

ARIANE MÁRCIA DE SOUSA SILVA

**Frações de fósforo inorgânico no solo em relação a fosfatagem e sua resposta no sistema antioxidativo e produtividade da cana-de-açúcar**

RECIFE - PE

2015

Ficha Catalográfica

S586f Silva, Ariane Márcia de Sousa  
Frações de fósforo inorgânico no solo em relação a  
fosfatagem e sua resposta no sistema antioxidativo e  
produtividade da cana-de-açúcar / Ariane Márcia de Sousa  
Silva. – Recife, 2015.  
96 f.: il.

Orientador(a): Emídio Cantídio Almeida de Oliveira.  
Dissertação (Programa de Pós-graduação em Ciências do  
Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,  
Departamento de Agronomia, Recife, 2015.  
Inclui apêndice(s) e referências.

1. Fixação de fósforo 2. Enzimas antioxidantes 3. Solos  
tropicais I. Oliveira, Emídio Cantídio Almeida de, orientador  
II. Título

CDD 631.4

ARIANE MÁRCIA DE SOUSA SILVA

**Frações de fósforo inorgânico no solo em relação a fosfatagem e sua resposta no sistema antioxidativo e produtividade da cana-de-açúcar**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, para obtenção do título de Mestre.

**Orientador:**

---

Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira

**Examinadores:**

---

Dr. Fernando José Freire

---

Dr<sup>a</sup>. Lilia Gomes Willadino

RECIFE - PE

2015

*Aos meus pais, Francisco e Francisca  
pelo amor, apoio, conforto e ajuda,  
incondicionalmente.*

*Aos meus irmãos Adriane, Adriele e  
Antônio pelo apoio e compreensão.*

**Dedico**

## **Agradecimentos**

A Deus por guiar meus passos e me ajudar a superar os momentos mais difíceis.

Agradeço a minha família que mesmo distante me deu total apoio em todas as decisões que tomei, mesmo não sendo as escolhidas por eles.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia; Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, não apenas pela formação e oportunidade de realização profissional.

Ao professor Emídio Cantídio A. Oliveira, mais que orientador, um exemplo de profissional dedicado à pesquisa, que, com enorme paciência e extrema competência, norteou o presente trabalho, e, principalmente, pela valiosa amizade as quais serão lembradas e reconhecidas na minha vida profissional e pessoal. Muito obrigada!

Aos professores Luis Reynaldo F. Alleoni e Lilia Willadino, pelo apoio e parceria na realização de análises.

Ao Professor Valdomiro Severino de Souza Júnior pelas importantes sugestões na realização deste trabalho.

A todos os professores do PPGCS pelos ensinamentos e convivência.

A Usina Cucaú, em especial ao Dr. Vamberto e Dr. Tony Ramos, pela parceria e disponibilidade da área e apoio na realização das atividades de campo e laboratório.

Ao pessoal do LCTV, Luciana, Neto, Laís, Gemima, Marciana, Carla, Liliane, Marta, Wellington, pela amizade, ajuda e momentos de descontração.

Ao pessoal do laboratório de química da ESALQ, Luiz e Luan.

Aos estagiários Rogério, João Luna, Luan Rafael, Priscila, Môema, pela ajuda na realização deste trabalho.

Aos colegas da Pós-Graduação, pela amizade e convívio durante o curso, em especial a Danubia, Patrícia, Monalisa, Emanuella, Wagner, Igor, Raquel, Érica e Wildson.

Aos funcionários da UFRPE, Maria do Socorro, por toda a ajuda e carinho cedido, Seu Josué, Ivani e todos que se dedicam a esse programa e nos ajudam tão prestativamente.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho

**OBRIGADA.**

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	10
RESUMO.....	11
Abstract.....	13
<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>15</b>
Revisão de Literatura.....	17
Referências.....	25
<b>CAPITULO I Disponibilidade e frações inorgânicas do fósforo no solo, em relação a fosfatagem.....</b>	<b>30</b>
Resumo.....	31
Abstract.....	32
Introdução.....	33
Material e Métodos.....	34
Resultados e Discussão.....	40
Conclusões.....	54
Referências.....	55
<b>CAPITULO II Atividade das enzimas do sistema antioxidativo na cana-de-açúcar, em relação a fosfatagem.....</b>	<b>59</b>
Resumo.....	60
Abstract.....	61
Introdução.....	62
Material e Métodos.....	63
Resultados e Discussão.....	69
Conclusões.....	76
Referências.....	77
<b>CAPITULO III Produtividade e atributos tecnológicos da cana planta, em relação a fosfatagem.....</b>	<b>80</b>
Resumo.....	81
Abstract.....	82
Introdução.....	83
Material e Métodos.....	84
Resultados e Discussão.....	88

Conclusões.....	93
Referências.....	94
Apêndice A.....	97

## LISTA DE FIGURAS

---

### Capítulo I

---

**Figura 1.** Precipitação pluviométrica durante a condução do experimento, em Ribeirão – Pernambuco..... 34

**Figura 2.** Difractogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 - 0,10, 0,10 - 0,20, 0,20 - 0,30 m em e um Latossolo Amarelo Distrofíco de Ribeirão-PE. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita..... 37

**Figura 3.** P-disponível pelo extrator Mehlich-1 aos 30 (A, B, C), 120 (D, E, F) e 210 (G, H, I) dias após o plantio (DAP), em função da fosfatagem com fontes de solubilidade variada. FNR: Fosfato natural reativo; ST: Superfosfato triplo; TF: Torta de filtro. Barras na vertical demonstram o intervalo de confiança a  $p \leq 0,05$ . ..... 42

**Figura 4.** P-disponível pelo extrator Resina trocadora de íons (RTI), aos 30 (A, B, C), 120 (D, E, F) e 210 (G, H, I) dias após o plantio (DAP), em função da fosfatagem com fontes de solubilidade variada. FNR: Fosfato natural reativo; ST: Superfosfato triplo; TF: Torta de filtro. Barras na vertical demonstram o intervalo de confiança a  $p \leq 0,05$ ..... 43

---

### Capítulo II

---

**Figura 1.** Precipitação pluviométrica durante a condução do experimento, em Ribeirão – Pernambuco..... 64

**Figura 2.** Difractogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 - 0,10, 0,10 - 0,20, 0,20 - 0,30 m em e um Latossolo Amarelo Distrofíco de Ribeirão-PE. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita..... 66

**Figura 3.** Massa seca da parte aérea ( $g\ planta^{-1}$ ), aos 518 DAP em relação a fosfatagem com doses crescentes de P na variedade de cana-de-açúcar RB 867515. \*\* significativo a 1 % de probabilidade. Barras na vertical, apresentam o intervalo de confiança a  $p \leq 0,05$ ..... 71

**Figura 4.** Atividade das enzimas SOD, APX e CAT em função da fosfatagem com doses e fontes de solubilidade variada\*\*, \* significativo a 1 e 5 % de probabilidade respectivamente. Barras na vertical demonstram o intervalo de confiança a  $p \leq 0,05$ ..... 74

---

### Capítulo III

---

<b>Figura 1.</b> Precipitação pluviométrica durante a condução do experimento, em Ribeirão – Pernambuco.....	84
<b>Figura 2.</b> Difrátogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 - 0,10, 0,10 - 0,20, 0,20 - 0,30 m em e um Latossolo Amarelo Distrofíco de Ribeirão-PE. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.....	87
<b>Figura 3.</b> Matéria seca da parte aérea (MSPA) e produtividade de colmos (TCH), em relação a fosfatagem, aos 518 DAP. Barras na vertical demonstram o intervalo de confiança a $p \leq 0,05$ .....	90

## LISTA DE TABELAS

---

### Capítulo I

---

**Tabela 1.** Caracterização química e física do solo da área experimental, nas profundidades de 0,0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m..... 36

**Tabela 2.** Frações de fósforo inorgânico no solo, em função da fosfatagem com doses e fontes de solubilidade variada, aos 30 DAP. FNR: Fosfato natural reativo; ST: Superfosfato triplo; TF: Torta de filtro..... 46

**Tabela a 3.** Percentuais das frações de fósforo inorgânico no solo, em função da fosfatagem com doses e fontes de solubilidade variada, aos 30 DAP. FNR: Fosfato natural reativo; ST: Superfosfato triplo; TF: Torta de filtro ..... 49

**Tabela 4.** Frações do fósforo inorgânico no solo, em função da fosfatagem com fontes de solubilidade variada na dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aos 30, 120 e 210 DAP. FNR: Fosfato natural reativo; ST: Superfosfato triplo; TF: Torta de filtro..... 53

---

### Capítulo II

---

**Tabela 1.** Caracterização química e física do solo da área experimental, nas profundidades de 0,0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m..... 65

**Tabela 1.** Teores de fósforo na folha + 1 da cana-de-açúcar aos 120 e 210 DAP e massa seca por planta aos 518 DAP, em função da fosfatagem com fontes de solubilidade variada. FNR: Fosfato natural reativo, ST: Superfosfato triplo e TF: Torta de filtro... 69

**Tabela 2.** Atividade das enzimas do complexo oxidativo superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e catalase (CAT) em função das fontes de fósforo aplicado no solo. FNR: Fosfato natural reativo, ST: Superfosfato triplo e TF: Torta de filtro.... 72

---

### Capítulo III

---

**Tabela 1.** Caracterização química e física do solo da área experimental, nas profundidades de 0,0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m..... 86

**Tabela 2.** Matéria seca da parte aérea (MSPA), produtividade de colmos (TCH) e tonelada de Pol por hectare (TPH), em relação a fosfatagem com fontes de solubilidade variada, aos 518 DAP..... 89

**Tabela 3.** Atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, em relação a fosfatagem com fontes de solubilidade variada, aos 518 DAP..... 92

## Resumo

A baixa disponibilidade e a fixação de fósforo (P) em solos tropicais são frequentemente relatados como fatores limitantes para o crescimento das plantas. Os solos que mineralogicamente apresentam mais caulinita em relação aos óxidos de Fe e Al, possuem diferença na capacidade de fixação e precipitação do P, o que evidencia a necessidade de avaliar as frações inorgânicas de P no solo quando realizada adubação ou fosfatagem com fertilizantes de alta e baixa solubilidade. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a disponibilidade de P e as frações do fósforo inorgânico (Pi) em solos com predominância de caulinita, quando manejado com doses e fontes fosfatadas de solubilidade variada, sendo verificado, na planta o efeito da variação da disponibilidade de P no solo por meio da avaliação nutricional, enzimas do complexo oxidativo e produtividade de colmos. Os tratamentos consistiram da aplicação das fontes de três fontes P; Superfosfato Triplo (ST); Fosfato Natural Reativo (FNR) e Torta de Filtro (TF), nas doses de 50, 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, bem como um tratamento adicional sem a realização da fosfatagem. Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso, utilizando o esquema fatorial de (3 x 4) +1, com quatro repetições. Aos 30, 120 e 210 dias após aplicação dos tratamentos (DAAT) foram coletadas, na entrelinha da cana-de-açúcar, amostras de solo nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, sendo determinado o teor de P-disponível em Mehlich-1 e Resina de troca iônica mista, o P-rem e pH das amostras. O fracionamento do Pi foi determinado nas mesmas amostras anteriores, porém apenas nos tratamentos 0, 100 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. No fracionamento do Pi foram determinados o P facilmente solúvel (P-H<sub>2</sub>O), P ligado ao alumínio (P-Al), P ligado ao ferro (P-Fe) e o P ligado ao cálcio (P-Ca). Após o quarto e sétimo mês de crescimento da cana planta, foram coletadas aleatoriamente amostras da folha diagnóstico (F+1), sendo determinado o teor de P na folha e atividade das enzimas superóxido dismutase, catalase, e peroxidase do ascorbato. Aos 518 dias após o plantio (DAP) foi determinada a produção de massa seca da parte aérea, produtividade de colmos e os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar. O fracionamento do Pi demonstrou que o uso do fosfato natural reativo de gafsa elevou os teores de P-H<sub>2</sub>O e o uso de uma fonte acidulada como superfosfato triplo reduziu, por outro lado essas fontes de P promoveram a menor e maior teores do P-Fe. Independente das fontes e tempo avaliados, a atividade da SOD, CAT e APX foram decrescente até a dose média de 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. A fosfatagem aumentou a produção de massa seca

da parte aérea e a produtividade de colmos no ciclo de cana planta, em 16 e 10 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. No entanto, não promoveu incrementos nos atributos tecnológicos do primeiro ciclo de crescimento da cana-de-açúcar.

**Palavras-chaves:** fixação de fósforo, enzimas antioxidantes, solos tropicais

## Abstract

The low phosphorus availability and the fixation (P) in tropical soils are often reported as limiting factors for plant growth. Soils that feature mineralogically more kaolinite with respect to Fe and Al oxides Fe and Al, have difference in fixation capacity and precipitation of P, which highlights the need to assess the inorganic fractions of P when performed fertilization or phosphating with high fertilizer and low solubility. The objective of this study was to evaluate the availability of P and fractions of inorganic phosphorus (Pi) in soils with a predominance of kaolinite, when handled with phosphate levels and sources of varying solubility, being checked in the plant the effect of varying the availability of P through nutritional evaluation of oxidative enzymes complex and sugarcane productivity. The experiment was carried out under field conditions in the State of Pernambuco Forest Zone, Brazil. The treatments consisted of three sources of sources of P; Triple superphosphate (ST); Natural Reactive Phosphate (FNR) and Filter cake (TF) at doses of 50, 100, 200 and 300 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as well as an additional treatment without performing the phosphating. The treatments were arranged in a randomized block design, using the factorial of (3 x 4) + 1, with four replications. At 30, 120 and 210 days after treatment (DAAT) were collected between rows of sugarcane, soil samples in the layers 0-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m, P - being determined available content and Mehlich-1 mixed ion exchange resin, and rem-P pH of the samples. The fractionation of Pi was determined in the samples previously mentioned, but only in the treatments 0, 100 and 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> of. In the fractionation Pi were determined readily soluble P (P-H<sub>2</sub>O), aluminum-bound P (P-Al), iron bound P (Fe-P) and P bound to calcium (Ca-P). After the fourth and seventh month of plant cane growth, were collected random samples diagnostic leaf (F + 1), and being determined the P content in the leaf and activity of superoxide dismutase, catalase and peroxidase ascorbate. To 518 days after planting (DAP) was determined dry matter production of shoots, productivity and technological attributes of canesugar. Fractionation of Pi demonstrated that the use of a gafsa reactive phosphate has increased P-H<sub>2</sub>O content and the use of an acidic source as triple superphosphate reduced, on the other hand these sources of P promoted lowest and highest levels of P-Fe. Independent sources and evaluated time, the activity of SOD, CAT and APX were descending to the average dose of 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>. The dose of phosphate increased the dry matter production of shoots and sugarcane yield in cane plant cycle, on 16 and 10 t ha<sup>-1</sup>,

respectively. However, not promoted increases in the technological attributes of the first growth cycle of sugarcane.

**Key words:** phosphorus fixation, antioxidant enzymes, tropical soils

## INTRODUÇÃO GERAL

O fósforo é o nutriente mais limitante para a produção agrícola em solos tropicais (LÓPEZ-BÚCIO et al., 2000). Essa limitação se deve principalmente aos baixos teores existentes no solo e a predominância dos óxidos de ferro e alumínio e argilas do grupo da caulinita como principais constituintes da fração argila (VOLKSWEISS & RAIJ, 1977; ROCHA et al., 2005). Os oxi-hidróxidos de Fe e de Al são considerados os constituintes da fração argila mais efetivos na adsorção de P, sendo que a goethita é considerada o principal componente da fração argila responsável por este fenômeno em solos do Brasil Central (RESENDE et al., 2005).

Desse modo, a predominância do mineral caulinita reduz a capacidade de adsorção específica de fósforo (P) e a presença de Al e Fe na solução, diminuindo o processo de precipitação, o que promoverá diferenças nas frações de P inorgânico (Pi) eventualmente encontradas nos solos oxídicos do Brasil.

Devido a importância do P para o desenvolvimento, produtividade e longevidade da cultura da cana-de-açúcar e sua alta taxa de fixação nos solos tropicais, torna-se pertinente o estudo de níveis e formas de aplicação desse elemento no solo (CAIONE et al., 2011), visto que sua dinâmica ainda é algo que necessita de muitos estudos, justamente devido as particularidades pertinentes a esse elemento, principalmente suas relações com os constituintes do solo, que requerem um manejo diferenciado em relação aos demais elementos fertilizantes, para que se possa minimizar suas perdas e maximizar seu aproveitamento.

Dessa forma, a aplicação correta e o uso de fontes adequadas proporcionam melhores resultados da produtividade em função da adubação fosfatada realizada. A forma de aplicação do fertilizante varia em função da fonte adotada. Segundo Horowitz & Meurer (2004), a dissolução dos fosfatos naturais depende da superfície de contato com o solo, sendo aumentada com a aplicação em área total seguido de incorporação, o que não implica necessariamente em aumento na eficiência da adubação. Para os fosfatos solúveis, a recomendação é que este seja aplicado no sulco de plantio, de forma localizada (PRADO et al., 2001), proporcionando assim, maior contato e proximidade com o sistema radicular das plantas, facilitando a absorção. Contudo, Rossetto et al. (2008) recomendaram a aplicação de P em cana-de-açúcar em área total, na forma de fosfatagem, onde o P melhor distribuído na área contribui para o enraizamento, aumentando conseqüentemente o volume de solo explorado pelas plantas.

Visto que, a variação da disponibilidade de P associado ou não a outros estresses abióticos tais como seca, salinidade, temperaturas extremas, toxicidade química, limitação nutricional acarretam uma série de mudanças morfológicas, fisiológicas e moleculares nas plantas. Essas mudanças afetam o crescimento e a produtividade das culturas (JAVIDIAN et al., 2010). Entre as limitações nutricionais, a de fósforo (P) torna-se principalmente importante ao se considerar as interações deste nutriente com outros elementos do solo, como alumínio e ferro, o que resulta em redução da capacidade de aproveitamento do P presente no solo pelas plantas (BALIGAR & FAGERIA, 1999).

A baixa disponibilidade de P nos solos da zona da mata e litoral do Nordeste Brasileiro mostra o quanto é importante o estudo do comportamento desse elemento no solo, visando adequado suprimento as plantas, pois tal conhecimento contribui para o estabelecimento de um método apropriado para adubação fosfatada e na recuperação dos teores de P no solo, porque a capacidade dos solos em adsorver P influencia diretamente na resposta das plantas a aplicação de fertilizantes (MOREIRA et al., 2002).

Nesse sentido, o fracionamento do P no solo tem sido utilizado para estudar as transformações desse nutriente no solo (PAVINATO; MERLIN; ROSOLEM, 2009). O entendimento da distribuição do fósforo inorgânico nos solos permitirá novos estudos os quais poderão fornecer resultados visando aperfeiçoar a recomendação da adubação fosfatada.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a disponibilidade de P e as frações do fósforo inorgânico (Pi) em solos com predominância de caulinita, quando manejado com doses e fontes fosfatadas de solubilidade variada, sendo verificado, na planta o efeito da variação da disponibilidade de P, no solo por meio da avaliação nutricional, enzimas do complexo oxidativo e produtividade de colmos.

## Revisão de Literatura

### A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é originária da região leste da Indonésia e Nova-Guiné, é uma planta alógama pertencente à família Poaceae e ao gênero *Saccharum* (DANIELS & ROACH, 2006; SANTOS et al., 2008). Foi introduzida no Brasil em meados de 1526, fazendo parte do contexto histórico brasileiro como um dos principais produtos agrícolas do país (SIMÕES NETO, 2008).

A cana-de-açúcar esta entre as espécies de maior rendimento fotossintético da família Poaceae, possui metabolismo C4, apresentando elevada eficiência no resgate e utilização do gás carbônico atmosférico, além de alta adaptabilidade às condições de alta luminosidade e temperaturas elevadas (SEGATO et al., 2006).

A evolução tecnológica nos canaviais proporcionou aumentos significativos de produtividade no campo, contribuindo para tornar o Brasil o maior produtor mundial desta cultura, com produção estimada de 642,1 milhões de toneladas de colmos na safra 2014/2015, obtidos em pouco mais de 9 milhões de hectares, conferindo produtividade média nacional de 71 Mg ha<sup>-1</sup> de colmos. A região Nordeste ocupa a terceira posição no ranque da produção nacional com 55.6 milhões de toneladas. O estado de Pernambuco apresenta uma produção de aproximadamente 14,7 milhões toneladas de colmos sendo o 2º maior produtor de cana-de-açúcar do Nordeste (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2014).

Aproximadamente 69% do total dos canaviais do Brasil possuem variedades desenvolvidas pela rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do setor Sucroalcooleiro – RIDESA. Dentre as cultivares lançada pela RIDESA tem-se a RB867515, desenvolvida pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), que apresenta uma alta produção agrícola, alto teor de sacarose e sem restrição aos ambientes para produção (RIDESA, 2010).

A importância que a cultura da cana-de-açúcar representa, tanto no cenário nacional quanto internacional, traz inúmeros benefícios para o país. No entanto, apesar das conquistas numéricas obtidas no campo, a produtividade dos canaviais ainda se encontra abaixo do potencial genético das cultivares atualmente utilizadas, estimado em valores superiores a 300 Mg ha<sup>-1</sup> (ALBUQUERQUE; SILVA, 2008).

A redução da produtividade dos canaviais pode ser atribuída à baixa oferta de nutrientes dos solos e a disponibilidade hídrica. Portanto, é de suma importância

conhecer as exigências minerais da cana-de-açúcar a qual irá direcionar a novos métodos e formas de adubação mais eficazes, com menos desperdício e economicamente viáveis (COLETI et al., 2006; OLIVEIRA, 2011).

Dessa forma, observa-se a necessidade do maior conhecimento da nutrição dessas plantas, principalmente no que se refere a disponibilidade de P, uma vez que, há competição do solo com a planta pelo P nas condições tropicais, sendo este nutriente considerado um dos mais limitantes da produtividade de plantas cultivadas (NOVAIS; SMYTH, 1999; SANTOS et al., 2011).

### **O Fósforo no solo e suas frações**

O fósforo (P) de interesse agrônomo ou ambiental presente no solo é constituído por compostos derivados do ácido ortofosfórico e, menos comumente, de pirofosfatos. Durante o processo de intemperização, o P é liberado das apatitas, transformado em minerais secundários e incorporado por processos biológicos em compostos orgânicos (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

As formas de P comumente absorvida pelas plantas são, em maior proporção o ânion monovalente – ortofosfato biácido –  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , e em menor proporção o ânion bivalente ortofosfato monoácido –  $\text{HPO}_4^{2-}$ , sendo o pH o principal fator determinante na proporção em que as duas formas estão disponíveis para absorção (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). Em regiões tropicais devido ao avançado grau de intemperismo do solo esse nutriente recebe atenção especial, uma vez que, a maior presença de óxidos e hidróxidos de Fe e Al na fração argila, torna o solo como dreno de P, competido com a planta pelo nutriente adicionado na adubação.

Isso ocorre por conta do aumento na concentração de cargas positivas desses solos (NOVAIS; SMYTH, 1999). Novais, Smyth e Nunes (2007), relatam que mais de 90% do P aplicado ao solo pode ser adsorvido já na primeira hora de contato com o mesmo, formando inicialmente o P-lábil e, posteriormente, com tempo do P adsorvido, o P não lábil. Havendo dessa forma, a necessidade de se aplicar altas doses de P para atender a demanda adequada do nutriente às plantas (SOUSA; LOBATO; REIN, 2004).

O P no solo pode ser dividido em dois grupos, fósforo inorgânico (Pi) e fósforo orgânico (Po), podendo ser encontrado na forma iônica e em compostos na solução do solo; fósforo adsorvido na superfície dos constituintes minerais do solo; minerais cristalinos e amorfos e fósforo componente da matéria orgânica (BARBER, 1995).

O teor de Pi na maioria dos solos é de aproximadamente 50% do P total, variando de 10-96% do P total (BRITO, 1998). Silveira et al. (2006), estudando sobre a distribuição de fósforo em diferentes ordens de solo do semiárido da Paraíba e Pernambuco mostram que o P residual, a fração menos lábil, corresponde a proporções entre um terço e metade do P total da maior parte dos solos, exceto nos Vertissolos e Neossolos (SILVEIRA, et al., 2006). Por outro lado, na maioria dos solos, cerca de 50% do P total, representa a forma de compostos orgânicos (ANDERSON, 1980).

No solo, o P é distribuído em formas que variam com a natureza química do ligante e a energia de ligação entre o solo e este elemento. Quanto à natureza do ligante, o P pode ser encontrado como P orgânico diéster, P orgânico monoéster, P inorgânico em ligações com Fe, Al, Ca, argilas silicatadas e óxidos (FUENTES; BOLAN & NAIDU, 2008). Quanto à energia de ligação, o P pode estar associado a outros íons ou moléculas em ligações monodentadas, bidentadas e bionucleadas (DALAL, 1977; PARFITT, 1978).

Do ponto de vista da fertilidade do solo, independentemente da natureza química, o P é dividido de acordo com a facilidade de reposição da solução do solo (GATIBONI et al., 2007) em diferentes labilidades. A forma lábil é representada pelo conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo, quando o P é absorvido por plantas ou por microrganismos (WALKER; SYERS, 1976; CROSS; SCHLESINGER, 1995). A forma de P precipitado com Fe e Al, mais a fração adsorvida em óxidos de Fe e Al, representam o P moderadamente lábil, que podem ser removidos da solução do solo via adsorção por ligações covalentes de alta energia, enquanto o P pouco lábil corresponde aos compostos fosfatados mais complexos e estáveis (RAIJ, 1991).

O ciclo do P é controlado por processos físico-químicos como a adsorção e a dessorção que determinam, em longo prazo, a disponibilidade de P nos solos. Há também a contribuição de processos biológicos, como a imobilização do P inorgânico (Pi) e mineralização do P orgânico (Po), as quais podem disponibilizar o fósforo a curto prazo (CHEN et al., 2003; MARTINAZZO et al., 2007).

Diversos fatores influenciam a retenção de P no solo como mineralogia, matéria orgânica, ácidos orgânicos, textura, tamanho médio dos constituintes mineralógicos da fração argila do solo (SOUZA, DAVIDE, 2001; SOUZA et al., 2007). Em estudos que analisaram a influência da toposequência nas formas e distribuição de P nos solos tropicais demonstraram que as diferenças na proporção e na concentração absoluta de

diferentes frações de P foram mais evidentes quando o solo e a vegetação diferiram ao longo da toposequência (NEGASSA; LEINWEBER, 2009).

Chang & Jackson (1957) apresentaram a base teórica para se estimar as formas de fósforo no solo por diferentes extratores, presumindo que a utilização de diferentes extratores poderia, em função do seu modo de ação, extrair seletivamente as diferentes formas de fósforo. Assim, a utilização destes extratores de maneira sequencial, do menor para o maior poder de extração, evitaria a extração simultânea de várias formas de P, o que ocorreria se cada um deles fosse adicionado separadamente em amostras de solo.

Esta técnica de separação do P em diversas frações foi denominada e difundida como “fracionamento de fósforo”. O método proposto por Chang & Jackson (1957) permite classificar o P do solo em quatro grandes grupos, fosfatos de alumínio, fosfatos de ferro, fosfatos de cálcio. Essas formas são identificadas de acordo com a sequência de extratores usado,  $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_4\text{F}$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 + \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ . Contudo, esta técnica não identifica separadamente as formas orgânicas e, principalmente, não estima a labilidade das formas extraídas.

## **Fontes de Fósforo**

A necessidade da aplicação de grandes quantidades de adubos fosfatados nos solos cultivados está relacionada à baixa fertilidade desses solos e também a elevada capacidade de adsorção dos íons de fosfato aos óxidos de ferro e alumínio e também à caulinita, principais representantes da fração argila (CESSA et al., 2009).

O P é, entre os macronutrientes, o que apresenta maior opção de fontes no mercado, as quais podem variar quanto à reatividade (SANTOS et al., 2008). Podendo ser classificados em solúveis, pouco solúveis e insolúveis. Os fosfatos solúveis correspondem a mais de 90 % do  $\text{P}_2\text{O}_5$  utilizado na agricultura brasileira e apresentam alta eficiência agrônômica em curto prazo, porém elevado custo por unidade do nutriente aplicado e baixo efeito residual, devido à forte competição entre o solo e planta pelo P solubilizado desses fosfatos (HOROWITZ & MEURER, 2003; NOVAIS et al., 2007).

As fontes solúveis em água mais produzida no Brasil são os superfosfatos (simples e triplo) e os fosfatos de amônio (MAP e DAP). São produtos solúveis que

quando incorporados ao solo possuem grande capacidade de liberação de fósforo para as plantas (GOEDERT, 1986).

Os fosfatos de menor solubilidade em água, como os fosfatos naturais reativos (FNR) são concentrados apáticos obtidos a partir de minerais fosfáticos e reagem mais rapidamente em solos ácidos (KAMINSKI; PERUZZO, 1997). Estes, embora apresentem menor disponibilidade imediata do nutriente para as plantas, uma vez que dissolvem lentamente na solução do solo, normalmente apresentam menor custo (HOROWITZ; MEURER, 2004). De acordo com Novais; Smyth (1999), nas condições de solo drenado, o uso dessas fontes menos reativas pode ser mais conveniente, desde que a menor reatividade não implique restrição do processo de difusão, que garante o suprimento de P à planta.

Outra fonte de P utilizada principalmente nos canaviais é a torta de filtro, considerada como subproduto da Agroindústria canavieira, composto da mistura de bagaço moído e lodo da decantação, proveniente do processo de tratamento do caldo. A torta de filtro é considerada como adubo orgânico e disponibiliza o P gradativamente por meio da mineralização e por ataque de micro-organismos no solo, sendo considerada como alternativa para a recuperação de solos exauridos ou de baixafertilidade (NUNES JÚNIOR, 2008). Al em do P, sua composição química apresenta altos teores de matéria orgânica, sendo também rica em nitrogênio e cálcio, além de teores consideráveis de potássio magnésio e micronutrientes.

O fósforo presente em cada uma dessas fontes irá reagir de maneira diferente no solo. Os fosfatos naturais por exemplo, a solubilização do P ocorre de forma gradual, e depende da superfície de contato com o solo, sendo aumentada com a aplicação em área total seguido de incorporação (HOROWITZ & MEURER, 2004). Enquanto que os fosfatos solúveis e a fonte orgânica (torta de filtro) apresentam uma solubilidade de P mais prontamente na solução do solo, podendo resultar de acordo com as características do solo maior ou menor P-disponível para as plantas.

### **Estresses em plantas e espécies reativas de oxigênio**

Está se tornando cada vez mais importante a preocupação com a resposta das plantas às condições ambientais desfavoráveis. O cenário de mudanças climáticas observadas nas últimas décadas sugerem um aumento da aridez em muitas áreas do globo (BLUM, 2011).

De modo geral, essas mudanças no ambiente e a exposição das plantas a fatores como seca, calor, frio, competição, exposição a substâncias em quantidades fitotóxicas ou deficiências nutricionais, insetos e doenças causadas por fungos, bactérias e vírus, impõem aos organismos afetados condições desfavoráveis, os quais podem alterar o crescimento, desenvolvimento e metabolismo, chegando a ocasionar inclusive a morte das plantas (LAWLOR, 2002; TONELLO, 2011).

As plantas em condições ambientais naturais são submetidas a diversos estresses os quais, quase sempre, ocorrem de forma combinada, e não isoladamente. A resposta do estresse combinado é diferente da soma das respostas dos fatores abióticos aplicados isoladamente, e os fatores de estresse podem revelar uma interação antagônica ou sinérgica (MITTLER, 2006).

A adaptação das plantas a estresses ambientais é dependente da ativação de cascatas de redes moleculares envolvidas na percepção, transdução de sinal e expressão de genes e metabólitos específicos relacionados ao estresse (VINOCUR & ALTMAN, 2005).

Todo estresse ambiental pode acarretar estresse oxidativo, o qual é resultante do acúmulo de espécies reativas e citotóxicas de oxigênio, sendo os radicais superóxido ( $O_2^-$ ), peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) e o radical hidroxila (OH) e oxigênio “singlet” ( $O_2$ ) as principais espécies produzidas (MITTLER, 2002). As espécies reativas de oxigênio (EROS) são subprodutos do metabolismo aeróbico e fotossintético que, em concentrações compatíveis com a homeostase redox celular, é componente de diversas vias de sinalização (FOYER & NOCTOR, 2003).

O excesso das EROS causa danos oxidativos em proteínas, lipídeos e ácidos nucleicos, caracterizando o estresse oxidativo secundário (BEN-AMOR et al., 2005). Para evitar os danos oxidativos, as plantas desencadeiam uma série de respostas metabólicas que se traduzem na ativação de mecanismos específicos de eliminação do excesso de ROS no interior das células de forma a obter um controle de sua acumulação, assim como a regulação da expressão genética para produção de metabólitos de sinalização (MARTINS; MOURATO, 2008).

Os mecanismos de defesa antioxidativo são constituídos por enzimas e metabólitos antioxidantes. Nos mecanismos enzimáticos destacam-se: superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) que participam diretamente na remoção das ROS ou que catalisam reações de formação/regeneração de moléculas para o sequestro das ROS (MARTINS; MOURATO, 2008).

O complexo sistema antioxidante que as plantas desenvolveram atuam de forma coordenada a fim de conter os efeitos deletérios da produção da ROS, sendo estas produzidas em qualquer compartimento celular (EL-SHABRAWI et al., 2010).

## **Antioxidantes Enzimático**

### **Superóxido Dismutase**

A primeira enzima que age no sistema antioxidante celular é a superóxido dismutase, catalisando a formação de peróxido de hidrogênio a partir de radicais superóxidos, conforme equação descrita por Haber-Weiss (OLMOS et al., 2003; KOPPENOL, 2001):



Inicialmente ocorre a reação do ânion superóxido com o grupo prostético da SOD na sua forma oxidada. Essa ligação conduz à aquisição de um próton e a consequente liberação de oxigênio molecular. A forma reduzida da enzima liga, então, um segundo ânion superóxido e próton, para liberar  $\text{H}_2\text{O}_2$  e retornar à sua forma oxidada.

A SOD tem papel fundamental na remoção desses superóxidos nos compartimentos onde são formados, visto que, as membranas fosfolipídicas são impermeáveis a moléculas carregadas de  $\text{O}_2$  (AZEVEDO, 2013).

A SOD apresenta isoformas que variam conforme o co-fator inorgânico ligado a região proteica: tem-se a manganês SOD (Mn-SOD), localizada em mitocôndrias e peroxissomos, Ferro SOD (Fe-SOD), localizada no cloroplasto e a cobre-zinco SOD (Cu/Zn-SOD), localizadas em cloroplastos, citosol e, possivelmente, no apoplasto (ALSCHER et al., 2002).

Entretanto, a SOD ao converter o superóxido acaba gerando o  $\text{H}_2\text{O}_2$ , o qual também é tóxico e deve ser eliminado pela ação da catalases e/ou peroxidases.

### **Ascorbato peroxidase**

A ascorbato peroxidase (APX) reduz o  $\text{H}_2\text{O}_2$  a água utilizando o ascorbato como doador de elétrons específicos (SHIGEOKA et al., 2002). A APX utiliza duas moléculas de ascorbato (AsA) para a redução do peróxido de hidrogênio a água e oxigênio,

gerando ao mesmo tempo moléculas de monohidroascorbato (MDHA), o qual é reduzido a AsA pela de hidroascorbato redutase (DHA redutase), usando NADH/NADPH como doador de elétrons. A DHAreductase utiliza a glutathione (GSH) como substrato para reduzir o AsA. Conforme equação abaixo:

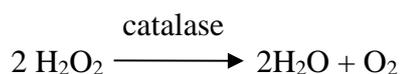


Dessa forma a APX combinada com as funções efetivas do ciclo de AsA-GSH evitam a acumulação de  $\text{H}_2\text{O}_2$  a níveis tóxicos em organismos fotossintéticos. Constituindo uma via eficiente de células de plantas que dispõem do peróxido de hidrogênio em determinados compartimentos onde não existe catalase presente, como por exemplo, no cloroplasto (MITTLER, 2002).

A APX apresenta cinco isoformas: citosólica, mitocondrial, peroxissomal, glioxissomal e cloroplástica (AZEVEDO, 2013).

### **Catalase**

A catalase (CAT) tem função de converter o  $\text{H}_2\text{O}_2$  em água e oxigênio estável. É a única entre as enzimas degradantes de  $\text{H}_2\text{O}_2$  que não consome equivalentes redutores da célula e que possui mecanismo muito eficiente para a remoção do peróxido de hidrogênio formado sob condições de estresse (MALLICK e MOHN, 2000), conforme reação a seguir:



Entretanto, a CAT tem baixa afinidade pelo peróxido de hidrogênio requerendo a ligação de duas células dessa ROS para que a reação ocorra, dessa forma, a CAT é provavelmente responsável pela remoção do excesso do  $\text{H}_2\text{O}_2$  durante o estresse (GRATÃO et al, 2005). Além de proteger a SOD da inativação por altos níveis desta espécie reativa (FRIDOVICH, 1995).

## Referências bibliográficas

ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. S. Agricultura tropical: quatro anos décadas de inovação tecnológica, institucionais e políticas. Brasília: Embrapa **Informações Tecnológica**, v. 1: produção e produtividade agrícola. 1336 p. 2008.

ALSCHER, R.G.; ERTURK, N.; HEATH, L.S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, p. 1331-1341, 2002.

ANDERSON, J. P. E. Assessing organic phosphorus in soil. In: KHASAWNEH, F. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRAT, E. J. The role of phosphorus in agriculture. Madison: Soil Science Society of America, p. 411-431. 1980.

AZEVEDO, V. M. de. **Ação combinada de fatores abióticos de estresses em cana-de-açúcar: variáveis fisiológica e bioquímicas**. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife-PE. 2013.

BARBER, S. A. Soil nutrient bioavailability: **A mechanistic approach**. 2. Ed. New York. John Wiley & Sons, 4414p. 1995.

BALIGAR, VC; FAGERIA, N. K. **Plant nutrient efficiency: towards the second paradigm**. In: SIQUEIRA, J. O. et al. Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas. Viçosa: SBCS, 1999.

BEN AMOR, N. et al. Physiological and antioxidant responses of the perennial halophyte *Crithmum maritimum* to salinity. **Plant Science** 168: 889-899. 2005.

BLUM, A. Drought resistance – is it really a complex trait? **Functional Plant Biology**, v. 38, p.753–757, 2011.

CAIONE, G. et al. Fontes de fósforo em variedades de cana-de-açúcar forrageira. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.41, n.1, p. 66-73, 2011.

CESSA, R. M. A. et al. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois Latossolos vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:1153-1162, 2009.

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

CHEN, C. R. et al. Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in New Zealand. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 177, n. 1/3, p. 539-557, 2003.

COLETI, J. T. et al. Remoção de macronutrientes pela cana-planta e cana-soca, em Argissolos, variedades RB835486 e SP813250. **STAB**, Açúcar, Álcool & Subprodutos, Piracicaba, v. 24, n. 5, p. 32-36, 2006.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v. 1 – Safra 2014/2015, n. 3 – terceiro Levantamento, Brasília, dez. 2014.

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**, v.64, p.197-214, 1995.

DALAL, R.C. Soil organic phosphorus. **Adv. Agron.**, 29:83-117, 1977.

DANIELS, J.; ROACH, B. T. Taxonomy and evolution in sugarcane. In: D. J. HEINZ (ed.), **Sugarcane improvement through breeding**. Elsevier Press, p. 7-84, 1987.

EI-SHABRAWI, H. et al. Redox homeostasis, antioxidant defense, and methylglyoxal detoxification as markers for salt tolerance in Pokkali rice. **Protoplasma**, v.245, p. 85-96. 2010.

FOYER, C. H. & NOCTOR, G. Redox sensing and signaling associated with reactive oxygen in chloroplasts, peroxisomes and mitochondria. **Physiologia Plantarum** 119: 355-364. 2003.

FRIDOVICH, I. Superoxide radical and superoxide dismutases. **Annual Review of Biochemistry**, v.27, p. 97-112, 1995.

FUENTES, M. et al. Assessment of phosphorous bioavailability from organic wastes in soil. In R. Naidu (Ed.), **Chemical Bioavailability in Terrestrial Environment**: Elsevier B.V. 2008.

GATIBONI, L. C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solos sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 31, n. 4, 691-699, 2007.

GOEDERT, W. J. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados não tradicionais**. Planaltina: Embrapa, CPAC, 1986, 21 p. (Documento, 24).

GRATÃO P.L. et al. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, v.32, p.481-494, 2005.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência de dois fosfatos naturais farelados em função do tamanho da partícula. **Ciência Rural**, v.33, n.1, p.41-47, 2003.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. **Eficiência agrônômica de fosfatos naturais**. In: YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S. (Eds). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, POTAFOS, p.665-682.2004.

JAVADIAN, N. et al. Cold induced changes of enzymes, poline, carbohydrates and chlorophyll in wheat. **Russian Journal of plant Physiology, Moscow**, v. 54, n. 4, p. 540-547, 2010.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. **Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo**. Santa Maria: NRS, SBCS, 1977. 31 p. (Boletim Técnico, n. 3).

KOPPENOL, W.H. The Haber-Weiss cycle 70 years later. **Redox Report**, v.6, p.229-234, 2001.

LAWLOR, D.W., CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant, cell and environment**, v. 25, p. 275-294, 2002.

LÓPEZ-BUCIO, J. L. et al. Enhance phosphorus uptake in transgenic tobacco plants that overproduce citrate. **Natural Biotechnology**, v. 18, p. 450-453, 2000.

MALLICK, N., MOHN, F.H. Reactive oxygen species: response of algal cells. **Journal of Plant Physiology**, v. 157, p. 183-193, 2000.

MARTINAZZO, R. et al. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 563-570, 2007.

MARTINS, L.; MOURATO, M. Alterações no metabolismo de plantas em meios contaminados por metais pesados: stresse oxidativo. **Revista Agros**, v. 8, 2008.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7, p.405-410, 2002.

MITTLER, R. Abiotic stress, the field environmental and stress combination. **Trends in Plant Science**, v.11, p.15-19, 2006.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; MORAES, L.A.C. Eficiência de fontes de fósforo na alfafa centrosema cultivada em Latossolo Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.1459-1466, 2002.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, New York, v. 172, n. 3, p. 305-325, 2009.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T. J. (Eds.). **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade de Viçosa, 399 p. 1999.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciências do Solo**, p. 471-550. 2007.

NUNES JÚNIOR, D. Torta de filtro: De resíduo a produto nobre. **Revista Idea News**, v.8, p.22-30, 2008.

OLIVEIRA, E.C.A. **Balanço nutricional da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada**. 213 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2011.

OLMOS, E. et al. Early steps in oxidative burst induced by cadmium in cultured tobacco cells (BY-2 line). **Journal of Experimental Botany**, v. 54, p.291-301, 2003.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 01-46, 1978.

PAVINATO, O. S. MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus fractions in brazilian cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 1, p. 149-155, 2009.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; ROQUE, C.G. Resposta da cultura do milho a modos de aplicação e doses de fósforo, em adubação de manutenção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.83-90, 2001.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: POTAFÒS.343 p. 1991.

REDE INTERUNIVERSITÁRIA DE DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO – RIDESA. Catálogo nacional de variedades “RB” de cana - de - açúcar. **RIDESA**, Curitiba, 136 p. 2010.

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S. B. **Mineralogia dos Solos Brasileiros**: interpretação e aplicações. Lavras: UFLA, 2005.

ROCHA, A. T. et al. Fracionamento de fósforo e avaliação de extratores de P-disponível em solos da ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 178-184, 2005.

ROSSETTO, R. et al. Fósforo. In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, p.271-287. 2008.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. K. Fatores que afetam a disponibilidade e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n. 2, p. 576-586, 2008.

SANTOS, J. Z. L. et al. Frações de fósforo em solo adubado com fosfato em diferentes modos de aplicação e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.32, p.705-714, 2008.

SANTOS, D.H. et al. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtroenriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.443-449, 2011.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. **Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar.** In: SEGATO et al. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: Livro cereas, p. 19-36, 2006.

SHIGEOKA, S. et al. Regulation and Function of Ascorbate Peroxidase Isoenzymes. **Journal Experimental Botany**, v. 53, p. 1305-1319, 2002.

SILVEIRA, L. M.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, E. V. S Distribuição de fósforo em diferentes ordens de solo do semi-árido da Paraíba e de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 281-291, 2006.

SIMÕES NETO, D. E. **Avaliação da disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação fosfatada para cana-planta em solos do estado de Pernambuco.** 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2008.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, A. T. Adubação Fosfatada. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. Ed. Brasília: **Embrapa Cerrados**. p. 147-168. 2004.

SOUZA, J. A.; DAVIDE, A. C. Deposição de serapilheira e nutrientes em uma mata não minerada e em plantações de bracatinga (*Mimosa scabrella*) e de eucalipto (*Eucalyptus saligna*) em áreas de mineração de bauxita. **Cerne**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 101-113, 2001.

SOUZA, R. F. et al. Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1535-1544, 2007.

TONELLO, L. S. **Estresse oxidativo em trigo causado por diferentes disponibilidades de fósforo em solução hidropônica.** 68 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade de Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS. 2011.

VINOCUR, B.; ALTMAN, A. Recent advances in engineering plant tolerance to abiotic stress: achievements and limitations, **Current Opinion Biotechnology**, v.16, p.123–132, 2005.

VOLKSWEISS, S.; RAIJ, B. van. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: FERRI, M. G., (Coord.) SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO: BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4. Belo Horizonte. **Anais**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1977. p. 317-332. 1977.

WALKER, T.W.; SYERS, J. K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, v.15, p.01-19, 1976.

## **Capítulo I**

### **Alocação de fósforo no solo proveniente de fontes de diferentes solubilidades**

## Resumo

O fracionamento de fósforo inorgânico é importante para se avaliar as formas com que o P está sorvido ao solo, visto que, a eficiência de um extrator de P disponível depende de sua capacidade de extrair cada uma das frações de Pi do solo. Objetivo desse trabalho foi avaliar, em solo com maior presença do mineral caulinita na fração argila, a disponibilidade de P e as frações de Pi após a realização da fosfatagem com fertilizantes de solubilidade variada. O experimento foi implantado, em condições de campo, na Zona da Mata do Estado de Pernambuco. Os tratamentos consistiram da aplicação de três fontes P em área total; Superfosfato Triplo (ST); Fosfato Natural Reativo (FNR) e Torta de Filtro (TF), nas doses de 50, 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, bem como um tratamento adicional sem a realização da fosfatagem. Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso, utilizando o esquema fatorial de (3 x 4) +1, com quatro repetições. Aos 30, 120 e 210 dias após aplicação dos tratamentos (DAAT) foram coletadas, na entrelinha da cana-de-açúcar, amostras de solonas camadas de 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, sendo determinado o teor de P-disponível em Mehlich-1 e Resina de troca iônica mista, o P-rem e pH das amostras. O fracionamento do Pi foi determinado nas mesmas amostras anteriores, porém apenas nos tratamentos 0, 100 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sendo determinados o P facilmente solúvel (P-H<sub>2</sub>O), P ligado ao alumínio (P-Al), P ligado ao ferro (P-Fe) e o P ligado ao cálcio (P-Ca). O P-rem não diferenciou com as doses e fontes de P, bem como apresentou recuperação acima de 50 mg dm<sup>-3</sup>, o que evidenciou a baixa capacidade de adsorção específica e precipitação de Pi da camada de 0-30 m desse solo. As fontes e as maiores doses de P utilizadas para fosfatagem elevaram os teores de P-disponível pelos extratores Mehlich-1 e Resina, a valores acima do nível crítico de P no solo para cana-de-açúcar, o que demonstra a possibilidade de realizar a fosfatagem em solo com mais 350 g kg<sup>-1</sup> de argila, como forma de recuperar os teores de P no solo. O fracionamento do Pi demonstrou que o uso do fosfato natural reativo de gafsa elevou os teores de P-H<sub>2</sub>O e o uso de uma fonte acidulada como superfosfato triplo reduziu, por outro lado essas fontes de P promoveram a menor e maior teores do P-Fe.

**Palavras-chaves:** fracionamento de fósforo inorgânico, disponibilidade de fósforo, solo caulinitico.

## **Abstract**

The inorganic phosphorus fractionation is an important way to evaluate the way in which P is sorbed to the soil, since the efficiency of P extractor available depends on your ability to extract each of the Pi fractions of soil. Objective of this study was to evaluate, in soils with higher presence of the mineral kaolinite in the clay fraction, the availability of P and Pi fractions after the realization of phosphating with varying solubility of fertilizers. The experiment was carried out under field conditions in the State of Pernambuco Forest Zone. The treatments consisted of three P sources in total area, Triple superphosphate (ST); Natural Reactive Phosphate (FNR) and Filter cake (TF) at doses of 50, 100, 200 and 300 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as well an additional treatment without performing the phosphating. The treatments were arranged in a randomized block design, using the factorial of (3 x 4) + 1, with four replications. At 30, 120 and 210 days after treatment (DAAT) were collected between rows of cane sugar, soil samples in the layers 0-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m, being determined available P content in Mehlich-1 and mixed ion exchange resin, the P-rem, pH of the samples. The fractionation Pi was determined in the same previous samples, but only in the treatments at 0, 100 and 300 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, being determined readily soluble P (P-H<sub>2</sub>O), aluminum to bound P (P-Al) P attached to the iron (P-Fe) and P bound to the calcium (Ca-P). The P-rem did not differ with the doses and sources of P and had recovery above 50 mg dm<sup>-3</sup>, which showed the low specific adsorption capacity and Pi precipitation of 0-30 m of the soil layer. The sources and the higher doses of P used for phosphating increased the levels of P-available by Mehlich-1 and resin, the values above the critical level of soil P to sugarcane, which demonstrates the ability to perform the phosphating in soil with more 350 g kg<sup>-1</sup> clay, in order to recover the P content in the soil. The fractionation Pi demonstrated that the use of a natural reactive phosphate gafsa raised P H<sub>2</sub>O content and the use of an acidulated source as triple superphosphate reduced, on the other hand these sources of P promoted lowest and highest levels of P-Fe.

**Key words:** inorganic phosphorus fractionation, phosphorus availability, kaolinitic soil.

## **Introdução**

Os solos das regiões tropicais são, em sua maioria, mais desenvolvidos mineralogicamente e naturalmente pouco férteis, sobretudo, quando a fertilidade está relacionada com a disponibilidade de fósforo (P). Nesses solos, a fração argila é dominada por caulinita, gibsita, goethita e hematita, apresentando geralmente pH ácido e presença de óxidos cristalinos e amorfos de Fe e Al (QAFOKU et al., 2004). Assim, a baixa disponibilidade de P se relaciona, principalmente, à adsorção de íons ortofosfato aos grupamentos superficiais Fe-OH e Al-OH, por meio de troca de ligantes com o estabelecimento de ligações covalentes (BROGGI et al., 2010), o que reduz a capacidade do solo de disponibilizar P em solução.

Além da fixação de P aos minerais de argila, a redução da disponibilidade de P em solos mais intemperizados também ocorre por meio de sua precipitação com Al, Fe e Ca livres em solução, sendo essas reações dependentes do pH; quando baixo, as reações se processam com o Al e Fe; quando alto, a carga superficial das partículas do solo tornam-se mais negativas, aumentando a repulsão entre o fosfato e a superfície adsorvente, o que promoverá redução da fixação de P e aumento da precipitação com o Ca disponível em solução (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Vale ressaltar que, nem todos os solos apresentam alta capacidade de fixação de P. Isso é resultante, sobretudo, das variações entre os solos no que diz respeito ao teor, tipo de argila e conteúdo de óxidos de ferro e alumínio. Ranno et al. (2007) estudando 16 solos do Rio Grande do Sul encontraram correlação direta entre os teores de argila, Fe e matéria orgânica na capacidade máxima de adsorção de fósforo, demonstrando a influência da composição do solo na sorção de P.

Cessa et al (2009) avaliando a área superficial específica, a porosidade das frações argila, caulinita natural, goethita e hematita sintéticas de Latossolos Vermelhos distroférico e Latossolos Vermelhos distrófico do Estado de Mato Grosso do Sul, concluíram que os óxidos de Fe e de Al, bem como outros materiais amorfos das frações argila extraídas dos solos, foram importantes para a adsorção de P.

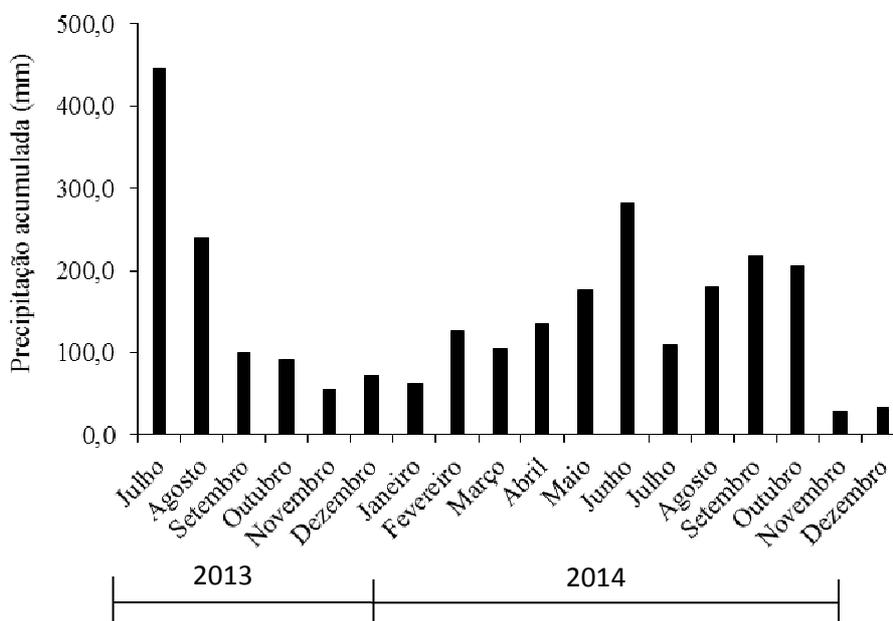
Assim o objetivo desse trabalho foi avaliar, em solo com maior presença do mineral caulinita na fração argila, a disponibilidade de P e as frações de Pi após a realização da fosfatagem com fertilizantes de solubilidade variada.

## MATERIAL E MÉTODOS

### *Condução experimental*

A pesquisa foi realizada em condições de campo na Zona da Mata do Estado de Pernambuco, no período de julho de 2013 a dezembro de 2014, durante a safra agrícola de 2013/2014 (cana planta de ano e meio). O experimento foi implantado na área agrícola da Usina Cucaú, situado no município de Ribeirão, PE, na latitude de 08° 30' 24'' S e longitude de 35° 22' 52'' W. De acordo com o sistema Köppen, o clima dominante na região é o Tropical As', tropical chuvoso com verão seco. Durante a condução do experimento a precipitação acumulada foi de 2.667,0 mm (Figura 1).

O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO AMARELO distrófico, com textura franco-argilosa (Embrapa, 2013) (Tabela 1). A caracterização química e física foi realizada nas profundidades 0,0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m (Tabela 1). A identificação dos minerais presente na fração argila foi realizada por difratogrametria de raios X (WHITTING & ALLARDICE, 1986) em três profundidades: 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Figura 2).



**Figura 1.** Precipitação pluviométrica durante a condução do experimento, em Ribeirão – Pernambuco.

Quimicamente os solos foram caracterizados pelo pH (H<sub>2</sub>O), Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>), P, M.O, Fe, Cu, Zn e Mn. O Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> foram extraídos com

KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e dosados por titulometria; o P, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Fe, Cu, Zn e Mn foram extraídos por Mehlich-1, sendo o P dosado por colorimetria, o K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> por fotometria de chama e o Fe, Cu, Zn e Mn por espectrofotometria de absorção atômica (EMBRAPA, 2009). A acidez potencial (H+Al<sup>3+</sup>) foi extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> e dosado por titulometria. Todas as análises foram realizadas conforme metodologias descritas pela EMBRAPA (2009). A matéria orgânica (M.O) foi determinada pelo método colorimétrico (RAIJ et al., 2001) (Tabela 1). Fisicamente foi determinado no solo a granulometria, definindo sua classe textural de acordo com Ruiz (2005a), densidade do solo, densidade das partículas, umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) (EMBRAPA, 1997) (Tabela 1).

Após a aplicação e incorporação dos corretivos de solo, foi realizada a marcação das parcelas experimentais e aplicado os tratamentos. Os tratamentos consistiram na utilização de três fontes e quatro doses de P, aplicadas em área total e incorporadas com grade leve a 0,10 m de profundidade, bem como um tratamento controle sem a realização da fosfatagem.

As fontes utilizadas foram o Superfosfato Triplo (ST); Fosfato Natural Reativo (FNR - 'Gafsa: 30 % do P total solúvel em ácido cítrico) e Torta de Filtro *inatura* (TF: 42 % de umidade), calculados para atender as doses 50, 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Para a fonte torta de filtro, foi realizada a caracterização química, sendo determinados os valores de 12,5; 36,9; 2,40; 186,0 g kg<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O e Matéria Orgânica, respectivamente.

Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso, utilizando o esquema fatorial de (3 x 4) + 1, com quatro repetições, perfazendo o total de 52 parcelas experimentais. As parcelas experimentais foram constituídas de 6 linhas de cana-de-açúcar com 20 m de comprimento (120 m<sup>2</sup>), espaçadas a 1,0 m entre si. Para a área útil das parcelas, foi considerada as 4 linhas centrais com 18 m de comprimento.

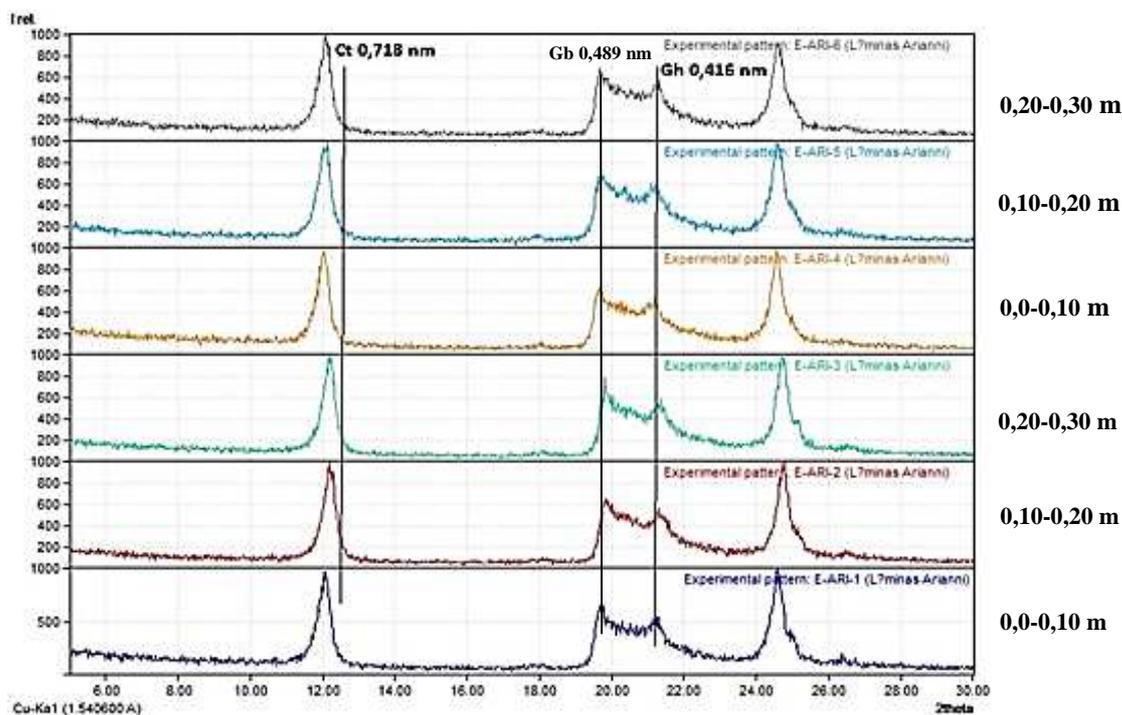
Na sequência, realizou-se a abertura dos sulcos de plantio, sendo acomodados os colmos sementes da variedade RB867515, contendo de 2 a 3 gemas, de modo a se obter 23 gemas por metro. Em seguida foi realizada a adubação de plantio, sendo aplicados 25 kg ha<sup>-1</sup> de N e 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de fosfato monoamônio (MAP).

**Tabela 1.** Caracterização química e física do solo da área experimental, nas profundidades de 0,0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m.

<i>Atributos do Solo</i>	<i>Química do Solo</i>	
	<i>Profundidade (m)</i>	
	0,0-0,20	0,20-0,40
pH (H <sub>2</sub> O 1:2,5)	5,50	5,30
H <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,90	3,70
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,40
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,30	2,40
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,30	0,20
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,14	0,05
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,04	0,03
SB <sup>(1)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,78	2,68
CTC <sub>potencial</sub> <sup>(2)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,68	6,78
CTC <sub>efetiva</sub> <sup>(3)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,78	3,08
V <sup>(4)</sup> (%)	43,54	39,52
m <sup>(5)</sup> (%)	0,00	12,98
M.O (%)	3,26	2,40
P (mg dm <sup>-3</sup> )	2,00	2,00
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	160,00	227,30
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,20	0,10
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	2,10	1,80
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	2,00	1,50
Ca/Mg	11,00	12,00
Ca/K	23,83	44,57
	<i>Física do Solo</i>	
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	429,4	361,4
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	174,6	230,5
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	396,0	408,1
D <sub>s</sub> <sup>(6)</sup>	1,35	1,48
D <sub>p</sub> <sup>(7)</sup>	2,34	2,43
θ <sub>vcc</sub> <sup>(8)</sup> (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,17	0,12
θ <sub>vppm</sub> <sup>(9)</sup> (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,20	0,21
Classe Textural	Franco Argilosa	Franco Argilosa

<sup>(1)</sup> Soma de base; <sup>(2)</sup> Capacidade de troca de cátions potencial; <sup>(3)</sup> Capacidade de troca de cátions efetiva; <sup>(4)</sup> Saturação por bases; <sup>(5)</sup> Saturação por alumínio; <sup>(6)</sup> densidade do solo; <sup>(7)</sup> Densidade das partículas; <sup>(8)</sup> Capacidade de campo; <sup>(9)</sup> Ponto de murcha permanente.

Aos 90 DAP realizou-se a adubação de cobertura, no qual foram aplicados 35 kg ha<sup>-1</sup> de N e 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, na forma de sulfato de amônio e cloreto de potássio, respectivamente. Assim, o total de nutrientes aplicados foram 60 kg ha<sup>-1</sup> de N; 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.



**Figura 2.** Difratomogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 - 0,10, 0,10 - 0,20, 0,20 - 0,30 m em Latossolo Amarelo Distrofico de Ribeirão-PE. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.

#### *Determinação do P-disponível*

Para a determinação do P-disponível foram coletadas, em todos tratamentos amostras de solo entre as linhas de plantio da cana-de-açúcar, de modo a não haver misturas de camadas de solo que não receberam os tratamentos ou influência da adubação fosfatada de plantio. As amostragens foram realizadas aos 30, 120 e 210 dias após o plantio (DAP) nas profundidades de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m. Para composição das amostras foram realizadas na área útil das parcelas, 3 amostragens simples para formar uma amostra composta. Após a coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com abertura de malha de 2 mm.

Para extração dos teores do P-disponível, utilizou-se a Resina de troca iônica (RAIJ et al., 2001) e extrator duplo ácido Mehlich-1 (EMBRAPA, 2009). Para avaliar o potencial de adsorção específica e precipitação do P do solo, determinou-se fósforo remanescente (P-rem). Adicionalmente ao P disponível e P-rem foi determinado o pH (H<sub>2</sub>O) das amostras de solo coletadas.

No P-disponível pelo extrator Mehlich-1 foi utilizado a relação solo:solução (v/v) 1:10 sendo agitados por 5 minutos e posteriormente determinado por colorimetria, conforme Braga & Defelipo (1974). Para Resina utilizou-se a metodologia de Raij et al. (2001). O P-rem, foi extraído a partir da agitação por 1 h, da terra fina seca ao ar (TFSA) com a solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ , contendo  $60 \text{ mg L}^{-1}$  de P, na relação de 1:10 sendo determinado por colorimetria, de acordo com Alvarez V. et al. (2000).

#### *Fracionamento do P inorgânico*

Para o fracionamento de fósforo inorgânico (Pi) utilizou-se as doses de 0, 100 e  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . A determinação das frações Pi no solo foram realizadas conforme o método descrito por Chang & Jackson (1957) com adaptações sugeridas por Souza Júnior et al., (2012). Para o fracionamento foi realizado extrações sequenciais do Pi conforme os procedimentos descrito a seguir.

#### **Extração do Pi facilmente solúvel (P-H<sub>2</sub>O)**

Pesou-se 0,5 g de solo (TFSA) e adicionou-se em erlenmeyer de 125 mL 25 mL de  $\text{NH}_4\text{Cl}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ , seguido de agitação durante 30 min em mesa agitadora horizontal. Após esse período, a suspensão foi centrifugada durante 5 min a 1.800 rpm, e o sobrenadante filtrado em papel de filtro e transferido para balão volumétrico de 50 mL, que teve seu volume completado com água deionizada (extrato A), no qual determinou-se a concentração de P e calculou-se o teor de P-H<sub>2</sub>O em solução.

#### **Extração do Pi ligado ao alumínio (P-Al)**

O resíduo de solo que ficou no tubo de centrífuga foi transferido para erlenmeyer de 125 mL, no qual foi adicionado 25 mL de  $\text{NH}_4\text{F}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  (pH 8,2), seguido de agitação em agitador horizontal por uma hora. Passado esse período, a suspensão foi centrifugada durante 5 min a 1.800 rpm, sendo o sobrenadante, filtrado em papel-filtro e transferido para balão volumétrico de 50 mL (extrato B). O resíduo de solo foi lavado duas vezes com porções de 12,5 mL de NaCl saturado sendo posteriormente centrifugado. As soluções de lavagem foram misturadas com o extrato B, e o volume, ajustado para 50 mL com água deionizada, no qual foi determinada a concentração de P e calculado o teor de P-Al no solo.

### **Extração do Pi ligado a ferro (P-Fe)**

O resíduo de solo do tubo de centrífuga foi transferido para erlenmeyer de 125 mL, em seguida adicionou-se 25 mL de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e agitou-se por 17 h. Posteriormente, a suspensão foi centrifugada durante 5 min a 1.800 rpm, e o sobrenadante, filtrado em papel de filtro e transferido para balão volumétrico de 50 mL (extrato C). O resíduo de solo foi lavado duas vezes com porções de 12,5 mL de NaCl saturado e em seguida centrifugado.

As soluções de lavagem foram misturadas com o extrato C, e o volume foi ajustado para 50 mL com água deionizada. Para eliminar a turbidez do extrato C, adicionou-se 4 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 mol L<sup>-1</sup>, seguido de agitação com bastão de vidro. Quando necessário, adicionaram-se gotas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado até a floculação completa dos coloides. Na sequência, o extrato C foi centrifugado novamente durante 5 min a 1.800 rpm e filtrado em papel de filtro para obtenção de um extrato límpido, a ser transferido para balão volumétrico de 50 mL. Sendo em seguida, determinada a concentração de P no extrato C e calculado o teor de P-Fe no solo.

### **Extração do Pi ligado a cálcio (P-Ca)**

O resíduo de solo remanescente da extração do P-Fe foi transferido para erlenmeyer de 125 mL, no qual se adicionou 25 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,25 mol L<sup>-1</sup>; em seguida a suspensão foi agitada durante uma hora. Após esse período, a suspensão foi centrifugada durante 10 min a 1.800 rpm e filtrada em papel de filtro, e o sobrenadante, transferido para balão volumétrico de 50 mL (extrato D). O resíduo de solo foi lavado duas vezes com porções de 12,5 mL de NaCl saturado e, em seguida, a suspensão foi centrifugada. As soluções de lavagem foram misturadas com o extrato D, e o volume, ajustado para 50 mL com água deionizada. Na sequência, foi determinada a concentração de P no extrato D e calculado o teor de P-Ca no solo.

A determinação de P nos extratos foi feita por colorimetria, conforme Braga & Defelipo (1974). O Pi total (Pi-total) foi obtido mediante a soma dos teores de P-H<sub>2</sub>O, P-Al, P-Fe e P-Ca.

#### *Análise estatística*

O P-disponível, o P-rem e o pH do solo foram submetidos a análise de contraste ortogonal e quando houve diferença significativa foi realizada a análise de variância

(ANAVA), utilizando o delineamento de blocos ao acaso em arranjo fatorial (3x4) + 1, para cada tempo e profundidade separadamente, ao nível de 5 % de significância pelo teste F.

Quando significativo pela ANAVA, os dados quantitativos foram ajustados a modelos polinomiais de primeira e segunda ordem. Como critério para escolha dos modelos de regressão, foram selecionados aqueles que apresentassem maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e significância dos parâmetros da equação até 10 % de probabilidade pelo teste t. Os dados qualitativos significativos tiveram as médias comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Para os valores de Pi obtidos pelo fracionamento foi realizada a ANAVA ao nível de 5 % de significância pelo teste F. Para avaliar o efeito das doses e das fontes utilizou-se o delineamento de blocos ao acaso em arranjo fatorial (3x3) + 1, para o tempo de 30 DAP, em cada profundidade separadamente. A transformação do Pi nos tempos 30, 120 e 210 DAP, com uso das diferentes fontes foi realizada apenas na dose de 300 kg ha<sup>-1</sup>, utilizando o delineamento de blocos ao acaso em arranjo fatorial (3x3) + 1. Os dados quando significativos tiveram as média comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Para as análises estatísticas utilizou-seo programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

## **Resultados e Discussão**

O P remanescente (P-rem) e o pH (H<sub>2</sub>O) do solo, não apresentaram diferença entre as doses e fontes utilizadas para todos os tempos e profundidades avaliadas (Apêndice A). O P-rem apresentou valores médios de 56,8, 56,9 e 56,9 mg dm<sup>-3</sup> nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Nas mesmas profundidades, os valores médios do pH (H<sub>2</sub>O) foram de 5,4, 5,3 e 5,2, respectivamente.

Os valores de P-rem acima de 50 mg dm<sup>-3</sup> em todas as profundidades, demonstra a baixa capacidade de adsorção específica e precipitação do P na camada de 0-0,30 m, na qual foi realizada a fosfatagem. Mesmo com os teores de argila superiores a 350 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 1), que seria o indicativo de não realizar a fosfatagem, a presença predominante do mineral caulinita (Figura 1) reduziu o potencial dreno de P do solo. Cessa et al. (2009) avaliando a área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de P em dois Latossos Vermelhos observaram que a caulinita, embora tenha sido o filossilicato de maior representatividade na fração argila, teve menor importância sobre o fenômeno de adsorção de P. De acordo com Barron et al. (1988) e Celi et al.

(2003), a baixa adsorção de P sobre caulinita é devida ao menor número de sítios ativos, no caso OH.

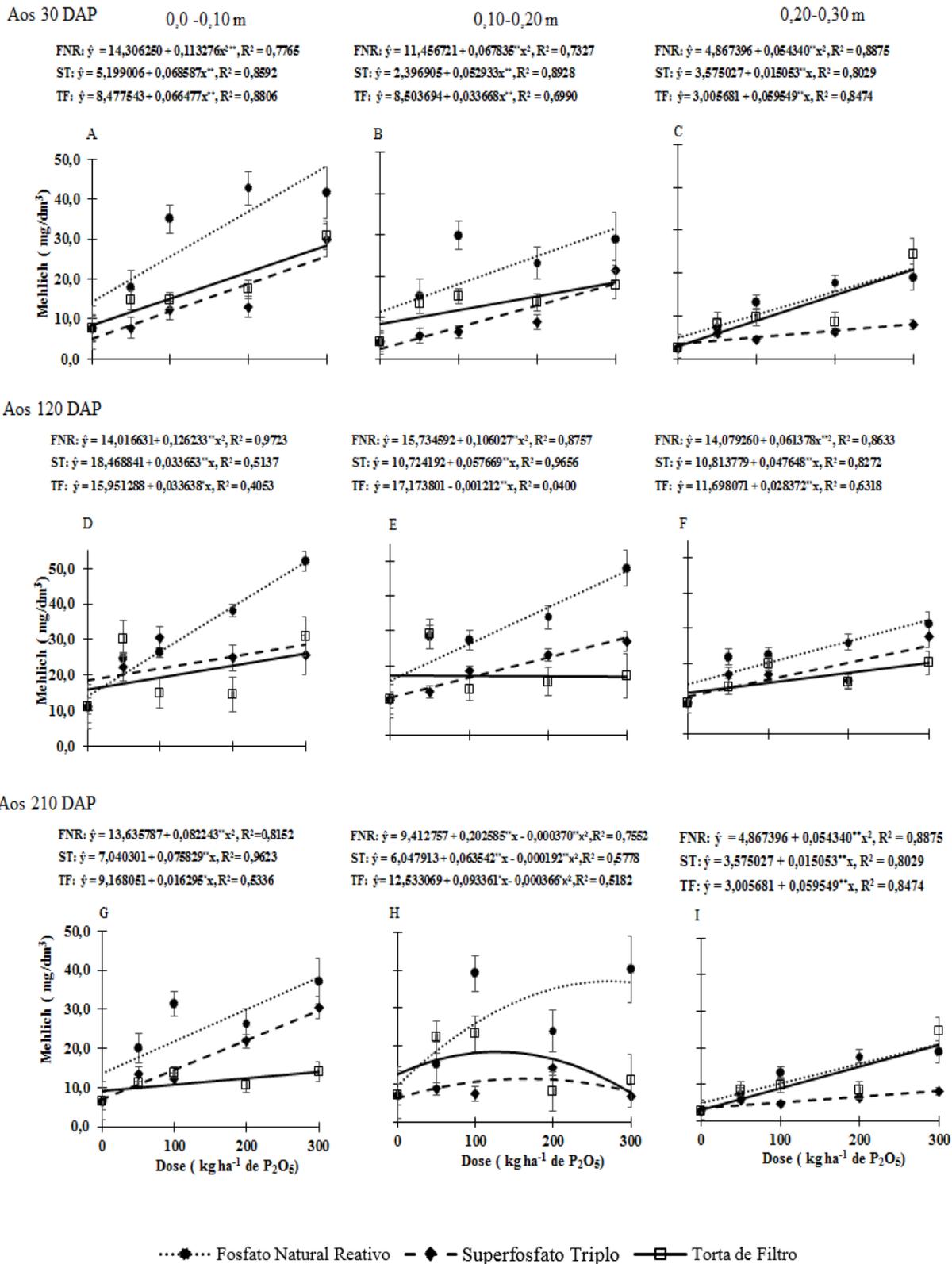
As doses das diferentes fontes utilizadas na fosfatagem aumentaram os teores do P-disponível no solo, entre as linhas de plantio da cana-de-açúcar, em todas as profundidades, sendo observada diferenças no comportamento das fontes pelo extrator utilizado (Figuras 3 e 4). No P-disponível extraído pelo Mehlich-1 os maiores valores foram observados com uso FNR até a profundidade de 0,20 m, em todos os tempos avaliados (Figura 3). Na profundidade de 0,20-0,30 m não se observou diferença com o uso do FNR e a TF para fosfatagem, tendo apresentado os maiores teores de P, exceto aos 120 DAP, quando as fontes utilizadas não se diferenciaram (Figura 3 C; F; I).

Com uso da Resina como extrator verificou-se que os teores de P com o FNR e o ST não diferiram, tendo se observado os maiores teores (Figura 4) até a profundidade de 0,20 m em todos os tempos, exceto aos 120 DAP, quando o uso das fontes não diferiram (Figura 4 D; E). Na profundidade de 0,20-0,30 m a aplicação do ST levou a menores incrementos, sendo observado os menores teores de P, quando comparadas com FNR e a TF (Figura 4 C; F; I)

Os valores superestimados do P-disponível pelo extrator Mehlich-1 quando se utilizou o FNR já era esperado, uma vez que o método utiliza ácidos, que tem a capacidade de dissolver os minerais de apatitas liberando "P-não disponível" para a solução (LOPES et al., 1982). A limitação do uso do extrator Mehlich-1 para solos adubados com fosfatos naturais foi observado por Holanda et al. (1995), quando observaram que o P-disponível obtido pelo extrator Mehlich-1, apenas apresentou alta correlação com produção de matéria seca e o P acumulado nas plantas de arroz nos tratamentos em que se utilizou fontes de fósforo aciduladas.

Simões Neto et al. (2009) avaliando métodos de extração para estimativa do P-disponível em solos da Zona da Mata do Nordeste, cultivados com cana-de-açúcar, observaram que o extrator Resina se mostrou mais adequado para estimar o P-disponível. Sendo desta forma o extrator mais recomendado para determinar a disponibilidade de P em solos que receberam a prática da fosfatagem, para qualquer fonte utilizada.

Independente do extrator utilizado observou-se que o FNR, de menor solubilidade em água, se mostrou eficiente em elevar os teores de P no solo sem diferenciar do ST e TF, que possuíam o P prontamente disponível. Possivelmente o pH ácido que variou entre 5,2 e 5,5 entre as profundidades aumentou o potencial de solubilização do P-FNR.



**Figura 3.** P-disponível pelo extrator Mehlich-1 aos 30 (A, B, C), 120 (D, E, F) e 210 (G, H, I) dias após o plantio (DAP), em função da fosfatagem com fontes de solubilidade variada. FNR: Fósforo natural reativo; ST: Superfósforo triplo; TF: Torta de filtro. Barras na vertical demonstram o intervalo de confiança a  $p \leq 0,05$ .



Lana et al. (2004) avaliando a produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de Cerrado, verificaram que o P disponível pelo fosfato reativo de Arad apresentou baixo teor, o que segundo os autores provavelmente ocorreu devido ao solo estar com acidez corrigida, o que reduziu a solubilização do fósforo nessa fonte.

Para os teores de P entre as profundidades, verificou-se que a prática da fosfatagem ficou limitada aos 0,20 m profundidade para os dois extratores utilizados, no qual os maiores teores de P foram obtidos até 0,10 m (Figura 3 e 4), principalmente aos 30 e 120 DAP. Após 210 dias os teores de P entre as profundidades 0-0,10 e 0,10-0,20 m não apresentaram diferenças.

Na profundidade de 0-0,20 m os valores P-disponível, aos 30 DAP, para as doses de 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> variaram de 13 a 48 mg dm<sup>-3</sup> de P no extrator Mehlich-1 e de 10 a 68 mg dm<sup>-3</sup> de P com a RTI (Figura 3 e 4). Os valores mínimos e máximos estão, respectivamente, dentro da classificação média e acima do nível crítico de P no solo recomendados por Simões Neto et al. (2015) para cana-de-açúcar no Nordeste, o que demonstra que as doses e as fontes utilizadas na fosfatagem atenderam o objetivo de elevar os teores de P no solo e pode ser utilizado em solo argiloso quando a fração argila possui predominância do mineral caulinita.

As frações do fósforo inorgânico (Pi), aos 30 DAP, apresentaram diferença entre as doses e as fontes em todas as profundidades, exceto para P-Al nos primeiros 0,10 m de profundidade, no qual verificou-se apenas efeito das doses (Tabela 2).

Nos 30 primeiros dias, a fosfatagem utilizando o FNR e o ST na dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, aumentou os teores de Pi-total em todas as profundidades, enquanto que na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o incremento do Pi nos 0,30 m de solo foi observado apenas com uso do FNR (Tabela 2). Por outro lado, o incremento do Pi-total com a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> utilizando o ST foi verificada apenas na profundidade de 0,20-0,30 m e nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m para TF (Tabela 2).

Em geral, todas as fontes aumentaram o Pi-total no solo aos 30 DAP (Tabela 2), o que demonstra a necessidade de identificar quais as transformações do P no solo após a fosfatagem.

Entre as frações do Pi, o FNR incrementou teores P-H<sub>2</sub>O em todas as profundidades, independente da dose utilizada (Tabela 2). Os incrementos nos teores de P solúvel no FNR ocorreram por esta fonte solubilizar o P lentamente para a solução do solo, o que resulta em maior teor de P solúvel. Com uso da TF verificou-se aumento no

P solúvel com a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, porém redução dos teores com o aumento da dose.

Essa redução do P solúvel na torta de filtro pode ser devido a essa fonte fornecer o P mais rapidamente ao solo, segundo Rossetto & Santiago (2015), cerca de 50% do fósforo presente na torta pode ser considerado prontamente disponível, o restante será mineralizado mais lentamente. Assim, o aumento da dose proporcionou maior teor de P no solo, que levou a precipitação deste com Fe, Al e Ca presentes na solução, resultando em menor teor de P solúvel.

Com uso do ST, os teores de P-H<sub>2</sub>O foram os menores entre as fontes, possivelmente a maior solubilidade desse fertilizante proporcionou maior incremento de P na solução, nos 30 primeiros dias e como consequência, maior reação com o Fe, como pode ser visto na fração P-Fe, no qual os teores dessa fração com uso do ST foram os maiores entre as fontes utilizadas (Tabela 2). Para esta fração, os teores de P-Fe com uso do FNR e TF não apresentaram diferença ou foram menores quando comparada ao solo que não recebeu a fosfatagem (Tabela 2).

A fração P-Al nos primeiros 0,10 m de profundidade apresentou apenas efeito das doses, sendo observado incremento dos teores com a fosfatagem (Tabela 2). Para as profundidades de 0-0,20 e 0,20-0,30 m, o P-Al foi maior com uso da TF, por outro lado com uso do FNR apenas verificou-se incremento dessa fração com a dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na camada de 0,10-0,20 m (Tabela 2).

Os maiores teores de P-Al para o FNR e a TF pode ser devido ao fato de que a medida que o P esteja sendo solubilizado por essas fontes, estejam reagindo com o Al presente na solução, oriundo da gibbsita que, embora tenha apresentado menor pico que a caulinita (Figura 2), apresenta grande capacidade de fixação por ter grande área de superfície específica e por promover adsorção específica com o fósforo. Refletindo a influência do material de origem sobre a dinâmica do fósforo no solo. Rocha et al (2005), avaliando as frações de fósforo orgânico e inorgânico em perfis de solo de Fernando de Noronha por meio do fracionamento de P, encontraram os menores teores de Pi na fração P-Al com valores variando de 0 a 23 mg kg<sup>-1</sup>, o que reflete a influência do material de origem dos solos da ilha.

A fração de P-Fe nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m foram maiores no ST, com valores variando de 17,5 a 21,3 mg dm<sup>-3</sup> na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e de 19,6 a 25,6 mg dm<sup>-3</sup> na dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Tabela 2).

**Tabela 2.** Frações de fósforo inorgânico no solo, em função da fosfatagem com doses e fontes de solubilidade variada, aos 30 DAP. FNR: Fosfato natural reativo; ST: Superfosfato triplo; TF: Torta de filtro.

DOSE kg ha <sup>-1</sup>	Pi Total				P-H <sub>2</sub> O				P-Al				P-Fe				P-Ca			
	FNR	ST	TF	Media	FNR	ST	TF	Media	FNR	ST	TF	Media	FNR	ST	TF	Media	FNR	ST	TF	Media
0,0-0,10 m																				
0	41,6 a B	41,6 a B	41,6 a A	41,6	5,6 a B	5,6 a B	5,6 a B	5,6	11,8	11,8	11,8	11,8 B	14,8 a A	14,8 a B	14,8 a A	14,8	9,4 a B	9,4 a B	9,4 a A	9,4
100	48,7 a A	41,0 b B	45,5 ab A	45,0	7,9 a A	2,4 b B	8,9 a A	6,4	14,2	12,9	15,7	14,3 A	14,7 b A	17,5 a B	11,8 b A	14,7	11,9 a B	8,2 b B	9,1 ab A	9,7
300	47,9 b A	53,0 a A	41,2 c A	47,4	6,2 a AB	3,3 b B	5,4 a B	5,0	15,0	13,1	14,2	14,1 A	11,3 b B	25,6 a A	12,3 b A	16,4	15,4 a A	11,0 b A	9,3 b A	11,9
Media	46,02	45,2	42,74		6,6	3,8	6,6		13,6	12,6	13,9		13,6	19,3	13,0		12,2	9,5	9,3	
F Fonte	4,059*				33,294**				2,016 <sup>NS</sup>				43,211**				13,144**			
F Dose	11,776**				6,326**				8,121**				3,354*				9,345**			
F Fontex Dose	9,730**				13,488**				1,064 <sup>NS</sup>				20,880**				4,594**			
C.V	6,57				17,37				12,50				12,07				15,13			
0,10-0,20 m																				
0	33,4 a B	33,4 a B	33,4 a C	33,3	3,3 a B	3,3 a AB	3,3 a B	3,3	11,0 a B	11,0 a AB	11,0 a C	11,0	12,8 a A	12,8 a C	12,8 a A	12,8	6,3 a C	6,3 a B	6,3 a B	6,3
100	42,2 b A	34,4 c B	56,1 a A	44,2	5,3 a A	2,3 b B	6,2 a A	4,6	12,9 b AB	9,6 c B	21,0 a A	14,5	13,4 b A	17,8 a B	15,0 b A	15,4	10,6 b B	4,7 c B	13,9 a A	9,7
300	43,4 ab A	47,6 a A	41,9 b B	44,3	6,1 a A	4,0 b A	0,2 c C	3,4	14,1 a A	12,6 b A	15,4 a B	14,00	9,9 c B	20,9 a A	12,8 b A	14,5	13,3 a A	10,1 b A	13,5 a A	12,3
Media	39,6	38,3	43,8		4,9	3,2	3,2		12,7	11,1	15,8		12,0	17,0	13,5		10,1	7,0	11,2	
F Fonte	9,987**				30,481**				28,050**				31,626**				31,488**			
F Dose	48,340**				17,296**				17,101**				7,724**				61,672**			
F Fontex Dose	22,478**				55,120**				15,253**				13,249**				12,738**			
C.V	7,7				16,22				11,94				11,24				14,19			
0,20-0,30 m																				
0	29,7 a B	29,7 a B	29,7 a C	29,7	3,5 a B	3,5 a A	3,5 a B	3,5	8,7 a B	8,7 a A	8,7 a B	8,7	11,3 a A	11,3 a B	11,3 a B	11,3	6,2 a B	6,2 a B	6,2 a B	6,2
100	35,7 c A	42,0 b A	51,3 a A	43,0	6,3 a A	3,0 b A	5,9 a A	5,1	13,1 b A	10,1 c A	15,9 a A	13,0	5,9 c B	21,3 a A	15,0 b A	14,1	10,4 b A	7,6 b AB	14,5 a A	10,8
300	32,9 b AB	41,0 a A	35,7 ab B	36,5	6,0 a A	3,3 b A	1,5 c C	3,6	13,3 a A	8,3 b A	13,9 a A	11,8	6,2 c B	19,6 a A	12,5 b AB	12,8	7,4 a AB	9,8 a A	7,8 a B	8,3
Media	32,8	37,5	38,9		5,3	3,2	3,6		11,7	9,0	12,8		7,8	17,4	12,9		8,0	7,8	9,5	
F Fonte	10,887**				21,228**				28,372**				62,504**				2,450 <sup>NS</sup>			
F Dose	50,543**				13,941**				37,541**				5,270*				21,208**			
F Fontex Dose	9,190**				15,736**				7,888**				16,106**				7,409**			
C.V	8,99				20,23				11,25				16,49				21,44			

Letras minúsculas iguais na linha e maiúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey, <sup>NS</sup> não significativo; \*, \*\* significativos, respectivamente, aos níveis de 5 e 1%.

Os maiores teores de P-Fe no ST com aplicação da fosfatagem é resultante da maior disponibilidade de P por essa fonte, que proporcionou maior concentração de P na solução do solo e conseqüentemente sua precipitação com o Fe presente no solo oriundo do material de origem goethita (Figura 2) que, assim como a gibbsita apresentou menor pico em comparação com a caulinita. Entretanto esses óxidos apresentam grande poder de adsorção com P tornando-os indisponível para as plantas.

Tem sido constatado na literatura que a goethita, pela sua área superficial específica mais elevada, assume papel preponderante nas reações de superfície desse mineral com adsorção do P (BARROW, 1990; TORRENT et al., 1992). McLaughlin et al. (1981) destacam a participação importante da gibbsita na adsorção de P, mesmo que de forma menos efetiva que a goethita. Almeida et al. (2003) observaram em Latossolos do extremo-sul do Brasil, altos teores de fósforo total, com predomínio das formas associadas aos óxidos de ferro, ligado a compostos orgânicos, adsorvido à superfície de óxidos e associado a compostos de ferro de baixa cristalinidade.

Segundo Rolim Neto et al. (2004) em um conjunto de Latossolos de Minas Gerais, com textura e filiação geológica variáveis, a percentagem e a área superficial dos óxidos de Fe e Al, respectivamente, goethita e gibbsita, têm participação no aumento da adsorção de fosfato. De acordo com estes mesmos autores os teores e superfície específica da caulinita e da hematita não apresentaram correlação significativa na adsorção de P, evidenciando a sua menor participação neste processo. Constatação semelhante foi obtida por Ker (1995) que observou a redução na adsorção de P com o aumento do caráter caulinitico em diversos Latossolos do Brasil.

Como a fosfatagem foi realizada logo após a aplicação de calcário e gesso, também foi determinado a fração do P-Ca, na qual houve aumento com a utilização do FNR e ST nas profundidades de 0-0,10 e 0,10-0,20 m com a dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Tabela 2). Com o uso da TF verificou-se incrementos no P-Ca com a fosfatagem apenas nas profundidades de 0,10-0,20 m com as duas doses e na profundidade de 0,20-0,30 m com aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Os maiores teores de Pi-Ca para o FNR e TF provavelmente é devido gradativa disponibilidade do P para a solução do solo por estas fontes, embora seja considerado que 50% do P da TF seja prontamente disponível e os outros 50% serão disponibilizados de forma gradativa. Assim, parte do P oriundo dessas fontes acaba precipitando com o Ca presente na solução do solo, proveniente do gesso e do calcário aplicado na área durante o preparo do solo, tornando-o indisponível para as plantas. Por

outro lado, os maiores teores no ST na dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> é devido a maior concentração de P na solução do solo, embora que, a maior parte do P tenha reagido com o Fe, a presença de Ca na solução fez com que parte do P em solução reagisse com o Ca.

Comportamento semelhante foi observado por Rocha et al. (2005), avaliando a distribuição das frações orgânicas e inorgânicas mediante o fracionamento de P em perfis de solo da Ilha de Fernando de Noronha, constataram que os teores de P-Ca foram inferiores aos de P-Fe, exceto no Cambissolo Háptico sob pastagem nativa (3.446 mg kg<sup>-1</sup>), onde o horizonte C, com elevados teores de P-Ca, se encontrava recoberto pela formação sedimentar dos horizontes superficiais deste perfil.

Souza Junior et al. (2012), que avaliando os teores das frações de Pi em solos representativos do Estado da Paraíba e sua correlação com características químicas do solo; observou que nos solos com pH alcalino e com teores elevados de Ca<sup>2+</sup>, o Pi foi encontrado principalmente na forma de P-Ca, tendo os valores variado nos solos menos intemperizados de 6,5 a 132,3 mg dm<sup>-3</sup>.

A identificação da contribuição percentual de cada fração do Pi promoverá melhor compreensão das transformações do P no solo após a realização da fosfatagem com fontes distintas. Assim, verificou-se na fração do P-solúvel em água que o uso do FNR promoveu incremento médio de 2,5, 3,0 e 6,0% e obteve as maiores contribuições relativas, entre as fontes, com valores médios de 15,5, 13 e 18% do Pi-total nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente (Tabela 3).

Quando o ST foi utilizado verificou-se redução de 7,0, 5,5 e 4,5% na fração Pi-H<sub>2</sub>O, proporcionando a menor contribuição relativa entre as frações do Pi no solo, com valores médios de 6,0, 4,5 e 7,5 %, nas profundidades de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Para a TF, as maiores contribuições foram observadas aos 0,10 m com valor médio de 16%, enquanto que nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m a contribuição relativa foi em média de 5,5 e 8%, respectivamente (Tabela 3).

Na fração P-Al as fontes FNR e TF não apresentaram diferenças, sendo verificado as maiores contribuições médias relativas de 30 e 34% respectivamente, na profundidade 0,0-0,10 m. Para a profundidade 0,10-0,20m, os valores percentuais foram de 31,5 e 37%, enquanto que na profundidade de 0,20-0,30 m os valores foram de 38,5 e 35% entre as fontes, respectivamente. Com uso do ST, a fração P-Al obteve contribuições menores, com valores médios de 28, 27 e 22% entre as profundidades, respectivamente.

**Tabela 3.** Percentuais das frações de fósforo inorgânico no solo, em função da fosfatagem com doses e fontes de solubilidade variada, aos 30 DAP. FNR: Fosfato natural reativo; ST: Superfosfato triplo; TF: Torta de filtro.

DOSE	Pi Total <sup>(1)</sup>			P-H <sub>2</sub> O			P-Al			P-Fe			P-Ca		
	FNR	ST	TF	FNR	ST	TF	FNR	ST	TF	FNR	ST	TF	FNR	ST	TF
kg ha <sup>-1</sup>	----- mg dm <sup>-3</sup> -----														
0	41,6	41,6	41,6	5,6 (13) <sup>(2)</sup>	5,6 (13)	5,6 (13)	11,8 (28)	11,8 (28)	11,8 (28)	14,8 (36)	14,8 (36)	14,8 (36)	9,4 (23)	9,4 a (23)	9,4 (23)
100	48,7	41,0	45,5	7,9 (17)	2,4 (6)	8,9 (19)	14,2 (29)	12,9 (31)	15,7 (35)	14,7 (30)	17,5 (43)	11,8 (26)	11,9 (24)	8,2 (20)	9,1 (20)
300	47,9	53,0	41,2	6,2 (14)	3,3 (6)	5,4 (13)	15,0 (31)	13,1 (25)	14,2 (34)	11,3 (24)	25,6 (48)	12,3 (30)	15,4 (32)	11,0 (21)	9,3 (23)
10-20 cm															
0	33,4	33,4	33,4	3,3 (10)	3,3 (10)	3,3 (10)	11,0 (33)	11,0 (33)	11,0 (33)	12,8 (38)	12,8 (38)	12,8 (38)	6,3 (19)	6,3 (19)	6,3 (19)
100	42,2	34,4	56,1	5,3 (12)	2,3 (6)	6,2 (11)	12,9 (31)	9,6 (28)	21,0 (37)	13,4 (32)	17,8 (52)	15,0 (27)	10,6 (25)	4,7 (14)	13,9 (25)
300	43,4	47,6	41,9	6,1 (14)	4,0 (3)	0,2 (0)	14,1 (32)	12,6 (26)	15,4 (37)	9,9 (23)	20,9 (44)	12,8 (31)	13,3 (31)	10,1 (21)	13,5 (32)
20-30 cm															
0	29,7	29,7	29,7	3,5 (12)	3,5 (12)	3,5 (12)	8,7 (29)	8,7 (29)	8,7 (29)	11,3 (38)	11,3 (38)	11,3 (38)	6,2 (21)	6,2 (21)	6,2 (21)
100	35,7	42	51,3	6,3 (17)	3,0 (7)	5,9 (12)	13,1 (37)	10,1 (24)	15,9 (31)	5,9 (17)	21,3 (51)	15,0 (29)	10,4 (29)	7,6 (18)	14,5 (28)
300	32,9	41	35,7	6,0 (19)	3,3 (8)	1,5 (4)	13,3 (40)	8,3 (20)	13,9 (39)	6,2 (19)	19,6 (48)	12,5 (35)	7,4 (22)	9,8 (24)	7,8 (22)

<sup>(1)</sup>Pi-total= P-H<sub>2</sub>O + P-Al + P-Fe + P-Ca, para cada fonte. <sup>(2)</sup> Valores em parênteses são expressos em percentagem e referem-se a contribuição de cada fração de Pi para o Pi-Total.

A fração P-Fe apresentou diferenças entre as fontes (Tabela 3). O uso do ST proporcionou nessa fração a maior contribuição relativa do Pi-total, com valor médio de 45,5, 48 e 49,5% nas profundidades de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente. Para as demais fontes, a participação percentual do P-Fe, entre as profundidades, foi de 27, 27,5 e 18% com o FNR e com uso da TF a contribuição relativa foi de 28, 29 e 32%, respectivamente.

Além da maior contribuição relativa, a fonte ST promoveu aumentos na fração P-Fe, na qual se verificou incremento médio entre as doses de 9,5, 10 e 11,5% nas três profundidades, respectivamente. Para as demais fontes, houve diminuição na fração P-Fe com a fosfatagem, com redução de 9,0, 10,5 e 20% com uso do FNR e de 8,0, 9,0 e 6,0% com uso da TF, nas profundidades de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, respectivamente.

Para o P-Ca, os valores percentuais foram inferiores aos observados para P-Al, porém superiores aos encontrados no P-H<sub>2</sub>O (Tabela 3), constatando-se que essa fração contribuiu com 28, 20 e 21%, respectivamente com uso das fontes FNR, ST e TF, até os 0,0-0,10 m de profundidade. Entre os 0,10-0,20 m a contribuição relativa da fração P-Ca foi de 28, 17,5, 28,5%, enquanto que na camada 0,20-0,30 m os valores percentuais foram de 25,5, 21 e 25%, respectivamente (Tabela 3).

A partir da contribuição percentual das frações do Pi observou-se diferenças entre as fontes, sendo possível determinar que a ordem de contribuição relativa com uso do FNR foi de P-Al > P-Ca ≥ P-Fe > P-H<sub>2</sub>O. No entanto, com uso do ST a ordem foi de P-Fe > P-Al > P-Ca > P-H<sub>2</sub>O, enquanto que com a utilização da TF a ordem foi de P-Al > P-Fe > P-Ca > P-H<sub>2</sub>O.

A ordem de contribuição para o ST por ser uma fonte de P prontamente disponível para o solo levou este a reagir principalmente com o Fe e Al, do que com o Ca e H<sub>2</sub>O. Essa reação do P com o Fe e Al ocorre devido a esses elementos catiônicos apresentarem grande capacidade de adsorver e precipitar o P do solo mesmo que, o solo apresente menores quantidades de minerais óxicos (Fe e Al), estes apresentam grande capacidade de reagir com o P, devido sua área de superfície específica e por promover a adsorção específica com o P. Diversos autores demonstraram que, em solos ácidos, os óxidos de ferro da fração argila são os principais responsáveis pela adsorção de fósforo em detrimento de outros minerais, como a gibbsita e a caulinita (HINGSTON et al., 1972; BAHIA FILHO, 1982; SOUZA et al., 1991; CURI, 1993).

A predominância do Pi na fração P-Fe e P-Al também foram observada por Souza Júnior et al. (2012), trabalhando com solos representativos do estado da Paraíba, verificaram que em média 45 e 37% do total do Pi apresenta-se nas frações P-Al e P-Fe e Silva et al. (2003), que, trabalhando com três Latossolos, verificaram que, em média, mais de 80 % do P inorgânico apresenta-se nas frações P-Al e P-Fe. Por outro lado, nos solos alcalinos e com teores elevados de  $\text{Ca}^{2+}$ , tanto o P nativo como o P adicionado como fertilizante precipitam com o  $\text{Ca}^{2+}$  da solução do solo, formando fosfatos de Ca pouco solúveis (GATIBONI et al., 2007).

Por outro lado, a maior contribuição das frações de P-Al nas fontes FNR e TF não são discutidas na literatura, uma vez que, é de se esperar que as reações ocorram principalmente com os óxidos de ferro como mencionado anteriormente. Havendo assim, uma lacuna quanto ao fato dessas fontes terem uma “prioridade” em reagir com o Al do que com o Fe.

As frações do Pi no solo apresentaram interação entre as fontes e o tempo, exceto para a fração P-Al na profundidade de 0,20-0,30 m e para P-Ca na profundidade de 0,10-0,20 m (Tabela 4). O teor de Pi-total aumentou, com uso das fontes no decorrer do tempo na profundidade de 0,0-0,10 m, sendo observado incremento de 49,5; 9,4 e 6,9  $\text{mg dm}^{-3}$  aos 210 DAP para FNR, ST e TF, respectivamente. Nas profundidade de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m apenas o FNR incrementou os teores de Pi-total com ganhos de 6,9 e 44,2  $\text{mg dm}^{-3}$  aos 210 DAP, respectivamente (Tabela 4).

Como as fontes possuem solubilidade diferentes, ou seja, o FNR e a TF necessitam de maior tempo para solubilizar o P enquanto, o ST disponibiliza praticamente quase todo o P para o solo de forma imediata após a aplicação. Dessa forma, é possível observar a liberação gradual do P no período de 210 DAP, sobretudo no FNR, verificando assim o incremento do P aos 210 DAP.

Os teores de Pi solúvel (P- $\text{H}_2\text{O}$ ) aumentaram com uso do FNR e ST no decorrer do tempo na profundidade de 0,0-0,10 m, apresentando incrementos de 1,7 e 4,0  $\text{mg dm}^{-3}$ , respectivamente (Tabela 4). Por outro lado, na TF os maiores teores de P- $\text{H}_2\text{O}$  foram observados aos 30 e 210 DAP. Essa maior disponibilidade do P- $\text{H}_2\text{O}$  na TF aos 30 DAP é devido a uma parte da TF que é prontamente disponível, o que proporcionou incrementos nos teores de P no solo, em contrapartida, o aumento dos teores aos 210 DAP ocorre por conta da gradativa disponibilidade do P da outra parte que não foi prontamente disponibilizada logo após sua aplicação. Nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m todas as fontes aumentaram os teores de P- $\text{H}_2\text{O}$  com o passar do tempo. O

aumento dos teores de P-H<sub>2</sub>O com o passar do tempo para nas diferentes fontes é decorrente de sua disponibilidade de forma gradativa com exceção do ST que tem sua disponibilidade quase toda logo após sua aplicação.

Com relação a fração P-Al, verificou-se que houve aumento do Pi nessa fração com o tempo, em todas as profundidades (Tabela 4), os quais apresentaram incrementos médios de 6,3; 1,8 e 3,5 mg dm<sup>-3</sup>.

Para a fração de P-Fe no FNR houve aumento dos teores com o passar do tempo em todas as profundidades 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, com incrementos de 5,3; 5,1 e 7,5 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente (Tabela 4). Esses resultados reafirmam a ideia de que a medida que as concentrações de P na solução do solo esteja sendo incrementada por meio da solubilização do P por essa fonte o P tende a reagir com o Fe, Al e Ca.

No Pi para a fração P-Ca observou-se aumento dos teores com o passar do tempo apenas para o FNR nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,20-0,30 m, apresentando incrementos de 37,8 e 31,5 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Na profundidade de 0,10-0,20 m não se observou efeito significativo da interação entre fontes e tempo, tendo o FNR apresentado maior teor de P-Ca comparando com o ST, sendo esse teores maiores aos 30 DAP. O incremento do P-Ca com o passar do tempo e os maiores teores no FNR nos tempos avaliados, pode ser porque a medida que o P dessa fontes esteja sendo solubilizado boa parte desse P esteja reagindo com o Ca tornando-se assim indisponível para as plantas.

De modo geral, todas as fontes aumentaram o Pi-total no solo aos 30 DAP (Tabela 4), o que demonstra a necessidade de identificar quais as transformações do P no solo após a fosfatagem.

**Tabela 4.** Frações do fósforo inorgânico no solo, em função da fosfatagem com fontes de solubilidade variada na dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aos 30, 120 e 210 DAP. FNR: Fosfato natural reativo; ST: Superfosfato triplo; TF: Torta de filtro.

FONTE	Pi Total				P-H <sub>2</sub> O				P-Al				P-Fe				P-Ca			
	30	120	210	MEDIA	30	120	210	MEDIA	30	120	210	MEDIA	30	120	210	MEDIA	30	120	210	MEDIA
----- mg dm <sup>-3</sup> -----																				
0,0-0,10 m																				
FNR	47,9 Ba	53,2 b A	97,4 a B	66,2	6,2 b A	7,0 ab A	7,9 a A	7,0	15,0 b A	17,2 ab A	19,7 a B	17,3	11,3 b B	16,6 a A	16,6 a B	14,8	15,4 b A	12,4 b A	53,2 a A	27,0
ST	53,1 b A	40,0 c B	62,5 a B	51,9	3,3 c B	4,8 b B	7,3 a A	5,1	13,1 b A	11,8 b B	23,2 a A	16,0	25,6 a A	14,0 b A	23,1 a A	20,9	11,0 a B	9,4 a A	8,9 a B	9,8
TF	41,1 b B	47,5 a A	48,0 a C	45,5	5,3 a A	2,6 b C	5,3 a B	4,4	14,2 b A	17,0 ab A	18,2 a B	16,5	12,3 b B	17,9 a A	14,3 ab B	14,8	9,3 a B	10,0 a A	10,2 a B	9,8
MEDIA	47,4	46,9	69,3		4,9	4,8	6,8		14,1	15,3	20,4		16,4	16,2	18		11,9	10,6	241	
F Fonte	115,065**				55,386**				1,650 <sup>NS</sup>				25,104**				340,823**			
F Tempo	169,686**				39,137**				44,864**				2,032 <sup>NS</sup>				191,179**			
F Fonte x Tempo	66,784**				17,694**				10,485**				17,650**				202,406**			
C.V	6,25				11,37				10,39				14,38				12,01			
0,10-0,20 m																				
FNR	43,3 b AB	50,2 a A	50,2 a A	47,9	6,1 a A	6,4 a A	6,4 a A	6,3	14,0 b AB	16,8 a A	16,8 a A	15,9	9,9 b C	15,0 a A	15,0 a A	13,3	13,3	12	12	12,4 A
ST	47,6 a A	43,1 a B	43,1 a B	44,6	4,0 b B	5,6 a A	5,6 a A	5,1	12,6 a B	12,9 a B	12,9 a B	12,8	20,9 a A	14,8 b A	14,8 b A	16,8	10,1	9,8	9,8	9,9 B
TF	41,9 a B	40,8 a B	40,8 a B	41,2	0,2 b C	1,4 a B	1,4 a B	1,0	15,4 b A	17,8 a A	17,8 a A	17	12,8 a B	12,0 a B	12,0 a B	12,3	13,5	9,6	9,6	10,9 AB
MEDIA	44,3	44,7	44,7		3,4	4,5	4,5		14	15,8	15,8		14,5	13,9	13,9		12,3 a	10,5 b	10,5 b	
F Fonte	13,296**				445,505**				37,201**				40,852**				6,939**			
F Tempo	0,077 <sup>NS</sup>				20,979**				8704**				0,741 <sup>NS</sup>				4,848*			
F Fonte x Tempo	4,397**				2,902*				1,526*				25,180**				1,590 <sup>NS</sup>			
C.V	7,22				11,01				8,11				9,16				15,26			
0,20-0,30 m																				
FNR	32,8 b B	37,7 b B	77,0 a A	49,2	6,0 b A	6,2 b A	8,0 a A	6,7	13,2	14,5	16,5	14,7 A	6,2 b C	8,4 b B	13,7 a B	9,4	7,4 b A	8,6 b A	38,9 a A	18,3
ST	40,9 b A	45,2 ab A	51,5 a B	45,8	3,2 c B	5,8 b A	7,8 a A	5,6	8,3	13,4	14,6	12,1 B	19,5 ab A	15,6 b A	22,0 a A	19	9,8 a A	10,4 a A	7,2 a B	9,1
TF	35,5 a AB	36,0 a B	39,9 a C	37,1	1,3 b C	1,0 b B	3,9 a B	2,1	13,8	14,9	14,9	14,7 A	12,5 a B	12,5 a AR	13,0 a B	12,6	7,8 a A	7,8 a A	8,2 a B	7,9
MEDIA	36,4	39,6	56,1		3,5	4,3	6,5		11,8 c	14,3 ab	15,3 a		12,8	12,1	16,2		8,3	8,9	18,1	
F Fonte	29,584**				224,069**				8,164**				54,330**				67,907**			
F Tempo	85,667**				90,826**				12,219**				11,203**				63,280**			
F Fonte x Tempo	36,213**				9,471**				2,716 <sup>NS</sup>				4,037*				81,524**			
C.V	9,00				11,69				12,93				16,78				20,27			

Letras minúsculas iguais na linha e maiúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey, <sup>NS</sup> não significativo; \*, \*\* significativos, respectivamente, aos níveis de 5 e 1%

## Conclusões

O P-rem não diferenciou com as doses e fontes de P, bem como apresentou recuperação acima de  $50 \text{ mg dm}^{-3}$ , o que evidenciou a baixa capacidade de adsorção específica e precipitação de  $P_i$  da camada de 0-30 m desse solo.

As fontes e as maiores doses de P utilizadas para fosfatagem elevaram os teores de P-disponível pelos extratores Mehlich-1 e Resina, a valores acima do nível crítico de P no solo para cana-de-açúcar, o que demonstra a possibilidade de realizar a fosfatagem em solo com mais  $350 \text{ g kg}^{-1}$  de argila, como forma de recuperar os teores de P no solo.

O fracionamento do  $P_i$  demonstrou que o uso do fosfato natural reativo de gafsa elevou os teores de  $P\text{-H}_2\text{O}$  e o uso de uma fonte acidulada como superfosfato triplo reduziu, por outro lado essas fontes de P promoveram o menor e maior teores do  $P\text{-Fe}$ .

A contribuição percentual das frações do  $P_i$  demonstrou diferença entre as fontes de P e apresentou a ordem decrescente de  $P\text{-Al} > P\text{-Ca} \geq P\text{-Fe} > P\text{-H}_2\text{O}$  com uso do FNR, com uso do ST a ordem foi de  $P\text{-Fe} > P\text{-Al} > P\text{-Ca} > P\text{-H}_2\text{O}$ , enquanto que com a utilização da TF a ordem foi de  $P\text{-Al} > P\text{-Fe} > P\text{-Ca} > P\text{-H}_2\text{O}$ .

## Referências bibliográficas

ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas de fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.985-1002, 2003.

ALVAREZ V., V. H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 25 (1): 27-33, 2000 (Boletim Informativo).

BAHIA FILHO, A. F. C. **Índice de disponibilidade e fósforo em latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas**. 1982. 178 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1982.

BARRÓN, V.; HERRUZO, M. & TORRENT, J. Phosphate adsorption by aluminous hematites of different shapes. **Soil Science Society of America Journal**, 52:647-651, 1988.

BARROW, N.J. **Relating chemical processes to management system**. In: SYMPOSIUM OF PHOSPHORUS REQUIREMENTS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE IN ASIA AND OCEANIA, 1. Manila, 1990. Proceedings. Manila, IRRI, p.199-209. 1990.

BRAGA, J. M.; DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. **Revista Ceres**, Viçosa, v.113, n.1, p.73-85, 1974.

BROGGI, F. et al. Avaliação da disponibilidade, adsorção e níveis críticos de fósforo em diferentes solos. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n.2, p. 247-252, 2010.

CELI, L.; De LUCA, G. & BARBERIS, E. Effects of interaction of organic and inorganic P with ferrihydrite and kaolinite-iron oxide systems on iron release. **Soil Science**. 168:479-488, 2003.

CESSA, R. M. A. et al. Área específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois Latossolos Vermelhos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:1153-1162, 2009.

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

CURI, N. (Coord.) Vocabulário de ciência do solo. Campinas: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 1993.

DEMATÊ, J. L. I. **Recuperação e manutenção da fertilidade dos solos**. Informações agronômicas, Piracicaba, n. 111, 24 p. set. (Encarte técnico). 2005.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro. Centro Nacional de Pesquisa de Solo, 212p. 1997.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes** / editor técnico, Fábio Cesar da Silva. 2 ed. Rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 627 p. 2009.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** / Humberto Gonçalves dos Santos... [et al.]. 3 ed. Rev. Ampl. Brasília, DF: Embrapa, 353 p. 2013.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** (UFLA), v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

GATIBONI, L.C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, 31:691-699, 2007.

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, London, v. 23, p. 177-191, 1972.

HOLANDA, J. S. de. et al. Eficiência de extratores de fósforo para um solo adubado com fósforo e cultivado com arroz. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n.3 p. 561-568, 1995.

KER, J.C. **Mineralogia, sorção e dessorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 181 p. (Tese de Doutorado). 1995.

LANA, R.M.Q. et al. Produção da alface em função do uso de diferentes fontes de fósforo em solo de cerrado. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.22, n.3, p.525-528, 2004.

LOPES, A. S.; VASCONCELLOS, C. A.; NOVAIS, R. F. Adubação fosfatada em algumas culturas nos Estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio Janeiro. In: OLIVEIRA, A. J. de; LOURENÇO, S.; GOEDERT, W. J. **Adubação fosfatada no Brasil**. Brasília, DF: EMBRAPA-DID, p. 137-200. (Documentos, 21). 1982.

McLAUGHLIN, R.R.; RYDEN, J.C.; SYERS, J.R. Sorption of inorganic phosphate by iron and aluminum containing components. **Journal of Soil Science**. 32:365-377, 1981.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T. J. (Eds.). **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade de Viçosa, 399 p. 1999.

QAFOKU, N. P. et al. Variable charge soils: their mineralogy, chemistry and management. **Advances in Agronomy**, 84, pp. 159–215. 2004.

- RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: POTAFÒS.343 p.1991.
- RAIJ, B. van: CANTARELA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van.: CANTARELA, H.: GUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Fundação IAC, p. 233-243. (IAC. Boletim, 100). 1997.
- RAIJ, B.van. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico de Campinas, 285p. 2001.
- ROCHA, A. T. DA. et al. Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande. v. 9, n. 2, p. 178-184, 2005.
- ROLIM NETO, F.C. et al. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:953-964, 2004.
- ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. Adubação - resíduos alternativos. <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_39\\_711200516717.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html)>. Acessado em 12/01/2015.
- RUIZ, H. Dispersão física do solo para a análise granulométrica por agitação lenta, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 30.Recife, 2005. **Anais**. Viçosa: SBCS, 2005 a.
- SILVA, M.A. et al. Frações de fósforo em Latossolos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 38:1197-1207, 2003.
- SIMÕES NETO, D. E. et al. Extração de fosforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v.13, p.840–848, 2009.
- SIMÕES NETO, D. E. et al. Adubação fosfatada para cana-de-acucar em solos representativos para o cultivo da espécie no Nordeste brasileiro. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.50, n.1, p.73-81, 2015.
- SOUZA, J. A.; CURTI, N.; GUEDES, G. A. A. Relação entre mineralogia e adsorção de fósforo em alguns latossolos sob cerrado do planalto central. **Ciência e Prática**, Brasília, DF, v. 15, p. 103- 111, 1991.
- SOUZA JÚNIOR, R. F. DE.; OLIVEIRA, F. H. T. de.; SANTOS, H. C.; FREIRE, F. J.; ARRUDA, J. A. de. Frações de fósforo inorgânico do solo e suas correlações com o fósforo quantificado por extratores e pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v.36: p.159-169, 2012.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U. & BARRÓN, V. **Fast and slow phosphate sorption by goethite-rich natural materials**. *Clays Clay Miner.*, 1:14-21, 1992.

WHITTING, L. D.; ALLARDICE, W. R. X-ray diffraction techniques. In: Klute, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. Part. 1 Physical and mineralogical methods. Madison: SSSA, cap.9, p.331- 359. 1986.

## **CAPITULO II**

### **Efeito da fosfatagem em resposta do sistema antioxidativo na cana-de-açúcar**

## Resumo

A baixa disponibilidade de P nos solos cultivados com a cana-de-açúcar é um fator de estresse abiótico e pode aumentar a produção das espécies reativas de oxigênio (EROS), bem como a atividade das enzimas do complexo oxidativo. Assim, o aumento da disponibilidade do P no solo com a prática da fosfatagem pode reduzir o efeito abiótico e o estresse oxidativo da planta. Neste sentido, a presente pesquisa objetivou avaliar a atividade das enzimas do complexo oxidativo e os teores de fósforo na folha índice, como também a produção de massa seca da parte aérea da cana-de-açúcar, após a prática da fosfatagem com fertilizantes de solubilidade variada. O experimento foi implantado, no ciclo de cana planta, em condições de campo, na Zona da Mata do Estado de Pernambuco. Os tratamentos consistiram da aplicação em área total e incorporação do Superfosfato Triplo (ST); Fosfato Natural Reativo (FNR) e Torta de Filtro (TF), nas doses de 50, 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, bem como um tratamento adicional sem a realização da fosfatagem. Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso, utilizando o esquema fatorial de (3 x 4) +1, com quatro repetições, usou-se a variedade de cana RB867515. Após o quarto e sétimo mês de crescimento da cana planta, foram coletadas amostras da folha diagnóstico (F+1), sendo determinado o teor de P e a atividade das enzimas catalase (CAT), Superóxido dismutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX). Antes da colheita, aos 518 DAP, foi determinada a produção de massa seca da parte aérea por planta. Os teores de fósforo na folha +1 não foram influenciadas com o manejo da fosfatagem, no entanto a produção de massa seca da parte aérea aumentou em 18,6 % com adição de 153 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para qualquer fonte testada. Independente das fontes e tempo avaliados, a atividade da SOD, CAT e APX foram decrescente até a dose média de 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Quando as doses foram superiores a esse valor verificou-se queda na produção da massa seca da parte aérea e aumento na atividades das enzimas do complexo oxidativo, o que indica relação direta da redução do estresse oxidativo com o maior desenvolvimento da cana-de-açúcar, com uso da fosfatagem.

**Palavras-chaves:** sistema antioxidante, massa seca da parte aérea, teor de fósforo na folha

## **Abstract**

The low availability of P in soils cultivated with sugarcane is an abiotic stress factor and can increase the production of reactive oxygen species (EROS), and the enzyme activity of oxidative complex. Thus, the increased availability of soil P with the practice of phosphating abiotic can reduce oxidative stress and effect of the plant. In this sense, the present study aimed to evaluate the activity of the enzymes of oxidative complex and phosphorus contents in the index leaf as also the sugarcane dry matter production of shoot, after the practice of phosphate applications with varying solubility of fertilizers. The experiment was established in the cane plant cycle in field conditions in the State of Pernambuco Forest Zone. The treatments consisted of the total area and incorporation of Triple superphosphate (ST), Natural Reactive Phosphate (FNR) and Filter cake (TF) at doses of 50, 100, 200 and 300 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> as well as an additional treatment without performing the phosphating. The treatments were arranged in a randomized block design, using the factorial of (3 x 4) + 1, with four replications. After the fourth and seventh month of plant cane growth, samples were collected diagnostic sheet (F + 1), being given the P content and activity of catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD) and ascorbate peroxidase (APX). Before harvest, to 518 DAP, was determined dry matter production of shoots per plant. Phosphorus in the leaf +1 were not affected with the management of phosphate were however, the dry matter production of shoots increased by 18.6% with the addition of 153 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> for any power supply. Independent sources and evaluated time, the activity of SOD, CAT and APX were descending to the average dose of 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> of. When doses were greater than that found a reduction in dry matter production of shoots and increase in the activities of the enzymes of oxidative complex, which indicates a direct relationship of reducing oxidative stress to the largest further development of cane sugar, with use of phosphate applications.

**Key words:** antioxidant system, shoot dry mass, phosphorus content in the leaf

## **Introdução**

Em Pernambuco o cultivo da cana-de-açúcar abrange toda Zona da Mata do Estado, no qual predominam solos distróficos, intemperizados com características químicas, físicas e mineralógicas que favorecem a baixa disponibilidade de P. Sendo este, considerado o fator nutricional de maior limitação para o aumento da produtividade dos canaviais pernambucanos.

As plantas sob condições naturais podem está frequentemente submetidas a estresse múltiplos (déficit hídrico, salinidade, altas temperaturas, luminosidade, deficiência ou excesso de nutrientes), sendo de fundamental importância adotar estratégias competitivas de manejo da produção agrícola que permita o máximo desempenho das culturas.

A exposição das plantas a fatores abióticos danosos pode levar a distúrbios nos processos fisiológicos ocasionado pela intensa geração de espécies reativas de oxigênio (EROS). O acúmulo das espécies reativas de oxigênio pode reagir e modificar quase todas as moléculas orgânicas, resultando em sérios danos às células e aos tecidos, podendo levar a morte celular (APEL & HIRT, 2004).

As espécies reativas de oxigênio (EROS) são produzidas nas plantas como produtos do seu metabolismo aeróbico. Em situações de estresse aeróbico ou anaeróbico essa produção aumenta, causando danos em compartimentos celulares (MOLLE & SWEETLOVE, 2010). As EROs podem ser produzidas em reações que ocorrem nas mitocôndrias, nos cloroplastos e nos peroxissomos, sendo extremamente reativas e citotóxicas a todos os organismos (SCANDALIOS, 1993).

Em caso de toxicidade causado pelas espécies reativas de oxigênio, as plantas possuem um mecanismo de defesa antioxidativo que atua mediante a ativação de um sistema enzimático (AGARWAL; PANDEI, 2004; WILLADINO et al., 2011), que inclui a superóxido dismutase (SOD), responsável pela conversão do radical superóxido em peróxido de hidrogênio; ascorbato peroxidase (APX), que converte o peróxido de hidrogênio em ascorbato; catalase (CAT), que transforma peróxido de hidrogênio em água (NOCTOR & FOYER, 1998).

A variação da disponibilidade de P pode resultar em estresse abiótico a planta, pois a deficiência nutricional pode afetar o metabolismo primário, gerando incremento na produção de espécies reativas de oxigênio. Uma das formas de minimizar esses efeitos da variação da disponibilidade de P é escolher a fonte e forma correta de

aplicação da adubação fosfatada. Uma vez que, o sistema radicular da cana-de-açúcar tende a explorar as diversas camadas do solo, principalmente as mais superficiais. Logo, é de se esperar que nos solos com baixo teor de fósforo a aplicação em área total facilite sua absorção pelo sistema radicular da planta (TOMAZ, 2009).

O possível estresse oxidativo acarretado pela baixa ou alta disponibilidade de P nas plantas não é objeto de estudo de muitos trabalhos havendo assim uma lacuna quanto a essa questão. Diante do contexto, a pesquisa teve como objetivo avaliar a atividade das enzimas do sistema antioxidativo e os teores de fósforo na folha índice, como também a produção de massa seca da parte aérea da cana-de-açúcar, após a prática da fosfatagem com fertilizantes de solubilidade variada.

## **Material e Métodos**

### *Condução experimental*

A pesquisa foi realizada em condições de campo na Zona da Mata do Estado de Pernambuco, no período de julho de 2013 a dezembro de 2014, durante a safra agrícola de 2013/2014 (cana planta de ano e meio). O experimento foi implantado na área agrícola da Usina Cucaú, situado no município de Ribeirão, PE, na latitude de 08° 30' 24'' S e longitude de 35° 22' 52'' W. De acordo com o sistema Köppen, o clima dominante na região é o Tropical As', tropical chuvoso com verão seco. Durante a condução do experimento a precipitação acumulada foi de 2.667,0 mm (Figura 1).

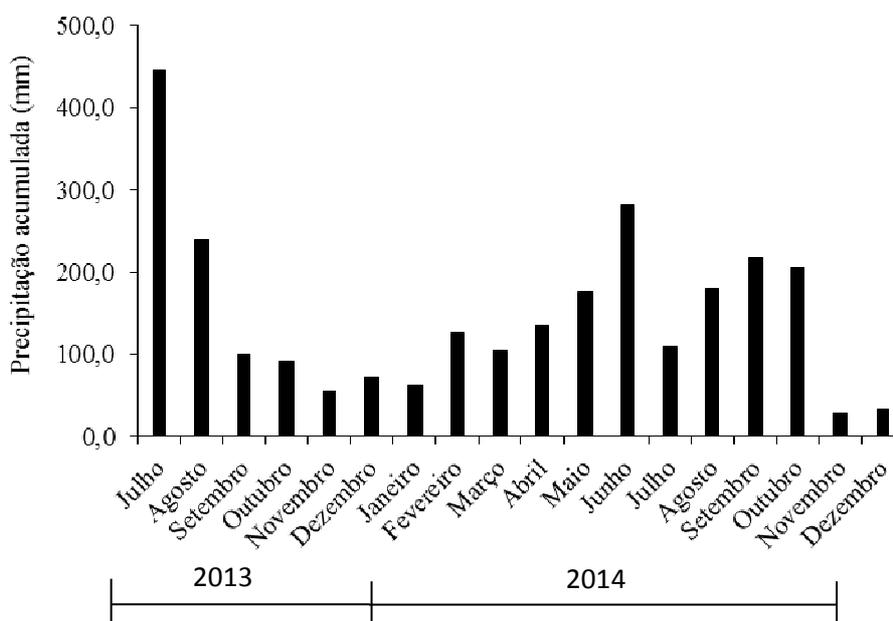
O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO AMARELO distrófico, com textura franco-argilosa (EMBRAPA, 2013) (Tabela 1). A caracterização química e física foi realizada nas profundidades 0,0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m (Tabela 1). A identificação dos minerais presente na fração argila foi realizada por difratogrametria de raios X (WHITTING & ALLARDICE, 1986) em três profundidades: 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Figura 2).

Quimicamente os solos foram caracterizados pelo pH (H<sub>2</sub>O), Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>), P, M.O, Fe, Cu, Zn e Mn. O Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> foram extraídos com KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e dosados por titulometria; o P, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Fe, Cu, Zn e Mn foram extraídos por Mehlich-1, sendo o P dosado por colorimetria, o K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> por fotometria de chama e o Fe, Cu, Zn e Mn por espectrofotometria de absorção atômica (EMBRAPA, 2009). A acidez potencial (H+Al<sup>3+</sup>) foi extraída com acetato de cálcio 0,5

mol L<sup>-1</sup> e dosado por titulometria. Todas as análises foram realizadas conforme metodologias descritas pela EMBRAPA (2009). A matéria orgânica (M.O) foi determinada pelo método colorimétrico (RAIJ et al., 2001) (Tabela 1). Fisicamente foi determinado no solo a granulometria, definindo sua classe textural de acordo com Ruiz (2005a), densidade do solo, densidade das partículas, umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) (EMBRAPA, 1997) (Tabela 1).

Após a aplicação e incorporação dos corretivos de solo, foi realizada a marcação das parcelas experimentais e aplicado os tratamentos. Os tratamentos consistiram na utilização de três fontes e quatro doses de P, aplicadas em área total e incorporadas com grade leve a 0,10 m de profundidade, bem como um tratamento controle sem a realização da fosfatagem.

As fontes utilizadas foram o Superfosfato Triplo (ST); Fosfato Natural Reativo (FNR - Gafsa: 30 % do P total solúvel em ácido cítrico) e Torta de Filtro *inatura* (TF: 42 % de umidade), calculados para atender as doses 50, 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Para a fonte torta de filtro, foi realizada a caracterização química, sendo determinados os valores de 12,5; 36,9; 2,40; 186,0 g kg<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O e Matéria Orgânica, respectivamente.



**Figura 1.** Precipitação pluviométrica durante a condução do experimento, em Ribeirão – Pernambuco.

**Tabela 1.** Caracterização química e física do solo da área experimental, nas profundidades de 0,0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m.

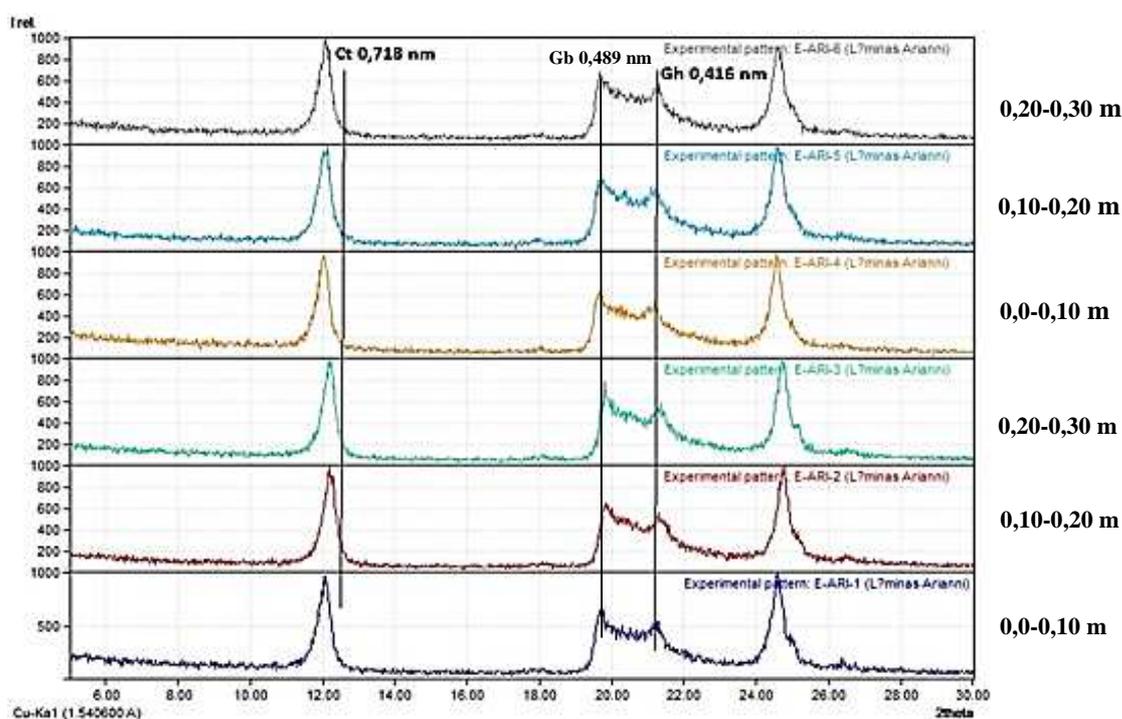
<i>Atributos do Solo</i>	<i>Química do Solo</i>	
	<i>Profundidade (m)</i>	
	0,0-0,20	0,20-0,40
pH (H <sub>2</sub> O 1:2,5)	5,50	5,30
H <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,90	3,70
Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,40
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,30	2,40
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,30	0,20
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,14	0,05
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,04	0,03
SB <sup>(1)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,78	2,68
CTC <sub>potencial</sub> <sup>(2)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,68	6,78
CTC <sub>efetiva</sub> <sup>(3)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,78	3,08
V <sup>(4)</sup> (%)	43,54	39,52
m <sup>(5)</sup> (%)	0,00	12,98
M.O (%)	3,26	2,40
P (mg dm <sup>-3</sup> )	2,00	2,00
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	160,00	227,30
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,20	0,10
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	2,10	1,80
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	2,00	1,50
Ca/Mg	11,00	12,00
Ca/K	23,83	44,57
	<i>Física do Solo</i>	
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	429,4	361,4
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	174,6	230,5
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	396,0	408,1
D <sub>s</sub> <sup>(6)</sup>	1,35	1,48
D <sub>p</sub> <sup>(7)</sup>	2,34	2,43
θ <sub>vcc</sub> <sup>(8)</sup> (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,17	0,12
θ <sub>vppm</sub> <sup>(9)</sup> (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,20	0,21
Classe Textural	Franco Argilosa	Franco Argilosa

<sup>(1)</sup> Soma de base; <sup>(2)</sup> Capacidade de troca de cátions potencial; <sup>(3)</sup> Capacidade de troca de cátions efetiva; <sup>(4)</sup> Saturação por bases; <sup>(5)</sup> Saturação por alumínio; <sup>(6)</sup> densidade do solo; <sup>(7)</sup> Densidade das partículas; <sup>(8)</sup> Capacidade de campo; <sup>(9)</sup> Ponto de murcha permanente.

Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso, utilizando o esquema fatorial de (3 x 4) + 1, com quatro repetições, perfazendo o total de 52 parcelas experimentais. As parcelas experimentais foram constituídas de 6 linhas de cana-de-açúcar com 20 m de comprimento (120 m<sup>2</sup>), espaçadas a 1,0 m entre si. Para a área útil das parcelas, foi considerada as 4 linhas centrais com 18 m de comprimento.

Na sequência, realizou-se a abertura dos sulcos de plantio, sendo acomodados os colmos sementes da variedade RB867515, contendo de 2 a 3 gemas, de modo a se obter 23 gemas por metro. Em seguida foi realizada a adubação de plantio, sendo aplicados 25 kg ha<sup>-1</sup> de N e 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de fosfato monoamônio (MAP).

Aos 90 DAP realizou-se a adubação de cobertura, no qual foram aplicados 35 kg ha<sup>-1</sup> de N e 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, na forma de sulfato de amônio e cloreto de potássio, respectivamente. Assim, o total de nutrientes aplicados foram 60 kg ha<sup>-1</sup> de N; 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.



**Figura 2.** Difratogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 - 0,10, 0,10 - 0,20, 0,20 - 0,30 m em Latossolo Amarelo Distrofíco de Ribeirão-PE. Ct: caulinita; Gb: gibbssita; Gh: goethita.

#### *Determinação do teor de P na folha diagnóstico*

O teor de fósforo na folha foi realizada aos 120 e 210 dias após o plantio (DAP) na folha +1, no qual foi coletado aleatoriamente na área útil de cada parcela, 10 amostras de folhas completamente desenvolvidas. Cada amostra de folha teve a nervura central, as bases e as pontas descartadas, utilizando somente a parte mediana do limbo

foliar com aproximadamente 20 a 25 cm, sendo posteriormente acondicionadas em sacos de papel e transportadas ao laboratório (RAIJ; CANTARELLA, 1997).

No laboratório as amostras foram lavadas com água destilada, acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa de circulação forçada a 65 °C até peso constante. Após a secagem, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley para posterior análise da concentração de P, que foi extraído por digestão nitroperclórica (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997) e determinado por colorimetria com comprimento de onda de 725 nm, por meio de reação com ácido ascórbico (DEFELIPO; RIBEIRO 1996).

#### *Determinação da atividade das enzimas do complexo oxidativo*

Ao mesmo tempo que foram coletadas as folhas para avaliação nutricional do P, também coletou-se 3 amostras da folha +1 para avaliação da atividade das enzimas do complexo oxidativo. Foram selecionadas as folhas que tivessem mais saudáveis, e para cada amostra de folha a nervura central, as bases e as pontas foram descartadas, utilizando somente a parte mediana do limbo foliar. Essas folhas foram identificadas, enroladas em papel alumínio e acondicionadas em nitrogênio líquido ainda no campo. No laboratório a determinação enzimática foi feita em triplicata, utilizando 0,1 g de material vegetal que foi homogeneizado a frio em tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,5) e polivinilpirrolidona, centrifugado a 10.000g durante 15 min a 4° C. O sobrenadante foi utilizado para o preparo do extrato e determinação da atividade das enzimas antioxidativas; catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD) e ascorbato peroxidase (APX).

A atividade da CAT foi determinada em solução contendo 1 mL de tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,5) e 25 µL de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) a 1 mM. A reação foi iniciada pela adição de 25 µL do extrato proteicoprotéico e a atividade determinada seguindo-se a decomposição do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> por 60 segundos, em espectrofotômetro a 240 nm, sob temperatura de 25 °C (HAVIR e MCHALE, 1987).

A atividade da SOD foi determinada a partir da inibição da redução do nitroblue tetrazolium (NBT) pelo extrato enzimático, evitando assim a formação do cromóforo. A solução de reação (3 mL) foi constituída de 85 mM de tampão fosfato (pH 7,8), 75 µM de NBT, 5 µM riboflavina, 13 mM de metionina, 0,1 mM EDTA e 50 µl de extrato enzimático. A solução foi adicionada em tubos de vidro e irradiada com luz branca

(lâmpada fluorescente de 15 W) por 5 min. Após esse período de exposição, a solução foi analisada por espectrofotômetro a 560 nm (GIANNOPOLITIS e RIES, 1977).

A determinação da atividade da APX foi feita por meio de reação composto por 650 µL de tampão fosfato de potássio 80 mM (pH 7,5), 100 µL de ascorbato 5 mM, 100 µL de EDTA 1 M, 100 µL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1 mM e 50 µL do extrato. A atividade da APX foi determinada pelo monitoramento da taxa de oxidação do ascorbato, em espectrofotômetro a 290 nm, a 30 °C, durante 60 segundos (NAKANO e ASADA, 1981).

### *Produção de massa seca*

Para quantificar a produção de massa seca da parte aérea (MSPA) da cana-de-açúcar foi realizado amostragem de material vegetal no final do desenvolvimento da cultura, aos 518 DAP. A amostragem foi realizada na parte central segunda linha de plantio das parcelas experimentais, coletando-se toda a parte aérea e contando o número de plantas contidas 1 metros comprimento. Ainda no campo, foi obtida a massa fresca das folhas secas, folhas verdes, ponteiro e colmo separadamente por meio da pesagem em balança eletrônica com precisão de 0,02 kg. As amostras foram identificadas e acondicionadas em sacos de papel e levadas para o laboratório.

No laboratório, foram retiradas subamostras dos ponteiros, folhas e colmos, as quais foram pesadas em balança analítica (precisão de 0,01 g e secas em estufa de ventilação forçada a 65 °C até atingir peso constante, sendo posteriormente novamente pesadas para determinação da umidade do material. De posse do número de plantas e da massa seca de cada compartimento da parte aérea em 1 m calculou-se a produção de matéria seca por planta (g planta<sup>-1</sup>).

### *Análise Estatística*

A atividade das enzimas e a concentração de P na folha +1, bem como a produção de massa seca por planta foram submetida a análise de variância (ANAVA), utilizando o delineamento de blocos ao acaso em arranjo fatorial (3x4) + 1, para cada tempo separadamente, ao nível de 5 % de significância pelo teste F.

Quando significativo pela ANAVA, os dados quantitativos (doses de P) foram ajustados a modelos polinomiais de primeira e segunda ordem. Como critério para escolha dos modelos de regressão, foram selecionados aqueles que apresentassem maior

coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e significância dos parâmetros da equação até 10 % de probabilidade pelo teste t. Os dados qualitativos (fontes) significativos tiveram as médias comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Para as análises estatísticas utilizou-se o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

## Resultados e Discussão

Os teores de P na folha +1 em função das fontes e doses não apresentaram diferença, nos dois períodos de avaliação (Tabela 2). Deste modo, a fosfatagem não influenciou na nutrição de P para o ciclo de cana planta, o que possivelmente se deve a adubação mineral fosfatada realizada no plantio, que adicionou 52 kg ha<sup>-1</sup> de P, atendendo a exigência nutricional de P dessa variedade, estimados em 19 kg ha<sup>-1</sup> de P para o ciclo de cana planta para produtividade superior a 100 ton ha<sup>-1</sup> de colmos (OLIVEIRA et al., 2010).

**Tabela 2.** Teores de fósforo na folha + 1 da cana-de-açúcar aos 120 e 210 DAP e massa seca por planta aos 518 DAP, em função da fosfatagem com fontes de solubilidade variada. FNR: Fosfato natural reativo, ST: Superfosfato triplo e TF: Torta de filtro.

Fonte de P	Teor de Fósforo		Massa Seca
	120	210	
	----- g kg <sup>-1</sup> -----		---- g planta <sup>-1</sup> ----
FNR	3,85	3,57	777,90
ST	4,00	3,29	822,68
TF	3,87	3,44	780,44
Média	3,90	3,44	93,67
F <sub>Fonte</sub>	0,423 <sup>NS</sup>	2,149 <sup>NS</sup>	16,101 <sup>NS</sup>
F <sub>Dose</sub>	1,539 <sup>NS</sup>	1,344 <sup>NS</sup>	39,523 <sup>**</sup>
F <sub>Dose x Fonte</sub>	0,490 <sup>NS</sup>	1,125 <sup>NS</sup>	9,962 <sup>NS</sup>
CV (%)	14,40	12,45	13,95

DAP – dias após o plantio; FNR – fosfato natural reativo; ST – superfosfato triplo; Torta- tora de filtro; <sup>NS</sup> não significativo; <sup>\*\*</sup> significativo a 1 % de probabilidade.

Os teores foliares de P observados estão dentro dos valores obtidos por Santos et al. (2009) em diferentes fontes de fósforo os quais verificaram teores que variavam de 2,5 a 4,0 g kg<sup>-1</sup>, se encontrando superiores aos 2,0 g kg<sup>-1</sup>, considerados adequados por Marinho & Albuquerque (1980) para cana-de-açúcar em áreas sob cultivo comercial em

Alagoas. Esses valores são superiores aos encontrados por Simões Neto (2008), que avaliando a disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação fosfatada para cana-planta em solos do estado de Pernambuco constatou teores de P na folha variando de 0,37 a 1,09 g kg<sup>-1</sup> em experimentos conduzidos em cinco solos no estado de Pernambuco.

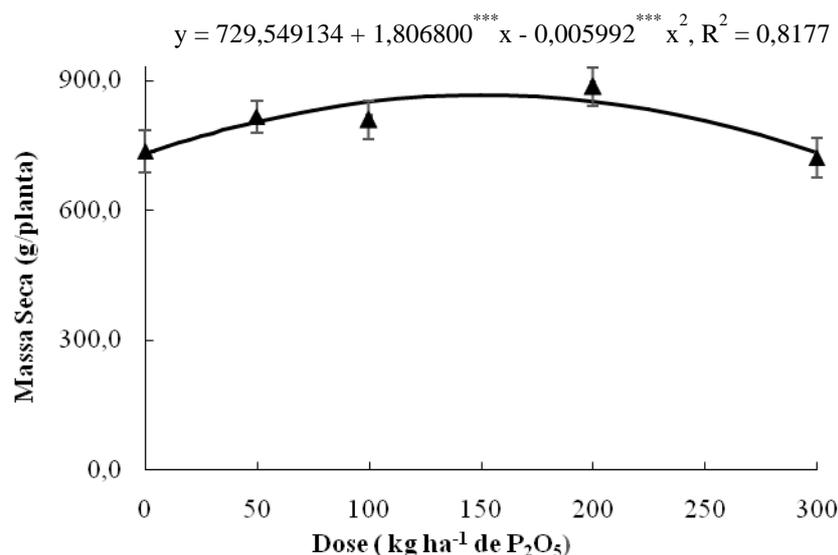
A produção de massa seca da parte aérea (MSPA) não apresentou diferença entre as fontes de fosfatadas utilizadas, no entanto, houve efeito significativo para as doses de P (Tabela 2). A MSPA se ajustou ao modelo quadrático para fosfatagem, no qual a dose estimada de 153 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> proporcionou a produção máxima de 865,72 g planta<sup>-1</sup> de MSPA, correspondendo ao incremento de 18,6% em relação a não realização da fosfatagem, que produziu 729,55 g planta<sup>-1</sup> de MSPA (Figura 3).

Mesmo sem haver diferença nos teores de P na planta, verificou-se que a fosfatagem promoveu ganhos na produção de MSPA e pode ser realizada com qualquer fonte avaliada. Estes resultados indicam que a cana planta responde positivamente a correção dos teores de P na superfície do solo em área total, em adição adubação fosfatada de plantio e que os ganhos obtidos para esse primeiros ciclo não se devem a melhoria nutricional de P, mas sim a outro efeito indireto da correção da fertilidade fosfatada do solo, como exemplo do maior desenvolvimento do sistema radicular, que não ficaria concentrado no fundo do sulco de plantio.

Garcia et al. (2009), avaliando o crescimento aéreo e radicular de arroz submetido a diferentes doses de fósforo na presença e ausência de bioestimulante, constataram que, assim como na parte aérea das plantas o diâmetro médio e massa da matéria seca do sistema radicular foram influenciado pelo aumento das doses de fósforo.

Com as raízes ocupando maior volume de solo, a planta teria menor estresse hídrico com o manejo da fosfatagem, o que refletiria na menor produção das EROs e redução da atividade das enzimas de defesa antioxidativas como a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX).

Deste modo, verificou-se que a fosfatagem diminuiu o estresse oxidativo da cana-de-açúcar, corroborado com a redução da atividade das enzimas do sistema antioxidativo (Tabela 3; Figura 4), no entanto observou-se entre os tempos, diferentes respostas das fontes testadas (Figura 4).



**Figura 3.** Massa seca da parte aérea ( $\text{g planta}^{-1}$ ), aos 518 DAP em relação a fosfatagem com doses crescentes de P na variedade de cana-de-açúcar RB 867515. \*\*\* significativo a 1 % de probabilidade. Barras na vertical, apresentam o intervalo de confiança a  $p \leq 0,05$ .

Tanto aos 120 quanto aos 210 DAP a atividade das enzimas reduziram com as doses de P e se ajustaram ao modelo quadrático (Figura 4). Para atividade da SOD aos 120 DAP as fontes não apresentaram diferença e a dose de  $172 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  proporcionou a menor atividade enzimática ( $4,98 \text{ U SOD g}^{-1}$  de M.F) (Figura 4). Aos 210 DAP houve efeito significativo para a interação entre dose e fonte de P, no qual se observou para o FNR a menor atividade da SOD ( $2,86 \text{ U SOD g}^{-1}$  de M.F) na dose de  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Para o ST e a TF as menores atividades de  $4,72$  e  $5,24 \text{ U SOD g}^{-1}$  de M.F foi obtida com as doses de  $159$  e  $172 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , respectivamente (Figura 4).

A partir da dose de  $172 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aos 120 DAP e na média de  $170 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  das fontes aos 210 DAP houve incremento na atividade enzimática com o aumento da dose de P, sugerindo que o excesso de P lavaria ao novo estresse da planta, com maior produção de radicais superóxidos, em virtude do efeito antagônico na absorção de outros nutrientes, proporcionando estresse nutricional. Espíndula (2009) trabalhando com dois genótipos de trigo cultivados em solução nutritiva sob diferentes doses de P observou que, na maior dose de  $1000 \mu\text{M}$  de P em ambos os genótipos havia a presença de uma isoforma de SOD que não estava presente na ausência de P, o qual também sugere aumento na produção de radicais livres em altas contrações de P.

**Tabela 3.** Atividade das enzimas do complexo oxidativo: superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e catalase (CAT) em função das fontes de fósforo aplicado no solo. FNR: Fosfato natural reativo, ST: Superfosfato triplo e TF: Torta de filtro.

FONTE	SOD			APX			CAT		
	120	210	Media	120	210	Media	120	210	Media
	----U SOD mg <sup>-1</sup> de M.F----			----- μmol min <sup>-1</sup> mg <sup>-1</sup> de M.F-----					
FNR	8,17 a A	4,83 b B	6,50	173,00 a A	77,74 b A	125,37	41,69 b A	56,33 a B	49,01
ST	8,08 a A	6,10 b A	7,09	153,27 a B	79,14 b A	116,21	42,78 b A	60,33 a A	51,5
TORTA	8,05 a A	6,45 b A	7,25	154,80 a B	79,53 b A	117,17	39,25 b A	61,75 a A	51,56
Média	8,10	5,80		160,36	78,81		41,24	59,47	
F <sub>Fonte</sub>		27,916**			5,051**			2,681 <sup>NS</sup>	
F <sub>Tempo</sub>		225,778**			992,150**			409,871**	
F <sub>dose</sub>		270,144**			34,458**			64,239**	
F <sub>Fonte x Tempo</sub>		4,500*			7,021**			6,491**	
F <sub>Fonte x Dose</sub>		1,362 <sup>NS</sup>			2,603*			0,592 <sup>NS</sup>	
CV (%)		10,78			11,86			9,79	

CAT – catalase; APX – ascorbato peroxidase; FNR – fosfato natural reativo; ST – superfosfato triplo; Torta- torta de filtro. Letras minúsculas iguais na linha e maiúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey, <sup>NS</sup> não significativo; \*, \*\* significativos, respectivamente, aos níveis de 5 e 1%.

A menor atividade da SOD com uso do FNR pode ser resultante do ambiente criado por essa fonte, que promoveu os maiores teores de P-disponível aos 210 DAP (Figura 3, capítulo 1), com conseqüente aumento no crescimento radicular e maior exploração do volume do solo, que levaria ao maior absorção da água e menor estresse oxidativo.

Para a atividade da CAT as fontes não influenciaram na atividade da enzima para os dois tempos e o ajuste quadrático demonstrou que a menor atividade ocorreu com a adição de 151 (35,70 μmol min<sup>-1</sup>g<sup>-1</sup> de M.F) e 153 (48,33 μmol min<sup>-1</sup>g<sup>-1</sup> de M.F) kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de nos tempos 120 e 210 DAP, respectivamente (Figura 4). Tanto aos 120 quanto aos 210 DAP após as doses de 151 e 153 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> respectivamente, houve aumento na atividade da CAT em função do aumento das doses de P. Esse resultado é condizente com os resultados de SOD, onde também se observou aumento na atividade após a dose de produção mínima da enzima com o aumento das doses de P, indicando que o aumento da atividade da CAT se deu em função do aumento da SOD, uma vez que, essa enzima atua em cima do produto de remoção da SOD, ou seja, do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> produzido pela SOD durante a dismutação do O<sub>2</sub><sup>-</sup>.

Com relação a atividade da enzima APX, a interação entre dose e fonte foi significativa aos 120 DAP, enquanto que, aos 210 DAP se observou efeito apenas para as doses (Figura 4). Aos 120 DAP o uso do FNR promoveu a menor atividade ( $160,54 \mu\text{mol min}^{-1}\text{g}^{-1}$  de M.F) na dose estimada de  $138 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  para APX, com a utilização do ST e TF foram observadas as menores atividades com valores de  $125,57$  e  $133,83 \mu\text{mol min}^{-1}\text{g}^{-1}$  de M.F, respectivamente com adição de  $121$  e  $169 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (Figura 4). Aos 210 DAP a fosfatagem reduziu a atividade da APX, sendo observado os menores valores ( $67,97 \mu\text{mol min}^{-1}\text{g}^{-1}$  de M.F, na dose de  $152 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

As menores atividades da SOD, CAT e APX, independente do tempo se concentraram entre as doses de  $121$  e  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , com valor médio de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Da mesma forma, a maior produção de massa fresca da parte aérea foi obtida com a dose de  $153 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Com as doses acima de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  verificou-se queda na produção da massa seca da parte aérea e aumento na atividades das enzimas do complexo oxidativo, o que indica relação direta da redução do estresse oxidativo com o maior desenvolvimento da cana-de-açúcar, quando realizada a fosfatagem nessa dose.

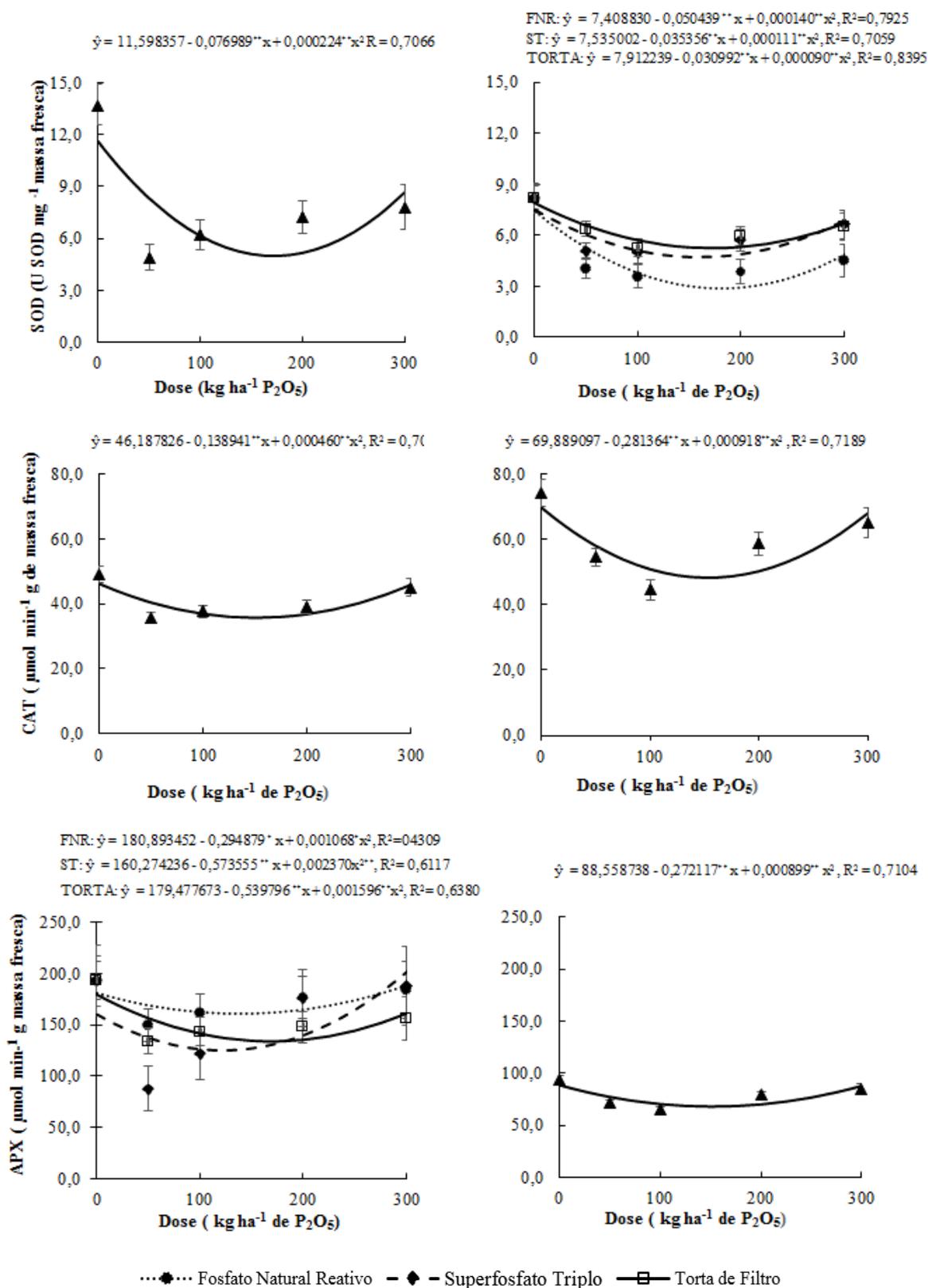
A atividade das enzimas apresentaram diferença ( $p < 0.05$ ) na interação entre fonte e o tempo, sendo observado que a maior atividade da CAT ocorreu aos 210 DAP, enquanto para a SOD e APX as maiores atividades foram observadas aos 120 DAP (Tabela 3). A maior atividade da SOD e da APX aos 120 DAP coincidiu ao período em que houve menor precipitação pluvial (Figura 1) o que evidencia maior produção das EROs devido ao estresse hídrico (Tabela 3).

O aumento na atividade da SOD associada ao déficit hídrico também foi observado por Azevedo (2013) na cultura da cana-de-açúcar, e em outras culturas como arroz (REDDY et al., 2004), trigo (SHAO et al., 2005). O déficit hídrico certamente proporcionou maior geração do radical superóxido ( $\text{O}_2^-$ ), contribuindo desta forma para o incremento da atividade da SOD, uma vez que, a primeira linha de defesa nas células contra a formação dos superóxidos é realizada por essa enzima antioxidativa. Por outro lado o aumento da atividade da CAT aos 210 DAP, não foi relevante, visto que, não se observou aumento na atividade da SOD e APX.

A atividade das enzimas do sistema de defesa antioxidativo apresentou diferentes comportamentos entre as fontes nos tempos avaliados (Tabela 3). Aos 120 DAP, apenas a enzima APX demonstrou diferença entre as fontes, no qual o uso do FNR promoveu a maior atividade entre as fontes de P.

120 DAP

210 DAP



**Figura 4.** Atividade das enzimas SOD, APX e CAT em função da fosfatagem com doses e fontes de solubilidade variada\*; \* significativo a 1e 5 % de probabilidade respectivamente. Barras na vertical demonstram o intervalo de confiança a  $p \leq 0,05$ .

Aos 210 DAP houve diferença significativa na atividade da SOD e da CAT, não sendo verificado efeito das fontes de P para APX (Tabela 3). Tanto na SOD quanto na CAT as maiores atividade das enzimas foram observadas com uso do ST e da TF. A maior atividade dessas enzimas com essas fontes pode estar relacionada a disponibilidade de P, visto que, aos 210 DAP, os valores estimados pelas equações mostraram menor disponibilidade de P (Figura 4, G; H; I do capítulo 1) e maiores frações do Pi precipitado com o Fe (Tabela 4 do capítulo 1).

A menor disponibilidade de P associado ao acúmulo do déficit hídrico entre os meses de Novembro, Dezembro e Janeiro (Figura 1), podem aumentar a produção do radical superóxido ( $O_2^-$ ) contribuindo desta maneira para o incremento da atividade da SOD e conseqüentemente da CAT através da produção do  $H_2O_2$  resultante da remoção do  $O_2^-$  pela SOD.

A superóxido dismutase (SOD) é considerada a primeira linha de defesa contra as EROs, agindo contra o radical superóxido, transformando-o em  $H_2O_2$  e água. O  $H_2O_2$  produzido pela SOD e outros metabólitos são usados pela CAT e APX para eliminar essa EROs. Alterações na atividade da SOD têm sido observadas em diversas culturas sob diferentes condições de estresse, YU et al, 1998 relaciona a resposta da SOD a nutrição em tabaco, BOR et al., 2003 associa a resposta da SOD em beterraba a diferentes estresses salino, e CATANEO et al., 2005 a aplicação de herbicida em soja.

## **Conclusões**

Os teores de fósforo na folha +1 não foram influenciadas com o manejo da fosfatagem, no entanto a produção de massa seca da parte aérea aumentou em 18,6 % com adição de 153 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para qualquer fonte testada.

Independente das fontes e tempo avaliados, a atividade da SOD, CAT e APX foram decrescente até a dose média de 150 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Quando as doses foram superiores a esse valor verificou-se queda na produção da massa seca da parte aérea e aumento na atividades das enzimas do sistema antioxidativo, o que indica relação direta da redução do estresse oxidativo com o maior desenvolvimento da cana-de-açúcar, com uso da fosfatagem.

## Referências bibliográficas

- AGARWAL, S.; PANDEY, V. Antioxidant enzyme responses to NaCl stress in *Cassia angustifoli*. **Biologia Plantarum**, v. 48, n. 04, p. 555-560, 2004.
- APEL, K., HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review Plant Biology**, v. 55, p. 373-399, 2004.
- AZEVEDO, V. M. de. **Ação combinada de fatores abióticos de estresses em cana-de-açúcar: variáveis fisiológica e bioquímicas**. 57 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife-PE. 2013.
- BOR, M., ÖZDEMİR, F., TURKAN, I. The effect of salt stress on lipid peroxidation and antioxidants in leaves of sugar beet *Beta vulgaris* L. and wild beet *Beta maritima* L. **Plant Science**, v.164, p.77-84, 2003.
- CATANEO, A.C. et al. Atividade de superóxido dismutase em plantas de soja (*Glycine max* L.) cultivadas sob estresse oxidativo causado por herbicida. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.4, p.23-31, 2005.
- DEFELIPO, B. V.; RIBEIRO, A. C. **Análise química do solo**. Viçosa: UFV, 17p. (Boletim de Extensão, 29). 1996.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro. Centro Nacional de Pesquisa de Solo, 212p. 1997.
- EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes** / editor técnico, Fábio Cesar da Silva. 2 ed. Rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 627 p. 2009.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** / Humberto Gonçalves dos Santos... [et al.]. 3 ed. Rev. Ampl. Brasília, DF: Embrapa, 353 p. 2013.
- ESPINDULA, L. **Comparação das respostas à deficiência de fósforo e a presença de alumínio em trigo, cv. Toropi**. Porto Alegre: UFRGS, 2009, 112 p. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós Graduação em Fitotecnia. Faculdade de Agronomia, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a **computer statistical analysis system**. Ciência e Agrotecnologia (UFLA), v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.
- GARCIA, R. A. et al. Crescimento aéreo e radicular de arroz de terras altas em função da adubação fosfatada e bioestimulante. **Bioscience Journal**, v.25, p.65-72, 2009.
- GIANNOPOLITIS CN, RIES SK. Superoxide Dismutases: I. Occurrence in Higher Plants. **Plant Physiology** 59: 309-314. 1977.
- HAVIR, E.A., MCHALE, N.A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiol** v. 84, p. 450-455, 1987.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 3. ed. Piracicaba: POTAFOS, 319 p. 1997.

MARINHO, M. L.; ALBUQUERQUE, G. A. C. Resposta da cana-de-açúcar a níveis de P e correlação com análise foliar. In: Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 1, 1979, Maceió. **Anais**. Maceió: STAB, v.2, p.328-333. 1980.

MKHABELA, M.S.; WARMAN, P. R. The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. 106, 57–67. 2005.

MOLLER, I. M.; SWEETLOVE, L. J. ROS signaling – specificity is required. **Trends in Plant Science**, London, n. 15, p. 370-374, 2010.

NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant Cell Physiology** 22:1068-1072. 1981.

NOCTOR, G., FOYER, C. H. ASCORBATE AND GLUTATHIONE: Keeping active oxygen under control. **Annual Review Plant Physiology Plant Molecular Biology**, v.49, p.249-279, 1998.

OLIVEIRA, E. C. A. et al. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1343-1352, 2010.

RAIJ, B. van: CANTARELA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van.: CANTARELA, H.: GUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (ed.). **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Fundação IAC, p. 233-243. (IAC. Boletim, 100). 1997.

RAIJ, B.van. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 285p. 2001.

REDDY, A.R.; CHAITANYA, K.V.; VIVEKANANDAN, M. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. **Journal of Plant Physiology**, Munich, v.161, n. 11, p.1189-1202, 2004.

RUIZ, H. Dispersão física do solo para a análise granulométrica por agitação lenta, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 30.Recife, 2005. **Anais**. Viçosa: SBCS, 2005 a.

SANTOS, V. R et al. Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, PB. V. 13, n. 4, p. 389-396, 2009.

SCANDALIOS, J. G. Oxygen stress and superoxide dismutases. **Plant Physiology**, v. 101, p. 7-12, 1993.

SHAO, H.B.; LIANG, Z.S.; SHAO, M.A.; WANG, B.C. Changes of antioxidative enzymes and membrane peroxidation for soil water deficits among 10 wheat genotypes a seedling. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, Amsterdam*, v. 42, p. 107-113, 2005.

SIMÕES NETO, D. E. **Avaliação da disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação fosfatada para cana-planta em solos do estado de Pernambuco**. 106 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2008.

SIMÕES NETO, D. E. et al. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.840–848, 2009.

TOMAZ, H. V de. **Fontes, doses e formas de aplicação de fósforo na cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Piracicaba. 2009.

YU, Q.; OSBORNE, L.; RENGEL, Z. Micronutrient deficiency changes activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase in tobacco plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.21, p.1427-1437, 1998.

WHITTING, L. D.; ALLARDICE, W. R. X-ray diffraction techniques. In: Klute, A. (ed.). **Methods of soil analysis**. Part. 1 Physical and mineralogical methods. Madison: SSSA, cap.9, p.331- 359. 1986.

WILLADINO, L. G. et al. Estresse salino em duas variedades de cana-de-açúcar: enzimas do sistema oxidativo e fluorescência da clorofila. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 2, p. 417-422, 2011.

### **Capitulo III**

## **Produtividade e atributos tecnológicos da cana planta, em relação a fosfatagem**

## Resumo

O fósforo pode ser considerado o segundo nutriente mais limitante ao aumento da produtividade da cana-de-açúcar em solos intemperizados, o que demonstra a necessidade de elevar os teores no solo como prática corretiva e não apenas na adubação de plantio. Neste sentido, o estudo teve como objetivo avaliar a produção de matéria seca, a produtividade de colmos e açúcar, bem como os atributos tecnológicos da cana planta após a correção dos teores de P no solo com a prática da fosfatagem com uso de fontes de solubilidade variada. O experimento foi implantado, em condições de campo, na Zona da Mata do Estado de Pernambuco. Os tratamentos consistiram da aplicação de 50, 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, na forma de Superfosfato Triplo (ST); Fosfato Natural Reativo (FNR) e Torta de Filtro (TF), em adição um tratamento sem aplicação da fosfatagem. Os tratamentos foram distribuídos em de blocos ao acaso e dispostos estatisticamenteno arranjo fatorial de (3 x 4) + 1. Aos 518 dias após o plantio (DAP) foram avaliados a produção de matéria seca da parte aérea, a produtividade de colmos (TCH) e de pol por hectare (TPH). Adicionalmente realizou-se em 10 amostras de colmo a avaliação das variáveis tecnológicas: sólidos solúveis (°Brix), a percentagem de sacarose aparente no caldo (Pol), fibra, a percentagemde sacarose no colmo (PC) e o açúcar teórico recuperável (ATR). As fontes de fósforo não influenciaram na produçãode matéria seca da parte aérea (MSPA), na produtividade de colmos e nos atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, havendo efeito apenas das doses. A fosfatagem promoveu aumento de 16 e 10 t ha<sup>-1</sup> de MSPA e de TCH, respectivamente, em relação a realização de apenas a adubação de plantio. Os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar não foram influenciados pela fosfatagem no ciclo de cana planta.

**Palavras-chaves:** *Saccharum* spp., fontes de fósforo, fixação do fósforo, TCH, TPH.

## Abstract

The phosphorus can be considered the second most limiting nutrient to increase the productivity of sugarcane in weathered soils, which shows the need to raise the levels in the soil as corrective practice and not just in the planting fertilization. In this sense, the study aimed to evaluate the dry matter production, productivity of stalks and sugar, as well as technological attributes of the cane plant after correction of the P content in the soil with the practice of phosphate applications using solubility sources varied. The experiment was carried out under field conditions in the State of Pernambuco Forest Zone. The treatments consisted of 50, 100, 200 and 300 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in the form of Triple superphosphate (ST); Natural Reactive Phosphate (FNR) and Filter cake (TF), in addition a treatment without application of phosphate applications. The treatments were arranged in a randomized block design and statistically in the factorial arrangement (3 x 4) + 1. After 518 days after planting (DAP) were evaluated the production of dry matter of shoots, the stem productivity (TCH) and pol per hectare (TPH). In addition took place in 10 samples cane the evaluation of technological variables: Soluble solids (Brix), the percentage of the apparent sucrose broth (Pol), fiber, sucrose percentagem of the stem (PC) and the theoretical recoverable sugar (ATR). The phosphorus sources did not affect the production of dry matter (MSPA), productivity of stalks and technological attributes of cane sugar, with effect only the doses. Phosphorus sources did not influence the production of dry matter (MSPA) in the stem productivity and technological attributes of cane sugar, with effect only the doses. The phosphating promoted an increase of 16 and 10 t ha<sup>-1</sup> MSPA and TCH, respectively, in relation for the realization of just planting fertilization. The technological attributes of cane sugar were not influenced by phosphate applications in plant cane cycle.

**Key words:** *Saccharum* spp, phosphorus sources, match fixing, TCH, TPH

## Introdução

O cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) se destaca como a mais importante atividade agroeconômica voltada à produção de açúcar, etanol e energia elétrica no Brasil. Em virtude da crescente demanda por combustíveis e energia renovável, o etanol da cana-de-açúcar é considerado como uma fonte alternativa aos combustíveis fósseis (BÖRJESSON, 2009), bem como o potencial aproveitamento de sua biomassa para produção de energia elétrica evidencia a importância, desta cultura, na matriz energética nacional.

Em comparação a outros macronutrientes, o fósforo é requerido em menor quantidade pela planta, porém as adubações são elevadas, pelas características apresentadas por diferentes tipos de solo, que fazem com que a maior parte do P adicionado se torne indisponível à planta (BASTOS et al., 2008). Dessa forma, a adubação fosfatada passa a ser imprescindível para a obtenção de produções satisfatórias das culturas.

Dentre os processos metabólicos que o fósforo participa pode-se destacar: aumento da produção de colmos; atuando no desenvolvimento das raízes e nas características industriais, como porcentagem aparente de sacarose contida no caldo da cana (pol%), pureza de caldo e clarificação (MKHABELA & WARMAN, 2005; SIMÕES NETO et al., 2009).

O fósforo na cana-de-açúcar assume grande importância no enraizamento e perfilhamento, portanto, na produtividade final e no rendimento de açúcar (SANTOS, 2009). A deficiência de fósforo também é problemática pois, segundo Mahadevaiah et al. (2007), reduz a absorção de nitrogênio e dificulta a clarificação do caldo durante a fabricação do açúcar, elevando o custo de fabricação em virtude da necessidade de adição de fosfatos solúveis para atingir o teor ideal de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, fundamental para uma clarificação eficiente.

Além dos benefícios no campo, uma boa adubação fosfatada também é de grande importância na qualidade da cana-de-açúcar, influenciando a porcentagem aparente de sacarose contida no caldo da cana (pol%) e pureza de caldo (SIMÕES NETO et al., 2009). A qualidade da matéria-prima é definida como o conjunto de características que a cana-de-açúcar deve apresentar, atendendo às exigências da indústria, por ocasião do processamento, em especial o teor de sacarose e a fibra industrial (MOURA et al., 2005).

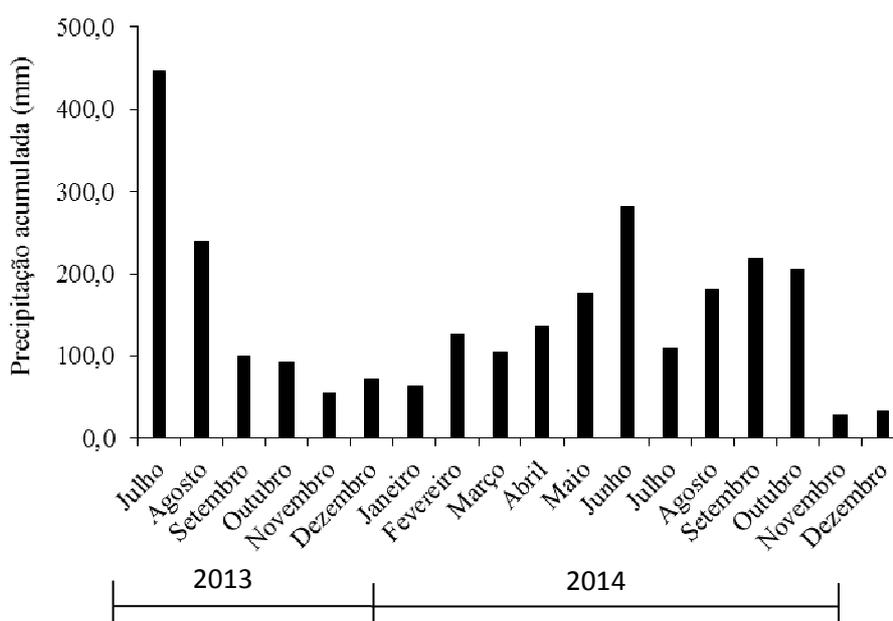
Assim, neste trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da fosfatagem com fontes de solubilidade variada e diferentes doses, na produção de massa seca da parte aérea, na produtividade de colmos e nas variáveis agroindustriais da cana-de-açúcar.

## Material e Métodos

### *Condução experimental*

A pesquisa foi realizada em condições de campo na Zona da Mata do Estado de Pernambuco, no período de julho de 2013 a dezembro de 2014, durante a safra agrícola de 2013/2014 (cana planta de ano e meio). O experimento foi implantado na área agrícola da Usina Cucaú, situado no município de Ribeirão, PE, na latitude de 08° 30' 24'' S e longitude de 35° 22' 52'' W. De acordo com o sistema Köppen, o clima dominante na região é o Tropical As', tropical chuvoso com verão seco. Durante a condução do experimento a precipitação acumulada foi de 2.667,0 mm (Figura 1).

O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO AMARELO distrófico, com textura franco-argilosa (EMBRAPA, 2013) (Tabela 1). A caracterização química e física foi realizada nas profundidades 0,0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m (Tabela 1). A identificação dos minerais presente na fração argila foi realizada por difratogrametria de raios X (WHITTING & ALLARDICE, 1986) em três profundidades: 0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Figura 2).



**Figura 1.** Precipitação pluviométrica durante a condução do experimento, em Ribeirão – Pernambuco.

Quimicamente os solos foram caracterizados pelo pH (H<sub>2</sub>O), Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Al<sup>3+</sup>, (H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup>), P, M.O, Fe, Cu, Zn e Mn. O Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Al<sup>3+</sup> foram extraídos com KCl 1,0 mol L<sup>-1</sup> e dosados por titulometria; o P, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Fe, Cu, Zn e Mn foram extraídos por Mehlich-1, sendo o P dosado por colorimetria, o K<sup>+</sup> e Na<sup>+</sup> por fotometria de chama e o Fe, Cu, Zn e Mn por espectrofotometria de absorção atômica (EMBRAPA, 2009). A acidez potencial (H+Al<sup>3+</sup>) foi extraída com acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> e dosado por titulometria. Todas as análises foram realizadas conforme metodologias descritas pela EMBRAPA (2009). A matéria orgânica (M.O) foi determinada pelo método colorimétrico (RAIJ et al., 2001) (Tabela 1). Fisicamente foi determinado no solo a granulometria, definindo sua classe textural de acordo com Ruiz (2005a), densidade do solo, densidade das partículas, umidade na capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) (EMBRAPA, 1997) (Tabela 1).

Após a aplicação e incorporação dos corretivos de solo, foi realizada a marcação das parcelas experimentais e aplicado os tratamentos. Os tratamentos consistiram na utilização de três fontes e quatro doses de P, aplicadas em área total e incorporadas com grade leve a 0,10 m de profundidade, bem como um tratamento controle sem a realização da fosfatagem.

As fontes utilizadas foram o Superfosfato Triplo (ST); Fosfato Natural Reativo (FNR - 'Gafsa: 30 % do P total solúvel em ácido cítrico) e Torta de Filtro *inatura* (TF: 42 % de umidade), calculados para atender as doses 50, 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Para a fonte torta de filtro, foi realizada a caracterização química, sendo determinados os valores de 12,5; 36,9; 2,40; 186,0 g kg<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O e Matéria Orgânica, respectivamente.

Os tratamentos foram distribuídos em blocos ao acaso, utilizando o esquema fatorial de (3 x 4) + 1, com quatro repetições, perfazendo o total de 52 parcelas experimentais. As parcelas experimentais foram constituídas de 6 linhas de cana-de-açúcar com 20 m de comprimento (120 m<sup>2</sup>), espaçadas a 1,0 m entre si. Para a área útil das parcelas, foi considerada as 4 linhas centrais com 18 m de comprimento.

Na sequência, realizou-se a abertura dos sulcos de plantio, sendo acomodados os colmos sementes da variedade RB867515, contendo de 2 a 3 gemas, de modo a se obter 23 gemas por metro. Em seguida foi realizada a

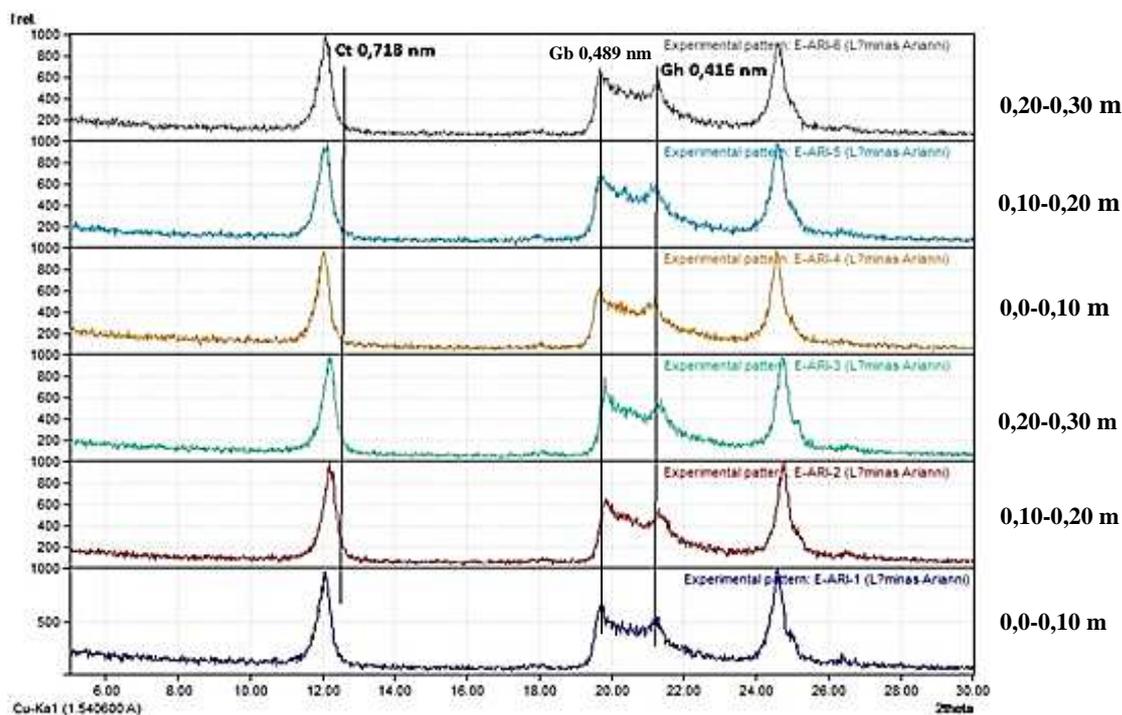
adubação de plantio, sendo aplicados 25 kg ha<sup>-1</sup> de N e 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de fosfato monoamônio (MAP).

Aos 90 DAP realizou-se a adubação de cobertura, no qual foram aplicados 35 kg ha<sup>-1</sup> de N e 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, na forma de sulfato de amônio e cloreto de potássio, respectivamente. Assim, o total de nutrientes aplicados foram 60 kg ha<sup>-1</sup> de N; 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.

**Tabela 1.** Caracterização química e física do solo da área experimental, nas profundidades de 0,0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m.

<i>Atributos do Solo</i>	<i>Química do Solo</i>	
	<i>Profundidade (m)</i>	
	0,0-0,20	0,20-0,40
pH (H <sub>2</sub> O 1:2,5)	5,50	5,30
H <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,90	3,70
Al <sup>+3</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,00	0,40
Ca <sup>+2</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,30	2,40
Mg <sup>+2</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,30	0,20
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,14	0,05
Na <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,04	0,03
SB <sup>(1)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,78	2,68
CTC <sub>potencial</sub> <sup>(2)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	8,68	6,78
CTC <sub>efetiva</sub> <sup>(3)</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,78	3,08
V <sup>(4)</sup> (%)	43,54	39,52
m <sup>(5)</sup> (%)	0,00	12,98
M.O (%)	3,26	2,40
P (mg dm <sup>-3</sup> )	2,00	2,00
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	160,00	227,30
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,20	0,10
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	2,10	1,80
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	2,00	1,50
Ca/Mg	11,00	12,00
Ca/K	23,83	44,57
	<i>Física do Solo</i>	
Areia (g kg <sup>-1</sup> )	429,4	361,4
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	174,6	230,5
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	396,0	408,1
D <sub>s</sub> <sup>(6)</sup>	1,35	1,48
D <sub>p</sub> <sup>(7)</sup>	2,34	2,43
e <sub>v<sub>cc</sub></sub> <sup>(8)</sup> (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,17	0,12
e <sub>v<sub>pmp</sub></sub> <sup>(9)</sup> (cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> )	0,20	0,21
Classe Textural	Franco Argilosa	Franco Argilosa

<sup>(1)</sup> Soma de base; <sup>(2)</sup> Capacidade de troca de cátions potencial; <sup>(3)</sup> Capacidade de troca de cátions efetiva; <sup>(4)</sup> Saturação por bases; <sup>(5)</sup> Saturação por alumínio; <sup>(6)</sup> densidade do solo; <sup>(7)</sup> Densidade das partículas; <sup>(8)</sup> Capacidade de campo; <sup>(9)</sup> Ponto de murcha permanente.



**Figura 2.** Difratogramas de raios X da fração argila das profundidades 0,0 - 0,10, 0,10 - 0,20, 0,20 - 0,30 m em Latossolo Amarelo Distrofico de Ribeirão-PE. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita.

Para quantificar a produção de massa seca da parte aérea (MSPA) da cana-de-açúcar foi realizado amostragem de material vegetal no final do desenvolvimento da cultura, aos 518 DAP. A amostragem foi realizada na parte central da segunda linha de plantio das parcelas experimentais, coletando-se toda a parte aérea e contando o número de plantas contidas em 01 metro de comprimento. Ainda no campo, foi obtida a massa fresca das folhas secas, folhas verdes, ponteiro e colmos separadamente, por meio da pesagem em balança eletrônica com precisão de 0,02 kg. As amostras foram identificadas e acondicionadas em sacos de papel e levadas para o laboratório.

No laboratório, foram retiradas subamostras dos ponteiros, folhas e colmos, no qual foram pesadas em balança analítica (precisão de 0,01 g) e secas em estufa de ventilação forçada a 65 °C até atingir peso constante, sendo posteriormente novamente pesadas para determinação da umidade do material. De posse do número de plantas e da massa seca de cada compartimento da parte aérea, calculou-se a produção de matéria seca da parte aérea ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), tomando como base o espaçamento de 1 m entre as linhas de plantio.

Após a avaliação da produção da massa seca da parte aérea foi realizada, no mesmo período, a queima do experimento, de modo a eliminar a palha e facilitar a identificação das parcelas e o corte da cana-de-açúcar. Ressalta-se que em Pernambuco, a prática da queima nos canaviais ainda é utilizada no corte da cana-de-açúcar.

Para quantificar a produtividade de colmos, foi realizada a colheita e despolpa das plantas contidas na área útil das parcelas experimentais (72 m<sup>2</sup>). Posteriormente, ainda no campo os colmos foram pesados com auxílio de dinamômetro PR30-3000, com precisão de 50kg, (Líder, Araçatuba, SP), no qual se determinou a produtividade em tonelada de colmo por hectare (TCH).

Em seguida, foram tomados aleatoriamente 10 colmos e enviados ao laboratório da Usina Cucaú S/A, no município de Rio Formoso – PE, para avaliação das variáveis agroindustriais. Para isso, as amostras foram trituradas em forrageira e retiradas subamostras, as quais foram submetidas à prensa hidráulica por um minuto, sob pressão de 250 kg cm<sup>-2</sup>, coletando-se o caldo (CONSECANA, 2006). No caldo determinou-se: a sólidos solúveis totais (°Brix), percentagem de sacarose aparente no caldo (POL). No colmo foi determinado: açúcar teórico recuperável (ATR), percentagem de fibra, sacarose no colmo (PC). A produtividade de açúcar ou tonelada de Pol por hectare (TPH) foi estimada pela equação:  $TPH = TCH \times PC/100$ , conforme Lima Neto et al. (2013).

A produção de MSPA, a produtividade de colmos e as variáveis tecnológicas foram avaliadas em função das fontes e doses de fósforo utilizadas na fosfatagem. Os dados foram submetidos a análise de variância (ANAVA) utilizando o delineamento de blocos ao acaso em arranjo fatorial (3x4) +1, ao nível de 5 % de significância pelo teste F. Nas variáveis qualitativas cujos efeitos principais e/ou interação foram significativos, aplicou-se o teste de comparação de médias de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Nas variáveis quantitativa (doses) cujos efeitos principais e/ou interação foram significativos foram ajustados a modelos polinomiais de primeira e segunda ordem. Como critério para escolha dos modelos de regressão, foram selecionados aqueles que apresentassem maior coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e significância dos parâmetros da equação até 10 % de probabilidade pelo teste t. Para as análises estatísticas utilizou-se o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

## **Resultados e Discussão**

A produção de MSPA e o TCH não foram influenciadas pela interação entre as fontes e doses de P, sendo observado apenas efeito das doses utilizadas na fosfatagem (Tabela 2). Para o TPH, não verificou-se efeito da fosfatagem na produtividade de açúcar (Tabela 2).

Houve aumento na produção de MSPA e no TCH independente da fonte de P utilizada na fosfatagem, no qual se observou ajuste ao modelo quadrático obtendo nas doses de 155 e 251 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as maiores produções, com valores de 79 e 127 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 3). A prática da fosfatagem promoveu incremento de 16 e 10 t ha<sup>-1</sup> de MSPA e de TCH, respectivamente, em relação a realização de apenas a adubação de plantio, que produziu 63 e 117 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 3).

Mesmo com a adubação fosfatada de plantio (52 kg ha<sup>-1</sup> de P), que atendeu a exigência nutricional de P para essa variedade (19 kg ha<sup>-1</sup> de P) no primeiro ciclo da cana-de-açúcar, como pode ser visto nos resultados de Oliveira et al. (2010b) e nos dados de teores de P na folha +1 da tabela 2 do segundo capítulo, a cana planta cultivada em solo argiloso, com mais de 350 g kg<sup>-1</sup> de argila, respondeu positivamente a correção dos teores de P na camada superficial do solo.

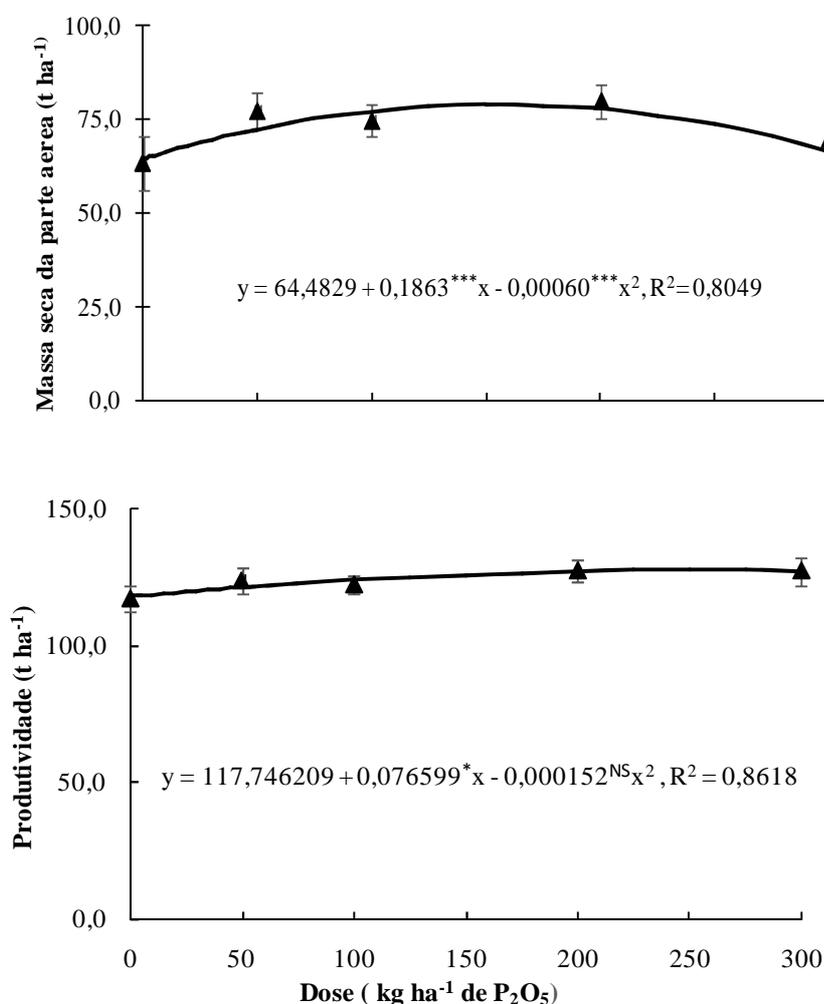
**Tabela 2.** Matéria seca da parte aérea (MSPA), produtividade de colmos (TCH) e tonelada de Pol por hectare (TPH), em relação a fosfatagem com fontes de solubilidade variada, aos 518 DAP.

DOSES	MSPA			TCH			TPH		
	FNR	ST	TF	FNR	ST	TF	FNR	ST	TF
	----- t ha <sup>-1</sup> -----								
0	63,4	63,4	63,4	116,8	116,8	116,8	13,9	13,9	13,9
50	77,3	72,2	77,3	125,9	124,6	120,4	15,8	14,8	15,7
100	63,4	82,7	78,0	123,2	123,3	119,8	15,3	15,5	14,3
200	86,6	84,8	68,4	126,6	126,5	128,7	16,5	15,1	15,9
300	71,6	83,5	62,8	122,2	131,5	127,4	15,2	15,6	15,9
F <sub>Fonte</sub>		15,203 <sup>NS</sup>			0,221 <sup>NS</sup>			0,251 <sup>NS</sup>	
F <sub>Dose</sub>		9,638 <sup>**</sup>			2,225 <sup>*</sup>			2,414 <sup>NS</sup>	
F <sub>Fonte x Dose</sub>		2,604 <sup>NS</sup>			0,308 <sup>NS</sup>			0,401 <sup>NS</sup>	
C.V		14,68			8,05			11,14	

<sup>NS</sup> não significativo; \*, \*\* significativo a 10 e 1 % de probabilidade, pelo teste de Tukey. FNR: Fosfato natural reativo, ST: Superfosfato triplo e TF: Torta de filtro.

Esses resultados evidenciam que os ganhos obtidos para esse primeiro ciclo não se devem ao melhoria nutricional de P, mas sim ao efeito indireto da correção da fertilidade fosfatada do solo, como exemplo no maior desenvolvimento do sistema radicular, que exploraria maior volume de solo, aumentando a absorção de água e outros nutrientes, reduzindo o estresse hídrico e nutricional.

Os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar não foram influenciados pela fosfatagem no ciclo de cana planta (Tabela 3). Como os teores de P na Folha +1 não apresentaram diferença pela fosfatagem, em virtude da adubação de plantio, a nutrição de P da planta já estaria adequada, o que justifica não haver incrementos na qualidade do caldo e no ganho de açúcar com o aumento da disponibilidade de P fora da linha de plantio.



**Figura 3.** Matéria seca da parte aérea (MSPA) e produtividade de colmos (TCH), em relação a fosfatagem, aos 518 DAP. Barras na vertical demonstram o intervalo de confiança a  $p \leq 0,05$ .

Resultados encontrados por Santos et al. (2010), demonstram a importância do P para o incremento da qualidade do caldo e na concentração de açúcar no colmo da cana planta adubada com P, uma vez que os autores verificaram aumento do °Brix, ATR e PC com a maior oferta de P pela adubação fosfatada de plantio. O aumento do °Brix e ATR com a adubação fosfatada de plantio, também foi observado por Costa (2012) em Argissolo Vermelho Amarelo distrófico no Estado de Pernambuco.

Deste modo, o efeito da fosfatagem nos atributos tecnológicos, nos teores de P da folha e em maiores ganhos de produtividade de colmo, possivelmente serão observados no ciclo seguinte de cana soca, quando a disponibilidade de P no sulco de plantio for menor e a correção do teor de P em área total promoverá efeito residual. Tomaz (2009) ao avaliar o efeito residual da adubação fosfatada no plantio da cana-de-açúcar em Latossolo Amarelo distrófico, observou redução de 32,3 % na produtividade de colmos entre a cana planta e cana soca. Segundo os autores a redução na produtividade deve-se a menor disponibilidade do P no solo após o primeiro ciclo de crescimento.

Com relação aos atributos do caldo, os valores encontrados no presente estudo encontram-se na faixa dos valores mínimos desejáveis para °Brix e Pol descritos em Rodrigues (1995), que são da ordem de 18 e 14,4%, respectivamente. Oliveira et al. (2011) verificaram em cana planta sob o sistema de produção irrigado e de sequeiro valores de °Brix e Pol para a variedade RB867515 foram superiores aos observados.

Para os atributos do colmo, os teores de fibra foram superiores ao limite superior da faixa indicada por Oliveira et al. (2009). Os altos teores de fibra dificultam a extração de caldo nas moendas, reduzindo sua eficiência (MARQUES et al., 2008), além de possuir uma relação negativa com o teor de açúcar (BARBOSA et al., 2007).

Os resultados de PC e ATR, foram baixos quando comparados com os resultados de Oliveira (2008), na mesma variedade cultivada em Argissolo Amarelo distrófico, o qual constatou valores de 16,0% e 153,7 kg ton<sup>-1</sup>, respectivamente. No entanto, segundo Simões Neto (2009) os valores de ATR estão de acordo com o padrão para o estado de Pernambuco, que possui valores médios de 119 kg ton<sup>-1</sup>.

**Tabela 3.** Atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, em relação a fosfatagem com fontes de solubilidade variada, aos 518 DAP.

DOSES	<i>Atributos do Caldo</i>						<i>Atributos do colmo</i>								
	POL			°Brix			Teor de Fibra			Sacarose do colmo			ATR		
	FNR	ST	TF	FNR	ST	TF	FNR	ST	TF	FNR	ST	TF	FNR	ST	TF
	----- % -----												kg ton <sup>-1</sup>		
0	14,9	14,9	14,9	19,7	19,7	19,7	15,0	15,0	15,0	12,0	12,0	12,0	124,2	124,2	124,2
50	15,5	15,3	15,0	18,7	19,2	19,4	14,5	16,5	15,0	12,5	11,9	11,9	126,4	118,3	131,0
100	14,4	15,7	14,9	18,2	19,1	19,3	14,3	15,2	15,0	12,5	12,5	12,5	126,8	126,5	124,6
200	16,3	14,3	14,3	19,6	18,8	17,4	14,7	15,4	15,0	13,0	11,9	12,4	131,4	118,3	123,7
300	15,6	13,8	15,1	18,9	17,4	18,8	14,9	15,3	14,4	12,5	11,8	11,8	125,7	120,3	127,0
MEDIA	15,3	14,8	14,8	19	18,8	18,9	14,7	15,5	14,8	12,5	12,0	12,4	126,9	121,5	126,1
F <sub>Fonte</sub>	0,611 <sup>NS</sup>			0,090 <sup>NS</sup>			3,199 <sup>NS</sup>			1,060 <sup>NS</sup>			2,107 <sup>NS</sup>		
F <sub>Dose</sub>	0,116 <sup>NS</sup>			1,491 <sup>NS</sup>			0,200 <sup>NS</sup>			0,475 <sup>NS</sup>			0,084 <sup>NS</sup>		
F <sub>Fonte x Dose</sub>	0,758 <sup>NS</sup>			1,112 <sup>NS</sup>			0,784 <sup>NS</sup>			0,576 <sup>NS</sup>			0,712 <sup>NS</sup>		
C.V	11,8			7,68			7,11			8,45			7,14		

<sup>NS</sup> não significativo; \*, \*\* significativo a 5 % de probabilidade, pelo teste de Tukey. FNR: Fosfato natural reativo, ST: Superfosfato triplo e TF: Torta de filtro. POL: percentagem de sacarose aparente no caldo; °Brix: Sólidos solúveis totais; PC: Sacarose no colmo; ATR: Açúcar teórico recuperável

## **Conclusões**

As fontes de P não apresentaram diferença na produção de biomassa e nos atributos de produtividade da cana planta, o que possibilita a utilização dos três fertilizantes para a prática da fosfatagem.

A dose de  $155 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  é ideal quando se quer obter uma maior produção de biomassa da parte aérea. Enquanto que a dose de  $250 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  é ideal quando se deseja obter uma maior produtividade de colmos de cana-de-açúcar.

## Referências bibliográficas

BARBOSA, M. H. P. et al. Variedades melhoradas de cana-de-açúcar para Minas Gerais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 28, n. 239, p. 20-24, 2007.

BASTOS, A. L. et al. Influência de doses de fósforo no fluxo difusivo em solos de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.136-142, 2008.

BÖRJESSON, P. **Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective –what determines this?** *Appli. Ener.* 86: 589–594, 2009.

COSTA, D. B. **Adubação fosfatada da cana-de-açúcar: Disponibilidade de fósforo e formas de aplicação.** Tese (Doutorado em Ciência do solo). Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife. 2012.

CONSECANA – CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, A. E. Á. DO E. DE S. P. **Manual de instruções.** [s.l: s.n.] p. 112. 2006.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro. Centro Nacional de Pesquisa de Solo, 212p. 1997.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes** / editor técnico, Fábio Cesar da Silva. 2 ed. Rev. ampl. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 627 p. 2009.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** / Humberto Gonçalves dos Santos... [et al.]. 3 ed. Rev. Ampl. Brasília, DF: Embrapa, 353 p. 2013.

FERREIRA, DANIEL FURTADO. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia** (UFLA), v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

LIMA NETO, J. F. et al. Avaliação agroindustrial e parâmetros genéticos de clones UFRPE de cana-de-açúcar no litoral norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v 18, n.1, p. 8-13, 2013.

MAHADEVAIAH, M. S. et al. A simple spectrophotometric determination of phosphate in sugarcane juices, water and detergent samples. **Journal of Chemistry**, v.4, p.467-473, 2007.

MARQUES, M. O. et al. Considerações sobre a qualidade da matéria-prima. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; NOGUEIRA; T. A. R., TASSO JÚNIOR, L. C.; NOGUEIRA, G. A.; BERNARDI, J. H. **Tecnologias na agroindústria canavieira.** Jaboticabal: FUNEP, p. 9-16. 2008.

MKHABELA, M. S.; WARMAN, P. R. The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown

in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. 106, 57–67. 2005.

MOURA, M. V. P. F. et al. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, v.29, p.753-760, 2005.

OLIVEIRA, E. L. DE et al. Uso de vinhaça de alambique e nitrogênio em cana-de-açúcar irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. V, 44, n. 11, p. 1398-1403, 2009.

OLIVEIRA, E. C. A. et al. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 14, n. 9, p. 951-960, 2010b.

OLIVEIRA, E. C. A. DE et al. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v, 46, n. 06, p. 617-625, 2011.

RAIJ, B. van. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 285p. 2001.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: Instituto de Biociências. 69p. 1995.

RUIZ, H. Dispersão física do solo para a análise granulométrica por agitação lenta, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 30. Recife, 2005. **Anais**. Viçosa: SBCS, 2005 a.

SANTOS, D. H. **Adubação da cana-de-açúcar com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel**. Presidente Prudente: UNOESTE. Dissertação Mestrado. 35p. 2009.

SANTOS, D. H.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; FABRIS, L. B. Produtividade de cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Pesquisa Agropecuária Tropical**. Goiania, v. 40, n. 4, p. 454-461, 2010.

SIMÕES NETO, D.E. et al. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.840–848, 2009.

SORIANO, H. L. **Extração e eficiência na utilização de macro e micro nutrientes por variedades RB de cana-de-açúcar**. 22 p. Monografia - (Graduação). Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo. 2007.

TOMAZ, H.V.Q. **Fontes, doses e formas de aplicação do fósforo na cana-de-açúcar.** 94 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba. 2009.

WHITTING, L. D.; ALLARDICE, W. R. X-ray diffraction techniques. In: Klute, A. (ed.). **Methods of soil analysis.** Part. 1 Physical and mineralogical methods. Madison: SSSA, cap.9, p.331- 359. 1986.

**Apêndice A.** Valores de pH em H<sub>2</sub>O e P-remanescente em função da fosfatagem com fontes de solubilidade variada. FNR: Fosfato natural reativo, ST: Superfosfato triplo e TF: Torta de filtro.

FONTES	pH	P-rem mg dm <sup>-3</sup>
0,0-0,10 m		
FNR	5,5	56,7
ST	5,4	56,4
TF	5,4	57,8
MEDIA	5,4	56,8
F <sub>Fonte</sub>	0,592 <sup>NS</sup>	2,916 <sup>NS</sup>
F <sub>Dose</sub>	0,490 <sup>NS</sup>	0,404 <sup>NS</sup>
F <sub>Fonte X Dose</sub>	1,055 <sup>NS</sup>	1,545 <sup>NS</sup>
C.V	7,86	3,16
0,10-0,20 m		
FNR	5,3	56,8
ST	5,3	56,4
TF	5,3	57,5
MEDIA	5,3	56,9
F <sub>Fonte</sub>	0,294 <sup>NS</sup>	0,910 <sup>NS</sup>
F <sub>Dose</sub>	0,620 <sup>NS</sup>	1,446 <sup>NS</sup>
F <sub>Fonte X Dose</sub>	1,035 <sup>NS</sup>	1,643 <sup>NS</sup>
C.V	7,52	3,1
0,20-0,30 m		
FNR	5,1	56,8
ST	5,3	56,4
TF	5,3	57,5
MEDIA	5,2	56,9
F <sub>Fonte</sub>	1,623 <sup>NS</sup>	0,913 <sup>NS</sup>
F <sub>Dose</sub>	0,262 <sup>NS</sup>	0,502 <sup>NS</sup>
F <sub>Fonte X Dose</sub>	0,846 <sup>NS</sup>	1,635 <sup>NS</sup>
C.V	9,01	3,1

<sup>NS</sup> não significativo a 5 % de probabilidade, pelo teste de Tukey. FNR: Fosfato natural reativo, ST: Superfosfato triplo e TF: Torta de filtro.