

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
CIÊNCIA DO SOLO**

**DINÂMICA DO FÓSFORO EM ECOSISTEMA DE  
PASTAGEM NATURAL SUBMETIDO À APLICAÇÃO  
DE FONTES DE FOSFATO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Leandro Bittencourt de Oliveira**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

**DINÂMICA DO FÓSFORO EM ECOSSISTEMA DE  
PASTAGEM NATURAL SUBMETIDO À APLICAÇÃO DE  
FONTES DE FOSFATO**

**Leandro Bittencourt de Oliveira**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Químicos e ciclagem de elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo.

**Orientador: Prof. Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2012**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**DINÂMICA DO FÓSFORO EM ECOSSISTEMA DE PASTAGEM  
NATURAL SUBMETIDO À APLICAÇÃO DE FONTES DE FOSFATO**

elaborada por  
**Leandro Bittencourt de Oliveira**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Ciência do Solo**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos**  
(Presidente/Orientador) – CCR – UFSM

---

**Prof. Dr. Fernando Luiz Ferreira de Quadros**  
CCR-UFSM

---

**Dr. José Pedro Pereira Trindade**  
EMBRAPA

Santa Maria, 09 de janeiro de 2012.

*Aos pecuaristas de campo nativo*

*Que ganham a vida,*

*do suor, no lombo do cavalo, ao relento de sol.*

**Dedico este trabalho!**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao professor Danilo Rheinheimer pela orientação, pelos conselhos, confiança e pelo exemplo de dedicação à pesquisa e ao ensino superior.

Ao professor Fernando de Quadros pela co-orientação, pelos ensinamentos desde o tempo da iniciação científica e pelo exemplo de dedicação à pesquisa sobre Pastagens Naturais.

Ao pesquisador José Pedro Pereira pela oportunidade de convívio, aprendizagem e realização dos experimentos instalados em Candiota para execução do presente trabalho.

Ao professor João Kaminski pelas conversas, sábios ensinamentos e amparo intelectual.

Ao pecuarista Álvaro Brum pela concessão da área experimental no município de Candiota.

Ao colega e amigo Tales Tiecher pelos ensinamentos, paciência e ajuda na idealização e realização deste trabalho.

Aos amigos Bruno Castro e Émerson Soares pelo convívio e longas discussões sobre o futuro da pecuária e as soluções para a manutenção dos “campos nativos”.

A minha namorada Vanessa pelo companheirismo e ajuda nas correções deste trabalho.

Aos colegas de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela amizade e convívio, especialmente ao Gustavo Griebeler, Fábio Mallmann e Carlos Alberto Casali pelos ensinamentos do laboratório e na confecção deste documento.

Aos bolsistas de iniciação científica do Laboratório de Química e Fertilidade dos Solos, em especial ao Marcos Antônio Bender, Rogério Piccin, Fabiano Elias Arbugeri, Rafael Ramon, Cesar Cella, Elci Gubiani e Luana Orlandi, pelo auxílio na execução dos trabalhos de campo e de laboratório.

Aos estagiários da Embrapa especialmente ao Régis Carvalho, Renan Gonzato, Gisele, Carolina Goulart e Rafaela Vidart.

Aos funcionários da Embrapa CppSul em especial Clóvis Treptow (Felipão).

Ao Alex Giuliani pela amizade, disposição e presteza.

A EMBRAPA, na figura do Pesquisador Marcos Borba pela estrutura e auxílio para execução do projeto.

A EMBRAPA e ao CNPQ, pela concessão dos projetos: Embrapa Macroprograma 6 número 06.09.01.006 e CNPq 557360/2009-9, o quais deram auxílio financeiro na realização deste trabalho.

Ao Departamento de solos da UFSM pelo auxílio e estrutura para execução do projeto.

A CAPES pela bolsa de estudo para execução do projeto.

Enfim, a todos que estiveram presentes direta ou indiretamente nesta etapa da minha vida e que contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Universidade Federal de Santa Maria

### DINÂMICA DO FÓSFORO EM ECOSISTEMA DE PASTAGEM NATURAL SUBMETIDO À APLICAÇÃO DE FONTES DE FOSFATO

AUTOR: LEANDRO BITTENCOURT DE OLIVEIRA  
ORIENTADOR: DR. DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS  
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 09 de janeiro de 2012.

