassland soils: a model. **Biogeochemistry,** Dordrecht, v. 5, p. 109-131, 1988.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. **Soil Science Society of América Journal**, Madison, v. 51, p. 1173-1179, 1987.

PAUSTIAN, K.; COLLINS, H.P.; PAUL, E.A. Management controls on soil carbon. In PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E.T.; COLE, C.V. (Ed.) Soil organic matter in temperate agroecosystems: long-term experiments in North América. Boca Raton: CRC press, 1997, p. 15-49.

PEIXOTO, A.A.; DELGADO, F.R.M.C.R. Manejo da colheita: III Perdas de cana no campo, com corte em leitos de 5 e 7 linhas. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v. 106, n. 4, p. 18-21, 1988.

PURCHASE, B.S. Nitrogen fixation associated with sugarcane. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association**, Mount Edgecombe, v.54, p. 173-176, 1980.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHES, B.; LARRE-LARROUY, M.C.; DE LUCA, E.F.; LAURENT, J.Y.; CERRI, C.C.; FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 115, p. 285-289, 2006.

RESENDE, A.S.; XAVIER, R.P.; OLIVEIRA, O.C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.JR.; BODDEY, R.M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. **Plant and Soil,** Dordrecht, v. 281, p. 339-351, 2006.

ROBERTSON, F. **Sugarcane trash management:** consequences for soil carbon and nitrogen - Final report of the project Nutrient Cycling in Relation to Trash Management. Townville: CRC for Sustainable Sugar Production, 2003. 39 p.

RUSCHEL, A.P.; HENIS, Y.; SALATI, E. Nitrogen-15 tracing of N-fixation with soil-grown sugar cane seedlings. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 7, p. 181-182, 1975.

SANFORD, R.L.J.; PARTON, W.J.; OJIMA, D.S.; LODGE, D.J. Hurricane effects on soil organic matter dynamics and forest production in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico: results of the simulation modeling. **Biotropica**, New Orleans, v. 23, p. 364-372, 1991.

SILVER, W.L.; NEFF, J.; MCGRODDY, M.; VELDKAMP, E.; KELLER, M.; COSME, R. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian Forest ecosystem. **Ecosystems**, New York, v. 3, p. 193-209, 2000.

SINGELS, A.; DONALDSON, R.A.; SMIT, M.A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, p. 291-303, 2005.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEF, K.; OGLE, S.M.; SA, J.C.DE M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils- Effects of no-tillage. **Agronomie**, Paris, v. 22, p. 755-775, 2002.

SMITH, P.; SMITH, J.U.; POWLSON, D.S., McGILL, W.B.; ARAH, J.R.M.; CHERTOV, O.G. ; COLEMAN, K.; FRANKO, U.; FROLKING, S.; JENKINSON, D.S.; JENSEN, L.S.; KELLY, R.H.; KLEIN-GUNNEWIEK; KOMAROV, A.S.; LI, C.; MOLINA, J.A.E.; MUELLER, T.; PARTON, W.J.; THORNLEY, J.H.M.; WHITMORE, A.P. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. **Geoderma,** Amsterdam, v. 81, p. 153-225, 1997.

SILVA, A.L.C. de; COSTA, W.A.J.M. de. Varietal variation in growth, physiology and yield of sugarcane under two contrasting water regimes. **Tropical Agricultural Research**, Peradeniya, v. 16, p. 1-12, 2004.

SILVA, G.M. de A.; ORLANDO FILHO, J. Caracterização da composição química dos diferentes tipos de vinhaça no Brasil. **Boletim Técnico Planalsucar**, Piracicaba, v. 3, p. 5-22, 1981.

SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, Dordrecht , v. 241, p. 155-176, 2002.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research,** Amsterdam, v. 92, p. 169-183, 2005.

SPAIN, A.V.; HODGEN, M.J. Changes in the decomposition of sugarcane harvest residues during the decomposition as a surface mulch. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 17, p. 225-231, 1994.

SPAROVEK, G.; SCHNUG, E. Temporal erosion-induced soil degradation and yield loss. **Soil Science Society of América Journal**, Madison, v. 65, p. 1479-1486, 2001.

SUTTON, M.R.; WOOD, A.W.; SAFFIGNA, P.G. Long term effects of green cane trash retention on Herbert River soils. In: WILSON, J.R.; HOGARTH, D.M.; CAMPBELL, J.A.; GARSIDE, A.L. (Ed.). **Sugarcane:** Research Towards Efficient and Sustainable Production. Brisbane: CSIRO - Division of Tropical Crops and Pastures, 1996. p. 178-180.

THOMPSON, G.D. The production of biomass by sugarcane. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association**, Mount Edgecombe, v. 52, p. 180-187, 1978.

THORBURN, P.J.; VAN ANTWERPEN, R.; MEYER, J.H.; BEZUIDENHOUT, C.N. The impact of trash management on soil carbon and nitrogen: I Modelling long-term experimental results in the South African sugar industry. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association**, Mount Edgecombe, v. 76, p. 260-268, 2002.

TOMINAGA, T.T.; CÁSSARO, F.A.M.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; TIMM, L.C. Variability of soil water content and bulk density in a sugarcane field. **Australian Journal of Soil Research,** Collingwood, v. 40, p. 605-614, 2002.

TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W.; GAVA, G.J.C.; SARRIES, G.A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** Viçosa, v. 26, n. 3, p. 636-646, 2002.

TRUMBORE, S. Comparison of carbon dynamics in tropical and temperature soils using radiocarbon measurements. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 7, p. 275-290, 1993.

VALLIS, I.; PARTON, W.J.; KEATING, B.A.; WOOD, A.W. Simulation of the effects of trash and N fertilizer management on soil organic matter levels and yields of sugarcane. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 38, p.115-132, 1996.

VAN ANTWERPEN, R.; MEYER, J.H.; TURNER, P.E.T. The effects of cane trash on yield and nutrition from the 61 year old BT1 trial at Mount Edgecombe. **Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association**, Mount Edgecombe, v. 75, p. 235-241, 2001.

VAN VEEN, P.; PAUL, E.A. Organic carbon dynamics in grassland soils. 1. Background information and computer simulation. **Canadian Journal of Soil Science,** Ottawa**,** v. 61, p. 185-201, 1981.

VEIGA, F.M.; DOBEREINER, J.; PINTO, R.S.; GONDIM, G.S. Influencia do tratamento do palhiço da cana-de-açúcar na matéria orgânica do solo. **Boletim do Instituto de Ecologia e Experimentação Agrícolas**, Rio de Janeiro, n.21, p.65-78, 1962.

WALKLEY, A.; BLACK, I.A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Philadelphia, v. 37, p. 29-38, 1934.

WOOD, A.W. Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in north Queensland. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 69-85, 1991.

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo