

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Formas de fósforo em Latossolo sob cana-de-açúcar colhida sem queima

Benedito Luiz Correia

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

**Piracicaba
2010**

Benedito Luiz Correia
Engenheiro Agrônomo

Formas de fósforo em Latossolo sob cana-de-açúcar colhida sem queima

Orientador:
Prof. Dr. **LUÍS REYNALDO FERRACCIÚ ALLEONI**

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

**Piracicaba
2010**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Correia, Benedito Luiz

Formas de fósforo em Latossolo sob cana-de-açúcar colhida sem queima / Benedito Luiz
Correia. - - Piracicaba, 2010.
103 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.

1. Cana-de-açúcar 2. Colheita 3. Fertilidade do solo 4. Fósforo 5. Latossolos 6. Queimada
Título

CDD 633.61
C824f

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

A Deus,
por tudo.

Aos meus pais, João (*in memoriam*) e Benedita,
pela minha educação, formação humana
e exemplos de coragem e fé.

Aos irmãos João, Janete, Jorge, Emílio, Jener e Janio,
pelo fraterno convívio e estímulo ao longo da vida.

A Márcia, esposa e companheira em todos os projetos,
pelo amor, desprendimento e total dedicação à construção de uma família.

Às minhas filhas Marília e Marina,
pelo apoio e renúncia para tornar este projeto possível.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Luís Reynaldo Ferracciú Alleoni, pela orientação, estímulo, amizade e exemplo profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas e ao Departamento de Ciência do Solo, por meio dos seus professores e funcionários, pela oportunidade de crescimento profissional e pelo apoio técnico, científico e material em todas as fases do curso.

Ao Dr. John L. Kovar, do National Laboratory for Agriculture and Environment, ARS/USDA, Ames – IA – USA, e ao Prof. Michael Thompson, do Department of Agronomy, Iowa State University, pelo apoio e orientação durante o estágio no exterior.

À Usina São Martinho, Pradópolis, SP, pela disponibilização da área experimental e pelo fornecimento das informações necessárias para a realização da pesquisa.

Ao Eng. Agr. Ivo Belinasso, do Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba, SP, pelas informações sobre a instalação da área experimental.

Aos amigos e colegas Ceres e Brivaldo Almeida, Roberta, Cíntia, Fernando, Leônidas e Patrícia Melo, Suzana e Julius Blum, Mariana, Anderson, Sabrina, Joice, Antônio Fernandes (Toninho), Evandro, Alexys, Rodrigo Coqui, Rodrigo Czyca, Adriana, Rodney, Luis Silva, Marina, Leandro e Elisandra Bortolon, Jay Berkley, Brian Hill, Sunny e Tony Kindschuh, Marcelo e Vívian Schneider que, em diferentes momentos e maneiras, ajudaram a tornar possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Luiz Roberto Martins Pinto, do Departamento de Ciências Exatas - Universidade Estadual de Santa Cruz, pela assessoria nas análises estatísticas.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, ao Colégio Agrícola Dom Agostinho Ikas e aos professores da área de agricultura que me liberaram para realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa por um período de um ano e meio, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela continuidade do benefício e concessão da bolsa de Doutorado Sanduíche no Exterior.

A todos que, direta ou indiretamente, me impulsionaram na concretização deste projeto de formação profissional.

Muito Obrigado.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
Referências	16
2 ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO SOB CANA-DE-AÇÚCAR COLHIDA SEM QUEIMA EM EXPERIMENTO DE LONGO PRAZO.....	19
Resumo	19
Abstract	19
2.1 Introdução	20
2.2 Material e Métodos	21
2.3 Resultados e Discussão	24
2.3.1 Carbono orgânico total – COT	24
2.3.2 Acidez do solo.....	27
2.3.3 P-disponível.....	31
2.3.4 Cátions trocáveis.....	34
2.3.5 CTC e saturação por bases.....	37
2.4 Conclusões.....	39
Referências	40
3 FORMAS DE FÓSFORO INORGÂNICO EM LATOSSOLO SOB CANA-DE-AÇÚCAR COLHIDA SEM QUEIMA	45
Resumo	45
Abstract	45
3.1 Introdução	46
3.2 Material e Métodos	48
3.3 Resultados e Discussão	53
3.3.1 Fósforo total – P total.....	53
3.3.2 Fósforo orgânico total - P _o total.....	54
3.3.3 Fracionamento do P inorgânico – P _i	59
3.3.4 Fração P _i + P _o residual.....	65
3.4 Conclusões	66
Referências	67
4 FRACIONAMENTO DO FÓSFORO ORGÂNICO EM LATOSSOLO SOB CANA-DE-AÇÚCAR COLHIDA SEM QUEIMA.....	73

Resumo	73
Abstract	73
4.1 Introdução	74
4.2 Material e Métodos	76
4.3 Resultados e Discussão	80
4.3.1 Frações de P_o	81
4.3.1.1 P_o lábil.....	81
4.3.1.2 P_o na biomassa microbiana (P_o biomassa).....	82
4.3.1.3 P_o moderadamente lábil	83
4.3.1.4 P_o ligado a ácido fúlvico (P_o fúlvico).....	84
4.3.1.5 P_o ligado a ácido húmico (P_o húmico).....	85
4.3.1.6 P_o não lábil.....	86
4.3.2 Distribuição das frações de P_o nas camadas do solo	86
4.3.3 Distribuição percentual das frações de P_o em relação ao somatório das frações P_o ..	87
4.4 Conclusões	93
Referências	93
ANEXOS.....	99

RESUMO

Formas de fósforo em Latossolo sob cana-de-açúcar colhida sem queima

No sistema de colheita de cana-de-açúcar sem queima da palha (SQ) são depositadas, em média, $14 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de restos da cultura sobre as áreas de cultivo. Isso promove elevação do teor de matéria orgânica (MO) e melhoria nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Contudo, os efeitos desse sistema na disponibilidade do fósforo ainda são pouco estudados. Amostras de um Latossolo foram colhidas num experimento de campo conduzido sob os sistemas SQ e com queima da cana (CQ). Foram coletadas amostras nas profundidades de 0-0,05 m, 0,05-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m, na linha de plantio, a 25 cm da linha e na entrelinha (0,75 m da linha de plantio). Avaliaram-se: (i) variações nos atributos químicos do solo nos sistemas sob cana SQ e CQ; (ii) variações nos teores de P total, P orgânico total e as frações de P inorgânico (P_i) ligadas a ferro ($P_i - \text{Fe}$), a alumínio ($P_i - \text{Al}$), a cálcio ($P_i - \text{Ca}$), P_i - ocluso e P - residual; e (iii) alterações nos teores das frações de P_o lábil, P_o biomassa, P_o moderadamente lábil, P_o fúlvico, P_o húmico e P_o não lábil. Partiu-se da hipótese de que a preservação da palha melhora os atributos químicos do solo e promove aumento da quantidade de P ligada às frações de P inorgânico (P_i) e de P orgânico (P_o) mais lábeis, com maior intensidade nas posições e profundidades mais influenciadas pelo sistema radicular da planta. Houve elevação da capacidade de troca de cátions das amostras de solo coletadas no sistema SQ em todas as posições e profundidades testadas. Valores de carbono orgânico total, Ca^{2+} , Mg^{2+} e $V\%$ no SQ superaram os do CQ nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m nas posições linha, 0,25 m e entrelinha, como resposta aos efeitos positivos do acúmulo de MO proveniente da palha da cana. O teor de P-disponível foi pouco afetado pela manutenção da palhada sobre o solo, sendo que valores mais altos foram encontrados somente na camada de 0-0,05 m nas amostras de solo coletadas no sistema CQ. Em geral, não houve diferenças nas formas de P_i entre as amostras de solo dos sistemas SQ e CQ e entre as posições e profundidades. No compartimento P_o total, os resultados do sistema SQ apresentaram depleção em relação ao CQ na camada com maior densidade de raízes (0-0,05 m) e acumulação nas camadas de aplicação da adubação de plantio (0,2-0,3 e 0,3-0,4 m). Os teores das frações de P_o lábil, biomassa, moderadamente lábil, fúlvico e húmico no solo sob sistema SQ foram superiores aos do CQ, nas amostras coletadas na profundidade de 0,1-0,2 m.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar; Colheita sem queima; Fertilidade do solo; Amostragem do solo; P total; P orgânico total; Fracionamento de P_i ; Fracionamento de P_o

ABSTRACT

Forms of phosphorus in an Oxisol cultivated with sugarcane harvested without burning

In the management system of harvesting sugarcane without straw burning (SQ), 14 t ha⁻¹ yr⁻¹ of crop residues, on average, are deposited on the soil. So, organic matter (MO) contents increase, and physical, chemical and biological soil attributes are improved. However, the effects of phosphorus (P) availability in this system are still poorly studied. Samples of an Oxisol were collected from a field experiment conducted under SQ and under burned sugarcane (CQ) systems. Samples were collected at layers of 0-0.05 m, 0.05-0.1 m, 0.1-0.2 m, 0.2-0.3 m, and 0.3-0.4 m in row, at 0.25 m from row and in interrow (0.75 m from the rows). We evaluated: (i) variations in soil chemical attributes in samples from both harvesting systems; (ii) changes in the contents of total P, total organic P, and inorganic P fractions (P_i) linked to iron (P_i-Fe), aluminum (P_i-Al), calcium (P_i-Ca), occluded P_i and P residual; (iii) changes in P_o fractions, labile, biomass, moderately labile, fulvic, humic and non-labile. The main hypothesis is that the preservation of straw improves the chemical soil attributes and increases the amount of P bound to the most labile inorganic and organic P fractions, with greater intensity in the positions and depths most affected by sugarcane roots. Values of soil cationic exchange capacity were higher in soil samples collected in the SQ system in all positions and depths tested. The values of total organic carbon, Ca²⁺, Mg²⁺ and V% were higher in the SQ than in CQ, on the layers of 0-0.05 m and 0.05-0.1 m and on the positions of row and 0.25 m, in response to the positive effects of OM from the straw. Contents of available phosphorus were slightly affected by the maintenance of straw on the soil. Higher P values were found in samples collected in the upper layer (0-0.05 m) under CQ than under SQ harvesting system. In general, there were no differences between the values of total P and P_i fractions in soil samples from both systems. In the P_o total compartment, the samples from SQ system showed depletion in relation to the CQ on the layer with the highest density of roots (0-0.05 m) and accumulation on the layers of application of fertilizer (0.2-0.3 and 0.3-0.4 m). The values of labile P_o fractions (biomass, moderately labile, fulvic and humic acids) were higher in soil samples under SQ than under CQ systems in the samples collected at 0.1-0.2 m-layer.

Keywords: Sugarcane; Harvesting without burning; Total P; Total organic P; P_i fractionation; P_o fractionation

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com estimativa de produção para a safra 2010/11 de 651 milhões de toneladas, numa área de 8,2 milhões de hectares. O interesse mundial pela produção do etanol como alternativa ao uso de combustíveis fósseis impulsiona o setor, que prevê expansão de 7,8% da área cultivada em relação à safra anterior. Essa tendência é liderada pelo Estado de São Paulo, que responde por 53% da área plantada e 56% da produção nacional (CONAB, 2010). Por questões tecnológicas ou econômicas, é utilizado fogo antes da colheita da cana em várias regiões do Brasil. A colheita da cana com queima visa a diminuir a quantidade de palha e, desta forma, facilitar a operação do corte manual e do carregamento mecânico.

A colheita da cana com queima agrava os problemas ambientais pela emissão de gases para a atmosfera, principalmente CO₂, CH₄ e N₂O, contribuindo para o aquecimento global (CERRI et al., 2007). Há também aumento das internações por problemas respiratórios entre crianças e idosos das cidades circunvizinhas às usinas (CANÇADO et al., 2006). Alguns Estados brasileiros adotaram medidas legislativas que estabelecem prazos e procedimentos para eliminação gradativa da queima. O Governo do Estado de São Paulo e a União da Agroindústria Canavieira de São Paulo – ÚNICA assinaram o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista, visando a antecipar o prazo final para eliminação da queimada de 2021 para 2014, nos terrenos com declividade até 12%, e de 2031 para 2017, em áreas com declividade acima de 12% (SÃO PAULO; UNICA, 2007).

Por meio da colheita mecanizada da cana sem queima depositam-se sobre o solo, em média, 14 t ha⁻¹ ano⁻¹ de palha, folhas e ponteiros de cana, com variações de 10 a 15 t ha⁻¹ ano⁻¹, em função da variedade e da fase da cultura (PAES; OLIVEIRA, 2005). Dependendo do manejo do solo e das condições climáticas locais, a decomposição da palha afeta o ciclo do carbono, a dinâmica da matéria orgânica do solo e pode constituir uma prática de manejo na mitigação do efeito estufa, aumentando o interesse no agrossistema cana-de-açúcar entre as estratégias para sequestro de carbono (CERRI et al., 2007; LUCA et al., 2008).

O manejo da colheita da cana sem queima aumenta a concentração de frações húmicas, a capacidade de troca de cátions e os teores de N, P e S totais do solo (CANELLAS et al., 2010). Oliveira et al. (1999) verificaram elevação na biodisponibilidade de K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ proveniente da mineralização da palha da cana. A decomposição da palhada pode promover aumento do pH

do solo, com formação de complexos entre ácidos orgânicos e metais que reduzem a toxidez do alumínio e promovem maior movimentação de cátions no solo (JONES; PRABOWO; KOCHIAN, 1996; MIYAZAWA; PAVAN; CALEGARI, 1993).

No sistema de colheita sem queima, desenvolvem-se condições diferenciadas de fertilidade do solo entre as posições linha e entrelinha, bem como entre as profundidades de superfície (0-0,2 m) e subsuperfície (0,2-0,4 m). O adensamento do sistema radicular nas camadas superficiais é favorecido pela preservação da água do solo, pelas faixas de compactação da área de cultivo por ação das máquinas agrícolas e pela aplicação localizada de adubos e corretivos (ALVAREZ; CASTRO; NOGUEIRA, 2000; WOOD, 1991). Essas modificações têm levado os técnicos a reavaliar recomendações quanto ao local e à profundidade de amostragem para fins de avaliação da fertilidade do solo. Segundo Demattê (2004), não é exagero afirmar que se deve aprender tudo novamente em matéria de manejo de adubação com a introdução do sistema de colheita de cana sem queima.

Os efeitos da palha da cana na biodisponibilidade do fósforo (P) ainda são questionáveis, visto que o material orgânico adicionado ao solo pode agir ou como “fonte” ou como “dreno” de P. O comportamento fonte se dá quando a relação C:P for menor que 200, propiciando a mineralização do P orgânico (P_o), enquanto o comportamento dreno aparece quando a relação C:P for superior a 300, levando à imobilização do P inorgânico (P_i) (DALAL, 1977; HAVLIN et al., 2005). Oliveira et al. (1999) relataram que a palha da cana-de-açúcar variedade SP79-1011 coletada logo após o corte apresentou relação C:P = 947. Após um ano de decomposição no campo, esse valor caiu para 551 sem que houvesse redução nos teores totais de P no material. Como resultado da relação C:P maior que 300 e das baixas concentrações do elemento, não se pode esperar aumento da disponibilidade do P diretamente pela mineralização da palha da cana-de-açúcar em período curto de tempo.

A dinâmica do P_i no solo interfere na eficácia da adoção do sistema de colheita sem queima na biodisponibilidade do elemento. Os solos predominantes nas áreas consolidadas e de expansão da cana-de-açúcar são, de modo geral, altamente intemperizados, ácidos e possuem elevadas concentrações de minerais 1:1 e óxidos de Fe e de Al na fração argila. Nessas condições, grande parte do P mineralizado do P_o ou adicionado via adubação é adsorvida pela fração mineral ou precipitada como compostos de Fe e de Al, tornando o elemento pouco disponível às plantas (TIESSSEN, 2005). Isso faz com que sejam necessárias aplicações maciças

de fertilizantes, geralmente de alto custo, para alcançar a produtividade almejada. Por sua vez, pesquisadores e agricultores não têm dado a devida atenção ao fósforo dos compostos orgânicos (P_o), possivelmente por sua quantidade ser pequena. A crescente preocupação com a preservação ambiental leva pesquisadores em ciência do solo a tomar novos rumos que impulsionem o entendimento da dinâmica de P associada à produção e à decomposição dos resíduos orgânicos (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007).

A origem do P_o no solo está na incorporação da biomassa constituída pela mistura de componentes vegetais, protoplasma microbiano, restos de animais e produtos em decomposição que passam por transformações pelo metabolismo de bactérias, fungos e protozoários do solo (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). O fosfato de inositol é a forma mais comum de P_o e compreende 60% das formas conhecidas de P_o . É a mais resistente à degradação devido à sua elevada massa molar, ao número de grupos fosfatos e à formação de ligações estáveis com a MO e minerais do solo. Fosfolipídios, ácidos nucleicos, açúcares e fosfoproteínas compreendem menos de 20%. A maior parte das espécies de P_o permanecem não identificadas (CELI; BARBERIS, 2005).

A adição de biomassa vegetal ao solo pode reduzir a adsorção de P na fração mineral e assim aumentar sua biodisponibilidade (HUNT et al., 2007). Os compostos produzidos na decomposição da MO, raízes e exsudatos radiculares podem atuar por mecanismos tais como: (i) favorecimento da elevação da microbiota do solo e armazenamento do P na forma microbiana (GEORGE et al., 2006); (ii) bloqueio e competição por sítios de adsorção do P_i nos óxidos de Fe e de Al, visto que a forma de P ligada à MO é aproximadamente a mesma adsorvida pelos óxidos de Fe e de Al (GUPPY et al., 2005); (iii) deslocamento de parte do P adsorvido pela fração mineral para solução do solo (HEREDIA; CIRELLI, 2007); (iv) solubilização de fosfatos de Fe e de Al em solos ácidos e de fosfatos de Ca em solos calcários, liberando o P (KOCHIAN; HOEKENGA; PIÑEROS, 2004), e (v) favorecimento do processo de nucleação-crescimento do cristal do óxido de ferro goethita, elevando a superfície específica e reduzindo os sítios de adsorção do P (KÄMPF; CURI, 2000).

Independentemente de sua natureza inorgânica (P_i) ou orgânica (P_o), a disponibilidade do fósforo é estudada de acordo com a facilidade com que se repõem os teores do elemento na solução do solo. Mais recentemente, foi dada ênfase à identificação da predominância de diferentes frações de P_i e P_o na disponibilidade do elemento. Para tanto, são utilizados métodos de

fracionamento que se baseiam na extração sequencial do P_i e do P_o , com extratores seletivos que isolam compartimentos de diferentes solubilidades, permitindo classificá-los como P lábil, P moderadamente lábil e P não lábil (SANTOS et al., 2008). Informações qualitativas e quantitativas provenientes desses fracionamentos são muito úteis em pesquisas de impactos ambientais de manejo de solo (ZHANG; KOVAR, 2009).

Nesse estudo partiu-se da hipótese de que a adoção do sistema de colheita de cana-de-açúcar sem queima promove alterações nos atributos de fertilidade do solo e na distribuição das frações de fósforo inorgânico e orgânico de maneira diferenciada na linha de plantio e nas profundidades de maior atividade radicular. Para testar a hipótese foram desenvolvidos três estudos comparando os sistemas de colheita com e sem queima, com os seguintes objetivos:

- (i) estudar as variações nos valores de atributos químicos do solo em função da distância da linha de plantio e da profundidade de amostragem;
- (ii) avaliar as alterações na distribuição das formas de P total, P orgânico total e das frações P_i -Fe, P_i -Al, P_i -Ca e P_i -ocluso;
- (iii) estimar as alterações nas frações de P_o lábil, P_o biomassa, P_o moderadamente lábil, P_o fúlvico, P_o húmico e P_o não lábil.

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, p. 653-659, 2000.
- CANÇADO, 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**, Durhan, v. 114, p. 725-729, 2006.
- CANELLAS, L.P.; BUSATO, J.G.; DOBBSS, L.B.; BALDOTTO, M.A.; RUMJANEK, V.M.; OLIVARES, F.L. Soil organic matter and nutrient pools under long-term non-burning management of sugar cane. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 61, p. 375-383, 2010.
- CELI, L.; BARBERIS, E. Abiotic stabilization of organic phosphorus in the environment. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. (Ed.). **Organic phosphorus in the environment**. Cambridge: CAB International, 2005. chap. 6, p. 113 – 132.

CERRI, C.E.P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, J.M.; CERRI, C.C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 83-99, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Avaliação da safra agrícola de cana-de-açúcar, 2º levantamento, setembro de 2010**. Brasília, CONAB. 2010, 15 p. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 23 out. 2010.

DALAL, R.C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 29, 83-117, 1977.

DEMATTE, J.L.I. Manejo e conservação de solos na cultura da cana. **Visão Agrícola**. Piracicaba, v. 1, p. 8-17, 2004.

GEORGE, T.S.; TURNER, B.L.; GREGORY, P.J.; CADE-MENUN, B.J.; RICHARDSON, A.E. Depletion of organic phosphorus from Oxisols in relation to phosphatase activities in the rhizosphere. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 57, p. 47-57, 2006.

GUPPY, C.N.; MENZIES, N.W.; BLAMEY, F.P.C.; MOODY, P.W. Do decomposing organic matter residues reduce phosphorus sorption in highly weathered soils? **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 1.405-1.411, 2005.

HAVLIN, J.H.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. Phosphorus. In: _____. **Soil Fertility and Fertilizers – An introduction to nutrient management**, 7th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. chap. 5, p. 160-198.

HEREDIA, O.S.; CIRELLI, A.F. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 137, p. 426-431, 2007.

HUNT, J.F.; OHNO, T.; HE, Z.; HONEYCUTT, C.W.; DAIL, D.B. Inhibition of phosphorus sorption to goethite, gibbsite and kaolin by fresh and decomposed organic matter. **Biology Fertility Soils**, Berlin, v. 44, p. 277-288, 2007.

JONES, D.L.; PRABOWO, A.M.; KOCHIAN, L.V. Aluminium-organic acid interactions in acid soils – II. Influence of solid phase sorption on organic acid-Al complexation and Al rhizotoxicity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 182, p. 229-237, 1996.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In.: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: SBCS, 2000. v. 1. p. 107- 139.

KOCHIAN, L.V.; HOEKENGA, O.A.; PIÑEROS, M.A. How do crop plants tolerate acid soil? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. **Annual Review of Plant Biology**. Palo Alto, v. 55, p. 459-493, 2004.

LUCA, E.F.; FELLER, C.; CERRI, C.C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D.C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 789-800, 2008.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 411-416, 1993.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 8, p. 471-550.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; PENATTI, C.P.; PICCOLO, M.C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 2.359-2.362, 1999.

PAES, L.A.D.; OLIVEIRA, M.A. Potential trash biomass of the sugar cane plant. In: HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. (Ed.). **Biomass power generation: Sugar cane bagases and trash**. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005. chap. 1, p. 19-23.

SANTOS, D.R.; CASSOL, P.C.; KAMINSKI, J.; ANGHINONI, I. Fósforo orgânico do solo. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Ecosistemas tropicais & subtropicais. 2. ed., Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 8, p. 101-111.

SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 576-586, 2008.

SÃO PAULO (Estado); UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO. Protocolo Ambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista, 2007. Disponível em: http://www.unica.com.br/userFiles/Protocolo_Assinado_Agroambiental.pdf
Acesso em: 23 out. 2010.

TIESSEN, H. Phosphorus dynamics in tropical soils. In: SIMS, J.T.; SHARPLEY, A.N. (Ed.). **Phosphorus: Agriculture and the environment**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 2005. chap. 8, p. 253-262. (Agronomy monograph, 46).

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.

ZHANG, H.; KOVAR, J.L. Fractionation of soil phosphorus. In: KOVAR, J.L.; PIERZYNSKI, G.M. (Ed.). **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters**. 2nd ed. Raleigh: North Carolina State University, 2009. p. 50-60.

2 ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO SOB CANA-DE-AÇÚCAR COLHIDA SEM QUEIMA EM EXPERIMENTO DE LONGO PRAZO

Resumo

O sistema de colheita da cana-de-açúcar sem queima promove, a longo prazo, aumento no teor de carbono orgânico (CO) e na disponibilidade de nutrientes no solo. A intensa mecanização e a aplicação localizada de adubos e corretivos podem alterar a fertilidade do solo e a distribuição das raízes da soqueira da cana. Avaliaram-se atributos químicos de um Latossolo Vermelho distrófico sob cana-de-açúcar colhida sem queima há 14 anos. Utilizaram-se amostras coletadas numa área experimental instalada em 1995, em Pradópolis, São Paulo (21°23'S; 47°59'O; 620,3 m). Dois sistemas de colheita foram avaliados: cana colhida sem queima (SQ) e cana colhida após queima (CQ). As amostras foram coletadas nas posições: linha de plantio, a 0,25 m da linha e na entrelinha (0,75 m da linha de plantio); nas profundidades: 0-0,05 m; 0,05-0,1 m; 0,1-0,2 m; 0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m. Amostras nas mesmas profundidades foram coletadas numa mata nativa adjacente, tomada como referência. Foram determinados os teores de CO total (COT), pH em solução de CaCl_2 0,01 mol L⁻¹, acidez trocável (Al^{3+}), acidez potencial (H + Al), Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ trocáveis, P resina e Mehlich-1. Foram calculadas a capacidade de troca de cátions ao pH 7,0 (CTC), saturação por alumínio (m%) e saturação por bases (V%). A CTC foi mais alta nas amostras coletadas no sistema SQ em todas as posições e profundidades testadas. Valores de COT, Ca^{2+} , Mg^{2+} e V% no SQ superaram os do CQ nas camadas mais superficiais (0-0,5 e 0,05-0,1 m) na maioria das posições. O teor de P-disponível foi pouco afetado pela manutenção da palhada sobre o solo, sendo que valores mais altos foram encontrados somente na camada de 0-0,05 m nas amostras de solo coletadas no sistema CQ.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar; Colheita sem queima; Fertilidade do solo; Amostragem do solo

Abstract

Harvesting sugarcane without burning promotes, in a long term, an increase in organic carbon content and improves nutrient availability in soils. The intense mechanization and the localized application of fertilizers and lime may alter soil fertility and root distribution in sugarcane ratoons. In this study, chemical attributes of a dystrophic Oxisol under sugarcane cultivation without burning for 14 years were evaluated. Soil samples were collected in a field experiment established since 1995 in Pradópolis, state of Sao Paulo, Brazil (21°23'S; 47°59'W; 620.3 m a.s.l.). Two treatments were evaluated: sugarcane harvested without burning (SQ) and burned sugarcane (CQ). Soil samples were collected on the row, 0.25 m from the row, and on the interrow (0.75 m from row) at the layers 0-0.05, 0.05-0.1, 0.1-0.2, 0.2-0.3 and 0.3-0.4 m. Samples at the same layers were also collected in an adjacent area under native forest considered a control. The following determinations were performed: total organic carbon (COT), 0.01 M CaCl_2 pH, exchangeable acidity (Al^{3+}), total exchangeable acidity (H + Al), exchangeable Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , P extracted by resin and Mehlich-1. Cation exchange capacity - CEC, aluminum saturation - m% and base saturation - V% were then calculated. CEC was higher in soil samples collected in SQ at all positions and depths tested, while COT, Ca^{2+} , Mg^{2+} and V% values were also higher in SQ than in the CQ system only in the upper layers (0-0.05 and 0.05-0.1 m). Contents of available phosphorus were slightly affected by the maintenance of straw on the soil. Higher values were

found in samples collected in the upper layer (0-0.05 m) under CQ than under SQ harvesting system.

Keywords: Sugarcane; No-burning harvesting; Soil fertility; Soil sampling

2.1 Introdução

No sistema de colheita de cana-de-açúcar sem queima depositam-se sobre o solo de 10 a 15 t ha⁻¹ ano⁻¹ de palhada, folhas e ponteiros, cuja decomposição afeta o ciclo do carbono e a dinâmica da matéria orgânica (MO) (LUCA et al., 2008; PAES; OLIVEIRA, 2005). O aporte de MO é de fundamental importância em solos tropicais de regiões úmidas, na sua maioria altamente intemperizados e ácidos, porque melhora a disponibilidade de nutrientes para as culturas, a capacidade de troca de cátions (CTC) e a complexação de elementos tóxicos (BAYER; MIELNICZUK, 2008). A preservação e a intensidade dos efeitos benéficos da MO na fertilidade dependem da formação de complexos argilo-orgânicos e têm correlação positiva com o teor de argila do solo (ZINN; LAL; RESCK, 2005). A disponibilização dos nutrientes imobilizados é rápida na camada de palha diretamente em contato com o solo e depende da composição química do material, do tempo de decomposição e de fatores ambientais como temperatura, disponibilidade hídrica e oxigênio. (GALDOS et al., 2010; SILVA; MENDONÇA, 2007). As evidências de elevação da CTC e da biodisponibilidade de nutrientes nas áreas submetidas a esse manejo de colheita são conhecidas (CANELLAS et al., 2010; OLIVEIRA et al., 1999).

O tráfego das colhedoras de cana tem intensificado a compactação nas entrelinhas de plantio (WOOD, 1991). A manutenção da palha na área limita a aplicação de adubos orgânicos e minerais na superfície do solo. Nessas condições, forma-se um sistema radicular com cerca de 75% de raízes concentradas nos 40 cm superficiais e uma densa distribuição lateral até 20 cm da linha de plantio (ALVAREZ; CASTRO; NOGUEIRA, 2000). Apesar dessas alterações, existem poucos estudos que levem em consideração os efeitos da palha na fertilidade do solo com vistas a reavaliar a localização e as profundidades para amostragem, visando a adubações mais econômicas e eficazes.

O primeiro passo na avaliação do estado de fertilidade do solo é uma adequada amostragem, especialmente em culturas semiperenes como a cana-de-açúcar, na qual existe uma faixa próxima à linha bem diferenciada da outra faixa, na entrelinha. Pesquisadores do Instituto Agrônomo de Campinas recomendam a amostragem nas entrelinhas da soqueira (RAIJ et al., 1997). Vitti e Mazza (2002) recomendam amostragem a 20-25 cm da linha, alertando para a

possibilidade de superestimativa dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , SB e V% em amostras coletadas na entrelinha, e superestimativa dos teores de P e de K^+ em amostras da linha de plantio. Existe recomendação de amostragem de 30% das subamostras da área na linha e 70% na entrelinha (MALAVOLTA, 1992). Os autores recomendam a amostragem na profundidade de 0-20 cm e só levam em consideração a colheita com queima e corte manual. As pesquisas com outras culturas no sistema de plantio direto já avançaram, e diversos pesquisadores reconhecem as alterações de fertilidade promovidas nas camadas mais superficiais (abaixo de 0,2 m). Por isso a Comissão de Fertilidade de Solo do Núcleo Regional Sul da SBCS recomenda, desde 1997, a amostragem na camada de 0-0,1 m em áreas de plantio direto com mais de cinco anos (CQFS-RS/SC, 2004).

Nesse estudo avaliaram-se atributos químicos de amostras de um Latossolo Vermelho distrófico colhidas em diferentes profundidades e posições em relação à linha de plantio numa área sob cana-de-açúcar colhida sem queima há 14 anos.

2.2 Material e Métodos

A área de coleta das amostras está localizada em Pradópolis, nordeste do Estado de São Paulo, na região geomorfologicamente denominada de *Cuestas Basálticas*. O clima, segundo classificação de Köppen, é do tipo Aw, tropical com verão chuvoso e inverno seco, com temperatura média anual de 22,5 °C e a precipitação média anual é de 1.470 mm. O solo é um Latossolo Vermelho distrófico muito argiloso (EMBRAPA, 2006), com teor médio de 656 g kg⁻¹ de argila até 40 cm. A fração argila é constituída principalmente de caulinita, gibbsita, goethita e hematita, nas quantidades de 294; 196; 70 e 59 g kg⁻¹, respectivamente, cujos teores foram estimados com base em Kämpf e Schwertmann (1983).

O experimento foi instalado pelo Centro de Tecnologia Canavieira, em 1995, na Fazenda Aparecida, da Usina São Martinho (21°23' S; 47°59' O; 620,3 m), em gleba cultivada com cana-de-açúcar desde 1950, após conversão da vegetação nativa. O delineamento experimental foi em blocos aleatorizados com seis repetições e três tratamentos: cana sem queima colhida mecanicamente (SQ); com queima colhida mecanicamente (CQM); com queima colhida manualmente (CQ) (Figura 1). As parcelas eram compostas de 22 linhas de plantio com 50 m de comprimento, as seis linhas laterais e os 10 m iniciais e finais das linhas foram definidos como bordadura, restando uma área útil de 10 linhas com 30 m de comprimento.

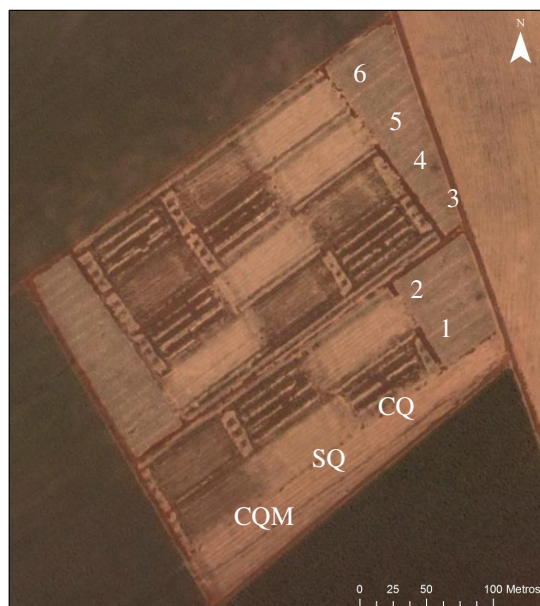


Figura 1 - Imagem de Satélite da área experimental em Pradópolis, SP, indicando a distribuição de blocos (1 a 6) e tratamentos: cana com queima colhida mecanicamente (CQM); sem queima colhida mecanicamente (SQ) e com queima colhida manualmente (CQ). Fonte: Google Earth

O preparo do solo foi realizado com grade aradora, grade niveladora, subsolagem e grade niveladora. A área recebeu 2 t ha^{-1} de calcário e adubação de plantio com 500 kg ha^{-1} da fórmula N-P-K 10-25-25 (informação pessoal)¹. Foi plantada a variedade SP 80-185, que apresenta porte ereto, boa adaptabilidade ao corte mecanizado, alta produtividade agrícola, média exigência de fertilidade e ótima brotação de soqueira (COPERSUCAR, 1997). O primeiro corte foi realizado em 1996. As amostras do solo foram submetidas a análises químicas, cujos resultados estão na tabela 1. A adubação de soqueira de 1996 a 2003 foi com 600 kg ha^{-1} da fórmula 15-05-25, equivalente a 90 kg ha^{-1} de N, 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 150 kg ha^{-1} de K_2O .

Tabela 1 - Análises químicas do solo após o primeiro corte da cana-de-açúcar

Camadas	pH ¹	M.O	P ²	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC	V	m
m		g dm^{-3}	mg dm^{-3}		----- $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ -----						----	----
											----	----
0-0,1	4,7	37	13	2,1	22,8	6,7	2,0	47	32	79	40	6
0,1-0,2	4,9	33	19	1,7	26,1	7,5	1,3	42	35	77	46	3

1: em CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$; 2: P extraído por resina; SB: Soma de bases. Fonte: Ivo Belinasso (CTC-Piracicaba,SP).

¹ Informações sobre preparo do solo, calagem e adubação fornecidas por Lidiane Carine Garzon e Carlos Sardão, do Setor de Qualidade Agrícola, Usina São Martinho, Pradópolis, SP, e pelo Eng. Agr. Ivo Belinasso, do Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba, SP, Brasil.

A renovação do canavial ocorreu em março de 2003, com grade aradora, grade niveladora, subsolagem e grade niveladora. A área recebeu 2 t ha⁻¹ de calcário. Foi plantada a variedade SP90-3414, que tem hábito de crescimento ereto, bom perfilhamento, alta produtividade, boa brotação de soqueira e média exigência de fertilidade (COPERSUCAR, 2003). O manejo da fertilidade do solo consistiu apenas de adubação mineral de plantio e de soqueira (Tabela 2).

Tabela 2 – Adubações minerais efetuadas nas parcelas do experimento no segundo ciclo de plantio

Nutriente	2003	2004	2005	2006	2007	2008
	----- kg ha ⁻¹ -----					
N	28	121	113	115	90	86
P ₂ O ₅	56					
K ₂ O	84	108	100	115	73	70

No presente estudo, foram avaliados dois tratamentos: sistema de cana sem queima colhida mecanicamente (SQ) e sistema de cana com queima colhida manualmente (CQ). As amostras do solo foram coletadas em janeiro de 2009, coincidindo com o período de maior intensidade de chuvas da região. A amostragem foi realizada nas posições: linha de plantio, a 0,25 m da linha de plantio e na entrelinha. Em cada posição foram amostradas as camadas: 0-0,05 m; 0,05-0,1 m; 0,1-0,2 m; 0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m. A amostragem nas duas primeiras camadas foi realizada com espátula. Nas demais camadas, utilizou-se o trado holandês com caçamba de 20 cm de altura. Numa área adjacente sob vegetação nativa (VN) remanescente, classificada como Mata Atlântica Ombrófila, foram coletadas amostras nas mesmas profundidades, que serviram como padrão de comparação das alterações decorrentes dos manejos de colheita estudados. Em cada parcela, coletaram-se 20 amostras simples que deram origem a uma amostra composta para cada posição e profundidade. No total, foram coletadas 210 amostras compostas (2 sistemas x 6 blocos x 3 posições x 5 profundidades + VN x 6 áreas x 5 profundidades).

As amostras compostas foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA), colocadas em saco plástico e armazenadas em local fechado e de baixa umidade. Posteriormente foram submetidas a análises químicas para determinação dos seguintes atributos: C total por combustão a seco em autoanalisador elementar (NELSON; SOMMERS, 1982), após as amostras terem sido moídas e peneiradas em malha de 0,1 mm; pH CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ na proporção TFSA:solução de 1:2,5; acidez total (H + Al) extraída com

acetato de amônio pH 7,0; acidez trocável (Al^{3+}) extraído com KCl 1 mol L^{-1} e determinação por titulometria com NaOH ; K^+ trocável extraído por Mehlich-1 (HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ + H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$) e determinado por fotometria de chama; Ca^{2+} e Mg^{2+} extraídos por resina trocadora de íons e determinados por espectrometria de absorção atômica; P-disponível extraído pela resina trocadora de íons (P resina) e quantificado por colorimetria (RAIJ et al., 2001); P-disponível extraído pela solução duplo ácido de Mehlich-1 (P Mehlich) (EMBRAPA, 1999), também quantificado por colorimetria. Foram calculadas a CTC a pH 7,0 (CTC) pela soma de bases acrescida da acidez potencial, a saturação por bases pela equação $V\% = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+) \times 100 / \text{CTC}$; saturação por alumínio pela equação $m\% = \text{Al}^{3+} \times 100 / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Al}^{3+})$.

Foram realizadas análises de variância seguindo o modelo em parcelas subdivididas, com sistemas de colheita na parcela e posições nas subparcelas. Para os resultados nas profundidades, utilizou-se o modelo bloco aleatorizado. As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do procedimento GLM do SAS (Statistical Analysis Systems), versão 9.2 (SAS, 1997), sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Para que houvesse homogeneidade de variância e normalidade dos erros, os dados foram transformados da seguinte maneira: $1/\text{COT}$; $\log \text{pH CaCl}_2$; $\sqrt{\text{Al}^{3+}}$; $\sqrt{m\%}$; $\log \text{H+Al}$; $1/\sqrt{\text{P resina}}$; $1/\sqrt{\text{P Mehlich}}$; $1/\sqrt{\text{Ca}^{2+}}$; $\log \text{Mg}^{2+}$; $\text{K}^+ (0,05)$; CTC^{-2} ; $\log V\%$. Os resultados levantados na área de referência (VN) foram excluídos da análise estatística por não fazerem parte do desenho experimental.

2.3 Resultados e Discussão

As comparações das médias dos atributos químicos entre os sistemas de colheita estão apresentadas na forma de figuras, enquanto os contrastes entre as posições e as profundidades de amostragem para cada sistema estão na forma de tabelas. Os valores dos atributos avaliados na área de vegetação nativa estão acompanhados dos respectivos desvios-padrão. As principais diferenças nos atributos de fertilidade foram observadas nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m.

2.3.1 Carbono orgânico total - COT

Após 14 anos da instalação do experimento, o teor de COT na área SQ foi superior ao da CQ nas profundidades de 0-0,05 m e 0,05-0,1 m, em todas as posições de amostragem (Figura 2). Na média das três posições, o teor de COT nas amostras de solo coletadas sob sistema SQ foi 28% maior do que no CQ na camada de 0-0,05m (SQ = 29 g kg^{-1} ; CQ = $22,7 \text{ g kg}^{-1}$), enquanto na

camada subsequente (0,05-0,1 m) a diferença foi de 22% (SQ = 25,3 g kg⁻¹; CQ = 20,8 g kg⁻¹). Razafimbelo et al. (2006) estudaram a mesma área experimental após seis anos de cultivo e observaram que teor de COT foi 20% maior no solo sob o sistema SQ do que no CQ na camada de 0-0,05 m e 9% na camada de 0,05-0,1 m. Os resultados são condizentes com os descritos no presente estudo e mostram uma evolução no acúmulo de matéria orgânica de seis para 14 anos de manejo SQ.

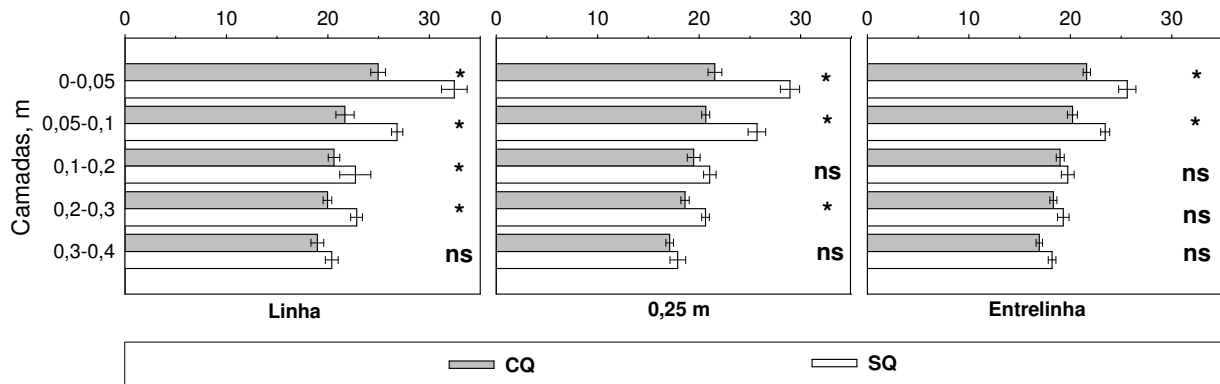


Figura 2 - Valores de carbono orgânico total (g kg⁻¹) num Latossolo Vermelho distrófico sob colheita de cana com (CQ) e sem queima (SQ). Diferenças entre CQ e SQ (Tukey, $p < 0,05$): * significativo; ns: não significativo. As barras representam os erros-padrão da média

De forma geral, os teores de COT no solo sob SQ superaram as do CQ na linha e 0,25 m até a profundidade de 0,3 m (Figura 2). Isso decorreu da maior densidade de raízes no tratamento SQ e realça a importância das raízes no acúmulo de carbono orgânico em profundidade (ANGHINONI, 2007). Na entrelinha, onde há menor densidade do sistema radicular do que na linha, a acumulação da MO limitou-se às duas camadas superficiais, provavelmente devido à sua estabilização pela formação de complexos organominerais em solo com alto teor de argila (ZINN; LAL; RESCK, 2005). Na profundidade de 0,3-0,4 m, não houve diferença nos valores de COT entre os sistemas em todas as posições. Canellas et al. (2010) estudaram um canal cultivado sem queima da palha há mais de 50 anos, num Cambissolo com 270 g kg⁻¹ de argila, e relataram elevação nas quantidades de COT até 0,4 m de profundidade. Nessas condições, a percolação de compostos orgânicos solúveis foi favorecida.

Pelo efeito da atividade radicular, houve o seguinte gradiente de COT no sistema SQ: linha = 0,25 m > entrelinha, na camada de 0-0,05 m. De forma geral, nas demais profundidades, verificaram-se maiores teores de COT na linha do que nas demais posições (Tabela 3). Na linha, a adição de MO também se deu pela decomposição de raízes, liberação de exsudatos radiculares,

lavagens de constituintes solúveis da planta pelas chuvas e transformações desses materiais pelos macro e microrganismos (SILVA; MENDONÇA, 2007).

Tabela 3 – Valores de carbono orgânico total num Latossolo Vermelho distrófico sob manejo de cana com (CQ) e sem queima (SQ) e em área de vegetação nativa (VN)

Camadas m	CQ			SQ			CV %	VN g kg ⁻¹
	Linha	0,25 m	Entrelinha	Linha	0,25 m	Entrelinha		
	g kg ⁻¹							
0-0,05	24,9 aA*	21,5 aB	21,6 aB	32,4 aA	29,0 aA	25,6 aB	7	41,1 ±1,7
0,05-0,1	21,7 bA	20,6 abA	20,2 abA	26,8 bA	25,7 bAB	23,4 aB	6	32,7 ±4,5
0,1-0,2	20,6 bcA	19,5 bcA	19,0 bcA	22,7 cA	21,0 cAB	19,7 bB	5	21,9 ±1,6
0,2-0,3	20,0 cdA	18,6 cB	18,3 cB	22,8 cA	20,6 cB	19,3 bC	4	22,4 ±3,3
0,3-0,4	19,0 dA	17,1 dA	16,9 dA	20,4 dA	17,9 dB	18,2 bB	6	20,4 ±2,6
CV, %	4	4	5	5	5	6		

*Dentro de cada sistema de colheita, médias seguidas das mesmas letras minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem (Tukey, $p < 0,05$). Os resultados de VN estão seguidos dos desvios-padrão.

O teor de COT decresceu a partir camada superficial para as camadas mais profundas em todos os sistemas de colheita e posições (Tabela 3). Maiores teores de COT nas camadas superficiais (até 0,2 m) sob cana CQ podem ser atribuídos ao processo natural de incorporação de MO por meio de raízes e restos culturais, mesmo com a queima anual da palha. O efeito foi mais evidente nas amostras de solo coletadas no sistema SQ, em que o teor médio de COT na camada de 0-0,05 m (29 g kg⁻¹) foi 53% maior do que a média da camada de 0,3-0,4 m (18,8 g kg⁻¹). Nas amostras de solo sob sistema CQ, a diferença caiu para 28% (22,7 g kg⁻¹ na camada de 0-0,05m e 17,7 g kg⁻¹ na camada de 0,3-0,4 m). Robertson e Thorburn (2007) relataram redução do teor de C em profundidade para ambos os sistemas de colheita, com teor mais elevado na superfície da área SQ. Nesse caso, o sistema SQ estava instalado há seis anos, em solo com 39% de argila, sob clima tropical úmido na Austrália.

Em comparação ao solo sob vegetação nativa (VN), na média das três posições de amostragem do solo sob sistema SQ, houve diminuição de 29% no teor de COT na camada de 0-0,05 m (VN = 41,1 g kg⁻¹; SQ = 29 g kg⁻¹) e de 23% na camada de 0,05-0,1m (VN = 32,7 g kg⁻¹; SQ = 25,3 g kg⁻¹). No tratamento CQ, foram registradas maiores quedas do valor de COT: 45% na camada de 0-0,05 m (VN = 41,1 g kg⁻¹; CQ = 22,7 g kg⁻¹) e 36% na camada de 0,05-0,1 m (VN = 32,7 g kg⁻¹; CQ = 20,8 g kg⁻¹). Tais resultados corroboram os de Czycza (2009) que encontrou redução de 41% de C em Latossolo submetido há 12 anos ao sistema de colheita de cana CQ na mesma região do presente estudo. Maia e Ribeiro (2004) relataram redução de 48%

do C na camada superficial de Argissolo cultivado há 30 anos em Alagoas. As perdas resultaram da quebra de equilíbrio do ecossistema natural, com consequente redução do teor de MO. As menores perdas nos teores de COT no manejo SQ indicaram adaptação a um novo nível de estabilização da MO em decorrência do acúmulo da palhada.

2.3.2 Acidez do solo

Em geral, não houve diferença entre os sistemas de colheita no pH medido em solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ das amostras coletadas na linha e a $0,25 \text{ m}$ da linha, independentemente da profundidade de coleta (Figura 3a). A acidificação, motivada pela remoção de cátions ou pela aplicação de fertilizantes minerais junto à linha de plantio, provavelmente ocorreu com a mesma intensidade nos dois tratamentos e mascarou o efeito da MO. Na entrelinha, onde tais processos são menos intensos, o efeito tampão da MO nas variações do pH atuou mais intensamente, e o sistema SQ induziu a elevação do pH nas camadas de $0-0,05$ e de $0,05-0,1 \text{ m}$. Luca (2002) encontrou elevação de pH CaCl_2 em amostras coletadas na entrelinha, num Latossolo Vermelho submetido à colheita SQ por cinco anos em comparação com o sistema CQ.

No solo sob cana CQ, os valores de pH não diferiram em função do local de amostragem (Tabela 4), exceto nas camadas mais profundas ($0,2-0,3$ e $0,3-0,4 \text{ m}$), nas quais as amostras coletadas na linha de plantio estavam mais ácidas, provavelmente face ao efeito residual da adubação de plantio e do menor teor de MO. No sistema SQ, as amostras das camadas $0-0,05$ e $0,05-0,1 \text{ m}$ apresentaram um gradiente de acidez na seguinte ordem: linha = $0,25 \text{ m}$ > entrelinha. Isso reforça o efeito da frente de acidificação e o papel de cada fator desse processo nas amostras coletadas em diferentes posições. Nas camadas subsequentes, apenas as amostras da linha tiveram maior acidez do que as amostras coletadas a $0,25 \text{ m}$ e na entrelinha, em virtude da atividade radicular. Prado e Fernandes (2001) e Orlando Filho et al. (1998) relataram menor acidez em amostras coletadas na linha de plantio em relação à entrelinha do sistema de colheita sem e com queima. Em ambos os casos, as amostras foram coletadas 11 meses após a instalação do experimento.

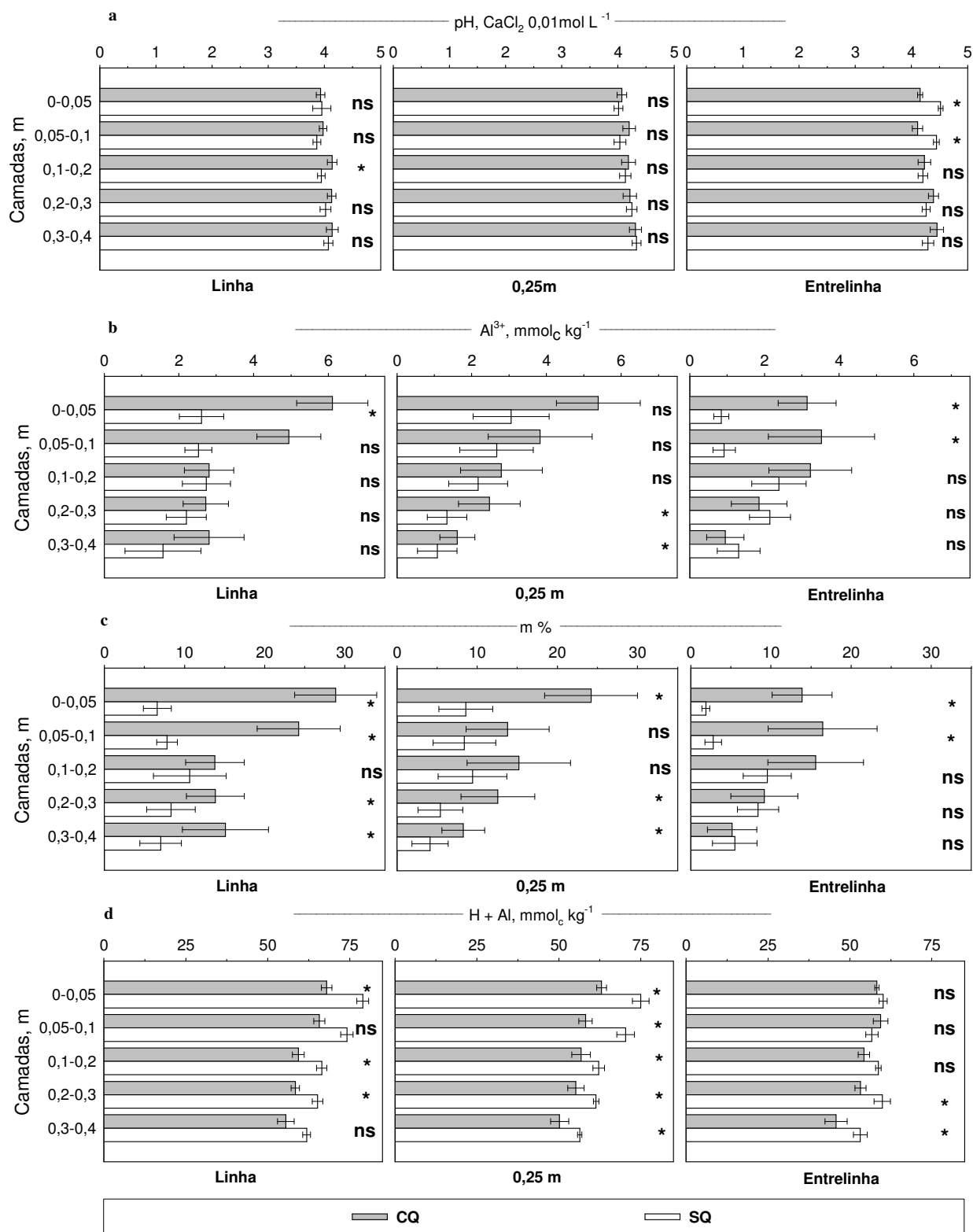


Figura 3 - Valores de pH CaCl₂ (a), Al trocável - Al³⁺ (b), saturação por Al³⁺ - m% (c) e acidez potencial - H+Al (d) num Latossolo Vermelho distrófico sob colheita de cana com (CQ) e sem queima (SQ). Diferenças entre CQ e SQ (Tukey, $p < 0,05$): * significativo; ns: não significativo. As barras representam os erros-padrão da média

Tabela 4 – Valores de pH CaCl₂, acidez trocável (Al³⁺), saturação por Al (m) e H+Al num Latossolo Vermelho distrófico sob manejo de cana com (CQ) e sem queima (SQ) e em área de vegetação nativa (VN)

Camadas	CQ			SQ			CV	VN
	Linha	0,25 m	Entrelinha	Linha	0,25 m	Entrelinha		
m	pH CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹						%	pH CaCl ₂
0-0,05	3,9 bA	4,1 bA	4,1 bcA	4,0 aB	4,0 cB	4,5 aA	3	3,9 ±0,2
0,05-0,1	4,0 bA	4,2 abA	4,1 cA	3,9 aB	4,0 cB	4,4 abA	3	3,8 ±0,0
0,1-0,2	4,1 aA	4,2 abA	4,2 abcA	3,9 aB	4,1 bcA	4,2 cA	1	3,7 ±0,0
0,2-0,3	4,1 aB	4,2 abAB	4,4 abA	4,0 aB	4,2 abAB	4,3 bcA	2	3,8 ±0,1
0,3-0,4	4,1 aB	4,3 aAB	4,5 aA	4,1 aB	4,3 aA	4,3 bcA	1	3,8 ±0,0
CV, %	1	1	2	3	2	2		
	Al ³⁺ , mmol _c kg ⁻¹							Al ³⁺
0-0,05	6,1 aA	5,4 aA	3,1 aA	2,6 aAB	3,1 aA	0,8 bB	22	7,4 ±2,7
0,05-0,1	4,9 aA	3,8 abA	3,5 aA	2,5 aA	2,7 abA	0,9 bA	23	10,0 ±1,3
0,1-0,2	2,8 bA	2,8 bcA	3,2 aA	2,7 aA	2,2 abcA	2,4 aA	14	8,7 ±1,0
0,2-0,3	2,7 bA	2,5 bcA	1,9 abB	2,2 aA	1,3 bcB	2,1 aA	10	7,1 ±1,5
0,3-0,4	2,8 bA	1,6 cA	1,0 bB	1,6 aA	1,1 cA	1,3 abA	14	7,0 ±0,7
CV, %	9	16	25	24	20	20		
	m%							m%
0-0,05	28,9 aA	24,2 aA	13,9 abB	6,6 aAB	8,6 abA	1,9 bB	22	17,1 ±7,2
0,05-0,1	24,2 aA	13,8 bA	16,4 aA	7,8 aA	8,4 abA	2,8 bA	27	32,4 ±3,8
0,1-0,2	13,8 bA	15,2 abA	15,6 aA	10,7 aA	9,4 aA	9,5 aA	17	45,8 ±5,4
0,2-0,3	13,8 bA	12,6 bA	9,2 abA	8,3 aA	5,7 abA	8,4 aA	13	35,9 ±6,0
0,3-0,4	15,1 bA	8,3 bB	5,1 bB	7,0 aA	4,1 bA	5,5 abA	14	42,2 ±6,2
CV, %	10	18	28	25	22	27		
	H + Al, mmol _c kg ⁻¹							H + Al
0-0,05	68,0 aA	63,0 aA	58,3 aB	79,0 aA	75,0 aA	60,2 aB	1	104,5 ±7,5
0,05-0,1	68,5 aA	58,2 abA	59,4 aA	74,1 aA	70,4 aA	56,7 aB	2	94,5 ±5,1
0,1-0,2	59,3 bA	56,8 bAB	54,3 aA	66,5 bA	62,2 bAB	58,7 aB	1	75,8 ±4,7
0,2-0,3	58,4 bA	55,2 bcA	53,2 aA	65,2 bA	61,4 bA	59,9 aA	1	71,3 ±6,8
0,3-0,4	55,5 bA	50,2 cAB	45,8 bB	61,9 bA	56,4 bAB	53,2 aB	1	67,2 ±2,8
CV, %	1	1	2	1	1	2		

*Dentro de cada sistema de colheita, médias seguidas das mesmas letras minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem (Tukey, $p < 0,05$). Os resultados de VN estão seguidos dos desvios-padrão.

Transcorridos seis anos da última calagem, a acidez dos solos cultivados aproximou-se das condições de acidez da maioria dos solos altamente intemperizados. Nesta situação, a acidez trocável (Al³⁺) passa a ocupar sítios de adsorção no complexo sortivo e a interferir negativamente na fertilidade do solo. Embora a cana-de-açúcar apresente elevada tolerância à toxidez do Al, deve-se considerar que o Al³⁺ também diminui a solubilidade de compostos fosfatados e a absorção de P, Ca²⁺ e Mg²⁺ pelas plantas (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

No sistema SQ houve redução do teor de Al³⁺ nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m em comparação ao CQ, especialmente na posição entrelinha. Nas demais profundidades, na maioria dos casos, não houve diferenças entre os sistemas de colheita (Figura 3b). Os maiores valores de

COT foram encontrados nas duas camadas superficiais, podendo indicar que a redução da acidez ativa está relacionada com a presença de resíduos vegetais, conforme observaram Miyazawa; Pavan e Calegari (1993) em condições de plantio direto. O efeito se verifica pela formação de complexos Al-radicaís orgânicos provenientes dos ácidos orgânicos exsudados pelas raízes (MA, RYAN, DELHAIZE, 2001) e pela decomposição dos resíduos vegetais (STROBEL, 2001). O extrator da acidez trocável ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) não tem capacidade de remover o Al^{3+} complexado aos ânions orgânicos (ANGHINONI, 2007). Por isso, solos com mesmo pH podem mostrar diferenças na acidez trocável.

De modo geral, os valores de m% das amostras de solo no sistema SQ foram menores do que no CQ em todas as profundidades da linha e 0,25 m. Na entrelinha, valores menores de m% nas amostras sob sistema SQ foram observados apenas nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m (Figura 3c). A redução da m% ocorreu em maior número de profundidades do que a redução observada no teor de Al^{3+} (Figura 3b), coincidindo com os maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas camadas de 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m da linha e na camada de 0-0,05 m da posição 0,25 m (Figura 5). Silva e Ribeiro (1998) verificaram redução da saturação por alumínio em área de canavial após aplicação de vinhaça em relação a uma área de vegetação nativa, atribuindo o efeito à movimentação de cátions básicos presentes na vinhaça. No presente estudo, pode-se atribuir a movimentação do Ca^{2+} e Mg^{2+} à formação de complexos com grupamentos funcionais dos ácidos orgânicos liberados pelas raízes (JONES; PRABOWO; KOCHIAN, 1996).

O valor da acidez potencial (H+Al) foi maior nas amostras coletadas no sistema SQ do que no CQ em praticamente todas as camadas do solo das posições linha e 0,25 m (Figura 3d). Tais resultados coincidem com os locais de elevada concentração de COT (Figura 2) e reforçam o papel dos grupos carboxílicos, fenólicos e alcoólicos da MO como fonte de H na acidez potencial e no tamponamento da acidez do solo. Nas primeiras três camadas da entrelinha, a acidez potencial não diferiu entre SQ e CQ ($p < 0,05$), confirmando os resultados de Canellas et al. (2010) e Mendonza et al. (2000) para solos amostrados na entrelinha de plantio de cana.

De forma geral, as amostras provenientes das áreas sob sistema SQ apresentaram gradiente de acidez ativa e potencial na ordem: linha = 0,25 m > entrelinha, em todas as profundidades (Tabela 4). Essa distribuição coincide com a região de alta densidade de raízes, favorecida pelo sistema de conservação da MO, e pode indicar a participação de exsudatos radiculares na acidificação do solo (FAGERIA; ARAÚJO; STONE, 2009). O mesmo não se

verificou com a acidez trocável e a saturação de alumínio, que não diferiram entre as posições, exceto na camada superficial. No tratamento CQ, não houve diferença entre as posições na maioria dos casos (Tabela 4).

Não houve diferença entre camadas nos valores de pH, Al^{3+} e m% das amostras de solo coletadas na linha de plantio no sistema SQ, em razão da elevada atividade radicular. Por outro lado, na entrelinha, houve redução da acidez do solo da camada superior para a inferior pelo efeito da MO depositada na superfície (MIYAZAWA; PAVAN; CALEGARI, 1993).

2.3.3 P-disponível

Os valores de P-disponível extraídos pela resina nas amostras dos tratamentos SQ e CQ não diferiram ($p < 0,05$) na maioria das posições de coleta e das camadas avaliadas (Figura 4a). A similaridade de resultados para os sistemas de colheita foi causada, provavelmente, pela rápida mineralização do P em função da queima no sistema CQ. Por sua vez, o processo no SQ provavelmente dependeu da redução da relação C:P da palha. Oliveira et al. (1999) relataram não haver liberação de P após um ano de decomposição da palhada remanescente da colheita de cana sem queima sobre Latossolo Vermelho amarelo. A exceção foi observada na camada de 0-0,05 m da posição 0,25 m, onde o P resina na área CQ foi mais elevado, provavelmente devido ao P proveniente da cinza da palha, conforme observado por Ball-Coelho et al. (1993).

Os teores de P liberados nas cinzas no sistema CQ e os teores P mineralizados da palha da cana no sistema SQ não são prontamente disponíveis porque ocorre adsorção do elemento na fração mineral e orgânica do solo, assim como ocorre precipitação de P com Al e Fe em condições de acidez do solo (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). Czyzca (2009) também não encontrou diferenças nos teores de P na camada de 0-0,1m, entre os dois tratamentos, após seis e 12 anos de implantação do sistema SQ. Nas camadas de 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, Czyzca (2009) encontrou quantidades de P-resina superiores nas áreas sob cultivo SQ em relação ao sistema CQ. O autor utilizou solo com pH $CaCl_2$ entre 5,5 e 6,0 até 0,3 m de profundidade, o que pode ter contribuído com os resultados.

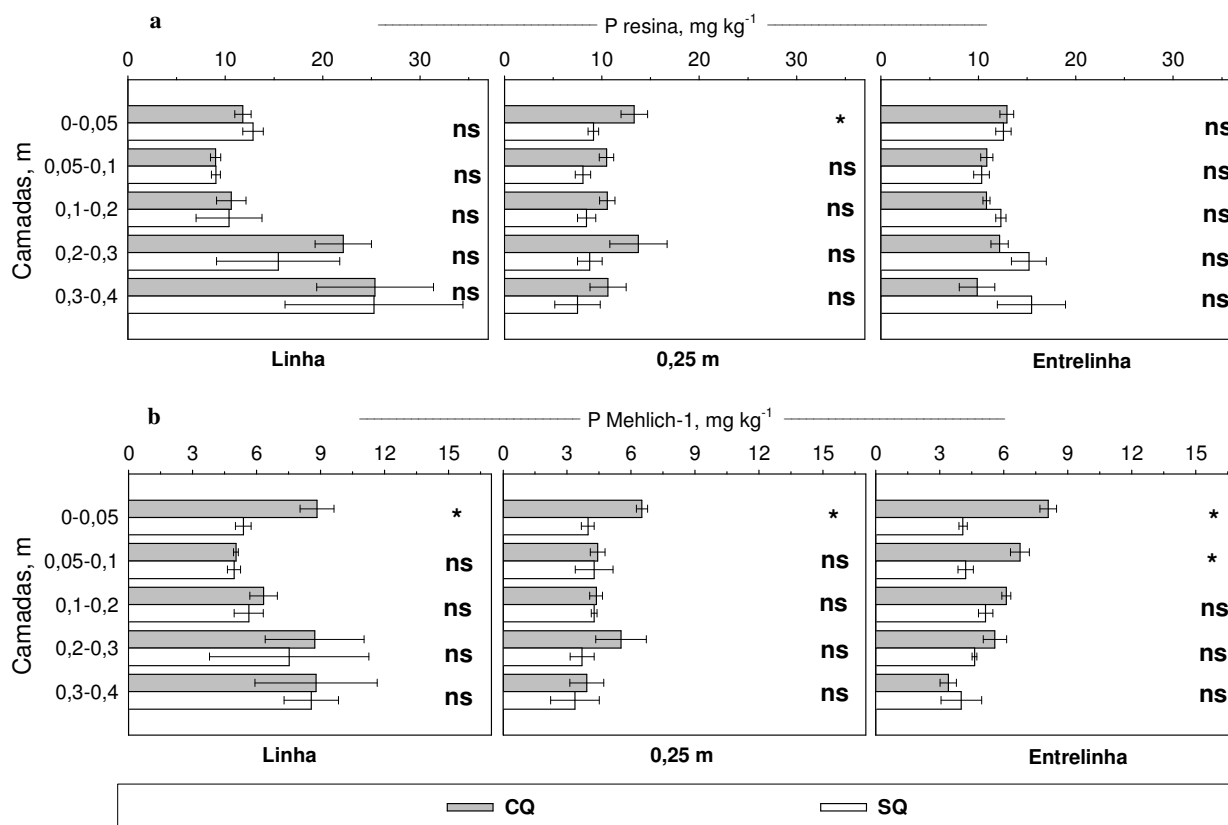


Figura 4 - Valores de P-disponível pelo extrator resina (a) e Mehlich-1 (b) num Latosolo Vermelho distrófico sob colheita de cana com (CQ) e sem queima (SQ). Diferenças entre CQ e SQ (Tukey, $p < 0,05$): * significativo; ns: não significativo. As barras representam os erros-padrão da média

O solo sob cana CQ apresentou maiores quantidades de P-disponível extraído pela solução Mehlich-1, na camada superficial (0-0,05 m) das três posições de coleta e na de 0,05-0,1 m da posição linha (Figura 4b). O extrator promove a dissolução dos colóides inorgânicos na ordem: P-Ca > P-Al > P-Fe, contabilizando o P de resíduos de fosfatos naturais adicionados aos solos e não disponíveis às plantas (SANTOS, GATIBONI; KAMINSKI, 2008; SILVA e RAIJ, 1996). Pode-se inferir que os maiores valores nas amostras de solo sob sistema CQ foram decorrentes do fosfato de cálcio formado durante a queima da palha e presente nas cinzas depositadas no solo (BALL-COELHO et al., 1993).

Canellas et al. (2003) relataram teores de P-Mehlich 86 vezes superior nas amostras de solo sob sistema de cana crua em relação à queimada, na camada de 0-0,2 m, e 217 vezes maior na camada de 0,2-0,4 m, e atribuíram os resultados ao efeito residual de adubações e à

mineralização da palha. A pesquisa de Canellas et al. (2003) foi conduzida em Cambissolo, com pH em torno de 6,5, cultivado com cana crua por mais de 50 anos. Mendonza et al. (2000) encontraram teor de P-Mehlich 2,5 vezes maior na área SQ, na camada de 0-0,1m, e valores iguais ao tratamento CQ até 0,6 m de profundidade. Mendonza et al. (2000) estudaram um Argissolo arenoso, com pH em torno de 6,0, cultivado por cinco anos com cana SQ. A falta de concordância entre os resultados deve-se a diferenças nas condições experimentais, tais como período de utilização do manejo de colheita sem queima, condições de fertilidade e diferenças nas classes texturais dos solos.

Os valores de P resina não foram diferentes ($p < 0,05$) entre posições de coleta em ambos os sistemas, na camada de 0-0,3 m (Tabela 5). Na camada subsequente, de 0,3-0,4 m, verificou-se tendência de maior concentração do elemento na linha de plantio, refletindo o efeito residual da adubação de plantio no fundo do sulco em ambos os sistemas de colheita. Com relação às profundidades de amostragem, registrou-se maior concentração nas camadas de 0,2-0,3 e de 0,3-0,4 m na posição linha, enquanto nas posições 0,25 m e entrelinha não houve diferença entre as cinco camadas testadas ($p < 0,05$).

Tabela 5 – Valores de P-disponível num Latossolo Vermelho distrófico, sob manejo de cana com (CQ) e sem queima (SQ) e em área de vegetação nativa (VN)

Camadas	CQ			SQ			CV	VN
	Linha	0,25 m	Entrelinha	Linha	0,25 m	Entrelinha		
m	-----mg kg ⁻¹ -----						%	mg kg ⁻¹
	----- P resina -----							P resina
0-0,05	11,8 bA*	13,3 aA	12,9 aA	12,9 bcA	9,1 aB	12,6 aA	7	20,0 ±9,0
0,05-0,1	9,0 bA	10,5 aA	10,9 aA	9,0 cA	8,1 aA	10,3 aA	10	15,3 ±7,7
0,1-0,2	10,6 bA	10,6 aA	10,8 aA	10,4 bcA	8,4 aA	12,3 aA	14	9,7 ±4,4
0,2-0,3	22,1 aA	13,8 aA	12,2 aA	15,4 abA	8,8 aA	15,2 aA	18	11,8 ±6,1
0,3-0,4	25,4 aA	10,6 aAB	9,9 aB	25,3 aA	7,5 aB	15,5 aAB	23	9,2 ±5,7
CV, %	13	13	10	15	12	13		
	----- P Mehlich-1 -----							P Mehlich-1
0-0,05	8,8 aA	6,5 aB	8,1 aAB	5,4 abA	4,0 aB	4,1 aB	6	5,2 ±4,7
0,05-0,1	5,0 aAB	4,4 abB	6,8 abA	4,9 bA	4,3 aA	4,2 aA	10	3,6 ±2,5
0,1-0,2	6,3 aA	4,4 abB	6,1 abA	5,6 abA	3,8 aB	5,1 aA	7	2,2 ±1,3
0,2-0,3	8,7 aA	5,5 abA	5,6 bA	7,5 abA	3,7 aB	4,6 aAB	20	1,8 ±1,4
0,3-0,4	8,8 aA	3,9 bA	3,4 cA	8,6 aA	3,4 aA	4,0 aA	27	1,2 ±1,1
CV, %	18	13	8	15	18	13		

*Dentro de cada sistema de colheita, médias seguidas das mesmas letras minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem (Tukey, $p < 0,05$). Os resultados de VN estão seguidos dos desvios-padrão.

2.3.4 Cátions trocáveis

Os teores de Ca^{2+} e de Mg^{2+} nas amostras de solo sob sistema de colheita SQ superaram os do CQ nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m, em todas as posições de amostragem (Figura 5a e b). Considerando que as mesmas quantidades de adubo e calcário foram aplicadas nos dois tratamentos, pode-se inferir que os valores encontrados no solo sob cana SQ são derivados diretamente da decomposição da palhada disposta na superfície do solo, seguida da acumulação e deslocamento do elemento até a profundidade de 0,1 m. A liberação desses cátions pode atingir 44% e 39% do total imobilizado na palha após um ano de decomposição, correspondendo a $11 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de Ca^{2+} e $5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de Mg (OLIVEIRA et al., 1999). As maiores concentrações de Ca^{2+} no manejo SQ continuaram nas camadas de 0,1-0,2, 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m, corroborando as observações de Canellas et al. (2003), que encontraram diferenças até 0,4 m de profundidade. Não houve diferença entre os valores de Mg^{2+} nas profundidades de 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m.

Embora o K^+ seja um nutriente rapidamente liberado no processo de decomposição da palha das culturas (COLONEGO; FOLONI; ROSOLEM, 2005), não houve diferenças ($p < 0,05$) entre os tratamentos SQ e CQ (Figura 5c). Enquanto o tratamento SQ adiciona consideráveis quantidades do elemento no solo pela ação das águas das chuvas (ROSOLEM et al., 2007) ou pela mineralização da palha (OLIVEIRA et al. 1999), o sistema CQ acrescenta K^+ por meio das cinzas da queima da palhada. Mendonza et al. (2000) não encontraram diferença entre os teores de K^+ na cana colhida SQ e CQ, na camada de 0-0,1 m de um solo de tabuleiro costeiro, após cinco anos de cultivo. Nas camadas de 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m, Mendonza et al. (2000) relataram elevada concentração de K^+ no tratamento CQ, atribuindo o transporte do elemento ao predomínio de argila de baixa atividade e aos baixos teores de MO no Argissolo onde desenvolveram o estudo. Canellas et al. (2003) relataram acréscimos de K^+ da ordem de 86% nas camadas de 0-0,2 e 0,2-0,4 m do solo sob cana SQ em comparação ao CQ. Os autores utilizaram área com 50 anos de colheita SQ e com pH 6,5 a 6,8, que apresentava condições mais favoráveis ao acúmulo de cátions do que no presente estudo, em que o pH do solo estava abaixo de 4,5 (Tabela 4).

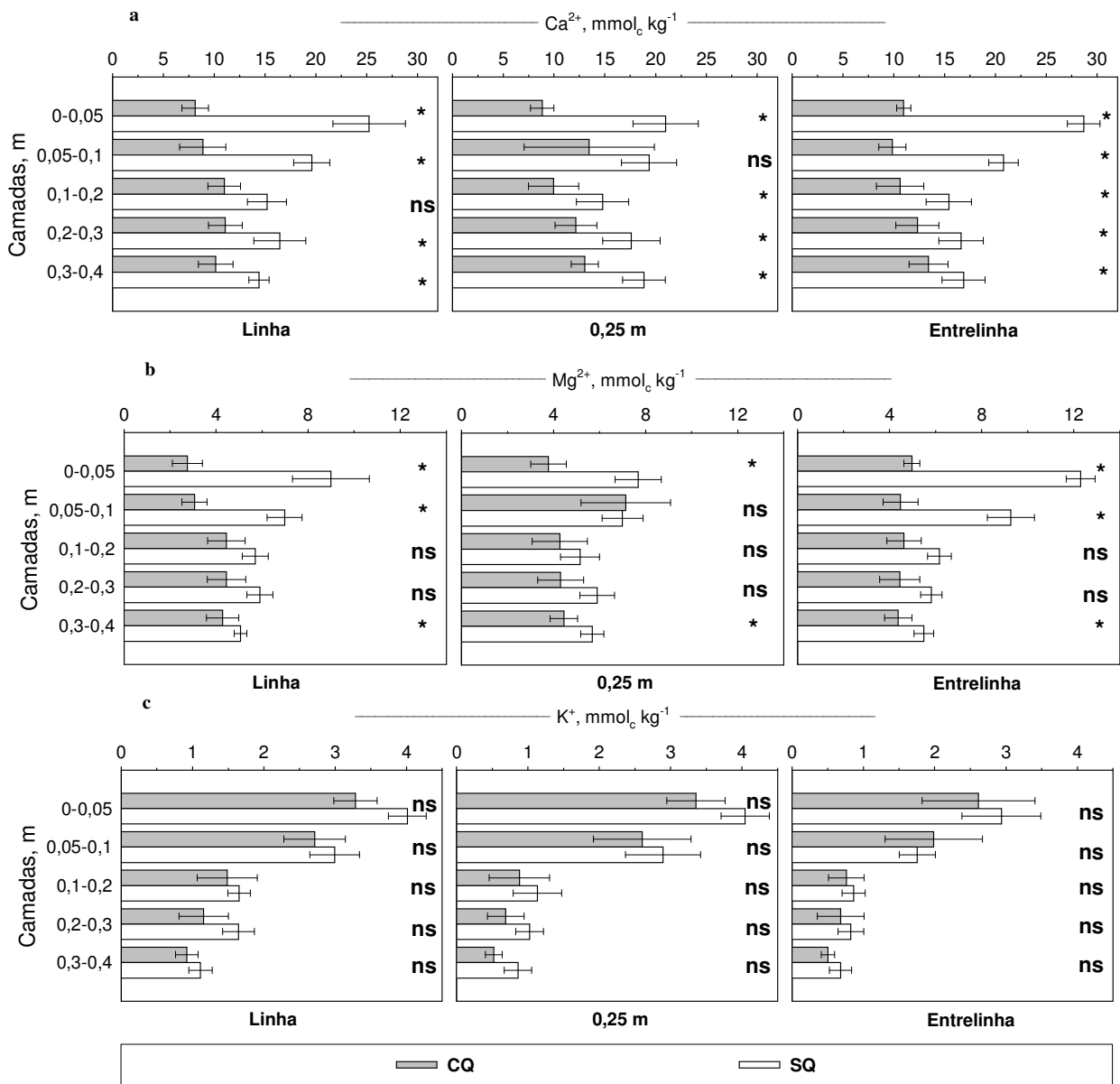


Figura 5 – Valores de Ca^{2+} (a), Mg^{2+} (b) e K^+ (c) num Latossolo Vermelho distrófico sob colheita de cana com (CQ) e sem queima (SQ). Diferenças entre CQ e SQ (Tukey, $p < 0,05$): * significativo; ns: não significativo. As barras representam os erros-padrão da média

No sistema SQ não houve diferenças entre os teores de Ca^{2+} nas amostras de solo em função das posições de amostragem, em todas as camadas (Tabela 6). Por sua vez, o teor de Mg^{2+} foi maior na camada superficial da posição entrelinha, coincidindo com a região de menor absorção do nutriente pela cultura no sistema SQ. Nos solos sob cana CQ, os teores de Ca^{2+} e de Mg^{2+} foram maiores na camada mais superficial da posição entrelinha (0-0,05 m), refletindo uma depleção dos elementos nas posições linha e 0,25 m, em decorrência da absorção dos nutrientes

pela cultura. Nas demais profundidades estudadas, não houve diferenças no teor dos elementos em função das posições de coleta.

Tabela 6 – Teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ num Latossolo Vermelho distrófico sob manejo de cana com (CQ) e sem queima (SQ) e em área de vegetação nativa (VN)

Camadas m	CQ			SQ			CV %	VN $\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$
	Linha	0,25 m	Entrelinha	Linha	0,25 m	Entrelinha		
	$\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$							
	----- Ca^{2+} -----							Ca^{+2}
0-0,05	8,1 cB	8,8 bB	11,0 aA	25,3 aA	21,0 aA	28,7 aA	8	23,8 ± 8,5
0,05-0,1	8,9 bcA	13,5 aA	9,9 aA	19,6 abA	19,4 abA	20,8 abA	13	12,3 ± 1,6
0,1-0,2	11,0 aA	10,0 abA	10,6 aA	15,2 bcA	14,8 bA	15,4 bA	9	5,7 ± 1,0
0,2-0,3	11,1 aA	12,2 abA	12,3 aA	16,5 bcA	17,6 abA	16,6 bA	6	7,5 ± 2,1
0,3-0,4	10,1 abB	13,0 aA	13,4 aA	14,4 cA	18,9 abA	16,9 bA	5	5,7 ± 1,8
CV, %	5	10	10	9	8	11		
	----- Mg^{2+} -----							Mg^{+2}
0-0,05	2,8 bB	3,8 bAB	5,0 aA	9,0 aB	7,7 aB	12,3 aA	16	12,1 ± 2,5
0,05-0,1	3,1 bB	7,1 aA	4,5 aB	7,0 abA	7,0 abA	9,3 aA	20	7,1 ± 1,4
0,1-0,2	4,5 aA	4,3 bA	4,6 aA	5,7 bA	5,1 cA	6,2 bA	17	3,6 ± 0,7
0,2-0,3	4,5 aA	4,3 bA	4,4 aA	5,9 bA	5,9 bcA	5,8 bA	15	4,1 ± 1,2
0,3-0,4	4,3 aA	4,4 abA	4,4 aA	5,1 bA	5,7 bcA	5,5 bA	4	3,2 ± 1,0
CV, %	9	19	18	10	7	10		
	----- K^+ -----							K^+
0-0,05	3,3 aA	3,4 aA	2,6 aA	4,0 aA	4,0 aA	2,9 aA	1	1,9 ± 0,2
0,05-0,1	2,7 aA	2,6 aA	2,0 aA	3,0 bA	2,9 aA	1,8 bB	1	1,5 ± 0,1
0,1-0,2	1,5 bA	0,9 bB	0,8 bB	1,7 cA	1,1 bB	0,9 cB	1	1,0 ± 0,2
0,2-0,3	1,2 bcA	0,7 bcB	0,7 bcB	1,6 cA	1,0 bB	0,8 cB	1	1,1 ± 0,3
0,3-0,4	0,9 cA	0,5 cB	0,5 cB	1,1 dA	0,9 bA	0,7 cA	1	0,9 ± 0,1
CV, %	1	1	1	1	1	1		

*Dentro de cada sistema de colheita, médias seguidas das mesmas letras minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem (Tukey, $p < 0,05$). Os resultados de VN estão seguidos dos desvios-padrão.

Não houve diferenças entre os teores de K^+ em função das posições de coleta na camada 0-0,05 m, em ambos os sistemas de colheita, e na camada 0,05-0,1 m do solo sob cana CQ. Isso reflete a distribuição uniforme de palha e cinzas na superfície do solo e a rápida mineralização do elemento pela queima. Em termos gerais, os teores de K^+ foram maiores nas amostras coletadas na linha do que a 0,25 m e na entrelinha, nas três camadas abaixo de 0,1 m tanto no sistema CQ como no SQ, indicando que as raízes da cultura estão acelerando os processos de transporte do elemento. Orlando Filho et al. (1998) também encontraram maiores teores de K^+ no solo coletado na linha de plantio do que na entrelinha em áreas de cana crua e queimada.

Observou-se tendência de maior concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} nas duas camadas superficiais do solo sob manejo SQ (0-0,05 e 0,05-0,1 m), independentemente da posição de

coleta (Tabela 6), em virtude da mineralização contínua da palha depositada na superfície do solo. No sistema de colheita CQ, não houve diferenças nos valores entre as camadas na maioria das posições estudadas. Os teores de K^+ foram mais altos nas camadas superficiais, em ambos os tratamentos. Mendonza et al. (2000) relataram a mesma tendência de distribuição em profundidade desses cátions em área sob colheita de cana SQ e CQ.

2.3.5 CTC e saturação por bases

Os valores de CTC nas amostras de solo no sob cana colhida sem queima (SQ) foram superiores aos encontrados nas amostras sob sistema CQ em todas as posições de amostragem e camadas, com efeito mais pronunciado na camada de 0-0,05 m (Figura 6a). Esse resultado ressalta o papel da MO incorporada pela palha como fonte de cargas negativas no solo. Canelas et al. (2010) e Czycza (2009) apresentaram resultados semelhantes em amostras de Cambissolo e Latossolo cultivados com cana, respectivamente. Por outro lado, Mendonza et al. (2000) não encontraram diferenças na CTC de um Argissolo arenoso e com baixo teor de MO em função do manejo da cana com ou sem queima.

As posições de amostragem não diferiram quanto à CTC em grande parte das profundidades testadas em ambos os tipos de colheita. As exceções foram as camadas de 0-0,5 m, em ambos os sistemas de colheita, e a mais profunda (0,3-0,4 m) do solo sob cana CQ. Nessas profundidades verificou-se gradiente de concentração na seguinte ordem: linha > 25 cm > entrelinha (Tabela 7). Em ambos os tipos de colheita, foi possível verificar redução na CTC com a profundidade, resultado das adições de cinzas oriundas da colheita CQ (MAIA; RIBEIRO, 2004) e da MO do sistema SQ (CANELLAS et al., 2010). Não se observaram valores diferentes de CTC nas amostras de solo nas diversas posições de amostragem em grande parte das camadas de solo amostradas, em ambos os tipos de colheita. As exceções foram as camadas de 0-0,5 m, em ambos os sistemas de colheita, e a mais profunda (0,3-0,4 m) do solo sob cana CQ. Nessas profundidades verificaram-se maiores valores na linha de plantio, seguidos da CTC no solo coletado a 25 cm e, finalmente, com menor CTC na amostra coletada na entrelinha (Tabela 7). Em ambos os sistemas (SQ e CQ), os valores de CTC foram mais altos nas camadas superficiais, com diminuição em camadas mais profundas do perfil de solo, como resultado das adições de cinzas oriundas da colheita de cana queimada (MAIA e RIBEIRO, 2004) e da MO do sistema SQ (CANELLAS et al., 2010).

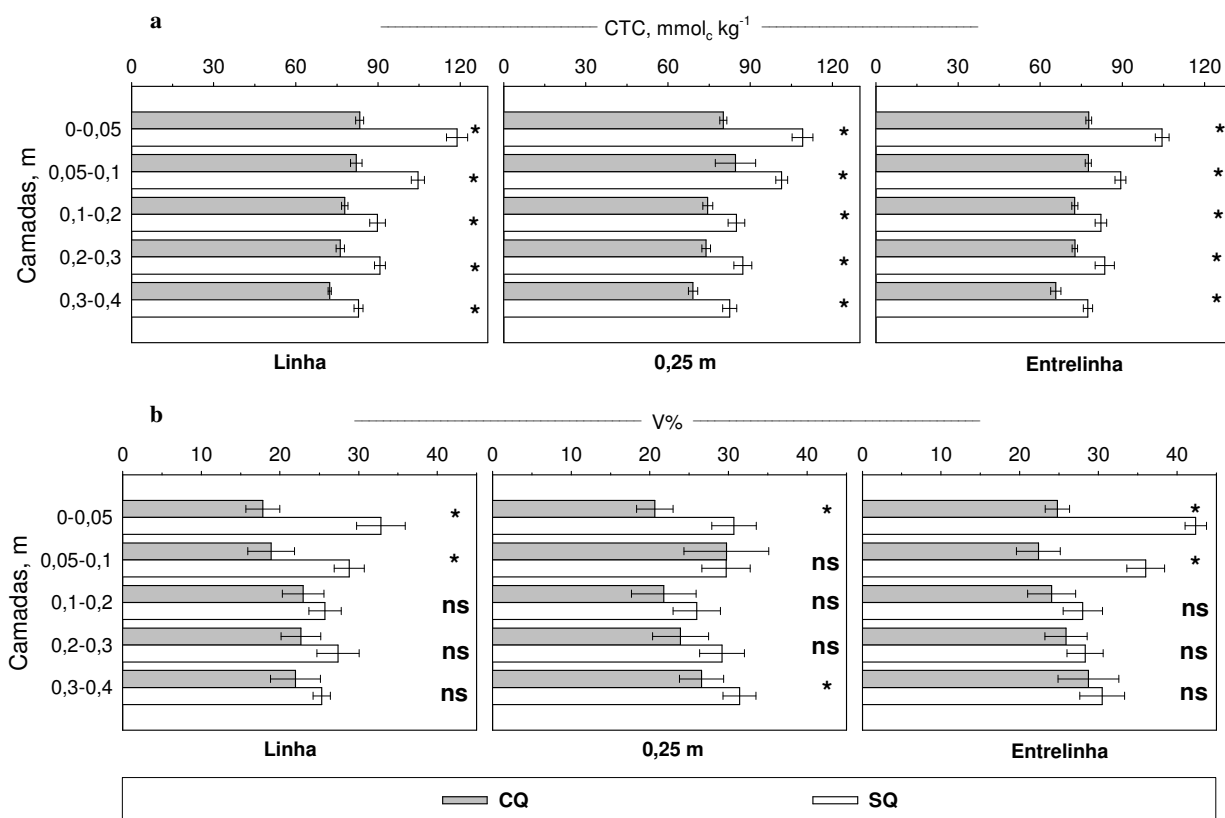


Figura 6 – Valores de CTC (a) e saturação por bases - V% (b) num Latossolo Vermelho distrófico sob colheita de cana com (CQ) e sem queima (SQ). Diferenças entre CQ e SQ (Tukey, $p < 0,05$): * significativo; ns: não significativo. As barras representam os erros-padrão da média

Tabela 7 – Valores de capacidade de troca de cátions - CTC e saturação por bases – V% num Latossolo Vermelho distrófico sob manejo de cana com (CQ) e sem queima (SQ) e em área de vegetação nativa (VN)

Camadas	CQ			SQ			CV	VN
	Linha	0,25 m	Entrelinha	Linha	0,25 m	Entrelinha		
m	----- CTC, mmol _c kg ⁻¹ -----						%	CTC
0-0,05	83,3 aA	80,2 abAB	77,8 aB	118,8 aA	109,1 aAB	104,5 aB	7	142,7 ± 4,7
0,05-0,1	82,0 abA	84,6 aA	77,5 aA	104,5 bA	101,5 aA	89,3 bA	18	115,6 ± 7,6
0,1-0,2	77,8 bcA	74,5 bcA	72,6 aA	89,8 cA	84,9 bA	82,1 bcA	9	86,2 ± 6,3
0,2-0,3	76,2 cdA	73,9 bcA	72,6 aA	90,7 cA	87,3 bA	83,6 bcA	8	84,3 ± 10,2
0,3-0,4	72,3 dA	69,1 cAB	65,6 bB	82,3 dA	82,5 bA	77,4 cA	9	77,0 ± 5,2
CV, %	7	12	9	9	10	13		
	----- V% -----							V%
0-0,05	17,8 bB	20,6 bB	24,8 aA	32,8 aAB	30,7 abB	42,4 aA	5	26,6 ± 6,6
0,05-0,1	19,8 bB	29,7 aA	22,4 aAB	28,9 abA	29,7 abA	36,0 abA	6	18,2 ± 1,4
0,1-0,2	22,9 aA	21,8 bA	24,1 aA	25,7 abA	26,0 bA	28,0 bA	4	12,0 ± 1,4
0,2-0,3	22,7 aA	23,9 abA	25,9 aA	27,4 abA	29,2 abA	28,3 bA	3	15,3 ± 2,6
0,3-0,4	22,0 aB	26,6 abA	28,7 aA	25,3 bB	31,4 aA	30,5 bA	2	12,6 ± 2,6
CV, %	3	5	5	4	3	5		

*Dentro de cada sistema de colheita, médias seguidas das mesmas letras minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem (Tukey, $p < 0,05$). Os resultados de VN estão seguidos dos desvios-padrão.

Os maiores valores de V% nas amostras de solo coletadas no sistema SQ nas duas camadas superficiais, em praticamente todas as posições de amostragem (Figura 6b), estão coerentes com os maiores teores de Ca^{2+} e de Mg^{2+} (Figura 5a e b) e com os menores valores de Al^{3+} (Figura 3c) nas mesmas posições e camadas. Nas camadas mais profundas, não houve diferença entre os dois sistemas de manejo ($p < 0,05$), na maior parte dos casos. Canellas et al. (2003), Czyzka (2009) e Mendonza et al. (2000) não identificaram diferenças na V% de amostras de solo sob sistemas de cana crua e cana queimada independentemente das profundidades estudadas. Os autores utilizaram faixas de profundidade mais largas na camada superficial (0-0,1 e 0-0,2 m), o que provavelmente mascarou possíveis diferenças localizadas nas camadas de 0-0,05 e de 0,05-0,1 m. Também pode ter concorrido uma elevada movimentação dos cátions no perfil do Argissolo estudado por Mendonza et al (2000) e no Cambissolo utilizado por Canellas et al., (2003), visto serem solos mais arenosos que o utilizado no presente estudo.

Valores de V% das amostras de solo não diferiram entre as posições de coleta, nas três camadas intermediárias, para ambos os sistemas. Na camada de 0-0,05 m, o solo coletado na entrelinha apresentou V% superior ao encontrado nas amostras das posições linha e 0,25 m (Tabela 7), refletindo a retirada de cátions básicos do complexo sortivo devido à absorção pelas plantas. Na camada mais profunda (0,3-0,4 m), os valores foram elevados nas posições 0,25 m e entrelinha, devido à menor acidificação em comparação à ocorrida na linha de plantio em função do efeito residual da adubação (CHIEN; GEARHART; COLLAMER, 2008).

2.4 Conclusões

Os valores de CTC foram mais altos nas amostras de solo coletadas no sistema SQ do que no sistema CQ em todas as posições e camadas. Nas camadas de 0-05 e 0,05-0,1 m, os valores de COT, Ca^{2+} , Mg^{2+} e V% foram mais elevados no SQ do que no CQ, enquanto o inverso ocorreu para m%. Os valores dos atributos de fertilidade nas posições linha, 0,25 m e entrelinha apresentaram maiores diferenças apenas na camada superficial (0-0,05 m).

O teor de P-disponível foi pouco afetado pela manutenção da palhada sobre o solo, sendo que valores mais altos foram encontrados somente na camada de 0-0,05 m nas amostras de solo coletadas no sistema CQ.

Referências

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

ANGHINONI, I. Fertilidade do Solo e seu manejo no sistema plantio direto. In.: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 15, p. 873-928.

BALL-COELHO, B.; SALCEDO, I.H.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Short- and long-term phosphorus dynamics in a fertilized Ultisol under sugarcane. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 1.027-1.034, 1993.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais & subtropicais**. 2. ed, Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 2, p. 7-18.

CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S.; ROSOLEM, C.A. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estádios de senescência após a dessecação química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 99-108, 2005.

CANELLAS, L.P.; BUSATO, J.G.; DOBBSS, L.B.; BALDOTTO, M.A.; RUMJANEK, V.M.; OLIVARES, F.L. Soil organic matter and nutrient pools under long-term non-burning management of sugar cane. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 61, p. 375-383, 2010.

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 palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciências do solo**, Viçosa, v. 27, p. 935-944, 2003.

CHIEN, S.H.; GEARHART, M.M.; COLLAMER, D.J. The effect of different ammonical nitrogen sources on soil acidification. **Soil Science**, Philadelphia, v. 173, p. 544-551, 2008.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre: SBCS, 2004. 400 p.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - COPERSUCAR. Variedade SP90-3414. **Boletim Técnico Copersucar - Edição Especial**. Centro de Tecnologia Copersucar – CTC, Piracicaba, 2003, p. 10.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO - COPERSUCAR. Variedade SP80-185. **Boletim Técnico Copersucar - Edição Especial**. Centro de Tecnologia Copersucar – CTC, Piracicaba, 1997, p. 6-8.

CZYCZA, R.V. **Quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar**. 2009. 92 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solo, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa comunicação para transferência de tecnologia, 1999. 370 p.

FAGERIA, N.K.; ARAÚJO, A.P.; STONE, L.F. Mudanças químicas na rizosfera. In: MELO, V.F.; ALLEONI, L.R.F. (Ed.). **Química e mineralogia do solo**. Pt 2 - Aplicações. Viçosa: SBCS, 2009. cap. 14, p. 161-186.

GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; LAL, R.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.; CERRI, C.E.P. Net greenhouse gas fluxes in Brazilian ethanol production system. **Global Change Biology Bioenergy**, Street Malden, v. 2, p. 37-44, 2010.

JONES, D.L.; PRABOWO, A.M.; KOCHIAN, L.V. Aluminium-organic acid interactions in acid soils – II. Influence of solid phase sorption on organic acid-Al complexation and Al rhizotoxicity. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 182, p. 229-237, 1996.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Relações entre óxidos de ferro e a cor em solos cauliniticos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 27-31, 1983.

LUCA, E.F. **Matéria orgânica e atributos do solo em sistema de colheita com e sem queima da cana-de-açúcar**. 2002. 101 p. Tese (Doutorado em Ciências, área de concentração Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

LUCA, E.F.; FELLER, C.; CERRI, C.C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D.C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 789-800, 2008.

MA, J.F.; RYAN, P.R.; DELHAIZE, E. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 6, p. 273-278, 2001.

MAIA, J.L.T.; RIBEIRO, M.R. Cultivo contínuo da cana-de-açúcar e modificações químicas de um Argissolo Amarelo fragipânico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 1.127-1.132, 2004.

MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solo e folhas**: Amostragem, interpretação e sugestões de adubação. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992. 124 p.

MENDONZA, H.N.S.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B., ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 201-207, 2000.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 411-416, 1993.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Pt 2 - Chemical and microbial properties. 2nd ed. Madison: ASA-SSSA, 1982. Chap. 29, p. 539-579.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 8, p. 471-550.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; PENATTI, C.P.; PICCOLO, M.C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 2.359-2.362, 1999.

ORLANDO FILHO, J.; ROSSETTO, R.; MURAOKA, T.; ZOTELLI, H.B. Efeitos do sistema de despalha (cana crua x cana queimada) sobre algumas propriedades do solo. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 16, p. 30 – 33, 1998.

PAES, L.A.D.; OLIVEIRA, M.A. Potential trash biomass of the sugar cane plant. In: HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. (Ed.). **Biomass power generation: Sugar cane bagases and trash**. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005. chap. 1, p. 19-23.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Amostragem do solo em área com cana-de-açúcar após calagem. Relação de alguns atributos químicos do solo e a produção de colmos. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 19, p. 31-33, 2001.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H., QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendação de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRÉ-LARROUY, M.C.; 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.

ROBERTSON, F.A.; THORBURN, P.J. Management of sugarcane harvest residues: consequences for soil carbon and nitrogen. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 45, p. 13-23, 2007.

ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, J.C. ; FOLONI, J.S.S.; GARCIA, R.A. Potássio lixiviado da palha de aveia-preta e milho após a dessecação química. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1.169-1.175, 2007.

SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 576-586, 2008.

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

SILVA, A.J.N.; RIBEIRO, M.R. Caracterização de um Latossolo amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no Estado de Alagoas: Propriedades químicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 291-299, 1998.

SILVA, F.C.; RAIJ, B. van. Avaliação da disponibilidade de fósforo, por diversos extratores, em amostras de solos cultivados com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 83-90, 1996.

SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. In.: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa; SBCS, 2007. cap. 6, p. 275-374.

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do Solo e sua correção. In.: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L.(Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap.5, p. 205-274.

STROBEL, B.W. Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution - a review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 99, p.169-198, 2001.

VITTI, G.C.; MAZZA, J.A. Planejamento, estratégias de manejo e nutrição da cultura de cana-de-açúcar. Encarte Técnico, **Informações Agronômicas**. Piracicaba, v. 97, 16 p., 2002.

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.

ZINN, Y.L.; LAL, R.; RESCK, D.V.S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 28-40, 2005.

3 FORMAS DE FÓSFORO INORGÂNICO EM LATOSSOLO SOB CANA-DE-AÇÚCAR COLHIDA SEM QUEIMA

Resumo

A maioria dos solos sob cultivo da cana-de-açúcar no Brasil são altamente intemperizados, com predomínio de minerais 1:1 e óxidos de Fe e de Al na fração argila, que adsorvem em torno de 90% do fósforo (P) das adubações. No sistema de colheita da cana sem queima espera-se aumento no grau de fertilidade dos solos em relação ao solo sob sistema de cana queimada, mas a eficácia na disponibilização do P é pouco estudada. Avaliaram-se as alterações na distribuição dos teores de P total, P orgânico (P_o) e das formas de P inorgânico (P_i) em área com sistema de colheita de cana sem queima em diferentes posições e profundidades de amostragem do solo. O experimento foi conduzido em Pradópolis, SP (21°23' S; 47°59' O; 620,3 m), com amostras de um Latossolo Vermelho distrófico muito argiloso. Utilizou-se delineamento em blocos aleatorizados com seis repetições e dois tratamentos: cana colhida sem queima (SQ) e cana colhida com queima (CQ). As amostras de solo foram coletadas em cinco camadas: 0-0,05 m; 0,05-0,1 m; 0,1-0,2 m; 0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m e três posições: sobre a linha de plantio, a 0,25 m da linha e na entrelinha (0,75 m da linha de plantio). Foram avaliados os teores de P total, P orgânico total, as formas P_i -Al, P_i -Fe, P_i -ocluso e P_i -Ca por meio de extração sequencial, e (P_i+P_o) residual pela diferença entre P total e demais formas determinadas. De forma geral, não houve diferença ($p < 0,05$) entre os valores de P total nas amostras de solo dos sistemas SQ e CQ. Observaram-se depleção no compartimento P_o total do SQ na camada de 0-0,05 m e acúmulo de P_o na profundidade de adubação de plantio (0,2-0,3 m), sendo que as diferenças só foram verificadas nas posições linha e 0,25 m. Houve acúmulo de P na fração P_i -Al no CQ na camada de 0,2-0,3 m, com maior intensidade na posição linha. A fração P_i -Fe não variou em função dos sistemas de colheita e das posições de amostragem. Os valores de P_i -ocluso no CQ superaram os encontrados no SQ na camada de 0,05-0,1 m das posições linha e 0,25 m, enquanto os valores de SQ foram maiores que no CQ nas camadas mais profundas das posições 0,25 m e entrelinha. Valores de P_i -Ca foram maiores no sistema CQ do que no SQ apenas na camada de 0-0,05 m sobre a linha de plantio. Na fração (P_i+P_o) residual, não houve diferença ($p < 0,05$) entre os sistemas SQ e CQ na maior parte das camadas. O compartimento P_o total foi o mais alterado pelo sistema SQ em comparação ao CQ. Em geral, o teor de P_i não variou em resposta ao sistema da colheita da cultura. Não houve diferença entre as posições de amostragem na maioria das camadas avaliadas em ambos os sistemas de colheita.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar; P total; P orgânico total; Fracionamento do P inorgânico

Abstract

Most of the soils under sugarcane in Brazil are highly weathered, with a predominance of 1:1 clay minerals and Fe and Al oxides that adsorb around 90% of phosphorus (P) added via fertilization. The degree of fertility of soils under the management system where sugarcane is harvested without burning tends to be higher than the one in which sugarcane is burned before being harvested, but the effectiveness in the provision of P is not well studied. We evaluated changes in the distribution of total P, organic P (P_o) and forms of inorganic P (P_i) of soil samples in different positions and depths of sampling in an area where sugarcane was not burned before

harvesting. The experiment was carried out in Pradópolis, state of São Paulo, Brazil (21°23'S, 47°59'W, 620.3 m a.s.l.) in a clayey Oxisol. A randomized block design was employed with six replicates; two treatments: sugarcane harvested without burning (SQ) and burned sugarcane (CQ); three positions: on the row, 0.25 m from the row, and on the sugarcane interrow (0.75 m from the rows); and five layers: 0-0.05 m, 0.05-0.1 m, 0.1-0.2 m, 0.2-0.3 m and 0.3-0.4 m. We evaluated contents of total P, total organic P, P_i -Al, P_i -Fe, occluded P_i and P_i -Ca, obtained by sequential extraction, and residual (P_i+P_o) form calculated by the difference between total P and the summation of the other fractions. In general, there was no difference ($p < 0.05$) between the values of total P in soil samples of the SQ and CQ systems. A depletion in the total P_o compartment of SQ in the 0-0.05 m layer was observed, while there was an accumulation of P in the layer where P fertilizer was applied (0.2-0.3 m). The differences were only observed in the row and 0.25 m positions. In the CQ, an accumulation of P_i -Al fraction was observed in the 0.2-0.3 m layer, with greater intensity in the row position. P_i -Fe did not vary regardless of cropping systems and sampling positions. The values of occluded P_i in the CQ exceeded those found in SQ in the most superficial layer (0.05-0.1 m) of the row and 0.25 m positions. In the deeper layers of the 0.25 m and interrow positions, the values in the SQ were higher than in the CQ. P_i -Ca was larger in CQ only on the superficial layer on the row position. In the residual fraction (P_i+P_o), there was no difference ($p < 0.05$) between the SQ and CQ systems in most soil layers. The total P_o pool was the fraction which varied the most between the SQ and CQ systems. In general, the values of P_i did not change as a function of the harvest system. There was no difference between the positions, in most of the evaluated layers in both harvesting systems.

Keywords: Sugarcane; Total P; Total organic P; Inorganic P fractionation

3.1 Introdução

O teor de P total no solo é função do material de origem, do grau de intemperismo e do manejo do solo, não havendo relação direta entre seu teor total e a disponibilidade do nutriente para as plantas. O P encontrado na solução do solo como íons fosfatos é fixado à fração mineral como compostos de P inorgânico (P_i) com Ferro (P_i -Fe), com alumínio (P_i -Al) ou com cálcio (P_i -Ca). Com o tempo de contato, parte do elemento migra para o interior dos minerais sendo convertido em P-ocluso. A predominância entre as formas de P_i depende do pH e do tipo e quantidade de minerais presentes na fração argila do solo (HAVLIN et al., 2005).

Os solos predominantes nas áreas consolidadas e de expansão da cana-de-açúcar no Brasil são altamente intemperizados, com a fração argila constituída de minerais com cargas variáveis, como caulinita e óxidos de Fe, de Al e de Mn, entre outros, os quais apresentam elevada capacidade de adsorção de ânions (FONTES; ALLEONI, 2006). Nessas condições, cerca de 90% do P acrescentado via adubações minerais ou orgânicas migram da solução do solo para a fase sólida, estabelecendo o caráter “dreno” de P dos solos (NOVAIS; SMITH; NUNES, 2007; TIESSEN, 2005). Por isso, nas regiões tropicais úmidas, são necessárias aplicações maciças de

fertilizantes fosfatados com alto custo de aquisição, o que induz pesquisadores a buscar mecanismos de redução ou reversibilidade do caráter dreno de P nos solos.

O manejo da matéria orgânica (MO) do solo pode atenuar o problema da fixação de P, elevando sua biodisponibilidade, por meio da elevação da atividade microbiana, do bloqueio de sítios de adsorção, do deslocamento do P adsorvido e da solubilização de fosfatos de Fe, Al e Ca (GEORGE et al., 2006; GUPPY et al., 2005; HEREDIA; CIRELLI, 2007; KOCHIAN; HOEKENGA; PIÑEROS, 2004). Os resíduos vegetais podem adicionar P quando apresentam relação C:P < 200, o que favorece a mineralização do material pela atividade microbiana. Por outro lado, microrganismos podem imobilizar o P-disponível no solo quando o resíduo vegetal apresenta relação C:P > 300 (DALAL, 1977).

A introdução do sistema de colheita de cana-de-açúcar sem queima, por imposições legais, econômicas e ambientais, despertou a atenção para a possibilidade da redução da adsorção do P nos solos. Já existem evidências da elevação do teor de MO (GALDOS et al., 2010) e melhoria na fertilidade do solo (CANELLAS et al., 2003). O sistema introduz de 10 a 15 t ha⁻¹ ano⁻¹ de palhada, folhas e ponteiros (LUCA et al., 2008). Ball-Coelho et al. (1993), Conde; Penatti e Bellinaso (2005) e Oliveira et al., (1999) encontraram teores de P na palha da cana entre 4,4 a 8,7 kg ha⁻¹, dependendo da variedade cultivada e das práticas de manejo. A mineralização da palhada se dá lentamente em decorrência da sua elevada relação C:P. Oliveira et al. (1999) encontraram C:P = 947 na palha da cana-de-açúcar, variedade SP 79-1011, logo após a colheita mecânica, e C:P = 551 após um ano de decomposição no campo, sem redução no teor de P do material. No sistema de colheita com queima o P é imediatamente mineralizado e retorna à superfície do solo nas cinzas, entrando em equilíbrio com a fração mineral ou sendo perdida por erosão (BALL-COELHO et al., 1993).

A elevação da disponibilidade do P às plantas pela mineralização da palha da cana ainda é matéria de discussão. Canellas et al. (2003) observaram aumento no teor de P-disponível em Cambissolo no sistema de colheita sem queima em comparação ao manejo com queima. Contrariamente, Mendonza et al. (2000) detectaram que amostras de Argissolo Amarelo coletadas em área sob sistema de colheita com queima apresentaram maiores teores de P. Resultados opostos podem ser decorrentes dos tipos de solos, manejos da adubação fosfatada, tempo de instalação do sistema de colheita sem queima ou posições e profundidades de amostragem do solo.

A manutenção da palhada sobre o solo, a passagem de máquinas e implementos nas entrelinhas de plantio e a adubação de cana-soca promovem condições físicas, químicas e biológicas favoráveis na faixa próxima à linha de plantio. A manutenção do teor de água no solo permite a proliferação de raízes na camada imediatamente abaixo da cobertura orgânica, com intensa absorção de fósforo na camada superficial do solo (BALL-COELHO et al., 1993). Por outro lado, para diminuir a adsorção do P, o adubo fosfatado é aplicado de forma localizada no fundo do sulco de plantio (ANGHINONI, 2004), a cerca de 0,3 m de profundidade no caso da cana-de-açúcar. Isso favorece o acúmulo de P em frações inorgânicas e orgânicas de maior ou menor estabilidade nessa profundidade (RAIJ, 2004; SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

O conhecimento pelos pesquisadores da natureza e da distribuição das formas de P no solo pode auxiliar na avaliação do efeito da preservação da palha da cana na dinâmica e na disponibilidade do fósforo. Para tanto, é necessário conhecer a dimensão do reservatório de P nas frações inorgânicas e orgânicas, o que pode ser feito por meio da extração sequencial (ou fracionamento) do elemento (TIESSSEN; STEWART; COLE, 1984 e RAIJ, 2004). Os métodos de fracionamento derivados de Chang e Jackson (1957) têm sido largamente utilizados para investigar as formas de P_i -Fe, P_i -Al, P_i -ocluído e P_i -Ca com base nas diferenças de solubilidades (SCHROEDER; KOVAR, 2006; ZHANG; KOVAR, 2009).

Nesse estudo avaliaram-se alterações na distribuição P total, P_o total e nas formas de P_i em amostras de solo coletadas em áreas de Latossolo submetidas ao sistema de colheita de cana sem e com queima em diferentes posições e profundidades de amostragem.

3.2 Material e Métodos

O presente estudo se desenvolveu com amostras de solo coletadas em experimento instalado em 1995, com objetivo de avaliar sistemas de colheita de cana-de-açúcar. A área está localizada em Pradópolis, SP (21°23'S; 47°59'O; 620,3 m) e vem sendo cultivada sucessivamente com a cultura desde 1950. O solo é um Latossolo Vermelho distrófico muito argiloso (EMBRAPA, 2006), com média de 217, 127 e 656 g kg⁻¹ para as frações areia, silte e argila, respectivamente, até a profundidade de 0,4 m (EMBRAPA, 1979). A fração argila é composta por 294, 196, 70 e 59 g kg⁻¹ de caulinita, gibbsita, goethita e hematita, estimada com base em Kämpf e Schwertmann (1983); e apresenta 68,4 g kg⁻¹ de ferro “livre” (Fe) solúvel em

ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) e 1,9 g kg⁻¹ de Fe “amorfo” ou mal cristalizado solúvel em solução ácida de oxalato de amônio (LOEPPERT; INSKEEP, 1996).

O delineamento experimental foi em blocos aleatorizados com seis repetições, sendo avaliados dois tratamentos: cana colhida sem queima (SQ) e cana colhida com queima (CQ). Cada parcela apresentava 22 linhas com 50 m, com área útil central formada por 10 linhas com 30 m. A área havia passado por dois ciclos de cultivo de cana (1995-2003 e 2003-2009), sendo o preparo do solo efetuado com grade aradora, grade niveladora, subsolagem e grade niveladora. Nos dois ciclos foram aplicadas 2 t ha⁻¹ de calcário. A adubação foi realizada apenas com fertilizantes minerais. No primeiro ciclo foram aplicados 50, 125 e 125 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, no plantio, e cerca 90, 30 e 150 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, na cana-soca. No segundo ciclo foram aplicados 28, 56 e 84 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, no plantio, e uma média de 104 e 110 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N e K₂O na cana-soca (informação pessoal)¹.

A coleta de amostras do solo foi realizada em janeiro de 2009, em três posições de amostragens: linha de plantio, a 0,25 m da linha e na entrelinha (0,75 m da linha), em cinco camadas: 0-0,05 m; 0,05-0,1 m; 0,1-0,2 m; 0,2-0,3 m e 0,3-0,4 m. Também coletaram-se amostras nas mesmas profundidades em área adjacente sob vegetação nativa (VN) remanescente, classificada como Mata Atlântica Ombrófila, que serviram como padrão de comparação das alterações decorrentes dos manejos de cana. Foram coletadas 20 amostras simples para obtenção da amostra composta por parcela em cada posição e profundidade, totalizando 210 amostras.

As amostras foram peneiradas em malha de 2 mm, sendo uma parte seca ao ar e submetida à caracterização química (Tabela 1). A determinação de carbono total foi feita por combustão a seco em autoanalisador elementar (NELSON; SOMMERS, 1982). A extração do P-disponível foi realizada pelo extrator duplo ácido de Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹) (EMBRAPA, 1999). Os demais atributos foram obtidos conforme Rajj et al. (2001). Foram calculadas ao CTC ao pH 7,0 (CTC) pela soma de bases acrescida da acidez potencial e a saturação por bases pela equação $V\% = (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+) \times 100 / CTC$. Parte das amostras foi mantida no grau de umidade de campo, acondicionada em sacos plásticos e armazenada em câmara fria, sob temperatura de 2° C, até o momento das análises para determinação do P total, P orgânico total e fracionamento do P inorgânico.

¹ Informações sobre preparo do solo, calagem e adubação fornecidas por Lidiane Carine Garzon e Carlos Sardão, do Setor de Qualidade Agrícola, Usina São Martinho, Pradópolis, SP, e pelo Eng. Agr. Ivo Belinasso, do Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba, SP, Brasil.

Tabela 1 - Características químicas num Latossolo Vermelho distrófico sob manejo de cana com (CQ) e sem queima (SQ) e em área de vegetação nativa (VN)

Camadas	CQ			SQ			CV	VN
	Linha	0,25 m	Entrelinha	Linha	0,25 m	Entrelinha		
m	pH CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹						%	
0-0,05	3,9 bA	4,1 bA	4,1 bcA	4,0 aB	4,0 cB	4,5 aA	3	3,9 ±0,2
0,05-0,1	4,0 bA	4,2 abA	4,1 cA	3,9 aB	4,0 cB	4,4 abA	3	3,8 ±0,0
0,1-0,2	4,1 aA	4,2 abA	4,2 abcA	3,9 aB	4,1 bcA	4,2 cA	1	3,7 ±0,0
0,2-0,3	4,1 aB	4,2 abAB	4,4 abA	4,0 aB	4,2 abAB	4,3 bcA	2	3,8 ±0,1
0,3-0,4	4,1 aB	4,3 aAB	4,5 aA	4,1 aB	4,3 aA	4,3 bcA	1	3,8 ±0,0
CV, %	1	1	2	3	2	2		
	Carbono orgânico total, g kg ⁻¹							
0-0,05	24,9 aA*	21,5 aB	21,6 aB	32,4 aA	29,0 aA	25,6 aB	7	41,1 ±1,7
0,05-0,1	21,7 bA	20,6 abA	20,2 abA	26,8 bA	25,7 bAB	23,4 aB	6	32,7 ±4,5
0,1-0,2	20,6 bcA	19,5 bcA	19,0 bcA	22,7 cA	21,0 cAB	19,7 bB	5	21,9 ±1,6
0,2-0,3	20,0 cbA	18,6 cB	18,3 cB	22,8 cA	20,6 cB	19,3 bC	4	22,4 ±3,3
0,3-0,4	19,0 dA	17,1 dA	16,9 dA	20,4 dA	17,9 dB	18,2 bB	6	20,4 ±2,6
CV, %	4	4	5	5	5	6		
	P – Mehlich-1, mg kg ⁻¹							
0-0,05	8,8 aA	6,5 aB	8,1 aAB	5,4 abA	4,0 aB	4,1 aB	6	5,2 ±4,7
0,05-0,1	5,0 aAB	4,4 abB	6,8 abA	4,9 bA	4,3 aA	4,2 aA	10	3,6 ±2,5
0,1-0,2	6,3 aA	4,4 abB	6,1 abA	5,6 abA	3,8 aB	5,1 aA	7	2,2 ±1,3
0,2-0,3	8,7 aA	5,5 abA	5,6 bA	7,5 abA	3,7 aB	4,6 aAB	20	1,8 ±1,4
0,3-0,4	8,8 aA	3,9 bA	3,4 cA	8,6 aA	3,4 aA	4,0 aA	27	1,2 ±1,1
CV, %	18	13	8	15	18	13		
	CTC, mmol _c kg ⁻¹							
0-0,05	83,3 aA	80,2 abAB	77,8 aB	118,8 aA	109,1 aAB	104,5 aB	7	142,7 ± 4,7
0,05-0,1	82,0 abA	84,6 aA	77,5 aA	104,5 bA	101,5 aA	89,3 bA	18	115,6 ± 7,6
0,1-0,2	77,8 bcA	74,5 bcA	72,6 aA	89,8 cA	84,9 bA	82,1 bcA	9	86,2 ± 6,3
0,2-0,3	76,2 cdA	73,9 bcA	72,6 aA	90,7 cA	87,3 bA	83,6 bcA	8	84,3 ±10,2
0,3-0,4	72,3 dA	69,1 cAB	65,6 bB	82,3 dA	82,5 bA	77,4 cA	9	77,0 ± 5,2
CV, %	7	12	9	9	10	13		
	V%							
0-0,05	18 bB	21 bB	25 aA	33 aAB	31 abB	42 aA	5	27 ±7
0,05-0,1	20 bB	30 aA	22 aAB	30 abA	30 abA	36 abA	6	18 ±1
0,1-0,2	23 aA	22 bA	24 aA	26 abA	26 bA	28 bA	4	12 ±1
0,2-0,3	23 aA	24 abA	26 aA	27 abA	29 abA	28 bA	3	15 ±3
0,3-0,4	22 aB	27 abA	29 aA	25 bB	31 aA	30 bA	2	13 ±3
CV, %	3	5	5	4	3	5		

*Dentro de cada sistema de colheita, médias seguidas das mesmas letras minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem (Tukey, $p < 0,05$). Os resultados da VN estão seguidos dos desvios-padrão.

O P total foi extraído em água régia (HCl: HNO₃ na proporção de 4:1 por volume), conforme método proposto por McGrath e Cunliffe (1985). Esse método apresenta alta correlação positiva com o método mais dispendioso (método da fusão) e com o mais perigoso para o meio ambiente (digestão com ácido perclórico) (CROSLAND et al., 1995). O roteiro analítico consistiu das seguintes etapas: 0,5 g de amostras secas ao ar foi colocado em tubos de digestão, seguido de 8 mL de HCl e 2 mL de HNO₃ concentrados. Após 12 h em temperatura ambiente, os tubos foram transferidos para bloco digestor aquecido por 1 h a 50° C, passando mais 1 h a 105° C

e permanecendo a 175° C até secar. Após 5 min, acrescentaram-se 12,5 mL de solução HCl a 20%. Após esfriar, o material foi misturado em agitador de tubo tipo vortex, passado em filtro Whatman n° 41 para balões volumétricos de 50 mL. O volume foi completado com água deionizada. O P total foi determinado por espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

O P orgânico (P_o) foi determinado pelo método da ignição (KUO, 1996), no qual o P orgânico é convertido em inorgânico por oxidação em alta temperatura. Foi utilizada a seguinte marcha analítica: um grama (1 g) de amostra seca ao ar foi calcinado em mufla a 550° C por 1 h, em seguida, transferido para tubo de centrífuga de 50 mL. Por sua vez, 1 g da mesma amostra não foi submetido à calcinação, sendo transferido para outro tubo de centrífuga. Adicionaram-se 25 mL de H_2SO_4 0,25 mol L^{-1} aos tubos, em seguida foram agitados por 16 h. Os extratos foram centrifugados a 3.500 rpm por 5 min. A solução sobrenadante foi transferida para balões de 25 mL, e o volume foi completado com água deionizada. O pH dos extratos foi ajustado com NaOH 5 mol L^{-1} na presença do indicador p-nitrofenol, com objetivo de obter o máximo de cor azul por unidade de P presente na amostra (JACKSON, 1958). O teor de P nos extratos foi determinado colorimetricamente pelo método do fosfomolibdato de Murphy e Riley (1962), conforme roteiro analítico proposto por Watanabe e Olsen (1965). O valor de P_o total foi obtido pelo seguinte cálculo: P_o Total = P total na amostra calcinada – P total na amostra não calcinada.

O fracionamento do P inorgânico foi realizado conforme método descrito por Zhang e Kovar (2009), baseado nas diferenças de solubilidade das formas de P inorgânico em vários extratores (Figura 1). Os extratos foram filtrados em membrana ultrafina de 0,45 μm , para eliminar partículas orgânicas em suspensão, e a determinação foi feita por espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). O (P_i+P_o) residual foi obtido pela diferença entre o P total e as frações P_o , P_i-Al , P_i-Fe , P_i-Ca e P_i -ocluso.

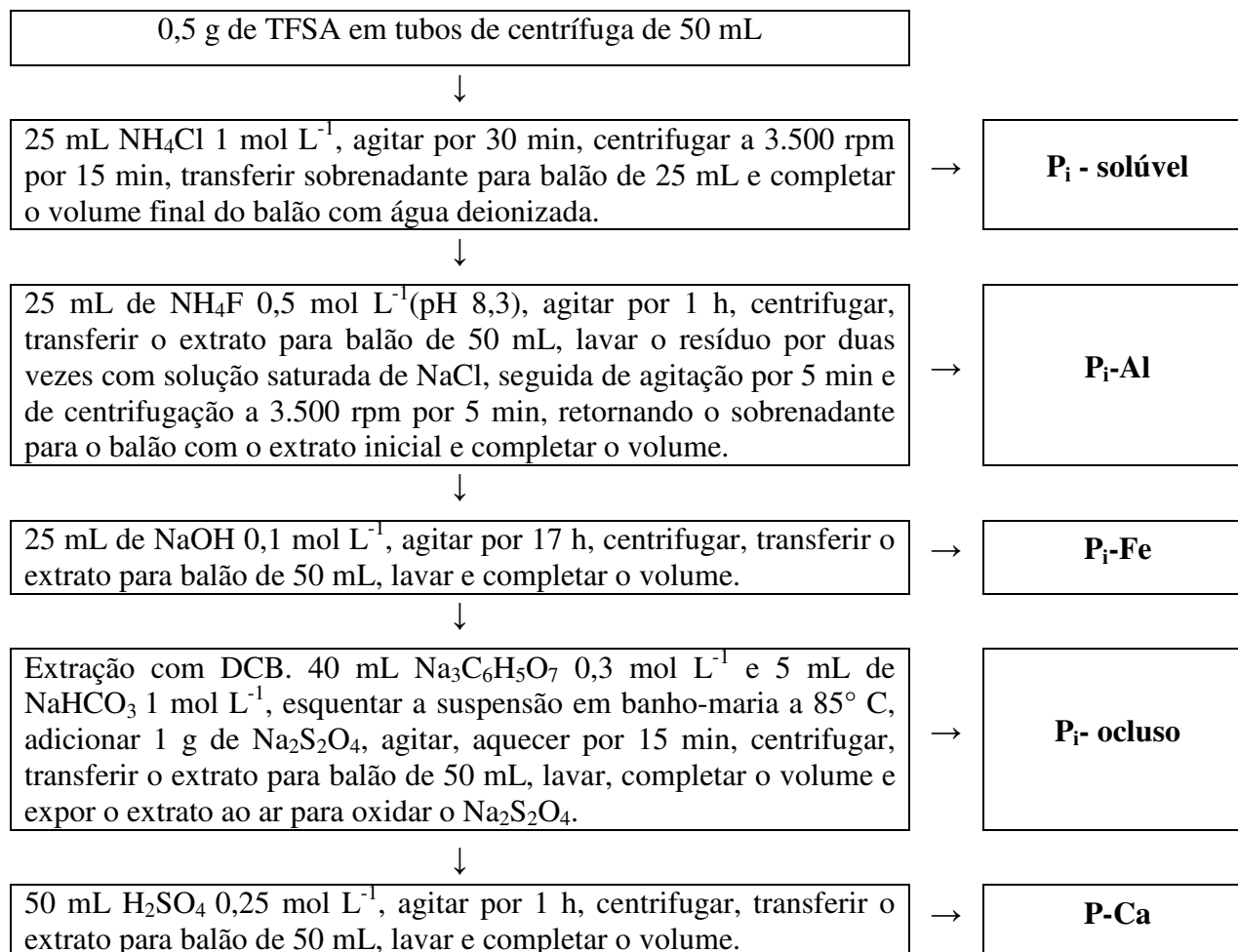


Figura 1 - Roteiro analítico usado no fracionamento do P inorgânico (ZHANG; KOVAR, 2009)

Foram realizadas análises de variância seguindo o modelo em parcelas subdivididas, com os sistemas de colheita na parcela e as posições nas subparcelas. Para os resultados entre as camadas (profundidades), utilizou-se o modelo de bloco aleatorizado. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o PROC GLM do Statistical Analysis Systems, versão 9.2 (SAS, 1997). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Para que houvesse homogeneidade de variância e normalidade dos erros, os resultados das frações $\text{P}_i\text{-Al}$, $\text{P}_i\text{-Fe}$ e $\text{P}_i\text{-Ca}$ foram transformados da seguinte maneira: $1/\sqrt{(\text{P}_i\text{-Al})}$; $(\text{P}_i\text{-Fe})^{(2)}$; $\log_{10} (\text{P}_i\text{-Ca})$. Os valores de P total, P orgânico total, $\text{P}_i\text{-occluso}$ e (P_i+P_o) residual não demandaram transformações para atendimento dos pressupostos dos testes estatísticos utilizados. Os valores relativos à área de vegetação nativa (VN) foram excluídos da análise estatística, visto que não faziam parte do desenho experimental.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Fósforo total – P total

Não houve interação significativa nos valores de P total entre os sistemas CQ e SQ e as posições de amostragem em todas as profundidades. Os teores de P total nas amostras coletadas na área SQ não diferiram dos da área CQ. A exceção foi na camada de 0,1-0,2 m, na qual o solo do tratamento CQ apresentou valor maior que o do SQ (Tabela 2), provavelmente em decorrência da incorporação de cinzas da queima da colheita e o revolvimento periódico do solo durante os 50 anos de cultivo da área. Busato; Canellas e Velloso (2005) relataram acréscimo de 277% no teor de P total no solo sob SQ em relação ao CQ na camada de 0-0,20 m e 252% na de 0,20-0,4 m, em Cambissolo eutrófico submetido aos dois sistemas por 55 anos. Segundo os autores, o acúmulo do material vegetal na área de produção durante longo período de tempo pode favorecer o retorno do P ao solo. No presente estudo, realizado com amostras de um Latossolo distrófico, o sistema SQ estava instalado há menos tempo (14 anos), o que provavelmente foi insuficiente para promover elevação no teor de P total em relação ao do solo sob sistema de CQ.

Tabela 2 – Teores de P total nos solos sob colheita de cana sem queima (SQ), com queima (CQ) num Latossolo Vermelho distrófico em diferentes camadas de amostragem

Tratamentos	Camadas, m				
	0-0,05	0,05-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4
	----- mg kg ⁻¹ -----				
SQ	1.104,3	983,85	963,2	976,1	938,0
CQ	1.118,9	979,30	1.019,1	972,1	937,7
Teste F	ns	ns	**	ns	ns
CV, %	5	5	6	7	7

ns = não significativo; * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$.

Os valores de P total variaram de 883 mg kg⁻¹ a 1.152 mg kg⁻¹ nas áreas sob cultivo, enquanto no solo sob vegetação nativa os valores variaram de 1.228 mg kg⁻¹ a 1.010 mg kg⁻¹ (Tabela 3). As concentrações estão de acordo com as relatadas por Jorge e Valadares (1969) em seis Latossolos do Estado de São Paulo, com valor máximo de 1.111 mg kg⁻¹ de P total. Machado; Brauner e Vianna (1993) descreveram valores de até 1.162 mg kg⁻¹ em Latossolo com 700 g kg⁻¹ de argila, no planalto do Rio Grande do Sul, e associaram o resultado à origem basáltica dos solo.

Os valores de P total foram maiores na camada superficial (0-0,05 m) do que nas demais camadas e apresentaram gradiente negativo em profundidade em ambos os sistemas de colheita e

na área sob VN (Tabela 3). No sistema de colheita CQ, isso decorreu do acúmulo de cinzas na superfície do solo. Tais efeitos ocorreram até a profundidade de 0,3 m provavelmente porque a queima da cana vem sendo realizada há vários anos, e as cinzas foram incorporadas ao solo por ocasião do preparo do solo na renovação do canavial. No solo sob cana colhida sem queima, a mineralização se dá de maneira lenta, e o efeito é mais nítido na camada superficial do que nas camadas mais profundas do perfil do solo. Araújo, Salcedo e Sampaio (1993) relataram decréscimo no teor de P total com a profundidade em amostras de um Latossolo Amarelo cultivado com cana colhida com queima. Os autores sugerem que o efeito foi devido à aplicação anual de fertilizante fosfatado solúvel na cana-soca e à ciclagem do P absorvido pelos restos de cultivo e pelas cinzas da queima, além da baixa mobilidade do P no perfil. A redução dos teores de P total em profundidade é relatada por diversos autores sob várias práticas de manejo do solo (ASSIS et al., 2010; JIMÉNEZ-CÁRCELES; ÁLVAREZ-ROGEL; 2008; SCHROEDER; KOVAR, 2005; TOKURA et al., 2002).

Tabela 3 – Teores de fósforo total num Latossolo Vermelho distrófico sob manejo de cana com (CQ) e sem queima (SQ) e em área de vegetação nativa (VN) em diferentes posições e camadas de amostragem

Camadas m	CQ			SQ			VN
	Linha	0,25 m	Entrelinha	Linha	0,25 m	Entrelinha	
	mg kg ⁻¹						
0-0,05	1.152,1 a	1.105,4 a	1.099,2 a	1.128,8 a	1.071,8 a	1.112,2 a	1.228,9 ± 133
0,05-0,1	1.009,2 bc	982,7 abc	945,9 b	1.029,0 b	936,7 b	985,7 b	1.168,5 ± 86
0,1-0,2	1.063,8 b	1.009,5 ab	984,1 b	964,9 c	951,4 b	973,1 b	1.162,6 ± 104
0,2-0,3	1.065,4 b	955,8 bc	895,3 b	1.028,4 b	952,8 b	947,0 b	1.039,2 ± 70
0,3-0,4	951,6 c	883,3 c	978,3 b	933,4 c	921,2 b	959,4 b	1.010,2 ± 169
CV, %	3	7	6	3	4	6	

*Dentro de cada sistema de colheita, médias seguidas das mesmas letras minúsculas na vertical não diferem (Tukey, $p < 0,05$). Os resultados da VN estão seguidos dos desvios-padrão.

3.3.2 Fósforo orgânico total - P_o total

A quantificação do P_o total permite detalhar o entendimento dos processos de mineralização-imobilização do P em diferentes ambientes e sistemas de cultivo (KUO, 1996). A participação percentual do P_o total no P total é muito variável e depende de fatores como cobertura vegetal, condições climáticas, grau de intemperismo do solo, relação C:P do material vegetal aplicado e manejo da fertilidade (DICK, 1983; NOVAIS; SMYTH, 1999; SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). Não houve diferença ($p < 0,05$) nos teores de P_o entre os

sistemas de colheita nas amostras coletadas na entrelinha. Possivelmente, na faixa entre as fileiras da cana não houve entradas de P inorgânico que promovessem diferenças de acumulação entre os sistemas. Também não houve absorção pelo sistema radicular que justificasse a redução na fração P_o total (BECK; SANCHEZ, 1994; BUEHLER et al., 2002).

Nas posições linha e 0,25 m, os sistemas apresentaram comportamentos opostos nas camadas estudadas. O sistema de colheita CQ promoveu maior concentração de P_o do que o SQ nas camadas de 0-0,05 m e 0,3-0,4 m (Figura 2). Nesse caso, parte da necessidade de P foi suprida pelas cinzas da palha (BALL-COELHO et al., 1993). Por outro lado, no sistema SQ, a camada superior (0-0,05 m) não recebeu adições de P_i . A elevada densidade de raízes na camada superficial promoveu maior absorção do elemento, compensada pela mineralização do P_o orgânico, o que resultou na depleção desse compartimento (BUSATO; CANELLAS; VELLOSO, 2005). O teor de carbono adicionado via palha da cana não repercutiu em elevação do teor de P_o total, tal como observou Dick (1983) em solos com relação C:P 121 e 129, sob plantio direto por 18 anos. No presente estudo, as amostras coletadas na camada de 0-0,05 m das posições linha e 0,25 m apresentaram relação C:P = 205 o que, segundo Havlin et al. (2005), representa o limite para o processo de mineralização-imobilização do fósforo. A maior demanda pelo nutriente foi ainda responsável pela menor teor de P_o nas amostras de solo do sistema SQ em relação ao CQ na camada de 0,3–0,4 m.

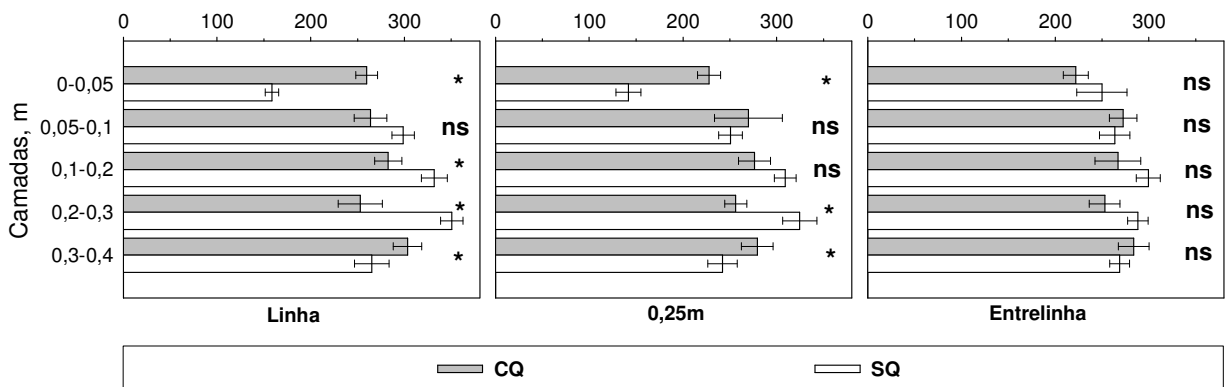


Figura 2 – Teores de P orgânico total (mg kg^{-1}) num Latossolo vermelho distrófico sob colheita de cana com queima (CQ), sem queima (SQ). Diferenças entre sistemas (Tukey, $p < 0,05$): * significativo; ns: não significativo. As barras representam os erros-padrão da média

Nas camadas de 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m da linha e na camada de 0,2-0,3 m da posição 0,25 m, os teores de P_o das amostras de solo sob cana SQ superaram os encontrados no CQ (Figura 2). Nesse caso, o P_o total exerceu caráter drenante de P (NOVAIS; SMYTH, 1999). O acúmulo de P

aplicado no fundo do sulco de plantio, provavelmente, favoreceu a adsorção do P inorgânico e a imobilização de parte do elemento na forma de P_o . Formas de P_o , como fosfatos de inositol, permanecem intimamente adsorvidos a superfície dos óxidos de Fe e de Al (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI; 2008). A manutenção ou o aumento do P_o total pela adubação fosfatada foram encontrados por Tiessen; Salcedo e Sampaio (1992) em solos do semiárido nordestino. Rheinheimer et al. (1998) observaram o mesmo fenômeno na camada de 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m de solo sob plantio direto em comparação ao cultivo convencional. A maior concentração de P_o no sistema SQ é favorecida pelo acúmulo de MO. No presente estudo o teor de C orgânico foi maior no solo sob cana SQ do que no CQ nessas camadas (Tabela 1).

Na comparação entre os valores de P_o total absoluto e relativo em cada sistema de colheita (Tabela 4), observou-se que houve depleção do P_o total nas amostras de solo sob sistema SQ, nas posições linha e 0,25 m, da camada superficial. A redução coincidiu com o maior teor de P-disponível, extraído com a solução de Mehlich-1, na posição linha da camada de 0-0,05 m do sistema SQ (Tabela 1), o que pode reforçar o caráter fonte do P_o na camada superficial.

Tabela 4 - Teores de P orgânico total absoluto (P_o total) e relativo (P_o total/P total) num Latossolo Vermelho distrófico sob manejo de cana com (CQ) e sem queima (SQ) e em área de vegetação nativa (VN) em diferentes posições e camadas de amostragem

Camadas m	CQ						SQ						CV %	VN
	Linha		0,25 m		Entrelinha		Linha		0,25 m		Entrelinha			
	----- Po total, mg kg ⁻¹ -----													
0-0,05	259,7	bA	227,7	aA	222,1	bA	158,7	dB	141,9	cB	249,8	aA	14	317,5 ±66,6
0,05-0,1	263,8	bA	270,0	aA	272,4	aA	298,6	bcA	250,6	bA	263,5	aA	14	392,4 ±55,5
0,1-0,2	282,6	abA	276,4	aA	266,9	aA	331,8	abA	309,0	aA	299,4	aA	9	333,3 ±57,4
0,2-0,3	253,0	bA	256,3	aA	252,9	abA	350,4	aA	324,6	aAB	288,3	aB	9	336,6 ±22,8
0,3-0,4	303,3	aA	279,2	aA	283,8	aA	265,1	cA	242,2	bA	268,8	aA	7	362,6 ±19,6
CV, %	7		16		9		9		11		14			
	----- Po total / P Total, % -----													
0-0,05	23	cA	21	bA	20	bA	14	cB	13	cB	22	aA	16	25 ± 5
0,05-0,1	26	bcA	28	abA	29	aA	29	bA	27	bA	27	abA	15	34 ±5
0,1-0,2	26	bA	28	abA	27	aA	34	aA	32	aA	31	aA	10	28 ±7
0,2-0,3	23	bcA	26	abA	28	aA	34	aA	34	aA	30	aA	10	32 ±3
0,3-0,4	32	aA	32	aA	29	aA	28	bA	26	bA	28	abA	9	37 ±8
CV, %	8		19		11		10		11		14			

*Dentro de cada sistema de colheita, médias seguidas das mesmas letras minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem (Tukey, $p < 0,05$). Os resultados de VN estão seguidos dos desvios-padrão.

Na maioria das posições estudadas, não houve nítida formação de gradiente de concentração do P_o total com as profundidades testadas (Tabela 4). Provavelmente isso foi decorrente da mobilidade de fosfatos monoésteres que apresentam menor adsorção na fração

mineral. Outra justificativa é a estabilização do P_o nos Latossolos, devido à correlação positiva entre teores de fosfatos di-ésteres e conteúdo de argila e de óxidos de ferro no solo (CONDRON; TURNER; CADE-MENUM, 2005). Nas posições linha e 0,25 m da cana SQ, verificou-se gradiente crescente em profundidade em virtude dos menores teores de P_o total na camada de 0-0,05 m., decorrentes da depleção da fração orgânica em superfície.

Considerando os valores de P_o relativo na camada arável (0-0,2 m), obtidos pela média ponderada das três posições nas camadas de 0-0,05 m, 0,05-0,1 m e 0,1-0,2 m (Figura 3), observou-se que o P_o representou 28% do P total nas amostras do sistema SQ, próximo do valor do CQ (26%). Na camada subsuperficial (0,2-0,4 m), a média para SQ foi de 30% do P total e 28% para CQ. O acréscimo de P_o na subsuperfície da cana SQ foi coerente com o descrito por Busato; Canellas e Velloso (2005), que relataram valores relativos de 25%, na camada de 0-20 cm, e 28% na de 20-40 cm. Guerra et al. (1996) encontraram contribuição média de 27% em amostras superficiais de 17 solos brasileiros, com valores variando entre 13 a 47% do P total.

De modo geral, o compartimento orgânico foi preponderante na maioria das camadas do solo na VN, exceto na camada de 0,1-0,2 m (Figura 3). Em comparação com a área sob VN, ambos os sistemas CQ e SQ apresentaram menores valores de P_o total nas camadas de 0-0,05 m (VN = 26% > CQ = 21% > SQ = 17%), 0,05-0,1 m (34% > 28% = 28%) e 0,3-0,4 m (37% > 31% > 27%). Na camada de 0,1-0,2 m, os valores de SQ (32%) superaram os da VN (28%). Na camada de 0,2 -0,3m, os valores nas amostras SQ (33%) se aproximaram aos da área VN (32%). Beck e Sanchez (1994) relataram redução nos teores de P_o total em resposta ao cultivo de culturas anuais por 13 anos sem adição de fertilizantes e aumento nas parcelas fertilizadas. Isso indica o caráter-fonte da forma P_o em condições de cultivo sem adubação fosfatada e o caráter-dreno quando solos pouco férteis são adubados com fontes inorgânicas de P (NOVAIS; SMYTH, 1999). A elevação dos valores de P_o nas camadas de 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m foi decorrente do efeito residual da adubação de plantio. Esse aumento foi compensado pela redução do compartimento P-residual, indicando mobilidade entre as frações (Figura 3). As amostras de solo sob sistema CQ apresentaram maior uniformidade na distribuição de P_o ao longo do perfil analisado do que foi observado nos sistemas onde houve aporte de matéria orgânica (SQ e VN), o que ressalta a importância dos compostos orgânicos na fixação do P.

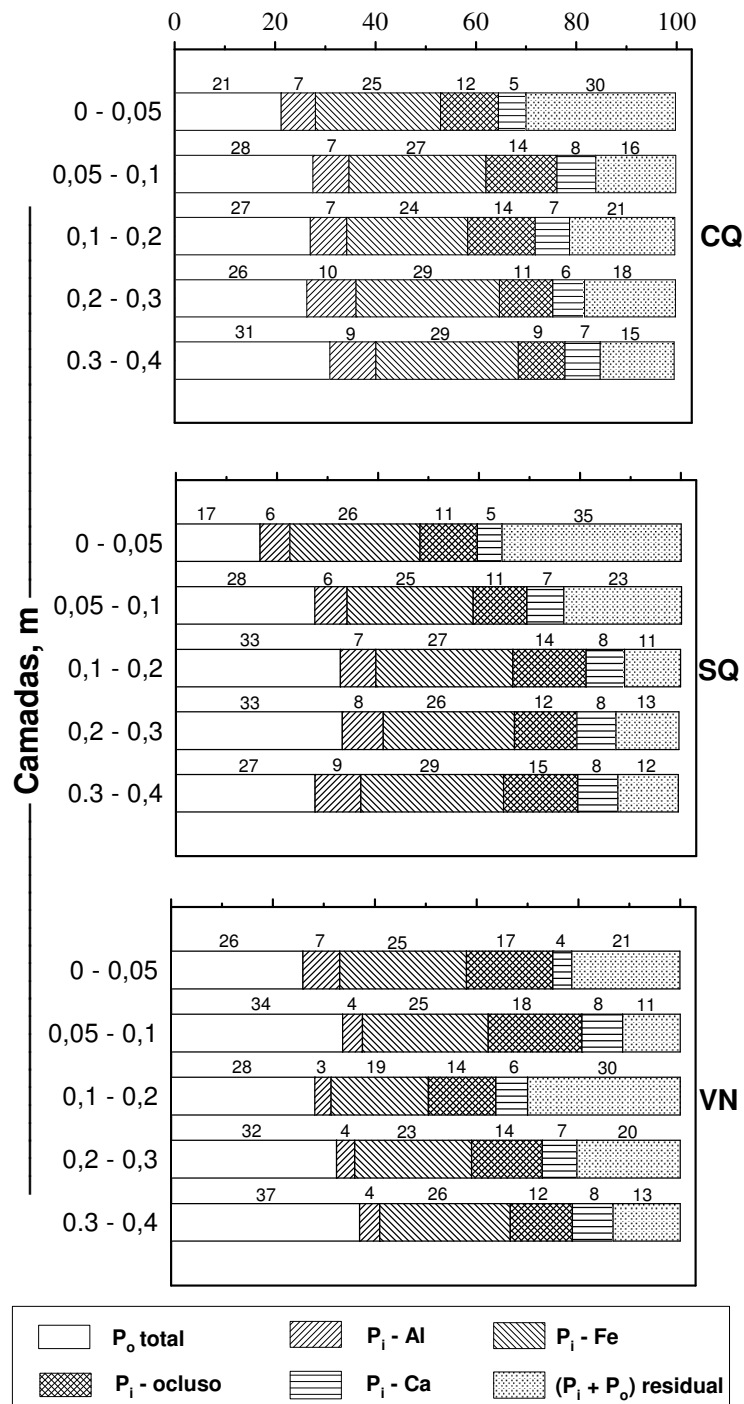


Figura 3 - Distribuição percentual da fração fósforo orgânico total (P_o total) e das frações do P inorgânico (P_i) em relação ao P total nos solos sob colheita de cana sem queima (SQ), com queima (CQ) e vegetação nativa (VN) num Latossolo Vermelho distrófico. Média das três posições de amostragem

3.3.3 Fracionamento do P inorgânico – P_i

A fração P solúvel ou trocável, também referida como P_i-lábil (SCHROEDER; KOVAR, 2006), apresentou valores abaixo do limite de detecção. Tentativamente, utilizou-se método colorimétrico em aparelho com limite de detecção de 0,005 mg kg⁻¹ e cubeta de 10 mm, sem obtenção de valores. Nesta etapa do fracionamento do P_i é utilizado o extrator NH₄Cl 1 mol L⁻¹, cujo ânion Cl⁻ é retido na superfície mineral do solo por adsorção não-específica e não tem praticamente poder de substituir o fosfato retido por adsorção específica (NOVAIS; SMITH; NUNES, 2007). Por isso, é usado como primeiro extrator do P “fracamente retido”. O extrator não é eficiente em solos ácidos altamente intemperizados. Nesse solos o P é fixado na forma de complexos de esfera interna, nos grupos OH⁻ expostos na superfície dos argilominerais, óxidos de Fe e de Al, principalmente, nos óxidos amorfos (FONTES; ALLEONI, 2006). O Latossolo distrófico usado no presente estudo tem elevado teor de argila (656 g kg⁻¹), constituição mineralógica favorável à forte retenção de P e não havia recebido adubação fosfatada há mais de seis anos quando as amostras foram coletadas (Janeiro de 2009), tendo por isso teores extraídos por solução de P Mehlich-1 que variaram de muito baixo a baixo (Tabela 1). Olibone e Rosolem (2010) utilizaram o mesmo extrator de P_i-lábil (NH₄Cl) em amostras de um Latossolo Vermelho franco-arenoso (220 g kg⁻¹ de argila) sob sistema de plantio direto, no Estado de São Paulo, e encontraram valores de 7 a 12 mg kg⁻¹ nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m e abaixo do limite de detecção nas camadas de 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m.

A participação percentual das frações do P_i no P total está apresentada na figura 3. Os valores médios das posições de coleta para cada camada avaliada nos solos sob cultivo de cana SQ e CQ apresentaram a ordem P_i-Fe > P_i-ocluso > P_i-Al ≈ P_i-Ca em todas as camadas. Segundo Ball-Coelho et al. (1993), as cinzas da queima da palha contêm fosfato de cálcio na sua composição. Isso pode justificar o teor de P_i-Ca nas amostras de solo do sistema CQ. No tratamento SQ, os valores de P_i-Ca foram decorrentes das maiores concentrações de Ca introduzidas no sistema (TOKURA et al., 2002) por meio da mineralização da palhada (BUSATO; CANELLAS; VELLOSO, 2005).

No solo sob vegetação nativa, o teor da fração P_i-Al foi maior que P_i-Ca na camada de 0-0,5m, enquanto o valor de P_i-Ca superou o de P_i-Al nas quatro camadas seguintes. A sequência P_i-Fe e P_i-ocluso está coerente com as condições de solos altamente intemperizados, com elevados teores de óxido de Fe e de Al na fração argila, distróficos, pobres em Ca e ácidos

(CROSS; SCHLESINGER, 1995; NOVAIS; SMITH; NUNES, 2007). Para solos tropicais ácidos a expectativa é de se encontrarem valores de $P_i\text{-Al} > P_i\text{-Ca}$. Os valores de $P_i\text{-Ca} > P_i\text{-Al}$ encontrados no presente estudo estão de acordo com o descrito por Jorge e Valadares (1969) em solos com 500 g kg^{-1} de argila, no Estado de São Paulo. As menores concentrações de $P_i\text{-Al}$ na VN reflete o elevado grau de intemperização do solo. Nessas condições, pode ocorrer conversão dessa forma pouco lábil para suprir componentes mais lábeis em solos tropicais de baixa fertilidade natural (BUSATO; CANELLAS; VELLOSO, 2005; HEDLEY. STEWART; CHAUHAN, 1982).

A fração $P_i\text{-Al}$ representa parte do que tem sido conceituado como fósforo pouco lábil (MACHADO; BRAUNER; VIANNA, 1993), podendo adsorver ou desorver P da/para solução do solo dependendo da concentração de equilíbrio. Os teores de $P_i\text{-Al}$ foram maiores nas áreas cultivadas do que na VN, especialmente nas camadas mais profundas (Tabela 5). Esse comportamento reflete o manejo de fertilidade do canavial ao longo dos anos. Pavinato; Merlin e Rosolem (2009) encontraram aumento no teor de P_i extraído com bicarbonato de sódio ($P_i\text{-Fe}$ e $P_i\text{-Al}$) em Latossolo cultivado com soja em plantio direto e convencional e que receberam adubação fosfatada. Isso indica que parte do P residual das adubações está sendo retido nas formas de pouco lábeis nas áreas sob cultivo. Na camada mais superficial (0-0,05 m), os teores no solo sob cana SQ foram menores do que na área de vegetação nativa. Concorreram para isso a formação de complexos Al-ácidos orgânicos liberados na decomposição da palha e o bloqueio dos sítios de adsorção do P nos óxidos de Al pelos compostos orgânicos (GUPPY et al., 2005; IYAMUREMYE; DICK, 1996).

Tabela 5 – Teores das frações de P inorgânico num Latossolo Vermelho distrófico sob manejo de cana com queima (CQ), sem queima (SC) e vegetação nativa (VN) em diferentes posições e camadas de amostragem

Camadas m	CQ			SQ			CV %	VN mg kg ⁻¹
	Linha	0,25 m	Entrelinha	Linha	0,25 m	Entrelinha		
	mg kg ⁻¹							
	Pi-Al							
0-0,05	87,6 abA	42,7 bB	96,9 aA	63,0 cA	61,6 bcA	70,9 abA	10	87,8 ± 5,7
0,05-0,1	75,2 bA	64,8 aA	70,8 bA	71,6 abcA	60,0 cA	56,4 bB	6	46,1 ±18,1
0,1-0,2	76,7 bA	75,1 aA	68,1 bA	67,6 bcA	66,9 bcA	68,3 abA	5	36,2 ±20,3
0,2-0,3	117,9 aA	95,1 aAB	73,9 bB	84,5 abA	82,6 aA	69,9 abA	8	37,7 ±21,1
0,3-0,4	125,1 aA	70,7 aA	54,8 cB	92,6 aA	71,8 abA	83,8 aA	14	40,3 ±15,1
CV, %	10	12	6	8	5	9		
	Pi-Fe							
0-0,05	288,3 aA	289,9 aA	255,8 aA	302,1 aA	270,6 aA	277,6 aA	9	305,9 ±42,4
0,05-0,1	232,8 bA	292,2 aA	272,9 aA	240,5 bA	261,2 abcA	241,1 aA	15	289,0 ±44,8
0,1-0,2	248,4 bA	255,0 bA	231,7 bA	258,5 bA	266,5 abA	259,1 aA	7	221,3 ±30,7
0,2-0,3	304,2 aA	253,4 bA	270,1 aA	242,3 bA	241,2 cA	270,5 aA	11	239,4 ±46,6
0,3-0,4	285,8 aA	253,1 bA	255,8 aA	272,9 abA	250,6 bcA	269,0 aA	18	252,5 ±19,8
CV, %	13	7	9	17	9	17		
	Pi-ocluso							
0-0,05	112,9 bA	148,3 aA	129,6 abA	110,4 abA	121,4 aA	144,3 abcA	16	209,4 ±35,8
0,05-0,1	128,6 abA	134,7 abA	152,3 aA	91,1 bB	97,7 aB	130,8 cA	11	214,3 ±21,5
0,1-0,2	154,0 aA	122,6 abA	144,9 aA	136,3 aA	122,1 aA	164,4 aA	21	155,1 ±13,9
0,2-0,3	124,1 abA	90,2 bcB	100,6 bcAB	121,7 aA	128,2 aA	114,8 cA	15	143,7 ±23,9
0,3-0,4	110,8 bA	70,9 cB	87,8 cAB	136,8 aA	128,7 aA	153,01 abA	19	119,3 ±17,3
CV, %	16	25	15	14	15	14		
	Pi-Ca							
0-0,05	88,5 aA	47,8 cB	50,0 bB	48,1 bA	55,8 bA	57,1 aA	4	45,6 ±5,7
0,05-0,1	77,9 abA	76,1 aA	73,0 aA	66,6 aA	72,8 aA	73,0 aA	3	93,6 ±6,5
0,1-0,2	76,5 abA	67,9 abB	62,5 abB	78,1 aA	72,4 aAB	67,6 aB	1	73,2 ±9,1
0,2-0,3	64,2 cA	55,5 bcA	63,1 aA	74,7 aA	69,8 aA	79,2 aA	4	70,8 ±5,2
0,3-0,4	71,0 bcA	65,2 abA	60,5 abA	66,9 aA	79,1 aA	75,1 aA	3	79,2 ±8,0
CV, %	2	3	3	4	2	5		

*Dentro de cada sistema de colheita, médias seguidas das mesmas letras minúsculas na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem (Tukey, $p < 0,05$). Os resultados de VN estão seguidos dos desvios-padrão.

Não houve diferença nos valores de Pi-Al ($p < 0,05$) entre os sistemas de colheita CQ e SQ para a maioria das camadas (Figura 4). Na camada de 0,2-0,3 m da posição linha, o solo sob sistema CQ apresentou maior teor de Pi-Al do que no SQ. O mesmo se verificou na camada de 0,05-0,1 m da posição entrelinha. Os menores valores de Pi-Al na área SQ, provavelmente, são decorrentes dos processos de competição e bloqueio de sítios de adsorção, anteriormente discutidos. Também se deve considerar a dessorção de P dos óxidos de Al para restabelecer equilíbrio com a solução em solos tropicais distróficos (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982).

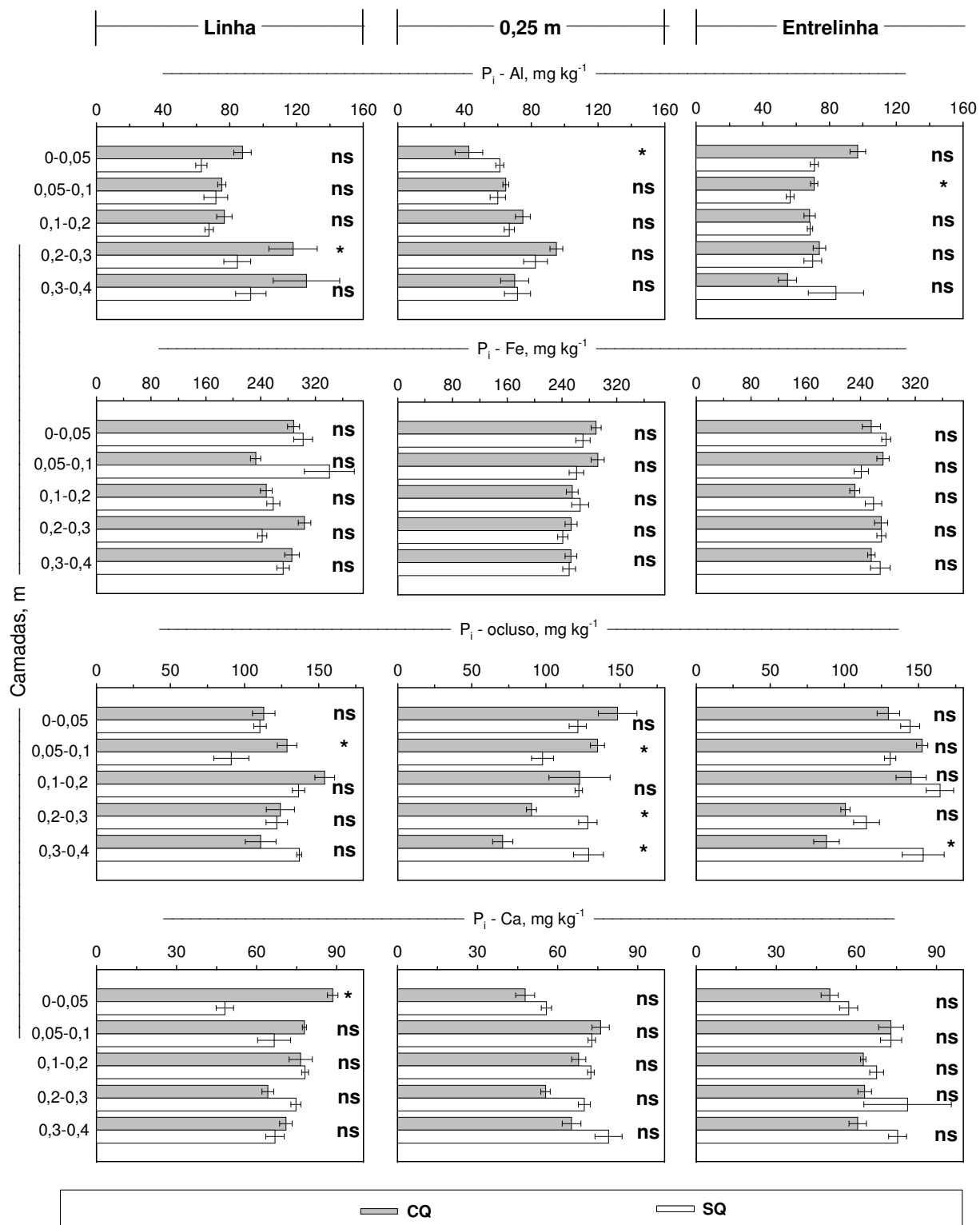


Figura 4 – Teores das frações de fósforo inorgânico (P_i) num Latossolo Vermelho distrófico sob colheita de cana com queima (CQ), sem queima (SQ). Diferenças entre sistemas (Tukey, $p < 0,05$): * significativo; ns: não significativo. As barras representam os erros-padrão da média

De forma geral, não houve diferença entre as amostras coletadas nas posições de amostragem na área sob cana SQ. Por outro lado, houve acúmulo de P_i -Al nas amostras sob CQ, coincidindo com o local da adubação fosfatada (Tabela 5). Foi observado gradiente de concentração de P_i -Al das camadas mais profundas para as superficiais, especialmente na posição linha, o que indica que a acumulação na fração P_i -Al foi governada pela posição de aplicação do adubo mineral de plantio.

Não houve diferença ($p < 0,05$) no teor de P_i -Fe entre as amostras de solo sob cana SQ e CQ em função das posições (Figura 4 e Tabela 5), diferentemente do que foi observado no compartimento P_i -Al. As diferenças entre as frações P_i -Al e P_i -Fe só são verificadas quando o método de extração utiliza diferentes extratores para cada uma, como é o caso dos métodos adaptados de Chang e Jackson (1957). No fracionamento de Hedley, Stewart e Chauham (1982) só é possível discutir o somatório das duas frações (P_i -Al + P_i -Fe) obtido na extração com NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (fração P_i -hidróxido). Por essa razão, Araújo; Salcedo e Sampaio (1993), Busato; Canellas e Velloso (2005), Rheinheimer; Anghinoni e Kaminski (2000), Tiessen; Salcedo e Sampaio (1992) atribuem a ambas as frações a mesma atividade como reservatório (fonte ou dreno) de P no solo.

Verificou-se maior teor de P_i -Fe na camada superficial (0-0,05 m) das posições linha e 0,25 m em razão das entradas de P por cinzas ou mineralização da MO. Olibone e Rosolem (2010) verificaram efeito da aplicação de superfosfato triplo no aumento do compartimento P_i -Fe em amostras de Latossolo franco arenoso (220 g kg^{-1} de argila), em experimento com soja sob plantio direto.

Nos Latossolos, o P_i -ocluso nos óxidos de Fe e de Al tem grande estabilidade e não contribui, em curto prazo, para o fornecimento de P para as plantas (WAGAR; STEWART; MOIR, 1986). As áreas sob cultivo apresentaram valores menores de P_i -ocluso do que o da vegetação nativa nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,1 m (Tabela 5). Isso indica que técnicas como correção da acidez, aplicação localizada da adubação e reciclagem de resíduos orgânicos ao longo dos anos têm atenuado os processos de fixação do P (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007).

O solo da área CQ em comparação à SQ apresentou maior concentração de P_i -ocluso na camada de 0,05-0,1 m das posições linha e 0,25 m (Figura 4). Pode-se inferir a ocorrência de certo grau de inibição do processo de fixação do P no interior dos minerais pelo bloqueio dos

sítios de adsorção por ácidos orgânicos ou pela formação de complexos organominerais (GUPPY et al., 2005; IYAMUREMYE; DICK, 1996). Pode também ter ocorrido dessorção de P para atender a carência nutricional da planta. Araújo; Schaefer e Sampaio (2004) e Busato; Canellas e Velloso (2005) relataram a liberação do P da fração P-hidróxido para frações de maior labilidade em solos com 350 g kg⁻¹ e 200 g kg⁻¹ de argila, respectivamente. No presente estudo, essa possibilidade é de difícil aceitação devido ao elevado teor de argila (656 g kg⁻¹) do Latossolo distrófico utilizado. Houve concentração de P_i-ocluso nas amostras do sistema SQ nas camadas de 0,2-0,3 e 0,3-0,4 m da posição 0,25 m e na camada de 0,3-0,4 m da entrelinha, indicando acúmulo do P residual da adubação, tal como observou Olibone e Rosolem (2010).

Nas diversas camadas, não foi observado gradiente nítido dos teores de P_i-ocluso nas amostras de solo sob cana SQ e na posição linha da cana CQ (Tabela 5), provavelmente devido à interação dos ânions orgânicos com a superfície de adsorção dos óxidos. Amostras coletadas nas camadas de 0,2-0,3 m e de 0,3-0,4 m na posição linha da área sob cana CQ tiveram maiores valores de P_i-ocluso do que nas posições 0,25 m e entrelinha, em função da adsorção do P residual da adubação. No sistema SQ, menores valores de P_i-ocluso na camada de 0,5-0,1 m foram obtidos nas amostras coletadas na linha de plantio, os quais podem ser atribuídos aos processos de bloqueio de sítios pelos compostos orgânicos liberados na decomposição da palha.

A participação média do P_i-Ca no P total foi semelhante nas amostras de solo sob cultivo de cana CQ e SQ, ficando em torno de 7% (Figura 3), o que é esperado em solos altamente intemperizados (CROSS; SCHLESINGER, 1995). Resultado similar foi encontrado por Busato, Canellas e Velloso (2005) em amostras de solo sob cana colhida com queima. Os autores utilizaram solo com pH > 6,0 e V% > 85% e relataram até 28% do elemento na forma de P_i-Ca em amostras de solos sob sistema SQ, justificando pela ocorrência de maior teor de Ca. Diferentemente, o Latossolo utilizado no presente estudo apresentou pH < 4,3 e V% < 32% na maioria das posições e camadas, indicando a carência de cátions básicos no complexo sortivo.

Entre todas as frações inorgânicas, a fração P_i-Ca apresentou menor variação em comparação com amostras de solo sob VN (Tabela 5). Nas condições tropicais, a fração P_i-Ca é formada pela ligação do P com cálcio contido nos corretivos e nos fertilizantes e apresenta baixa estabilidade em solos ácidos (ARAÚJO, SALCEDO; SAMPAIO, 1993). Em geral, não houve diferença ($p < 0,05$) entre o teor de P_i-Ca nos solos sob colheita CQ e SQ nas posições 0,25 m e entrelinha. Apenas na camada de 0-0,05 m da linha, houve diferença ($p < 0,05$) entre os sistemas

de colheita: CQ > SQ (Figura 4), possivelmente em decorrência da acumulação de fosfatos de cálcio das cinzas da palha da cana (BALL-COELHO et al., 1993).

3.3.4 Fração ($P_i + P_o$) residual

O P residual representa o P ocluso em minerais não destruídos pela ação do ditionito-citrato-bicarbonato de sódio, retido por minerais estruturalmente livres de P, e formas estáveis de P_o (ARAÚJO, SALCEDO; SAMPAIO, 1993). A fração deteve a maior parte do P total na camada de 0-0,05 m das áreas sob cultivo de cana, com 30% no tratamento CQ e chegando a 35% no SQ (Figura 3). Nas camadas subsequentes foi a terceira fração do P total, ficando atrás das frações P_o e P_i -Fe. Busato; Canellas e Velloso (2005) utilizaram o fracionamento pelo método de Hedley; Stewart e Chauham (1982) e observaram que a fração também foi a predominante em Cambissolo cultivado com cana, chegando a 59% e 36% na área sob cana com e sem queima, respectivamente.

Não houve interação significativa entre os sistemas de colheita e as posições de coleta para todas as camadas para o P-residual (Tabela 6). Também não houve diferença ($p < 0,05$) entre os sistemas SQ e CQ na maior parte das camadas. Canellas et al. (2010) encontraram maiores teores de P-residual nas amostras de um Cambissolo eutrófico (350 g kg^{-1} de argila) no sistema SQ do que nas amostras sob CQ. No presente estudo, o maior teor de argila (656 g kg^{-1}) não favoreceu tais alterações. Apenas na camada de 0,1-0,2 m, houve diferença ($p < 0,05$) entre os sistemas (CQ > SQ), provavelmente por efeito dos 50 anos de manejo da fertilidade do solo no cultivo convencional (com queima) da cana. A ausência de modificações nessa fração por efeito da fertilização ou do cultivo foi observada também por Araújo e Salcedo (1997), Araújo; Salcedo e Sampaio (1993) e Ball-Coelho et al. (1993). Os maiores teores do P residual foram verificadas na camada superficial, com gradiente de redução mais pronunciado na posição linha em ambos os sistemas de cultivo (Tabela 7).

Tabela 6 – Teores de ($P_i + P_o$) residual nos solos sob colheita de cana sem queima (SQ), com queima (CQ) num Latossolo Vermelho distrófico em diferentes camadas de amostragem

Tratamentos	Camadas, m				
	0-0,05	0,05-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4
	----- mg kg ⁻¹ -----				
SQ	393,26	228,62	107,84	125,0	114,8
CQ	334,81	160,20	215,56	179,1	140,7
Teste F	ns	ns	**	ns	ns
CV, %	22	32	50	48	69

ns = não significativo; * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$.

Tabela 7 – Teores de ($P_i + P_o$) residual num Latossolo Vermelho distrófico sob manejo de cana com queima (CQ), sem queima (SC) e vegetação nativa (VN) em diferentes posições e camadas de amostragem

Camadas m	CQ						SQ						VN
	Linha		0,25 m		Entrelinha		Linha		0,25 m		Entrelinha		
	----- mg kg ⁻¹ -----												
0-0,05	314,3	a	344,8	a	345,3	a	446,7	a	421,0	a	312,1	a	262,6 ± 97,5
0,05-0,1	231,1	ab	145,2	b	104,2	b	270,4	b	194,1	b	221,3	ab	133,1 ± 53,6
0,1-0,2	224,7	ab	212,0	ab	209,9	b	93,0	c	115,3	c	115,3	b	360,5 ± 74,3
0,2-0,3	197,4	b	205,2	ab	134,7	b	153,0	c	104,6	c	117,3	b	211,1 ± 52,7
0,3-0,4	47,0	c	141,5	b	233,7	ab	95,7	c	146,1	bc	102,6	b	156,2 ± 175
CV, %	30		43		36		26		23		60		

Dentro de cada sistema de colheita, as médias seguidas de mesma letra na vertical não diferem (Tukey, $p \leq 0,05$). Os resultados de VN estão seguidos dos desvios-padrão.

3.4 Conclusões

As amostras de solo do sistema de colheita SQ apresentaram depleção de P na fração P orgânico total na camada de 0-0,05 m e acumulação na camada de 0,2-0,3 m, nas posições linha e 0,25 m, em comparação ao sistema CQ. Em geral, os teores de fósforo total e das frações P_i -Fe, P-residual do solo não foram alteradas em função da manutenção da palhada. Por outro lado, não foi observado comportamento sistemático das frações P_i -ocluso, P_i -Ca e P_i -Al em relação aos sistemas de colheita e às posições de coleta.

No sistema de cana colhida sem queima, não houve diferença nos teores das frações inorgânicas de P e na fração de P orgânico total entre as posições linha, 0,25 m e entrelinha na maioria das camadas em ambos sistemas de colheita.

Referências

- ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: POTAFÓS, 2004. cap. 20, p. 537-562.
- ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar – I. Intensidade e formas de acumulação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 389-396, 1993.
- ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 643-650, 1997.
- ARAÚJO, M.S.B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; SAMPAIO, E.V.S.B. Frações de fósforo após extrações sucessivas com resina e incubação, em Latossolos e Luvisolos do semi-árido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 259-268, 2004.
- ASSIS, C.P.; OLIVEIRA, T.S.; DANTAS, J.N.; MENDONÇA, E.S. Organic matter and phosphorus fractions in irrigated agroecosystems in a semi-arid region of Northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 138, p. 74-82, 2010.
- BALL-COELHO, B.; SALCEDO, I.H.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Short- and long-term phosphorus dynamics in a fertilized Ultisol under sugarcane. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 1.027-1.034, 1993.
- BECK, M.A.; SANCHEZ, P.A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1.424-1.431, 1994.
- BUEHLER, S.; OBERSON, A.; RAO, I.M.; FRIESEN, D.K.; FROSSARD, E. Sequential phosphorus extraction of a ³³P-labeled Oxisol under contrasting agricultural systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 868-877, 2002.
- BUSATO, J.G., CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X. Fósforo num Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. I – Fracionamento sequencial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 935-944, 2005.
- CANELLAS, L.P.; BUSATO, J.G.; DOBBSS, L.B.; BALDOTTO, M.A.; RUMJANEK, V.M.; OLIVARES, F.L. Soil organic matter and nutrient pools under long-term non-burning management of sugar cane. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 61, p. 375-383, 2010.
- 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 palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 935-944, 2003.

CHANG, S.C.; JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v. 84, p. 133-144, 1957.

CONDE, A.J.; PENATTI, C.P.; BELLINASO, I.F. Impacts on soil. In: HASSUANI, S.J.; LEAL, M.R.L.V.; MACEDO, I.C. **Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash**. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005. cap. 19, p. 161-166.

CONDRON, L.M.; TURNER, B.L.; CADE-MENUM, B.J. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. In: SIMS, J.T.; SHARPLEY, A.N. (Ed.). **Phosphorus: agriculture and the environment**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 2005. chap. 4, p. 87-121. (Agronomy monograph, 46).

CROSLAND, A.R.; ZHAO, F.J.; McGRATH, S.P.; LANE, P.W. Comparison of *aqua regia* digestion with sodium carbonate fusion for the determination of total phosphorus in soils by inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP). **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 26, p. 1.357-1.368, 1995.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, p. 197-214, 1995.

DALAL, R.C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 29, 83-117, 1977.

DICK, W.A. Organic carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 102-107, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solo, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa comunicação para transferência de tecnologia, 1999. 370 p.

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

FONTES, M.P.F.; ALLEONI, L.R.F. Electrochemical attributes and availability of nutrients, toxic elements, and heavy metal in tropical soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, p. 589-608, 2006.

GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; LAL, R.; BERNOUX, M.; FEIGL, B.; CERRI, C.E.P. Net Greenhouse gas fluxes in Brazilian ethanol production system. **Global Change Biology Bioenergy**, Oxford, v. 2, p. 37-44, 2010.

GEORGE, T.S.; TURNER, B.L.; GREGORY, P.J.; CADE-MENUN, B.J.; RICHARDSON, A.E. Depletion of organic phosphorus from Oxisols in relation to phosphatase activities in the rhizosphere. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 57, p. 47-57, 2006.

GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.L.; SANTOS, G.A.; FERNANDES, M.S. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, p. 291-299, 1996.

GUPPY, C.N.; MENZIES, N.W.; BLAMEY, F.P.C.; MOODY, P.W. Do decomposing organic matter residues reduce phosphorus sorption in highly weathered soils? **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 1.405-1.411, 2005.

HAVLIN, J.H.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. Phosphorus. In: _____. **Soil Fertility and Fertilizers – An introduction to nutrient management**, 7th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. chap. 5, p. 160-198.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 970-976, 1982.

HEREDIA, O.S.; CIRELLI, A.F. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. **Geoderma**, Amsterdam, v. 137, p. 426-431, 2007.

IYAMUREMYE, F.; DICK, R.P. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 56, p. 139-185. 1996.

JACKSON, M.L.. Phosphorus determinations for soil. In: _____. **Soil Chemical Analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1958. chap. 7, 134-182.

JIMÉNEZ-CÁRCELES F.J.; ÁLVAREZ-ROGEL, J. Phosphorus fractionation and distribution in salt marsh soils affected by mine wastes and eutrophicated water: A case study in SE Spain. **Geoderma**, Amsterdam, v. 144, p. 299-309, 2008.

JORGE, J.A.; VALADARES, J. Formas de fósforo em solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 28, p. 23-30, 1969.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Relações entre óxidos de ferro e a cor em solos cauliníticos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 27-31, 1983.

KOCHIAN, L.V.; HOEKENGA, O.A.; PIÑEROS, M.A. How do crop plants tolerate acid soil? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 55, p. 459-493, 2004.

KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Pt 3 - Chemical methods. Madison: SSSA, 1996. chap. 32, p. 869-919.

LOEPPERT, R.H.; INSKEEP, W.P. Iron. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Method of soil analysis**. Pt 3 - Chemical methods. Madison: SSSA, 1996. chap. 23, p. 639-644.

LUCA, E.F.; FELLER, C.; CERRI, C.C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D.C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 789-800, 2008.

MACHADO, M.I.C.S.; BRAUNER, J.L.; VIANNA, A.C.T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 331-336, 1993.

McGRATH, S.P.; CUNLIFFE, C.H. A simplified method for the extraction of metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sludges. **Journal of Science Food and Agriculture**, London, v. 36, p. 794-798, 1985.

MENDONZA, H.N.S.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B., ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 201-207, 2000.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31-36, 1962.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Pt 2 - Chemical and microbial properties. 2nd ed. Madison: ASA-SSSA, 1982. chap. 29, p. 539-579.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV,DPS, 1999. 399 p.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 8, p. 471-550.

OLIBONE, D.; ROSOLEM, C.A. Phosphate fertilization and phosphorus forms in an Oxisol under no-till. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 465-471, 2010.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; PENATTI, C.P.; PICCOLO, M.C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 2.359-2.362, 1999.

PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 149-155, 2009.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van. Fósforo no solos e interação com outros elementos. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**. Piracicaba: POTAFÓS, 2004. cap. 4, p. 107-115.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção de fósforo inorgânico de diferentes frações provocada pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 345-354, 2000.

RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G.C.; SANTOS, E.J.S. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 713-721, 1998.

SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 576-586, 2008.

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

SCHROEDER, P.D.; KOVAR, J.L. Comparison of organic and inorganic phosphorus fractions in an established buffer and adjacent production field. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 37, p. 1.219-1.232, 2006.

TIESSEN, H. Phosphorus dynamics in tropical soils. In: SIMS, J.T.; SHARPLEY, A.N. (Ed.). **Phosphorus: Agriculture and the environment**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 2005. chap. 8, p. 253-262. (Agronomy monograph, 46).

TIESSEN, H.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 38, p. 139-151, 1992.

TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 853-858, 1984.

TOKURA, A.M.; NETO, A.E.F.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C.H.; ALOVISI, A.A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1.467-1.476, 2002.

WAGAR, B.I.; STEWART, J.W.B.; MOIR, J.O. Changes with time in form and availability of residual fertilizer phosphorus on Chernozemic soil. **Canadian Journal of Soil Science**, Pinawa, v. 66, p. 105-119, 1986.

WATANABLE, F.S.; OLSEN, S.R. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO_3 extracts from soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 29, p. 677-678, 1965.

ZHANG, H.; KOVAR, J.L. Fractionation of soil phosphorus. In.: KOVAR, J.L.; PIERZYNSKI, G.M. (Ed.). **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters**. 2nd ed. Raleigh: North Carolina State University, 2009. p. 50-60.

4 FRACIONAMENTO DO FÓSFORO ORGÂNICO EM LATOSSOLO SOB CANA-DE-AÇÚCAR COLHIDA SEM QUEIMA

Resumo

Sistemas conservacionistas de manejo favorecem o acúmulo de fósforo orgânico (P_o) em solos altamente intemperizados. Com isso o P_o pode constituir importante fonte de P às culturas. Uma das formas de se estudar a dinâmica do P_o é avaliar seu fracionamento no solo por meio da técnica de extração sequencial. Avaliaram-se as alterações nas formas de P_o em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (Pradópolis – SP - Brasil) cultivado há 14 anos com cana-de-açúcar colhida sem queima. Foram coletadas amostras de solo em áreas colhidas com (CQ) e sem queima da cana (SQ), na linha e na entrelinha de plantio, e também em uma mata adjacente, nas camadas de 0-0,05 m, 0,05-0,1 m e 0,1-0,2 m. As amostras foram mantidas sob refrigeração até serem submetidas às análises. Foram avaliadas as frações P_o lábil, P_o ligado à biomassa microbiana (P_o biomassa), P_o moderadamente lábil, P_o ligado ao ácido fúlvico (P_o fúlvico), P_o ligado ao ácido húmico (P_o húmico) e P_o não lábil ou residual. Na camada de 0-0,05 m, as amostras de solo da área do sistema CQ tiveram maior teor de P_o biomassa que as do SQ, provavelmente devido à maior atividade microbiana favorecida pela disponibilidade de P inorgânico contido nas cinzas oriundas da queima da palha. As amostras de solo do sistema SQ apresentaram maiores valores de P_o moderadamente lábil na camada de 0,05-0,1 m em comparação aos da área CQ. Na profundidade de 0,1-0,2 m, as amostras de solo do tratamento SQ apresentaram maiores valores de praticamente todas as frações de P_o do que as do sistema CQ, exceto a fração P_o não lábil, na qual CQ foi maior que SQ. Não houve efeito de posição de amostragem do solo (linha e entrelinha) nos valores das frações de P_o em função dos sistemas de colheita. A distribuição percentual das frações obedeceu à seguinte ordem: P_o não lábil > P_o fúlvico > P_o húmico > P_o lábil > P_o biomassa > P_o moderadamente lábil, tanto nas amostras coletadas em áreas sob ambos os sistemas de colheita como no solo da VN. Na profundidade de 0,1-0,2 m, o solo sob sistema SQ acumulou maiores teores de P_o nas frações lábil, biomassa, moderadamente lábil, fúlvico e húmico.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar; Fracionamento de P orgânico

Abstract

Conservative tillage systems favor the accumulation of organic phosphorus (P_o) in highly weathered soils. Thus P_o may constitute an important source of P for crops. The dynamics of P_o may be assessed by means of the fractionation or sequential extraction technique. This study aimed to evaluate changes in the forms of P_o from samples of an Oxisol collected in Pradópolis, state of São Paulo, Brazil, cultivated for 14 years with sugarcane harvested without burning. Soil samples were collected in areas with sugarcane harvested with (CQ) and without burning (SQ), in the planting row and in the interrow, at 0-0.05 m, 0.05-0.1 m, and 0.1-0.2 m-layers, and in an adjacent forest (VN). Soil samples were kept under refrigeration until the analytical procedures. The following P_o fractions were evaluated: labile, biomass P_o (P_o bound to microbial biomass), moderately labile P_o , fulvic P_o (P_o bound to fulvic acid), humic P_o (P_o linked to humic acid) and residual or nonlabile P_o . Soil samples from the 0-0.05 m layer had higher contents of P_o biomass in CQ than those from SQ, probably due to the increased microbial activity favored by available

inorganic P contained in the ash of burned sugarcane. Soil samples from the SQ system had higher values of moderately labile P_o in the 0.05-0.1 m-layer than in samples from CQ. At 0.1-0.2 m-layer, values of all P_o fractions were higher in SQ than in CQ harvesting system, except for the non labile P_o fraction, in which CQ was higher than SQ. There was no effect of soil sampling position (row and interrow) in the values of P_o fractions of samples from both SQ and CQ systems. The percentage distribution of the fractions had the following order: non-labile $P_o > P_o$ fulvic $> P_o$ humic $> P_o$ labile $> P_o$ biomass $> P_o$ moderately labile, for VN, SQ and CQ systems. In the layer 0.1-0.2 m, soil samples under the non-burned crop had accumulated higher levels of P_o in the labile, biomass, moderately labile, fulvic and humic acids fractions.

Keywords: Sugarcane; Organic P fractionation

4.1 Introdução

A cultura da cana-de-açúcar se desenvolveu no Brasil principalmente sobre solos altamente intemperizados, ácidos, de baixa fertilidade natural e com altos teores de óxidos de ferro e de alumínio na fração argila. Esses solos apresentam elevada capacidade de adsorção de fósforo (FONTES; ALLEONI, 2006). Nessas condições, o solo compete com a planta pelo P adicionado via fontes minerais e atua como dreno, fazendo com que o P seja um dos nutrientes que mais limita a produtividade agrícola (NOVAIS; SMITH, 1999). A introdução do sistema de colheita de cana sem queima (SQ) tem possibilitado elevação do estoque de matéria orgânica (MO) e melhoria na fertilidade do solo (CANELLAS et al., 2010; GALDOS; CERRI; CERRI, 2009; RAZAFIMBELO et al., 2006; CANELLAS et al., 2003). Contudo, as alterações na dinâmica do P ainda não estão totalmente esclarecidas. Há relatos de elevação da disponibilidade de P num Cambissolo atribuída à colheita da cana SQ (BUSATO, CANELLAS; VELLOSO, 2005; CANELLAS et al., 2003) e num Argissolo Amarelo sob sistema de colheita de cana com queima (CQ) (MENDONZA et al., 2000).

Para entender a dinâmica de disponibilidade, o teor total de P do solo pode ser dividido em dois grandes grupos: fósforo inorgânico (P_i) e orgânico (P_o), dependendo da natureza do composto a que está ligado (HAVLIN et al., 2005; NOVAIS; SMITH, 1999). O P_o desempenha importante papel na disponibilidade do P em solos altamente intemperizados (TIESEN; STEWART; COLE, 1984). A biodisponibilidade do P no solo pode ser favorecida pela aplicação de material orgânico, preferencialmente, de baixa relação C:N e C:P, pela preservação dos estoques de matéria orgânica e pela elevação da atividade microbiana e das reações das enzimas fosfatases responsáveis pelo processo de mineralização do P_o (OBERSON; JONER, 2005).

As análises químicas de rotina usualmente utilizadas em laboratórios para fins de avaliação da fertilidade do solo não quantificam o P_o e são inadequadas para avaliar sua contribuição na nutrição fosfatada das plantas nos solos tropicais com baixos valores de P ou em sistemas que não recebem adubo fosfatado (BALL-COELHO et al., 1993; BECK; SANCHEZ, 1994).

A técnica de fracionamento ou extração sequencial permite a divisão das frações em função dos graus de estabilidade, do tipo e da força das interações físico-químicas entre as formas de P. Com isso é possível classificar tanto o P_i como o P_o em lábil, moderadamente lábil e não lábil, levando-se em conta sua disponibilidade à mineralização (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). Os solos tropicais com elevado grau de intemperismo apresentam predomínio de P_i e de P_o nas formas de baixa labilidade. A participação das formas mais lábeis de P_o no P_o total representa a fração que pode ser mineralizada pelos processos biológicos, tornando-se fonte do elemento para as plantas (CROSS; SCHLESINGER, 1995).

O conhecimento detalhado das frações do P_o auxilia no desenvolvimento de estratégias de manejo que mantenham ou aumentem a produtividade das culturas, maximizando as entradas de P ligado a esses compostos e, eventualmente, minimizando a adição de fertilizantes (SANTOS, D. et al., 2008). As técnicas de fracionamento do P_o baseadas na reação com extratores ácidos e alcalinos são simples, pouco dispendiosas e podem ser realizadas com equipamentos e reagentes disponíveis nos laboratórios de química do solo (CONDRON; TURNER; CADE-MENUM, 2005). Apesar de não caracterizar os compostos quimicamente, a técnica é de grande utilidade para estudo da mineralização, de transformações microbianas e da dinâmica do P_o nos solos (BOWMAN; COLE, 1978; IVANOFF; REDDY; ROBINSON, 1998).

A compactação do solo pela passagem de máquinas na linha de plantio promove diferenças entre a entrelinha e a linha de plantio (WOOD, 1991). A palha deixada sobre o solo proporciona um ambiente em que há maior conservação do teor de água no solo do que no sistema convencional, no qual a cana é queimada antes da colheita. No sistema sem queima a densidade de raízes é mais elevada na camada superficial (primeiros 7,5 cm) do solo do que na camada de 15 a 30 cm (BALL-COELHO et al., 1992). A adubação de cana-soca e a produção de exsudatos radiculares melhoram o grau de fertilidade do solo e a atividade microbiana na faixa adjacente à linha de plantio em comparação com a entrelinha. Essa variabilidade nas posições

linha e entrelinha pode originar diferenças nos teores das frações de P_o em resposta à mineralização-imobilização dos compostos de P_o (DALAL, 1977).

Nesse estudo, avaliaram-se as alterações nas frações de P orgânico de um Latossolo submetido ao sistema de colheita de cana sem e com queima em diferentes posições e profundidades de amostragem.

4.2 Material e Métodos

Foram utilizadas amostras de solos de um experimento instalado em 1995, por técnicos do Centro de Tecnologia Canavieira – CTC, para verificar alterações nos atributos químicos e físicos do solo após introdução do sistema de colheita de cana sem queima. A área está localizada na Usina São Martinho, município de Pradópolis, Estado de São Paulo. O Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa (EMBRAPA, 2006) apresentava as seguintes características física e mineralógicas na camada de 0,3–0,4 m: (i) granulometria pelo método do densímetro (EMBRAPA, 1979), 217, 127, 656 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente; (ii) fração argila composta de 294 g kg⁻¹ de caulinita, 196 g kg⁻¹ de gibbsita, 70 g kg⁻¹ de goethita e 59 g kg⁻¹ de hematita, estimada com base em Kämpf e Schwertmann (1983); (iii) Fe “livre” solúvel em ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) = 68 g kg⁻¹, e ferro “amorfo” ou mal cristalizado extraído com solução ácida de oxalato de amônio = 1,9 g kg⁻¹, segundo métodos descritos em Loeppert e Inskeep (1996). A precipitação média anual é em torno de 1.470 mm, com temperatura média anual de 22,9° C. No início do experimento, em 1995, a área experimental estava sob cultivo de cana-de-açúcar por 50 anos, com a queima da palha antes da colheita, após a substituição da vegetação nativa.

O delineamento experimental foi em blocos aleatorizados com seis repetições, com parcelas de 22 linhas de 50 m e área útil central de 10 linhas com 30 m, descontadas as bordaduras. A área já havia passado por dois ciclos de cultivo de cana (1995-2003 e 2003-2009). Por ocasião da renovação do canavial, o preparo do solo foi feito com grade aradora, grade niveladora, subsolagem e grade niveladora. Nos dois ciclos foram aplicadas 2 t ha⁻¹ de calcário. A adubação foi realizada apenas com fertilizantes minerais. No primeiro ciclo foram aplicados 50, 125 e 125 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, no plantio, e cerca 90, 30 e 150 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, P₂O₅ e

K₂O, na cana-soca. No segundo ciclo foram aplicados 28, 56 e 84 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, no plantio, e uma média de 104 e 110 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de de N e K₂O (informação pessoal)¹.

Foram avaliados dois tratamentos: cana colhida sem queima (SQ) e cana colhida com queima (CQ). Em janeiro de 2009, foram coletadas 20 amostras simples que deram origem a uma amostra composta por parcela. Utilizaram-se as amostras provenientes de quatro blocos, das posições linha de plantio e entrelinha, nas camadas de 0-0,05 m, 0,05-0,1 m e 0,1-0,2 m. As posições de amostragem foram definidas visando a estabelecer contraste entre áreas de alta e baixa densidade de raízes de cana. As camadas foram escolhidas por apresentarem altas concentrações de carbono orgânico total, sem interferência do efeito residual da adubação de plantio aplicada no fundo do sulco, a 30 cm de profundidade. Também utilizaram-se amostras das mesmas camadas coletadas em área adjacente sob vegetação nativa (VN) que serviram como padrão de comparação das alterações decorrentes do cultivo da cana.

As amostras compostas foram peneiradas em malha de 2 mm, sendo uma parte seca ao ar e outra submetida à análise para fins de caracterização química (Tabela 1). O pH foi obtido em solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; Ca e Mg extraídos com resina trocadores de íons (RAIJ et al., 2001) e P extraído com solução HCl 0,05 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ (Mehlich-1) (EMBRAPA, 1999). O carbono total foi obtido por combustão a seco em autoanalisador elementar (NELSON; SOMMERS, 1982), após as amostras terem sido moídas e peneiradas em malha de 0,1 mm. Outra parte das amostras foi mantida no grau de umidade de campo, acondicionada em sacos plásticos e armazenada em câmara fria, sob temperatura de 2° C, até o fracionamento do P_o.

¹ Informações sobre preparo do solo, calagem e adubação foram fornecidas por Lidiane Carine Garzon e Carlos Sardão, do Setor de Qualidade Agrícola, Usina São Martinho, Pradópolis – SP, e pelo Eng. Agr. Ivo Belinasso, do Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba , SP, Brasil.

Tabela 1 - Características químicas num Latossolo Vermelho distrófico sob manejo de cana com (CQ) e sem queima (SQ) e em área de vegetação nativa (VN)

Camadas	CQ		SQ		VN
	Linha	Entrelinha	Linha	Entrelinha	
m	----- pH CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹ -----				
0-0,05	3,9 ± 0,2*	4,1 ± 0,0	4,0 ± 0,4	4,5 ± 0,1	3,9 ± 0,2
0,05-0,1	4,0 ± 0,2	4,1 ± 0,1	3,9 ± 0,2	4,4 ± 0,1	3,8 ± 0,0
0,1-0,2	4,1 ± 0,2	4,2 ± 0,1	3,9 ± 0,2	4,2 ± 0,2	3,7 ± 0,0
	----- Carbono orgânico total, g kg ⁻¹ -----				
0-0,05	24,9 ± 1,8	21,6 ± 0,9	32,4 ± 3,1	25,6 ± 2,1	41,1 ± 1,7
0,05-0,1	21,7 ± 2,2	20,2 ± 1,2	26,8 ± 1,3	23,4 ± 1,1	32,7 ± 4,5
0,1-0,2	20,6 ± 1,4	19,0 ± 1,0	22,7 ± 1,5	19,7 ± 1,6	21,9 ± 1,6
	----- P - Mehlich 1, mg kg ⁻¹ -----				
0-0,05	8,8 ± 1,9	8,1 ± 1,0	5,4 ± 0,9	4,1 ± 0,5	5,2 ± 4,7
0,05-0,1	5,0 ± 0,3	6,8 ± 1,1	4,9 ± 0,7	4,2 ± 0,9	3,6 ± 2,5
0,1-0,2	6,3 ± 1,6	6,1 ± 0,5	5,6 ± 1,7	5,1 ± 0,8	2,2 ± 1,3
	----- Ca ²⁺ , mmol _c kg ⁻¹ -----				
0-0,05	8,1 ± 3,2	11,0 ± 1,7	25,3 ± 8,7	28,7 ± 3,9	23,8 ± 8,5
0,05-0,1	8,9 ± 5,6	9,9 ± 3,3	19,6 ± 4,4	20,8 ± 3,5	12,3 ± 1,6
0,1-0,2	11,0 ± 3,9	10,6 ± 5,7	15,2 ± 4,7	15,4 ± 5,5	5,7 ± 1,0
	----- Mg ²⁺ , mmol _c kg ⁻¹ -----				
0-0,05	2,8 ± 1,6	5,0 ± 0,8	9,0 ± 1,2	12,3 ± 1,5	12,1 ± 2,5
0,05-0,1	3,1 ± 1,3	4,5 ± 1,9	7,0 ± 1,9	9,3 ± 2,5	7,1 ± 1,4
0,1-0,2	4,5 ± 2,0	4,6 ± 1,8	5,7 ± 1,4	6,2 ± 1,3	3,6 ± 0,7

* Os resultados estão seguidos dos desvios-padrão.

O fósforo orgânico foi fracionado nos reservatórios lábil, P_o contido na biomassa, moderadamente lábil, P_o ligado ao ácido fúlvico, P_o ligado ao ácido húmico e P_o não lábil, com base nos métodos desenvolvidos por Bowman e Cole (1978), Ivanoff; Reddy e Robinson (1998), Sharpley e Smith (1985), e proposto por Zhang e Kovar (2009) (Figura 1). O roteiro analítico proposto por Zhang e Kovar (2009) foi modificado visando a extrair P_i das frações P_o ácido fúlvico e P_o não lábil, evitando superestimativa nos valores de P_o nessas frações. Assim, foi realizada uma nova extração sequencial para acrescentar a etapa de calcinação do extrato NaOH acidificado e a obtenção do P_o ácido fúlvico por diferença entre P total e P_i. O resíduo final dessa extração não foi submetido à calcinação, visando à obtenção do P_o não lábil total pela diferença entre os teores da amostra calcinada e da amostra não calcinada (KUO, 1996). Dessa forma, todos os valores de P_o das frações foram obtidos pela diferença entre P total e P_i, conforme proposto por Ivanoff; Reddy e Robinson (1998).

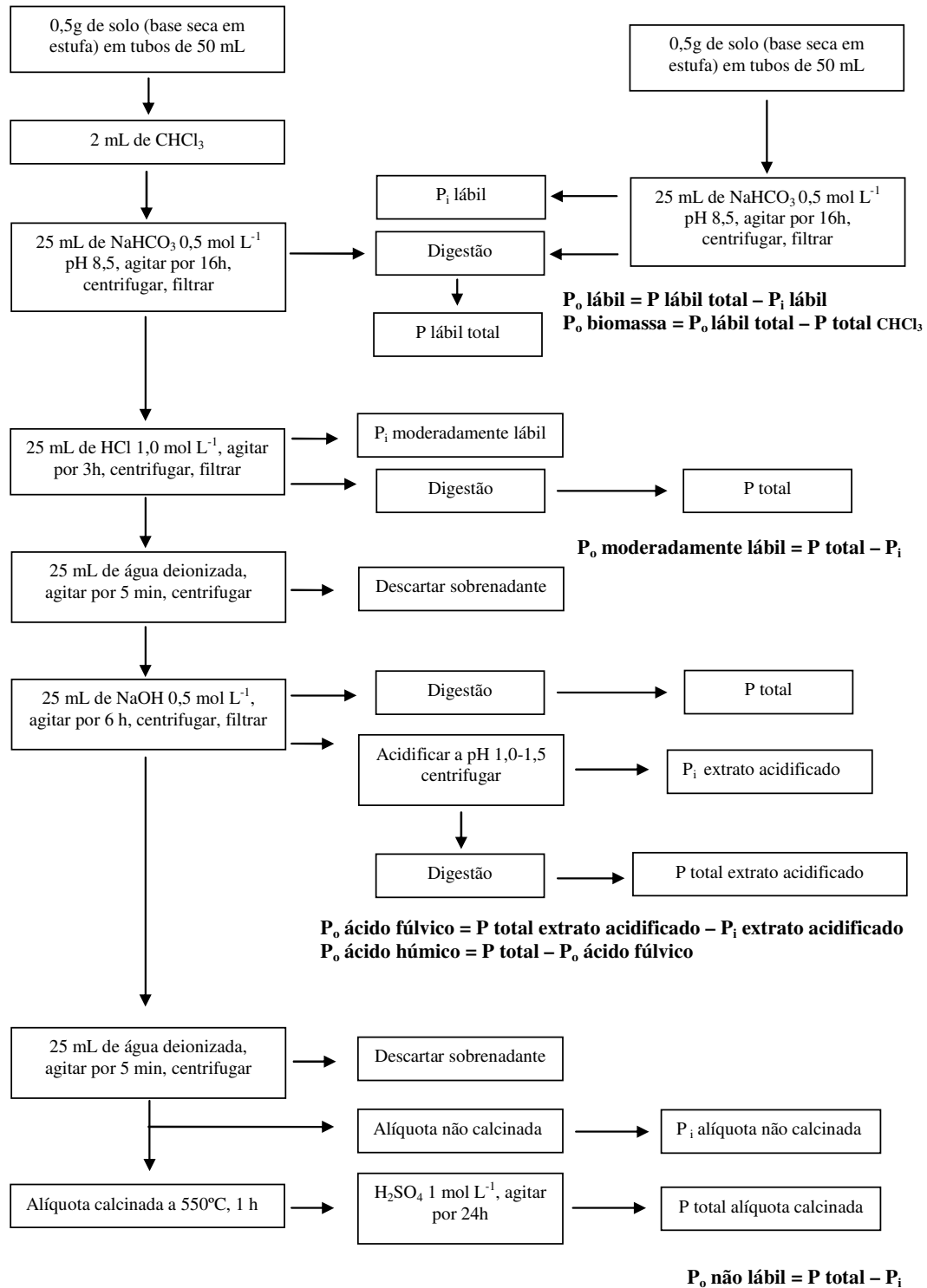


Figura 1 – Esquema do procedimento de fracionamento do P_o adaptado de Zhang e Kovar (2009).

P_i = fósforo inorgânico; P_o = fósforo orgânico

Todas as centrifugações foram realizadas a 7.000 rpm por 15 min. As filtrações foram realizadas em papel de filtro quantitativo Whatman nº 41. Para obtenção do P total, procedeu-se à digestão de uma alíquota de 5 mL do extrato com 0,5 g de persulfato de potássio ($K_2S_2O_8$) e 3 mL de H_2SO_4 1,25 mol L^{-1} em bloco digestor aquecido a 150° C por 20 min. Apenas o P total da fração não lábil foi obtido por calcinação (Figura 1). Os extratos ácidos foram neutralizados com NaOH 2 mol L^{-1} , enquanto os alcalinos foram neutralizados com HCl 2 mol L^{-1} , em presença do indicador p-nitrofenol, a fim de obter o máximo de cor azul por unidade de P presente na amostra (JACKSON, 1958). O P foi determinado colorimetricamente pelo método do fosfomolibdato de Murphy e Riley (1962), conforme roteiro analítico proposto por Watanabe e Olsen (1965).

O delineamento experimental adotado para a análise dos resultados foi em blocos aleatorizados, com parcelas subdivididas, no qual sistema de colheita foi alocado nas parcelas, enquanto a posição representou as subparcelas. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o PROC GLM do SAS (Statistical Analysis Systems), versão 9.2 (SAS, 1997), e as significâncias dos contrastes entre as médias avaliadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As camadas foram analisadas no delineamento blocos aleatorizado para cada sistema de colheita e posição. Os valores relativos à área de mata nativa foram excluídos da análise estatística, por não fazerem parte do desenho experimental.

4.3 Resultados e Discussão

Não houve interação significativa entre os sistema de colheita (CQ e SQ) e as posições (linha e entrelinha) e não foram identificadas diferenças em 16 das 18 interações testadas (Anexos). Desta forma, os resultados das médias do tratamento sistema de colheita, em cada profundidade, foram relatados e discutidos independentemente da posição de amostragem.

Há escassez de trabalhos relacionados ao fracionamento de P_o utilizando o método proposto por Zhang e Kovar (2009) para solos tropicais. As pesquisas sobre alterações no comportamento do P_o em diferentes condições de manejo de solo se baseiam, em sua maioria, no esquema de extração sequencial proposto por Hedley; Stewart e Chauhan (1982). Com este método, não é possível obter o teor de P_o moderadamente lábil e de P_o ligado às frações ácido húmico e ácido fúlvico das substâncias húmicas, como proposto no método utilizado no presente estudo. Assim, as discussões foram desenvolvidas, na medida do possível, estabelecendo comparações entre os resultados obtidos por ambos os métodos.

4.3.1 Frações de P_o

4.3.1.1 P_o lábil

Os teores de P_o lábil nas amostras das áreas sob cultivo de cana foram equivalentes aos da área sob VN nas amostras provenientes das duas camadas superficiais (Tabela 2). O revolvimento do solo, a calagem, a deposição de cinzas e a decomposição da palha nos cultivo da cana estimulam a atividade microbiana e favorecem o acúmulo do P_o adsorvido na superfície dos colóides minerais (SHARPLEY; SMITH, 1985). Na camada de 0,1-0,2 m, o teor P_o lábil nas amostras de solo sob VN foi menor do que nas amostras coletadas nas áreas de cana SQ e CQ (Tabela 2). Isso seguiu a distribuição dos teores de carbono orgânico (Tabela 1), conforme já observado por Stevenson (1995).

Tabela 2 – Frações do fósforo orgânico (P_o) num Latossolo Vermelho distrófico em função do sistema de colheita em diferentes camadas

Tratamento	P _o lábil	P _o biomassa	P _o mod. lábil	P _o fúlvico	P _o húmico	P _o não lábil
----- mg kg ⁻¹ -----						
----- 0-0,05 m -----						
VN	22,0 ± 1,8	6,1 ± 0,8	6,0 ± 2,2	108,0 ± 10,2	55,2 ± 9,1	190,0 ± 6,7
Colheita						
SQ	23,1 a	6,3 b	2,7 a	119,2 a	56,1 a	107,7 b
CQ	22,0 a	8,5 ab	4,9 a	107,5 a	51,5 b	112,4 c
Teste F	ns	*	*	ns	ns	ns
CV, %	11	28	22	4	10	9
----- 0,05-0,1 m -----						
VN	20,3 ± 1,3	14,3 ± 4,1	5,2 ± 0,8	108,7 ± 8,4	70,0 ± 7,2	154,7 ± 4,2
Colheita						
SQ	18,4 b	9,9 ab	3,8 a	106,3 a	51,4 a	147,4 a
CQ	21,5 a	11,1 a	1,0 b	94,4 b	71,9 a	169,1 b
Teste F	ns	ns	**	ns	*	ns
CV, %	6	30	19	10	23	13
----- 0,1-0,2 m -----						
VN	12,1 ± 0,4	3,6 ± 0,9	1,1 ± 0,4	84,9 ± 17,5	35,1 ± 1,4	269,8 ± 16,3
Colheita						
SQ	21,4 ab	13,9 a	4,6 a	116,7 a	64,0 a	127,1 ab
CQ	16,1 a	4,7 b	1,3 b	100,2 ab	48,4 b	200,6 a
Teste F	*	**	**	ns	ns	*
CV, %	16	21	13	9	14	6

VN: vegetação nativa; SQ: sem queima; CQ: com queima. ** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; ns: não significativo. Os resultados de VN estão seguidos dos desvios-padrão. Dentro de cada sistema de colheita, médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical não diferem (Tukey, $p < 0,05$).

Não houve diferença entre os teores de P_o lábil nas amostras de solo sob ambos os sistemas (SQ e CQ) nas duas camadas superficiais (Tabela 2), indicando que a depleção e a

acumulação do P se equivaleram. No solo sob cana SQ, houve grande densidade de raízes na camada de decomposição da palha como resultado das condições de conservação de água na camada superficial do solo (BALL-COELHO et al., 1993). Nessas condições, há elevada extração de P inorgânico nas camadas superiores e depleção da fração lábil, que atua como fonte de P_o para que ocorra mineralização (LINQUIST; SINGLETON; CASSMAN, 1997). Além disso, a elevada relação C:P da palha da cana não é favorável à mineralização do P e ao acúmulo do P_o . No sistema CQ, ocorrem adições de P_i proveniente das cinzas, que elevam o teor do P_o lábil, o qual supre parte das necessidades das plantas (BECK; SANCHES, 1994). Adicionalmente, há elevação do teor de P_o porque a parte não completamente calcinada da palha ainda possui relação C:P favorável aos processos de mineralização (BALL-COELHO et al., 1993).

Na camada de 0,1–0,2 m, os valores de P_o lábil encontrados no solo sob cana SQ foram superiores ($p < 0,05$) aos das amostras do sistema CQ (Tabela 2). Tal comportamento se deve ao bloqueio dos sítios de adsorção do P pelos ânions orgânicos liberados nos exsudatos radiculares e nos produtos de decomposição das raízes (IYAMUREMYE; DICK, 1996). Com isso há condições favoráveis para aumento da disponibilidade de P_o . Olibone e Rosolem (2010) também verificaram elevação nos teores de P_o na camada de 0,1-0,2 m em Latossolo cultivado com soja no sistema plantio direto.

A fração P_o lábil é constituída de compostos orgânicos adsorvidos aos colóides minerais e orgânicos em equilíbrio com a solução do solo. Esta forma se mantém em níveis razoavelmente constantes, a salvo em situações de carência, quando atuam como fonte do nutriente para a microbiota e plantas, diminuindo o estoque da fração, ou em situações de manejo conservacionista do solo, quando o P_o passa a ser acumulado. (CAMARGO et al., 2008; CROSS; SCHLESINGER, 1995; SHARPLEY; SMITH, 1985).

4.3.1.2 P_o na biomassa microbiana (P_o biomassa)

Os teores de P_o biomassa das amostras de solo do sistema CQ foram maiores do que as do SQ na camada de 0-0,05 m (Tabela 2). O balanço de entradas e saídas de P_i , provavelmente, foi favorável à elevação da atividade microbiana e do P_o biomassa, visto que a absorção de P pelos microrganismos é favorecida pela disponibilidade de P_i na solução do solo (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982). A correlação positiva entre teor de P disponível e teor de P_o

biomassa foi verificada mesmo em solos argilosos, o que realça a eficiência dos microrganismos na competição com os colóides inorgânicos do solo pelo P_i (LUKITO; KOUNO; ANDO, 1998). Por outro lado, o solo sob sistema SQ apresentou baixa disponibilidade de P em função do intenso processo de depleção de P, ocasionado pela alta densidade de raízes abaixo da palhada (BALL-COELHO et al., 1993). No presente estudo, não houve entradas de P_i na adubação de cana-soca no sistema SQ, e a mineralização da palha não foi capaz de liberar P_i , em curto prazo, devido à elevada relação C:P da palha, como destacam OLIVEIRA et al. (1999). Desta forma, o teor de P_o biomassa não acompanhou o teor de carbono orgânico no solo (Tabela 1).

Na camada de 0,1-0,2 m, o solo sob sistema SQ apresentou maior teor de P_o biomassa que o do sistema CQ (Tabela 2). Nesse caso, os compostos orgânicos liberados pela decomposição da palha e das raízes e os exsudatos radiculares competem com sítios de adsorção do P e elevam a disponibilidade do elemento para acumulação nas frações de P_o lábeis. Olibone e Rosolem (2010) verificaram que esse mecanismo foi responsável pela elevação nos teores de P_o na camada de 0,1-0,2 m, após cultivo de soja em Latossolo sob plantio direto.

Valores de P_o nas amostras de solo coletadas na camada de 0-0,05 m em área do sistema CQ e na camada de 0,1-0,2 m do sistema SQ foram maiores que os da VN (Tabela 2). Este resultado contraria a concepção de que o P microbiano nas camadas superficiais do solo é maior na floresta do que nas áreas de cultivo (OBERSON; JONER, 2005). Em solos tropicais altamente intemperizados, o manejo correto da fertilidade do solo promove condições mais favoráveis para formação do P_o (BECK; SANCHEZ, 1994; BUEHLER et al., 2002) do que sob condições naturais de baixa fertilidade.

4.3.1.3 P_o moderadamente lábil

Na camada superficial (0-0,05 m), as amostras de solo sob colheita CQ tiveram maiores teores de P_o moderadamente lábil do que as sob SQ (Tabela 2). Esse efeito pode ser justificado pelo acúmulo de cinzas contendo fosfatos de cálcio na sua composição (BALL-COELHO et al., 1993). Desta forma, a cinza é fonte de P_i , que estimula a atividade microbiana e a formação de complexos P_o -Ca. Nas camadas subsequentes, a relação se inverteu, e os teores de P_o moderadamente lábil no SQ foram superiores aos encontrados no tratamento CQ, indicando condições propícias para elevação da atividade microbiana, pelos mesmos mecanismos discutidos para P_o lábil e P_o biomassa.

O P_o moderadamente lábil é composto por complexos P_o ligados a Ca e a Mg com baixa estabilidade e elevada solubilidade em meios ácidos. Nessas condições, são estabelecidas ligações mais estáveis entre P_o com Fe e com Al, formando compostos mais resistentes à mineralização do que o P_o moderadamente lábil (CELI; BARBERIS, 2005). Por essa razão, os valores de P extraído com HCl são baixos em solos intemperizados, ácidos e com baixos teores de Ca e de Mg (BALL-COELHO et al., 1993). Apesar de ser uma fração de pouca expressão no somatório das frações de P_o dos solos, observa-se sua estreita correlação com teores trocáveis de Ca e de Mg no solo (Tabela 1).

Em geral, as áreas sob cultivo de cana-de-açúcar tenderam a apresentar menores teores de P_o moderadamente lábil do que os observados na VN nas duas camadas superficiais (Tabela 2). Na profundidade de 0,1–0,2 m, os teores de P_o moderadamente lábil das amostras de solo sob sistema de colheita SQ foram maiores do que sob a VN, provavelmente devido às altas quantidades de Ca e de Mg (Tabela 1). Por outro lado, os teores no solos sob CQ foram próximos aos registrados no solo sob VN.

4.3.1.4 P_o ligado a ácido fúlvico (P_o fúlvico)

No fracionamento proposto por Hedley; Stewart e Chauhan (1982), o P_o fúlvico é obtido juntamente com o P_o húmico na fração extraída com NaOH 0,1 mol L⁻¹, convencionalmente chamada fração P_o – hidróxido. A separação das frações, pelo método utilizado no presente estudo, permite uma avaliação mais detalhada da dinâmica do P_o em resposta aos sistemas de manejo de solo, visto que a fração P_o fúlvico é mais lábil e biodisponível que o P_o húmico (SCHROEDER; KOVAR, 2006).

Após 14 anos de implantação do experimento, não houve diferença ($p < 0,05$) entre os teores de P_o – fúlvico nas amostras das três camadas estudadas, independentemente do sistema de colheita - SQ e CQ (Tabela 2). Provavelmente, o tempo de estabelecimento do sistema SQ (14 anos) não tenha sido suficiente para que a decomposição da palha promovesse aumento na formação dessa substância húmica. Os resultados corroboram Pavinato; Merlin e Rosolem (2009), que também não encontraram diferença na quantidade de P_o -hidróxido (P_o fúlvico + húmico) em Latossolo Vermelho, com cerca de 600 mg kg⁻¹ de argila, cultivado havia 13 anos no sistema plantio direto em comparação ao cultivo convencional, em amostras coletadas até 0,4 m de profundidade.

Amostras de solo coletadas em área sob cultivo (SQ e CQ) apresentaram valores de P_o – fúlvico similares aos encontrados na VN, em todas as camadas de ambos os sistemas de colheita (Tabela 2). Isso indica que a aplicação de calcário e de fertilizantes, além da exportação de P pela cultura ao longo dos anos, não tiveram efeito no compartimento P_o fúlvico. O teor dessa fração não apresenta variação em solos com elevado teor de argila, como o utilizado no presente estudo, mesmo com aplicação de fontes minerais de P_i (CONTE; ANGHINONI; RHEINHEIMER, 2003). Por outro lado, Araújo; Salcedo e Sampaio (1993) encontraram teores de P_o hidróxido (fúlvico + húmico) maiores nas áreas de cana-de-açúcar do que na sob VN em condições de solo arenoso, com adubações fosfatadas anuais.

4.3.1.5 P_o ligado a ácido húmico (P_o húmico)

Amostras de solo coletadas na área sob sistema de colheita CQ não diferiram das amostras sob sistema SQ quanto ao teor de P_o húmico nas camadas de 0-0,05 e de 0,1-0,2 m. Pode ser que o tempo do experimento (14 anos) não tenha sido suficiente para promover alterações no teor dessa fração. Por outro lado, na camada de 0,05-0,1 m, os teores de P_o húmico nas amostras da área sob CQ foram maiores do que os das amostras de solo sob sistema SQ. Essa diferença indica que, no sistema de cana sem queima, o ácido húmico está sendo fonte de P para a solução, compensando a necessidade de P_i da planta e da biomassa microbiana. Em solos de baixa fertilidade da região tropical úmida, os ácidos húmicos constituem reserva importante de P_o prontamente disponível (CROSS; SCHLESINGER, 1995; BUSATO et al., 2005). Os maiores valores de P_o húmico nas amostras de solo do sistema CQ indicam que as entradas de P_i via cinzas das queimas, provavelmente, supriram parte das necessidades da cultura, como já relatado por Ball-Coelho et al. (1993), reduzindo assim a depleção da fração P_o ácido húmico.

Amostras de solo das áreas cultivadas em ambos os sistemas de colheita apresentaram os mesmos teores de P_o húmico daqueles da área sob VN na camada de 0-0,05 m. Na camada de 0,05-0,1 m, o solo sob sistema SQ apresentou valores menores de P_o húmico que os da VN, provavelmente em função da mineralização de P_o para suprir as necessidades da cultura e dos microrganismos. Na camada de 0,1-0,2 m, os valores da área de VN foram menores que os encontrados nas áreas de cultivo de cana. Isso reflete as limitações no grau de fertilidade do solo sob VN, no qual as entradas de P ocorrem apenas pela reciclagem da MO depositada na superfície.

4.3.1.6 P_o não lábil

A fração P_o não lábil é constituída de complexos de alta estabilidade formados entre fosfatos monoésteres fixados a minerais de Fe e de Al, em solos intemperizados, e a minerais de Ca, em solos neutros ou calcáreos. Em ambas as situações, evoluem para a formação de complexos organominerais (CELI; BARBERIS, 2005).

Os teores de P não lábil foram menores nas amostras de solo das áreas sob cultivo de cana-de-açúcar do que nas amostras da área sob VN. A exceção ocorreu na camada de 0,05–0,1 m, onde os valores foram semelhantes aos encontrados na área de referência (Tabela 2). Isso sugere que, apesar de ser um reservatório de espécies de P_o com alta estabilidade, a fração P_o não lábil agiu como “fonte” de P ao longo dos anos, após substituição da vegetação nativa pelo canavial. Após esgotamento do P do solo por cultivos sucessivos, todas as frações de P_o podem atuar como tamponantes e disponibilizar formas solúveis de fósforo (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

Não houve diferença ($p < 0,05$) entre os teores de P_o não lábil das amostras de solo de ambos os sistemas (SQ e CQ) nas duas camadas mais superficiais (0-0,05 e 0,05-0,1 m). Na profundidade de 0,1–0,2 m, as amostras de solo sob sistema SQ tiveram menores teores do que no sistema CQ, indicando a liberação do P_o da forma não lábil para formas mais disponíveis (TOKURA et al., 2002). Na mesma profundidade, houve elevadas quantidades de P_o lábil, P_o biomassa e moderadamente lábil nas amostras de solo coletadas no sistema de cana sem queima (Tabela 3). Segundo Lehmann et al. (2001), os manejos de solo que estimulam a atividade microbiana e a reciclagem de P podem reduzir a formação de P_o ocluso nos agregados do solo (P_o não lábil).

4.3.2 Distribuição das frações de P_o nas camadas do solo

A distribuição das formas de P_o em profundidade diferiu entre os sistemas de colheita e as frações analisadas. Em geral, os teores de P_o lábil, P_o biomassa e P_o moderadamente lábil das amostras de solo CQ foram maiores na camada de 0-0,05 m do que nas camadas subsequentes, apresentando gradiente decrescente em profundidade (Tabela 2). Nesse caso, provavelmente, a atividade microbiana foi favorecida pela entrada de P_i contido nas cinzas e pelo material orgânico não totalmente calcinado com relação C:P = 200 (Ball-Coelho et al., 1992), o que gerou condições propícias para a mineralização.

No sistema SQ, os teores de P_o lábil e P_o moderadamente lábil não variaram em profundidade em função da maior mobilidade do P_o em comparação ao P_i (DALAL, 1977). Além disso, a decomposição e a mineralização de raízes favorece a maior disponibilidade de P_i na camada de 0,1-0,2 m do que na camada superficial (0-0,1 m) (OLIBONE e ROSOLEM, 2010). Por outro lado, os valores de P_o biomassa aumentaram nas camadas mais profundas do perfil, provavelmente devido à depleção de P_i na camada de 0-0,05 m, provocada pela elevada densidade de raízes (BALL-COELHO et al., 1992) e pelo predomínio do processo de imobilização do P, em função da elevada relação C:P da palha.

Em geral, os valores de fósforo das frações P_o fúlvico, húmico e não lábil não variaram de forma acentuada ao longo do perfil do solo sob os sistemas SQ e CQ (Tabela 2). Possivelmente, esse comportamento foi decorrente da distribuição uniforme da fração argila no Latossolo utilizado no presente estudo, o que permitiu a formação de complexos argilo-orgânicos de grande estabilidade (ZINN; LAL; RESK, 2005) ao longo das camadas analisadas. No caso do P_o fúlvico, esse comportamento foi decorrente da elevada densidade de grupos carboxílicos e elevadas solubilidade e polaridade que conferem aos ácidos fúlvicos maior mobilidade no solo em relação aos ácidos húmicos (SILVA; MENDONÇA, 2007). A exceção foi a fração P_o não lábil na área CQ, que apresentou gradiente crescente em profundidade. Isso pode refletir a redução do teor de carbono orgânico em profundidade (Tabela 1) e o bloqueio dos sítios de adsorção pelos compostos orgânicos (IYAMUREMYE; DICK, 1996).

4.3.3 Distribuição percentual das frações de P_o em relação ao somatório das frações P_o

Em ambos os sistemas de colheita e na área de vegetação nativa, a distribuição percentual das frações de P_o seguiu a ordem: P_o não lábil > P_o fúlvico > P_o húmico > P_o lábil > P_o biomassa > P_o moderadamente lábil (Figura 2). O gradiente seguiu a ordem da resistência dos compostos à mineralização, com predomínio das formas bem estabilizadas física e quimicamente, que são características dos solos altamente intemperizados (CROSS; SCHLESINGER, 1995; TIESSEN; MOIR, 1993; TIESSEN; STEWART; COLE, 1984).

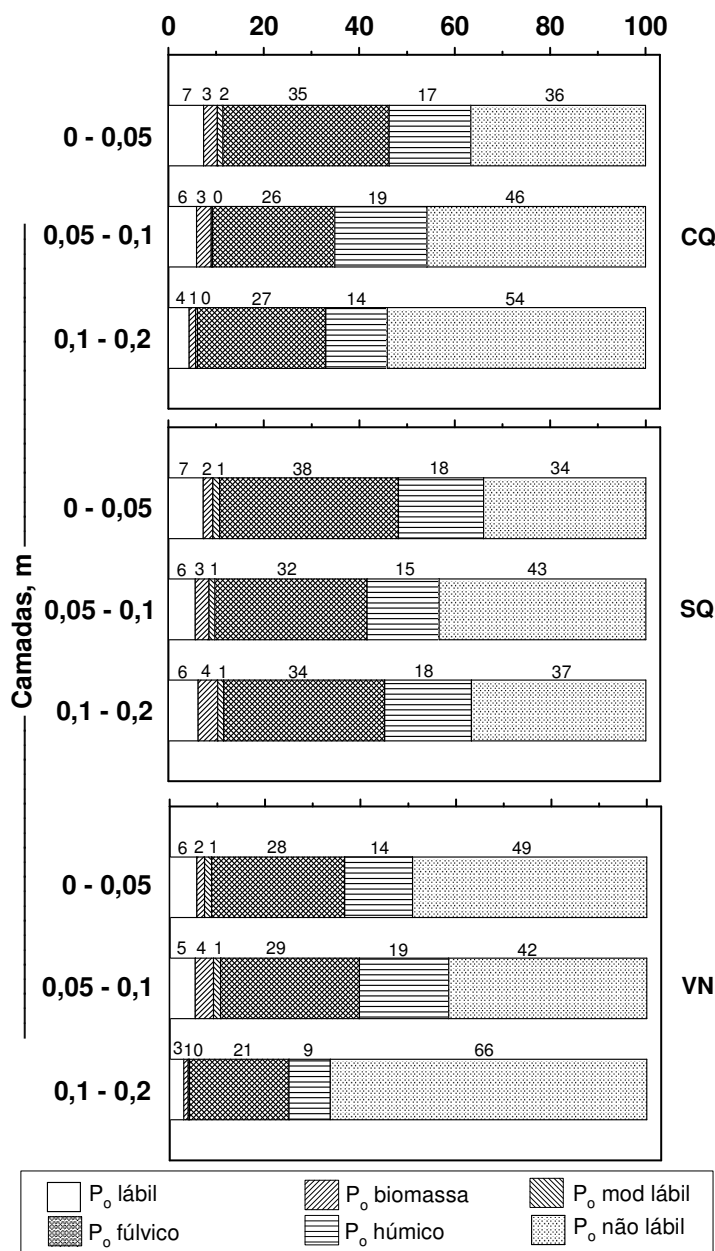


Figura 2 - Distribuição percentual das frações P orgânico (P_o) num Latossolo Vermelho distrófico sob sistema de colheita de cana-de-açúcar com (CQ) e sem queima (SQ) e em área sob vegetação nativa (VN)

Nas condições tropicais úmidas, o predomínio da fração P_o - hidróxido ($P_{o\text{-hid}} = \text{fúlvico} + \text{húmico}$) sobre a P_o -bicarbonato ($P_{o\text{-bic}} = P_o \text{ lábil}$) pode ser verificada na extração sequencial pelo método de Hedley; Stewart e Chauhan (1982). Santos, J. et al. (2008) encontraram $P_{o\text{-hid}} > P_{o\text{-bic}}$ na camada de 0-0,2 m de um Argissolo amarelo (540 mg kg^{-1} de argila) cultivado com milho e submetido à adubação com diferentes fontes de P_i . Resultados similares foram obtidos por

Araújo; Salcedo e Sampaio (1993) em Argissolo amarelo (35 e 50 g kg⁻¹ de argila nas camadas de 0-0,05 e 15-40 m, respectivamente) submetido ao cultivo de cana CQ por 25 anos.

A fração P_o não lábil foi predominante nas áreas cultivadas SQ e CQ e na VN, como é esperado em solos altamente intemperizados (CROSS; SCHLESINGER, 1995). A lixiviação de cátions básicos e a elevação das atividades de Fe e de Al que acompanham a evolução do grau de intemperismo dos solo influenciam a estabilização da matéria orgânica e do P_o associado (TIESSEN; STEWART; COLE, 1984). A participação percentual P_o não lábil no somatório das frações variou de 66% na camada mais profunda (0,01-0,2 m) da área sob VN até o mínimo de 34% na camada mais superficial (0-0,05m) do solo sob SQ. Os maiores percentuais encontrados na camada de 0,1-0,2 m do solo da VN em comparação com as áreas sob cultivo refletem a redução no teor de MO (TIESSEN; SALCEDO; SAMPAIO, 1992) e a presença de P associado a complexos organometálicos estáveis (CELI; BARBERIS, 2005). Por outro lado, a menor participação do P_o não lábil nas camadas de 0-0,05 e 0,1-0,2 m das áreas sob cultivo em relação à VN pode ser indício da destruição dos complexos organometálicos por ácidos orgânicos presentes nos exsudatos radiculares (PICCOLO, 2001). A liberação do P_o das substâncias húmicas resulta na formação de compostos relativamente menores que podem se tornar mais disponíveis para as plantas e para os microrganismos (CANELLAS et al., 2010).

A fração P_o fúlvico foi a única exceção na ordem de distribuição das frações orgânicas. Na camada superficial do solo sob cana SQ, a fração atingiu até 38% do P_o total, passando a ser a fração predominante (Tabela 3). Essa mudança de comportamento, provavelmente, reflete a depleção de P na forma mais resistente (P_o não lábil) para uma fração de labilidade moderada, como é a fração P_o fúlvico (SCHROEDER; KOVAR, 2006). A variação pode ser consequência da intensa absorção promovida pelo denso sistema radicular, num ambiente com baixas concentrações do elemento. A adsorção de ânions fosfatados orgânicos se dá por meio de pontes de cátions como Al e Fe com as cargas negativas das substâncias húmicas. A reação é favorecida pela maior densidade de cargas no ácido fúlvico do que no ácido húmico. (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007; SILVA; MENDONÇA, 2007). Por isso, a concentração de P_o ligado às substâncias húmicas segue a ordem ácido fúlvico > ácido húmico (DALAL, 1977).

A fração P_o húmico foi o terceiro reservatório nas amostras de solos em todos os sistemas e camadas (Figura 2), com percentual máximo de 19% na área de VN, 19% no solo SQ e 19% no CQ. Os menores percentuais obtidos na área sob VN nas camadas de 0-0,05 e 0,1-0,2 m indicam

que o manejo da fertilidade do solo favoreceu o acúmulo de P_o . O P_o húmico é considerado um reservatório não lábil e age como dreno de P no solo (SCHROEDER; KOVAR, 2006). O percentual da fração P_o húmico foi maior nas amostras de solo da área CQ do que da área SQ na camada de 0,05-0,1 m. Na camada subsequente, os percentuais foram maiores na área SQ (Tabela 3).

Tabela 3 – Frações do fósforo orgânico (P_o), em termos relativos (Fração P_o /soma P_o), num Latossolo Vermelho distrófico em função do sistema de colheita com queima (CQ) e sem queima (SQ) e na área de vegetação nativa (VN)

Tratamento	P_o lábil	P_o biomassa	P_o moder. lábil	P_o fúlvico	P_o húmico	P_o não lábil
----- % -----						
----- 0-0,05 m -----						
VN	6 ± 1	2 ± 0	1 ± 0,5	28 ± 2	14 ± 2	49 ± 1
Colheita						
SQ	7	2	1	38	18	34
CQ	7	3	2	35	17	36
Teste F	ns	ns	*	ns	ns	ns
CV, %	9	28	18	5	9	6
----- 0,05-0,1 m -----						
VN	5 ± 0	4 ± 1	1 ± 0	29 ± 2	19 ± 1	41 ± 2
Colheita						
SQ	6	3	1	32	15	43
CQ	6	3	0	26	19	46
Teste F	ns	ns	**	*	*	ns
CV, %	14	24	17	9	13	7
----- 0,1-0,2 m -----						
VN	3 ± 0	1 ± 0	0 ± 0	21 ± 4	9 ± 1	66 ± 3
Colheita						
SQ	6	4	1	34	18	37
CQ	4	1	0	27	14	54
Teste F	*	**	**	**	**	**
CV, %	17	25	7	12	15	3

** $p < 0.01$; * $p < 0.05$; ns: não significativo. Os resultados de vegetação nativa (VN) estão seguidos dos desvios-padrão.

As frações de menor labilidade (P_o não lábil, húmico e fúlvico) foram responsáveis por cerca de 90% do armazenamento de P_o (Tabela 3). Essas formas compreendem compostos orgânicos de cadeia longa e com grande número de grupamentos fosfatados. Entre elas destaca-se o fosfato de inositol, que forma ligações covalentes de alta energia com óxidos de Fe e de Al (CELI; BARBERIS, 2005). Conte; Anghinoni e Rheinheimer (2003) relatam que as formas de P_o hidróxido (fúlvico e húmico) predominaram em amostras coletadas na camada de 0-0,1m de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistema plantio direto, o que evidencia a importância delas como fonte de P para as plantas em solos altamente intemperizados ou em sistemas com baixas

adições de fertilizantes. Araújo e Salcedo (1997) encontraram valores de P_o hidróxido superiores aos de P_o bicarbonato (P_o lábil) em 11 áreas de cultivo de cana no Estado de Pernambuco, em solos com teores de argila entre 81 a 676 g kg⁻¹. A fração P_o bicarbonato oscilou positivamente em função da aplicação de adubação mineral, enquanto os valores do P_o lábil permaneceram inalterados.

Apenas 10% de P_o total esteve distribuído entre as formas lábil, biomassa e moderadamente lábil. Essa reduzida participação corrobora observações de Bowman e Cole (1978) que encontraram menos de 10% de P_o na forma lábil em cinco solos americanos (300 a 600 g kg⁻¹ de argila) sob vegetação de pradaria. Pavan e Chaves (1996) estudaram formas de P em amostras de várias camadas (0-0,05; 0,05-0,1 e 0,1-0,2m) de num Latossolo (800 g kg⁻¹ de argila) cultivado com cafeeiro em diferentes densidades de plantio. Os autores concluíram que o acúmulo de MO pela introdução de sistema de cultivo conservacionista não reverteu em alta participação das formas P_o lábil e P_o biomassa, que chegou a 11% da soma de P_o .

A fração P_o lábil representou apenas 3% na camada de 0,1-0,2 m da área sob VN e chegou a 7% na camada superficial do solo sob cana CQ (Tabela 3). Esse reduzido percentual é esperado em solos sob clima tropical úmido, com baixo pH e elevados teores de óxidos de Fe e de Al. Nesse ambiente, a adsorção de P é elevada, e sua disponibilidade é largamente controlada pela mineralização do P_o .

O teor de P_o contido nas células dos microrganismos do solo (P_o biomassa) variou de 1% a 4% da soma das frações nas amostras de solo da VN e nas áreas cultivadas (SQ e CQ). Em termos gerais, esses resultados se enquadram na média de 2% a 5% esperada para solos cultivados, visto que a fração P_o biomassa é mais disponível às plantas do que qualquer outra fração orgânica (STEVENSON, 1994). A fração foi a penúltima em ordem de grandeza em relação às demais formas de P_o . A fração P_o moderadamente lábil foi a menos representativa, com mínimo de 0,3% e máximo de 1,5% distribuído nos dois sistemas de colheita e na VN (Tabela 3). Segundo Ivanoff; Reddy e Robinson (1998), a participação desta fração indica que a formação de complexos P_o Ca e Mg não é decisiva na formação de P_o devido à elevada acidez e aos baixos níveis dessas bases trocáveis nos solos, como é o caso dos valores dos elementos nos solos deste experimento (Tabela 1).

Na camada superficial (0-0,1 m), não houve diferença ($p < 0,05$) na maioria das frações de P_o entre os sistemas de colheita SQ e CQ (Tabela 3). A exceção foi a fração moderadamente lábil

cuja participação nas amostras do Latossolo coletadas nas áreas sob o sistema CQ foi mais expressiva do que nas amostras sob sistema SQ. Isso deveu-se, provavelmente, à presença do fosfato de cálcio contido nas cinzas depositadas na superfície após as queimadas (BALL-COELHO et al., 1993). Essa diferença não causa grande impacto na disponibilidade de P_o dada a pequena participação da fração (1 a 2%) no reservatório de P_o do solo. O resultado contraria a concepção geral de que a acumulação de MO facilita a extração das frações de P_o (TIESEN; STEWART; COLE, 1984). Isso pode ser justificado pela relativa equivalência no balanço de depleção e acumulação de P nas camadas superficiais dos sistemas SQ e CQ, conforme discutido anteriormente.

Na camada de 0,05-0,1 m, verificou-se aumento no teor de P_o moderadamente lábil e de P_o fúlvico nas amostras de solo do sistema de colheita sem queima (33% do P_o total), em relação aos teores encontrados no sistema de cana queimada ($p < 0,05$). Por outro lado, o valor de P_o húmico nas amostras de solo SQ foi inferior ao encontrado na cana CQ, indicando processo de mineralização de P_o . É de se esperar que o reservatório P_o húmico tenha sido fonte de P para as frações mais lábeis (P_o fúlvico e moderadamente lábil). De acordo com Sharpley e Smith (1985), a baixa disponibilidade de P no solo é compensada pela mineralização de estoques de formas resistentes de P_o . Os teores de P_o lábil e biomassa não diferiram na camada de 0,05-0,1 m, provavelmente devido à intensa absorção de P_i pelas raízes da cana, independentemente do sistema de colheita.

Na camada de 0,1-0,2 m, as amostras de solo das áreas sob sistema de colheita SQ continham maiores teores de P_o lábil, biomassa, moderadamente lábil, fúlvico e húmico do que as do solo sob cana CQ. Essas frações representaram 63% do P_o total. Nessa camada subsuperficial houve no sistema SQ maior mineralização do P da fração P_o não lábil, que foi fonte de P_o para as outras frações, do que no sistema CQ (Tabela 3). A movimentação do P_o da forma não lábil para as formas mais lábeis no sistema de colheita de cana SQ pode ser devida à maior disponibilidade de exsudatos radiculares (produtos de decomposição das raízes e nutrientes) em comparação ao sistema CQ, o que estimulou a atividade microbiana (BECK e SANCHEZ, 1994). Com isso, no sistema SQ, ocorreu acúmulo de P_o nas frações lábeis e moderadamente lábeis que atuam como fonte para mineralização microbiana e elevam a disponibilidade de P para as plantas (REDDY; RAO; SINGH, 2005; SELLES et al., 1997; TOKURA et al., 2002).

4.4 Conclusões

- Os solos sob os sistemas de colheita de cana com e sem queima e sob vegetação nativa apresentaram gradiente nas formas de P_o que seguiu a ordem de resistência dos compostos à mineralização, característica dos solos da região tropical úmida: P_o não lábil > P_o fúlvico > P_o húmico > P_o lábil > P_o biomassa > P_o moderadamente lábil.
- Na profundidade de 0,1-0,2 m, o solo sob sistema de colheita sem queima acumulou maiores teores de fósforo orgânico do que o solo sob sistema de colheita de cana queimada. A variação se deu nas frações lábil, biomassa, moderadamente lábil, fúlvico e húmico, que representaram 63% do P_o total e podem atuar como fonte de P para mineralização pela microbiota.

Referências

- ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, I.H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 643-650, 1997.
- ARAÚJO, M.S.B.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar – I. Intensidade e formas de acumulação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 389-396, 1993.
- BALL-COELHO, B.; SALCEDO, I.H.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Short- and long-term phosphorus dynamics in a fertilized Ultisol under sugarcane. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, p. 1.027-1.034, 1993.
- BALL-COELHO B.; SAMPAIO, E.V.S.B.; TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, The Hague, v. 142, p. 297-305, 1992.
- BECK, M.A.; SANCHEZ, P.A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1.424-1.431, 1994.
- BOWMAN, R.A.; COLE, C.V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 125, p. 95-101, 1978.
- BUEHLER, S.; OBERSON, A.; RAO, I.M.; FRIESEN, D.K.; FROSSARD, E. Sequential phosphorus extraction of a ^{33}P -labeled Oxisol under contrasting agricultural systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 868-877, 2002.

BUSATO, J.G.; CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X. Fósforo num Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. I – Fracionamento sequencial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 935-944, 2005.

BUSATO, J.G.; CANELLAS, L.P.; RUMJANEK, V.M.; VELLOSO, A.C.X. Fósforo num Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. II – Análise de ácidos húmicos por RMN ³¹P. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 945-953, 2005.

CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; BISSANI, C.A. Fracionamento do nitrogênio, fósforo e enxofre orgânico. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Ecossistemas tropicais & subtropicais. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 16, p. 243-261.

CANELLAS, L.P.; BUSATO, J.G.; DOBBSS, L.B.; BALDOTTO, M.A.; RUMJANEK, V.M.; OLIVARES, F.L. Soil organic matter and nutrient pools under long-term non-burning management of sugar cane. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 61, p. 375-383, 2010.

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 palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 935-944, 2003.

CELI, L.; BARBERIS, E. Abiotic stabilization of organic phosphorus in the environment. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. (Ed.). **Organic phosphorus in the environment**. Cambridge: CAB International, 2005. chap. 6, p. 113 – 132

CONDON, L.M.; TURNER, B.L.; CADE-MENUM, B.J. Chemistry and dynamics of soil organic phosphorus. In: SIMS, J.T.; SHARPLEY, A.N. (Ed.). **Phosphorus: agriculture and the environment**. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 2005. chap. 4, p. 87-121. (Agronomy monograph, 46).

CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 893-900, 2003.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, 197-214, 1995.

DALAL, R.C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 29, 83-117, 1977.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solo, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa comunicação para transferência de tecnologia, 1999. 370 p.

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

FONTES, M.P.F.; ALLEONI, L.R.F. Electrochemical attributes and availability of nutrients, toxic elements, and heavy metal in tropical soils. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, p. 589-608, 2006.

GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, p. 347-352, 2009.

HAVLIN, J.H.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. Phosphorus. In: _____. **Soil Fertility and Fertilizers – An introduction to nutrient management**, 7th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. chap. 5, p. 160-198.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 970-976, 1982.

IVANOFF, D.B.; REDDY, K.R.; ROBINSON, S. Chemical fractionation of organic phosphorus in selected Histosols. **Soil Science**, Baltimore, v. 163, p. 36-45, 1998.

IYAMUREMYE, F.; DICK, R.P. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 56, p. 139-185, 1996.

JACKSON, M.L.. Phosphorus determinations for soil. In: _____. **Soil Chemical Analysis**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1958. chap. 7, p. 134-182.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Relações entre óxidos de ferro e a cor em solos caulíníficos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 27-31, 1983.

KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Pt 3 - Chemical methods. Madison: SSSA, 1996. chap. 32, p. 869-919.

LEHMANN, J.; GÜNTHER, D.; MOTA, M.S.; ALMEIDA, M.P.; ZECH, W.; KAISER, K. Inorganic and organic soil phosphorus and sulfur pools in an Amazonian multistrata agroforestry system. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 53, p. 113 – 124, 2001.

LINQUIST, B.A.; SINGLETON, P.W.; CASSMAN, K.G.; Inorganic and organic phosphorus dynamics during a build-up decline of available phosphorus in a Ultisol. **Soil Science**, Baltimore, v. 162, p. 254-264, 1997.

LOEPPERT, R.H.; INSKEEP, W.P. Iron. In: SPARKS, D.L. (Ed.). **Method of soil analysis**. Pt 3 - Chemical methods. Madison: SSSA, 1996. chap. 23, p. 639-644.

- LUKITO, H.P.; KOUNO, K.; ANDO, T. Phosphorus requirements of microbial biomass in a Regosol and an Andosol. **Soil Biology Biochemistry**, Elmsford, v. 30, p. 865-872, 1998.
- MENDONZA, H.N.S.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B., ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 201-207, 2000.
- MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31-36, 1962.
- NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Pt 2 - Chemical and microbial properties. 2nd ed. Madison: ASA-SSSA, 1982. chap. 29, p. 539-579.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399 p.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 8, p. 471-550.
- OBERSON, A.; JONER, E.J. Microbial turnover of phosphorus in soil. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. (Ed.). **Organic phosphorus in the environment**. Cambridge: CAB International, 2005. chap. 7, p. 133-164.
- OLIBONE, D.; ROSOLEM, C.A. Phosphate fertilization and phosphorus forms in an Oxisol under no-till. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 465-471, 2010.
- OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; PENATTI, C.P.; PICCOLO, M.C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 2.359-2.362, 1999.
- PAVAN, M.A.; CHAVES, J.C.D. Alterações nas frações de fósforo no solo associadas com a densidade populacional de cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 251-256, 1996.
- PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 149-155, 2009.
- PICCOLO, A. The supramolecular structure of humic substances. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, p. 810-832, 2001.
- RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRÉ-LARROUY, M.C.; 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.

REDDY, D.D.; RAO, S.A.; SINGH, M. Changes in P fractions and sorption in an Alfisol following crop residues application. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 168, p. 241-247, 2005.

SANTOS, D.R.; CASSOL, P.C.; KAMINSKI, J.; ANGHINONI, I. Fósforo orgânico do solo. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**. Ecosistemas tropicais & subtropicais. 2. ed., Porto Alegre: Metrópole, 2008. cap. 8, p. 101-111.

SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 576-586, 2008.

SANTOS, J.Z.L.; NETO, A.E.F.; RESENDE, A.V.; CURTI, N.; CARNEIRO, L.F.; COSTA, S.E.V.G.A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 705-714, 2008.

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

SCHROEDER, P.D.; KOVAR, J.L. Comparison of organic and inorganic phosphorus fractions in an established buffer and adjacent production field. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 37, p. 1.219-1.232, 2006.

SELLES, F.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; ZENTNER, R.P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in Brazilian Oxisol under different tillage systems. **Soil & Tillage Research**. Amsterdam, v. 44, p. 23-24, 1997.

SHARPLEY, A.N.; SMITH, S.J. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 127-130, 1985.

SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. In.: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa; SBCS, 2007. cap. 6, p. 275-374.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry**: genesis, composition, reactions. 2nd ed. New York: John Wiley, 1994. 408 p.

TIESSEN, H.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 38, p. 139-151, 1992.

TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 853-858, 1984.

TIESSEN, H.; MOIR, J.O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. Pinawa: Lewis Publishers, 1993. chap. 10, p. 75-86.

TOKURA, A.M.; NETO, A.E.F.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C.H.; ALOVISI, A.A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1.467-1.476, 2002.

WATANABLE, F.S.; OLSEN, S.R. Test of an ascorbic acid method for determining phosphorus in water and NaHCO_3 extracts from soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 29, p. 677-678, 1965.

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.

ZHANG, H.; KOVAR, J.L. Fractionation of soil phosphorus. In.: KOVAR, J.L.; PIERZYNSKI, G.M. (Ed.). **Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals, and waters**. 2nd ed. Raleigh: North Carolina State University, 2009. p. 50-60.

ZINN, Y.L.; LAL, R.; RESCK, D.V.S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 84, p. 28-40, 2005.

ANEXOS

Anexo A – Análise da variância para as frações do fósforo orgânico num Latossolo Vermelho distrófico em função do sistema de colheita e posição de amostragem

Tratamento	P _o lábil	P _o biomassa	P _o mod. lábil	P _o fúlvico	P _o húmico	P _o não lábil
----- mg kg ⁻¹ -----						
----- 0-0,05 m -----						
Colheita						
SQ	23,1	6,3	2,7	119,2	56,1	107,7
CQ	22,0	8,5	4,9	107,5	51,5	112,4
Teste F	ns	*	*	ns	ns	ns
Posição de coleta						
L	21,0	9,6	3,1	109,2	61,0	105,0
EL	24,2	5,1	4,4	117,4	46,6	115,1
Teste F	*	**	*	*	**	ns
Colheita x Posição	ns	ns	ns	**	ns	ns
CV, %	11	28	22	4	10	9
----- 0,05-0,1 m -----						
Colheita						
SQ	18,4	9,9	3,8	106,3	51,4	147,42
CQ	21,5	11,1	1,0	94,4	71,9	169,15
Teste F	ns	ns	**	ns	*	ns
Posição de coleta						
L	21,0	7,7	3,62	100,6	59,2	153,8
EL	18,9	13,3	1,15	100,1	64,1	162,8
Teste F	*	*	**	ns	ns	ns
Colheita x Posição	ns	ns	**	ns	ns	**
CV, %	6	30	19	10	23	13
----- 0,1-0,2 m -----						
Colheita						
SQ	21,4	13,9	4,6	116,7	64,0	127,1
CQ	16,1	4,7	1,3	100,22	48,4	200,6
Teste F	*	**	**	ns	ns	*
Posição de coleta						
L	18,8	10,2	2,6	105,9	64,0	163,5
EL	18,7	8,5	3,3	111,0	48,4	164,3
Teste F	ns	ns	**	ns	**	ns
Colheita x Posição	ns	*	ns	ns	ns	ns
CV, %	16	21	13	9	14	6

SQ: sem queima; CQ: com queima; L: na linha de plantio; EL: na entrelinha de plantio; **: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$; ns: não significativo.

Anexo B – Frações de P orgânico num Latossolo Vermelho distrófico em função do sistema de colheita e da posição e camada de coleta

Camadas	CQ		SQ		CV
	Linha	Entrelinha	Linha	Entrelinha	
m	----- mg kg ⁻¹ -----				%
	----- P _o lábil -----				
0-0,05	19,7	24,2	22,2	24,1	11
0,05-0,1	23,1	20,0	19,0	17,9	6
0,1-0,2	17,0	15,4	20,7	22,1	15
	----- P _o biomassa -----				
0-0,05	11,3	5,6	7,9	4,7	28
0,05-0,1	9,5	12,6	5,9	13,9	30
0,1-0,2	4,4 A	5,1 A	15,9 A	11,8 A	21
	----- P _o moderadamente lábil -----				
0-0,05	4,0	5,8	2,3	3,0	22
0,05-0,1	1,2 A	0,7 A	6,0 A	1,6 B	19
0,1-0,2	1,0	1,6	4,2	5,1	13
	----- P _o fúlvico -----				
0-0,05	107,9 A	107,0 A	110,6 A	127,8 A	4
0,05-0,1	91,8	97,0	109,5	103,2	10
0,1-0,2	95,0	105,7	116,9	116,6	9
	----- P _o húmico -----				
0-0,05	61,9	41,1	60,1	52,1	10
0,05-0,1	77,5	66,2	40,8	62,0	23
0,1-0,2	57,2	39,6	70,8	57,2	14
	----- P _o não lábil -----				
0-0,05	106,6	118,3	103,4	111,9	10
0,05-0,1	188,4 A	149,9 A	119,2 B	175,6 A	14
0,1-0,2	194,8	206,6	132,2	122,0	7
	----- P _o total -----				
0-0,05	311,4	302,0	306,5	323,6	4
0,05-0,1	391,5 A	346,4 A	300,4 A	374,1 A	11
0,1-0,2	369,3	373,6	360,7	334,8	4

SQ: sem queima; CQ: com queima; Dentro de cada sistema de colheita, médias seguidas das mesmas letras não diferem (Tukey $p < 0,05$). As letras são apresentadas somente nos contrastes em que a interação sistema de colheita x local de amostragem foi significativa.

Anexo C – Comparação de médias das frações do P orgânico (P_o) num Latossolo Vermelho distrófico em função do sistema de colheita dentro de cada posição de amostragem

Camadas	CQ	Linha SQ	Efeito	CQ	Entrelinha SQ	Efeito
m	mg kg ⁻¹					
	----- P _o lábil -----					
0-0,05	19,7	22,2	ns	24,2	24,1	ns
0,05-0,1	23,1	19,0	ns	20,0	17,9	ns
0,1-0,2	17,0	20,7	ns	15,4	22,1	ns
	----- P _o biomassa -----					
0-0,05	11,3	7,9	ns	5,6	4,7	ns
0,05-0,1	9,5	5,9	ns	12,6	13,9	ns
0,1-0,2	4,4	15,9	ns	5,1	11,8	ns
	----- P _o moderadamente lábil -----					
0-0,05	4,0	2,3	ns	5,8	3,0	ns
0,05-0,1	1,2	6,0	ns	0,7	1,6	ns
0,1-0,2	1,0	4,2	ns	1,6	5,1	ns
	----- P _o fúlvico -----					
0-0,05	107,9	110,6	ns	107,0	127,8	ns
0,05-0,1	91,8	109,5	ns	97,0	103,2	ns
0,1-0,2	95,0	116,9	ns	105,7	116,6	ns
	----- P _o húmico -----					
0-0,05	61,9	60,1	ns	41,1	52,1	ns
0,05-0,1	77,5	40,8	ns	66,2	62,0	ns
0,1-0,2	57,2	70,8	ns	39,6	57,2	ns
	----- P _o não lábil -----					
0-0,05	106,6	103,4	ns	118,3	111,9	ns
0,05-0,1	188,4	119,2	ns	149,9	175,6	ns
0,1-0,2	194,8	132,2	ns	206,6	122,0	ns

SQ: sem queima; CQ: com queima; ns: não significativo ($p < 0,05$).