O conhecimento da dinâmica do fósforo nos ecossistemas campestres pode ser importante para a prescrição das alterações provocadas pela adição de diferentes fontes de fertilizantes fosfatados sobre as formas de P no solo, na produção de matéria seca e na composição botânica das pastagens naturais. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência da dinâmica do P (a) na disponibilidade e formas de P no solo; (b) na massa total de forragem e as contribuições de massa seca e (c) curvas de diluição de P no tecido das principais espécies componentes das pastagens naturais submetidas à aplicação de diferentes fontes de fosfato em três solos com e sem histórico de fertilização fosfatada. Os tratamentos consistiram na aplicação de P nas formas de hiperfosfato de Gafsa, superfosfato simples, superfosfato triplo e testemunha, arranjados em blocos casualizados com três repetições. Nos dois experimentos instalados em Candiota (Luvissole Úmbrico e Neossolo Litólico), foram aplicados  $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  em setembro de 2010. No experimento de Santa Maria (Argissolo Vermelho) foram aplicados 180, 90, 100 e  $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  nos anos de 1997, 1998, 2002 e 2010, respectivamente, totalizando  $470 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . As coletas de solo (camada 0-10 cm) e as massas de forragem foram avaliadas no período primavera-verão, após a última aplicação dos tratamentos em cada experimento. O hiperfosfato de Gafsa demonstrou ter potencial de disponibilização de P em solos ácidos com baixo teor de cálcio sob pastagens naturais, mas a disponibilização de P obtida com os superfosfatos foi maior. A aplicação de fertilizantes fosfatados em solos pobres sob pastagens naturais aumenta a importância das frações inorgânicas lábeis de P na disponibilização de P para as plantas, tornando-as menos dependentes da mineralização das frações orgânicas. A resposta da pastagem natural à fertilização fosfatada foi maior onde havia significativa contribuição de espécies anuais. O histórico de adição de fertilizantes fosfatados solúveis alterou a contribuição das principais espécies na massa seca total das pastagens naturais. Em Candiota, as espécies não apresentaram crescimento em função de forte estiagem. Em Santa Maria, as espécies *Paspalum notatum*, *Aristida laevis* e o componente Outras Espécies aumentaram a biomassa aérea e diluíram P do tecido ao longo dos períodos avaliados. A espécie *Eustachys ulignosa* respondeu a adição de fosfato solúvel. As fontes de fosfatos avaliados não alteraram o teor de N no tecido das plantas.

**Palavras-chave:** Espécies campestres. Fertilização fosfatada. Formas de Fósforo. Massa seca de forragem. Diluição do P no tecido.

## ABSTRACT

Master Dissertation  
Post-Graduate Program in Soil Science  
Federal University of Santa Maria

### PHOSPHORUS DYNAMICS IN NATURAL GRASSLAND ECOSYSTEM SUBMITTED TO APPLICATION OF PHOSPHATE SOURCES

AUTHOR: LEANDRO BITTENCOURT DE OLIVEIRA  
ADVISER: DR. DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS  
Place and Date of the Defense: Santa Maria, 9<sup>th</sup> January 2012.

The knowledge of P dynamics in grassland ecosystems may be important to prescription of changes caused by the addition of different sources of phosphate fertilizers in the P forms of soil, dry matter production and botanical composition of natural grasslands. The objective of this work was to evaluate the dynamics of P (a) the availability and forms of P; (b) total dry matter and contributions in dry matter and (c) dilution curves of P content from tissue of main species of natural grasslands after the application of different phosphate sources in three soil types under natural grasslands with or without historical of P applications. Treatments were P applications as Gafsa rock phosphate, simple superphosphate, triple superphosphate and control, arranged in randomized blocks with three replicates. In two experiments located in the city of Candiota - RS (Ultisol and Entisol), 100 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were applied in September 2010. In the experiment of Santa Maria - RS (Alfisol), 180, 90, 100 e 100 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were applied in 1997, 1998, 2002 and 2010, respectively, which represent 470 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. The soil samples (0-10 cm) and herbage mass were evaluated in the spring and summer after applied the last treatment in each experiment. The Gafsa rock phosphate showed a potential to increase P availability in soils with low calcium content in natural grasslands, but increases were higher when superphosphate was used. The application of phosphate fertilizers in soils under grasslands increases the importance of inorganic fractions of labile P to the available P to plants, making them less dependent on the mineralization of organic fractions. The P fertilization response was higher where annual species occurrence prevailed. In pastures with historical of fertilization, contribution of main species to the total dry mass of pasture had changed. In Candiota city, species did not grow by a severe drought. In Santa Maria, species as *Paspalum notatum*, *Aristida laevis* and other plants aggregated as Other Species had increased biomass and P tissue content was diluted over the periods. The specie *Eustachys ulignosa* had responded in biomass to soluble phosphate additions. The evaluated phosphates sources did not alter the N content in the tissue of grassland species.

**Key words:** Grassland species. Phosphorus fertilization. Phosphorus forms. Herbage dry matter. Dilution of tissue P.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
1.1 Origem do fósforo em sistemas naturais .....	13
1.2 Mecanismos adaptativos de plantas a baixa disponibilidade de P.....	14
1.3 Referências .....	19
<b>2 HIPÓTESES</b> .....	<b>24</b>
<b>3 OBJETIVOS</b> .....	<b>25</b>
3.1 Objetivo geral.....	25
3.2 Objetivos específicos.....	25
<b>4 ESTRATÉGIA DE ESTUDO</b> .....	<b>26</b>
<b>5 ARTIGO I: FORMAS DE FÓSFORO NO SOLO SOB PASTAGEM NATURAL AFETADAS PELA ADIÇÃO DE FOSFATOS</b> .....	<b>27</b>
5.1 Introdução .....	28
5.2 Material e métodos .....	29
5.3 Resultados .....	34
5.3.1 Efeito da aplicação de diferentes fontes de fosfatos.....	34
5.3.2 Efeito do período de amostragem.....	38
5.4 Discussão .....	39
5.4.1 Efeito das fontes de adição de fosfatos.....	39
5.4.2 Efeito do período de amostragem.....	42
5.5 Conclusões .....	43
5.6 Referências .....	43
<b>6 ARTIGO II: MASSA DE FORRAGEM DE PASTAGENS NATURAIS SUBMETIDAS A DIFERENTES HISTÓRICOS DE ADIÇÃO DE FONTES DE FOSFATO</b> .....	<b>46</b>
6.1 Introdução .....	47
6.2 Material e métodos .....	48
6.3 Resultados .....	51
6.3.1 Massa de forragem total da pastagem natural .....	51
6.3.2 Contribuição das principais espécies e componentes da pastagem natural na massa de forragem total .....	53
6.3.2.1 <i>Efeito do histórico recente de aplicação de diferentes fontes de fosfato</i> .....	53

6.3.2.2 <i>Efeito do histórico de 13 anos de aplicação de diferentes fontes de fosfatos</i> .....	55
<b>6.4 Discussão</b> .....	<b>57</b>
<b>6.5 Conclusões</b> .....	<b>59</b>
<b>6.6 Referências</b> .....	<b>59</b>
<b>7 ARTIGO III: FÓSFORO NA BIOMASSA AÉREA DE ESPÉCIES NATIVAS DOS CAMPOS SULINOS</b> .....	<b>63</b>
<b>7.1 Introdução</b> .....	<b>64</b>
<b>7.2 Material e métodos</b> .....	<b>65</b>
<b>7.3 Resultados</b> .....	<b>69</b>
7.3.1 Fósforo disponível no solo .....	69
7.3.2 Efeito da aplicação de fontes de fosfato no teor de P no tecido das espécies nativas .....	69
7.3.3 Comparação do P no tecido entre as espécies nativas das pastagens naturais submetidas a aplicação de fontes de fosfatos .....	70
7.3.4 Biomassa aérea das espécies e componentes das pastagens .....	71
7.3.5 Diluição do P e N no tecido das espécies nativas das pastagens naturais .....	75
<b>7.4 Discussão</b> .....	<b>78</b>
7.4.1 Comparação do teor de P no tecido entre as fontes de fosfato e as espécies nativas .....	78
7.4.2 Biomassa aérea e diluição do P e N no tecido das espécies nativas .....	79
<b>7.5 Conclusões</b> .....	<b>82</b>
<b>7.6 Referências</b> .....	<b>82</b>
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>86</b>

## INTRODUÇÃO

Os solos ocorrentes sobre pastagens naturais no Rio Grande do Sul na sua maioria são pobres em fósforo disponível, sendo este nutriente no conceito tradicional de fertilidade limitante ao crescimento de plantas. Atualmente, com a pressão pela produção de alimentos, a prática da adubação fosfatada torna-se uma ferramenta para correção da restrição imposta pelo solo às plantas, aumentando a produção de biomassa e, conseqüentemente, a capacidade de suporte das pastagens. Como os custos da adubação são elevados, para o sucesso da fertilização é imprescindível a compreensão da interação entre: a) a disponibilização de P do fertilizante utilizado; b) os teores de P no solo e c) a composição botânica das pastagens.

A disponibilidade de nutrientes é um fator importante condicionante da resposta das pastagens à fertilização. De maneira geral, quanto mais baixo o teor de P no solo, maior seria a capacidade de resposta das pastagens. Porém, parece que essa relação não é direta, pois nas pastagens naturais existe a interação entre os níveis de nutrientes no solo e a vegetação, ou seja, os ambientes mais restritivos na disponibilidade de P são habitados por espécies mais tolerantes e, conseqüentemente, a capacidade de resposta das plantas é menor. O contraste é que, no geral, os ambientes mais pobres apresentam maior diversidade de plantas. Assim, provavelmente os ambientes mais férteis dominados por menor número de espécies podem ter maior capacidade de resposta à fertilização.

As espécies que habitam as pastagens naturais dos Campos Sul Brasileiros, ao longo de sua evolução, desenvolveram mecanismos de sobrevivência à restrição de P no solo para manutenção do crescimento e persistência. Dentre os de maior importância, a lenta taxa de crescimento relativo é o principal mecanismo de tolerância às restrições no fornecimento de P. Dessa forma, as plantas crescem em velocidade condizente com a capacidade do solo de fornecer nutrientes e o aumento da disponibilidade de nutrientes pode não ter efeito sobre a taxa crescimento relativo das plantas. Mesmo assim, há aumentos na produção de biomassa total das pastagens em função da coexistência de espécies de diferentes taxas de crescimento e maior capacidade de resposta.

O conhecimento dos fenômenos e mecanismos acima expostos é importante para que se possa prescrever o uso de fertilizantes de maneira sincronizada com a absorção/utilização das plantas, prevenindo a adsorção pelas partículas do solo e garantindo o aumento na massa de forragem produzida. O domínio da interação destes fatores irá refletir na mitigação de

utilização de P na produção primária e em decorrência disso, na manutenção dos ecossistemas naturais.

# 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 1.1 Origem do fósforo em sistemas naturais

As apatitas são os minerais fosfatados primários mais comuns e a fonte de fósforo do solo em sistemas naturais (RHEINHEIMER et al., 2008a). O rompimento desses minerais primários ocorre mediante intemperização, que depende dos fatores e processos de formação do solo. O fósforo é então liberado para a solução do solo e pode ser adsorvido aos colóides tornando-se indisponível às plantas. A adsorção ocorre principalmente pelo aumento na atividade de íons como ferro e alumínio com a consequente transformação dos minerais primários em argilas 2:1 e estas em 1:1 e óxidos (RHEINHEIMER & ANGHINONI, 2001) aumentando a quantidade de grupos funcionais de superfície mineral ávidos por P.

Nos solos pouco intemperizados a disponibilidade de P é sustentada por uma pequena contribuição das formas de P dos minerais primários (RHEINHEIMER et al., 2008a), já que os colóides inorgânicos são pouco intemperizados e a quantidade de sítios adsorventes é pequena. Com o avanço do intemperismo, os minerais fosfatados vão sendo degradados e sua contribuição no fornecimento de fósforo ao sistema é reduzida e os sítios de adsorção de fósforo aumentam. Com essa mudança, os minerais do solo passam de fonte de P a dreno da solução, devido à formação de complexos de alta especificidade e alta energia de ligação, diminuindo a disponibilidade de P inorgânico na solução do solo.

A contribuição dos processos geoquímicos para a disponibilidade de P varia com a pedogênese do solo (CROOS & SCHLESINGER, 1995). Porém, o fósforo liberado dos minerais primários pode ser absorvido pelos organismos e pelas plantas, e parte deste devolvido ao solo pela decomposição de resíduos e de tecido celular microbiano, assim uma nova forma de fósforo é acumulada, o fósforo orgânico. Em condições naturais, a contribuição das formas orgânicas de P atinge valores de 20 a 80%, e representa a mais importante fonte de P às plantas (DALAL, 1977). A maior parte do P orgânico total (90%), encontra-se em formas protegidas química e fisicamente (HEDLEY et al., 1982). Rheinheimer et al. (2002) verificaram a alta ocorrência de fosfatos monoésteres, que possuem alta reatividade com os colóides inorgânicos do solo, tornando-se de alta recalitrância e de difícil acesso às plantas e aos microrganismos. Dessa forma, apenas uma pequena fração do P

orgânico total é passível de mineralização a formas biodisponíveis em curto espaço de tempo. Todavia, os microrganismos afetam a dinâmica do P no solo, não apenas pela mineralização destes compostos orgânicos, mas também pela imobilização de fosfato, prevenindo a sorção de P pelos colóides inorgânicos do solo (NZIGUHEBA & BÜNEMANN, 2005) que, posteriormente, com a sua morte e lise das células é liberado de forma mais sincronizada com a demanda das plantas (MARTINAZZO et al., 2007).

Embora a disponibilidade de P no solo seja controlada pela interação de processos químicos, biológicos e físicos, em ambientes naturais a bio-reciclagem do P contido nos tecidos vegetais e o P orgânico menos recalcitrante parecem controlar a disponibilidade à biota e às plantas (TIESSEN et al., 1984). A biomassa microbiana do solo (BMS) é considerada um reservatório de P lábil e desempenha papel importante na ciclagem e disponibilização de P nos ecossistemas naturais. Em sistemas equilibrados biologicamente, o conteúdo de P microbiano pode atingir valores equivalentes ou maiores que os necessários às plantas (RHEINHEIMER et al., 2008b). A concentração de P microbiano em solos pode variar de 4 até mais de 100 mg kg<sup>-1</sup> de solo (OBERSON & JONER, 2005) e a liberação anual de P via BMS pode atingir valores de 13,9 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (CHEN et al., 2003) até 23 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (BROOKES et al., 1984).

Dessa maneira, o crescimento das plantas normalmente é limitado em ambientes naturais pela disponibilidade de P e mantido pela mineralização do P orgânico. Ainda pode se destacar que as plantas nativas ao longo da evolução desenvolveram mecanismos que lhes permitiram capacidades de captura e utilização de P mais adaptado às condições de solo para garantir a sobrevivência nos diferentes ambientes.

## **1.2 Mecanismos adaptativos de plantas a baixa disponibilidade de P**

A nutrição mineral de plantas é um tópico central na ecologia vegetal. Ao longo dos anos, ecologistas têm pesquisado várias adaptações de espécies de plantas a diferentes níveis de disponibilidade de nutrientes nos ambientes naturais (CHAPIN, 1980; AERTS & CHAPIN, 2000). De maneira geral, os mecanismos utilizados por plantas diferem quanto à capacidade de captura dos nutrientes e o uso destes depois de capturados (LAJTHA & HARRISON, 1995; VANCE et al., 2003) (Tabela 1).

Muitos mecanismos para maximizar a absorção de P no solo são respostas gerais ao déficit de nutrientes na parte aérea e podem ser encontradas para outros nutrientes, como nitrogênio. O aumento de relações raiz parte aérea, por exemplo, são observadas quando o P é limitante ao crescimento (NASSEY, 1970). Para Chapin (1980) as características de alteração da morfologia da planta estão relacionadas à plasticidade fenotípica e são mais encontradas em culturas agrícolas e/ou em espécies de ocorrência em ambientes mais férteis. Segundo o mesmo autor, os estudos de mecanismos de adaptação das plantas nativas devem ser criteriosamente entendidos e separados do das culturas.

Tabela 1 – Principais estratégias de aquisição e uso de P do solo por plantas.

Estratégias de captura / aquisição	Aumento relação raiz/parte aérea Aumento da área de superfície radicular Aumento da interação micorrízica Aumento da taxa de absorção radicular Aumento da exsudação solubilizadora de P
Estratégias de uso	Diminuição da taxa de crescimento Aumento do crescimento por unidade de P Aumento da reabsorção / retranslocação Aumento da vida útil das folhas

Fonte: Adaptado de LAJTHA & HARRISON, (1995).

As plantas de locais de baixa fertilidade maximizam mais a ingestão de nutrientes através da alta relação raiz/parte aérea e associações micorrízicas do que através de uma alta capacidade de absorção radicular (AERST & CHAPIN, 2000). A alta relação raiz/parte aérea encontrado no campo em habitats de baixa fértilidae é, em parte, resposta a reduzida disponibilidade de nutrientes. Espécies de crescimento rápido, de habitats de alta disponibilidade de nutrientes, mostram plasticidade considerável na relação raiz parte aérea e geralmente têm uma maior proporção de raiz em baixa disponibilidade de nutrientes e menor relação em alta disponibilidade, do que as espécies de um habitat de baixa disponibilidade de nutrientes (CHAPIN, 1980). Por exemplo, a relação raiz parte aérea variou mais para a espécie *Chionochloa pallens*, de crescimento rápido, em resposta ao déficit da nutrição fosfatada do que a *C. crassiuscula* espécie de lento crescimento (CHAPIN et al., 1982). Similarmente, plantas adaptadas a baixo P não mostram mudança na relação raiz parte aérea com a mudança no disponibilidade do P (CHAPIN, 1980). Isto é consistente com a idealização mais recente de Güsewell, (2005) de que as características das espécies de habitats

favoráveis mostram maior plasticidade no padrão de alocação de biomassa do que espécies de ambientes menos férteis.

A lenta taxa de crescimento relativo parece ser o principal mecanismo de tolerância de plantas nativas ao baixo suprimento de nutrientes (CHAPIN, 1980; AERTS & CHAPIN, 2000). Assim, as plantas tornam-se menos sensíveis a aumentos na disponibilidade de nutrientes (NASSERY, 1970; CHAPIN et al., 1982). Em consequência, a lenta taxa de crescimento pode denominar menor exigência no metabolismo nutricional da planta. Por exemplo, a espécie *Agrostis setacea* em diferentes situações de disponibilidade de P, cresceu mais lentamente que as espécies *A. canina* e *A. stolonifera*, e parece ser razoável manter lentas taxas de crescimento inerente a baixa demanda sobre o sistema de fornecimento de nutrientes (CLARKSON, 1967). Dessa maneira, as plantas não evoluíram em especializados mecanismos de captura de nutrientes e sim na necessidade de menores quantidades, facilmente mantidas por menores capacidades de absorção. Esta pode ser uma das explicações da maior tolerância de espécies nativas a elevadas saturações de alumínio no solo, ou seja, os níveis de alumínio absorvido pelas plantas são inferiores aos que causam a toxidez.

Entre as conseqüências da lenta taxa de crescimento de espécies de habitats de baixa fertilidade, a principal é a maior longevidade das folhas, o que reduz a necessidade de nutrientes. A maior longevidade foliar, associada à menor taxa de produção de folhas, pode ser a resposta fenotípica ao déficit de nutrientes em gramíneas (AERTS & CHAPIN, 2000), embora a fertilização não aumente a duração da vida foliar das plantas das gramíneas nativas no primeiro ano de aplicação (MACHADO, 2007). O déficit nutricional grave induz a senescência foliar em todas as plantas, mas as espécies adaptadas a locais menos férteis podem reter folhas em condições de baixa disponibilidade de nutrientes. Assim, as espécies com maior longevidade foliar tendem a ocupar lugares pobres em nutrientes (AERTS & CHAPIN, 2000).

A maior longevidade foliar das plantas acarreta algumas desvantagens e a taxa fotossintética diminui com a idade da folha (HARDWICK et al., 1968). Assim, a fotossíntese das folhas mais velhas pode atender aos requisitos de energia da planta com pouca ou nenhuma produção contínua, de modo que a planta passa a sobreviver períodos utilizando as reservas de nutrientes, quando as disponibilidades de nutrientes do solo são insuficientes para sustentar a produção de folhas novas (CHAPIN, 1980). As plantas com lentas renovações de folhas têm menores necessidades de nutrientes anuais, o que é vantajoso em habitat pobres em nutrientes disponíveis sendo que estas apresentam ineficiência na retranslocação de nutrientes das folhas senescentes. Além disso, as gramíneas são particularmente mais eficientes na re-

utilização P. A capacidade de reciclagem interna de nutrientes a partir da biomassa acima do solo é considerável, de 50-60% para o N e de 80-90% para o P (AERTS & CHAPIN, 2000).

Mesmo com capacidades de absorção inferiores, as plantas de habitats de baixa fertilidade, plantas de lenta taxa de crescimento, podem apresentar armazenamento de nutrientes, o “consumo de luxo” (CLARKSON, 1967). Os nutrientes são acumulados principalmente na forma inorgânica (P inorgânico vacuolar), sem função metabólica imediata (BIELESKI, 1973). Assim, nos períodos em que a absorção é inferior às demandas das células, os nutrientes são direcionados do vacúolo ao citoplasma, atendendo a exigência metabólica da célula (BIELESKI & FERGUSON, 1983). O papel do “consumo de luxo” não é bem conhecido, embora possa ser considerado importante reserva para manutenção do crescimento das plantas após distúrbios, como por exemplo, a desfolha (MCNAUGHTON & CHAPIN, 1985; CHAPIN & MCNAUGHTON, 1989). A gramínea *Sporobolus indicus* responde positivamente à desfolha em alta disponibilidade de P, quando foi constatado o “consumo de luxo” (OYARZABAL & OESTERHELD, 2009). Todavia, após a desfolha as plantas aumentam absorção de nutrientes e assim, pode ser difícil a discriminação entre a mobilização de reservas internas na planta e a absorção de P (CHAPIN & SLACK, 1979).

A capacidade de adaptação das raízes à mudança, na disponibilidade de P, é pouco conhecida. Resultados de estudos com plantas de habitats de fertilidade diferente têm demonstrado capacidades de absorção similares entre plantas (BIELESKI, 1973), e capacidade menor de aumento da absorção em função do aumento do suprimento de P em plantas de habitats pobres em nutrientes (CHAPIN et al., 1982; CHAPIN, 1983; CHAPIN et al., 1986). Nesse sentido, Caradus, (1983) verificou em populações de trevo que as linhagens mais adaptadas a solos de baixa disponibilidade de P tinham menor taxa de absorção radicular por unidade de comprimento. Assim, o aumento da capacidade de absorção com o declínio das reservas de nutrientes na parte aérea da planta (CHAPIN et al., 1989) tem menor importância do que a variabilidade genética. Isso confirma a hipótese de Chapin et al. (1986), de que deveria haver uma seleção natural para alta taxa de absorção de fosfato em plantas de solos férteis, mas não em plantas adaptadas a solos de baixa fertilidade devido a baixa difusão do anion fosfato no solo limitar a capacidade de absorção. Nesse sentido, Lajtha (1994) não viu qualquer relação entre a taxa de crescimento ou a taxa de absorção de P de raízes em mudas de árvores de folha caduca com o aumento da disponibilidade deste nutriente. Assim, as plantas adaptadas aos solos de baixo P não são susceptíveis a ter evoluído mecanismos para absorção mais eficientes, enquanto que mudanças na arquitetura da raiz ou maior exploração do solo seriam de se esperar.

No sentido de explorar maior volume de solo pode ser destacada a capacidade de algumas plantas em se associar com micorrizas. Essas relações são frequentemente citadas na Pampa Argentina, sendo benéficas as plantas micorrizadas, em diferentes topografias e tipos de solos em concentrações salinas diferentes, pela maior absorção de nutrientes, principalmente P e água (GARCIA & MENDOZA, 2008). Nas condições de solo do Cerrado brasileiro, a inoculação de micorrizas nativos em solo degradado de cascalheira promoveu o estabelecimento da gramínea nativa *Aristida setifolia*, a qual foi beneficiada com a adição de calcário e dos insumos orgânicos (MARTINS et al., 1999). Em ensaios de casa de vegetação com pensacola (*Paspalum notatum* var. *saurae*), Rheinheimer & Kaminski, (1994) e Rheinheimer et al., (1997) adicionaram calcário e fósforo em vasos contendo solo inoculado ou não com micorrizas e encontraram diminuição da absorção de P pelas plantas não-micorrizadas, com efeito no crescimento das plantas. Segundo os mesmos autores o aumento do pH do solo acima de 5,5 foi prejudicial ao estabelecimento da micorrização com danos ao desenvolvimento das plantas. Neste sentido Kaminski et al. (1998), com estudos de biótipos da grama forquilha (*Paspalum notatum*), demonstraram diferentes respostas a elevação do pH do solo, sendo o valor de pH sugerido como ideal por esses autores em torno de 5,3. Assim é evidenciado que a ocorrência dos fungos micorrízicos é beneficiada em solos ácidos. Ainda, Rheinheimer & Kaminski (1995) mostraram que a intensidade de colonização do córtex radicular tem relação com a disponibilidade de P do solo aumentando a absorção desse nutriente em pensacola e que o P até certo nível tem efeito benéfico sobre o grau de associação.

Alguns autores utilizaram experimentos de troca de isótopos  $^{32}\text{P}$  para testar a hipótese de que plantas micorrizadas pudessem utilizar formas químicas de P que estão indisponíveis para plantas não-micorrizadas (LAJTHA & HARRISON, 1995). Os resultados desses experimentos demonstraram que atividades específicas do P nas plantas micorrizadas e não micorrizadas foram semelhantes. Assim, em geral, associações micorrízicas não permitiram maior acesso à fração sorvida P (BOLAN, 1991). A vantagem da associação micorrízica é o aumento da exploração do solo, semelhante ao aumento da relação raiz parte aérea.

Também há evidências limitadas de que fungos micorrízicos podem ser capazes de utilizar diferentes fontes de P de forma mais eficaz (JAYACHADRAN et al., 1992), embora este ponto seja debatido na literatura (BLAL et al., 1990; IKRAM et al., 1987). Nesse sentido, Kaminski et al. (1997) desenvolveram experimento com a incubação de termofosfato magnésiano e não encontraram aumento da eficiência de absorção pela inoculação de fungos

micorrizicos em pensacola. Assim as plantas micorrizadas não aumentam a eficiência quando da aplicação no solo de fosfatos naturais (BLAL et al., 1990).

Fungos micorrízicos têm diferentes capacidades para produzir fosfatases e, portanto, para utilizar fontes de P orgânico (DIGHTON, 1983). Da mesma maneira, as plantas possuem capacidade de produzir ácidos orgânicos e inorgânicos que solubilizam o fósforo orgânico, como o ácido psídico (AE et al., 1990). Nesse sentido, Turner (2008) em recente revisão, propõe objetos de estudos que avaliem a capacidade de diferentes plantas em acessar frações do P orgânico do solo. Esses mecanismos podem ser beneficiados em locais onde ocorra diversidade de plantas com estratégias diferentes de aquisição, contudo, devem ser testados em estudos futuros.

Sendo assim, o entendimento dos processos acima citados é fundamental para a compreensão da sobrevivência das plantas nos ecossistemas naturais. Também são importantes para prever possíveis alterações causadas por ações antrópicas sobre os ecossistemas como, por exemplo, a fertilização fosfatada e calagem, pois podem além de maximizar a utilização destes insumos, garantirem a preservação do ecossistema.

### 1.3 Referências

AE et al. Phosphorus uptake by Pigeon Pea and its role in cropping systems of Indian subcontinent. **Science**, v. 248, p. 477-480, 1990.

AERTS, R.; CHAPIN, S. F. III. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. **Advances in ecological research**, v. 30 p. 1-67, 2000.

BIELESKI, R. L. Phosphate pools, phosphate transport and phosphate availability. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 24, p. 225-252, 1973.

BLAL, B. et al. Influence of vesicular-arbuscular mycorrhizae on phosphate fertilizer efficiency in two tropical acid soils planted with micropropagated oil palm (*Elaeis guineensis* jacq.). **Biology and Fertility of Soils**, v. 9, p. 43-48, 1990.

BOLAN, N. S. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. **Plant and Soil**, v. 134, p. 189-207, 2001.

BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D.S. Phosphorus in the soil microbial biomass. **Soil Biological Biochemistry**, v. 16, p. 169-175, 1984.

CARADUS, J. R. Genetic differences in phosphorus absorption among white clover populations. **Plant and Soil**, v. 72, p. 379-383, 1983.

CLARKSON, D. T. Phosphorus Supply and Growth Rate in Species of *Agrostis* L. **Journal of Ecology**, v. 55, p. 111-118, 1967.

CHAPIN, S. F. III; FOLETT, J. M.; O'CONNOR, K. F. Growth, phosphate absorption, and phosphorus chemical fractions in two *Chionochloa* species. **Journal of Ecology**, v. 70, p. 305-321, 1982.

CHAPIN, S. F. III; VITOUSEK, P. M.; CLEVE, K. V. The nature of nutrient limitation in plant communities. **The American Naturalist**, v. 127, p. 48-58, 1986.

CHAPIN, F. S. III. The mineral nutrition of wild plants. **Annual review of ecology and systematic**, v. 11 p. 233-260, 1980.

CHAPIN, S. F. III. Adaptation of selected trees and grasses to low availability of phosphorus. **Plant and Soil**, v. 72, p. 283-287, 1983.

CHAPIN, S. F. III; GROVES, R. H.; EVANS, L. T. Physiological determinants of growth rate in response to phosphorus supply in wild and cultivated *Hordeum* species. **Oecologia**, v. 79, p. 96-105, 1989.

CHAPIN, F. S. III; MCNAUGHTON, S. J. Lack of compensatory growth under phosphorus deficiency in grazing adapted grasses from the Serengeti plains. **Oecologia**, v. 79, p. 551-557, 1989.

CHAPIN, F. S. III; SLACK, M. Effect of defoliation upon root growth, phosphate absorption and respiration in nutrient limited tundra graminoids. **Oecologia**, v. 42, p. 67-79, 1979.

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

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

DALAL, R. C. Soil organic phosphorus. **Advance Agronomy**, v. 29, p. 83-117, 1977.

DIGHTON, J. Phosphatase production by mycorrhizal fungi. **Plant Soil**, v. 71, p. 455-462, 1983.

GARCÍA, I. V.; MENDOZA, E. R. Relationships among soil properties, plant nutrition and arbuscular mycorrhizal fungi-plant symbioses in a temperate grassland along hydrologic, saline and sodic gradients. **FEMS Microbiol Ecology**, v. 63, p 359-371, 2008.

GÜSEWELL, S. Responses of wetland graminoids to the relative supply of nitrogen and phosphorus. **Plant Ecology**, v. 176, p. 35-55, 2005.

HARDWICK , K.; WOOD, M.; WOOLHOUSE, H. W. Photosynthesis and respiration in relation to leaf age in *Perilla frutescens* (L.) britt. **New Phytological**, v. 67, p. 79-86, 1968.

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

IKRAM, A.; MAHMUD, A. W.; NAPI, D. Effects of P-fertilization and inoculation by two vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nodulation of *Calopogonium caeruleum*. **Plant and Soil**, v. 104, p. 195-207, 1987.

JAYACHADRAN, K.; SCHWAB, A. P.; HETRICK, B. A. D. Mineralization of organic phosphorus by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Biological Biochemistry**, v. 24, p. 897-903, 1992.

KAMINSKI, J.; PESSOA A. C. S.; RHEINHEIMER, D. S. Efeito do tempo de incubação de termofosfato magnésiano no solo e inoculação com fungos micorrízicos na recuperação de fósforo pelo capim pensacola. **Ciência Rural**, v. 27, p. 407-412, 1997.

KAMINSKI, J. et al. Resposta de biótipos da grama forquilha à calagem e a frequência de corte. **Ciência Rural**, v. 28, p. 581-586, 1998.

LAJTHA, K. Nutrient uptake in eastern deciduous tree seedlings. **Plant and Soil**, v. 160, p. 193-199, 1994.

LAJTHA, K.; HARRISON, A. F. Strategies of phosphorus acquisition and conservation by plant species and communities. In: TIESSEN, H. (Ed). **Phosphorus in the global environmental: transfers, cycles and management**. Ed. 1. Chichester, U.K: Wiley, p. 139-147, 1995.

MACHADO, J. M. **Morfogênese de gramíneas nativas sob níveis de adubação nitrogenada**. 2010. 78 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2010.

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**, v.31, p.563-570, 2007.

MARTINS, C. R.; MIRANDA, J. C. C.; MIRANDA, L. N. Contribuição de fungos micorrízicos arbusculares nativos no estabelecimento de arístida setifolia kunth em áreas degradadas do cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 665-674, 1999.

MCNAUGHTON, S. J.; CHAPIN, F. S. III. Phosphorus nutrition and defoliation on C4 graminoids from the Serengeti plains. **Ecology**, v. 66, p. 1617-1629, 1985.

NASSEY, H. Phosphate absorption by plants from habitats of different phosphate status. II Absortion and incorporation of phosphate by intact plants. **New Phytologist**, v. 69, p. 197-203, 1970.

NZIGUHEBA, G.; BÜNEMANN, E. K. Organic phosphorus dynamics in tropical agroecosystems. In: TURNER, B. L; FROSSARD, E.; BALDWIN, D. S. (Eds). **Organic Phosphorus in the Environmental**. Ed. 1. CAB International, Wallingford, UK, p. 243-268, 2005.

OBERSON, A.; JONER, E. J. Microbial turnover of phosphorus in soil. In: TURNER B. L; FROSSARD E.; BALDWIN D. S. (Eds). **Organic Phosphorus in the Environmental**. Ed. 1. CAB International, Wallingford, UK, p. 133-164, 2005.

OYARZABAL, M.; OESTERHELD, M. Phosphorus reserves increase grass regrowth after defoliation. **Oecologia**, v. 159, p. 717-724, 2009.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Amplitude no fósforo microbiano em um Argissolo em pastagem nativa submetida à roçada e à introdução de espécies forrageiras com fertilização fosfatada em diferentes épocas. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, p. 561-567, 2008b.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Efeito do cultivo sucessivo e inoculação com fungos micorrízicos no crescimento e nutrição do capim-pensacola. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 21, p. 191-197, 1997.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p.151-160, 2001.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I., FLORES, A.F. Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosphorus-31 nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems. **Communication Soil Science and Plant Analyses**, v. 33, p. 1853-1871, 2002.

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

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI J. Intensidade de colonização do cortex radicular e sua relação com a absorção de fósforo pelo capim pensacola. **Ciência Rural**, v. 25, p. 223-228, 1995.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Resposta do capim-pensacola à adubação fosfatada e à micorrização em solo com diferentes valores de pH. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p. 201-205, 1994.

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

TURNER, B. L. Resource partitioning for soil phosphorus: a hypothesis. **Journal of Ecology**, v. 96, p. 698- 702, 2008.

VANCE, C. P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN L. D. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a non-renewable resource. **New Phytologist**, v. 157 p. 423-447, 2003.

## 2 HIPÓTESES

A aplicação de fertilizantes fosfatados aumenta o P disponível e, por conseguinte, o imobilizado na BMS. Posteriormente, com a morte e lise das células microbianas, o P é mineralizado de forma mais sincronizada com a demanda das plantas. Ao mesmo tempo, a imobilização representa também um reservatório dinâmico de P potencialmente disponível para as plantas. Com isso, a primeira hipótese de estudo é que:

1. Com o aumento da produção de biomassa vegetal e da BMS pela aplicação de fosfatos há maior conversão do P inorgânico em formas de P orgânico.

Nos ecossistemas de pastagens naturais devido à limitação imposta pelo P no solo a adição de fertilizantes fosfatados aumenta a produtividade da massa de forragem. O aumento ocorre devido à resposta da pastagem ao fertilizante. Porém, pastagens naturais são compostas por um grande número de espécies forrageiras nativas, normalmente dotadas de estratégias de absorção e aquisição de P, as quais determinam a sua capacidade/habilidade de adquirir P e consequentemente, de produzir biomassa e permanecer no ambiente. Nos ambientes onde a limitação de nutrientes é maior ocorrem às espécies com lentas taxas de crescimento relativo, e nos locais com maior disponibilidade, as espécies com maiores capacidade de resposta a fertilização. Desse modo, pode existir divergência entre os níveis de nutrientes no solo e a capacidade de repostas das plantas à fertilização. Assim foram criadas as seguintes hipóteses:

2. O aumento da disponibilidade de P no solo pela adição de fosfatos pode beneficiar um grupo de espécies de rápida taxa de crescimento relativo, consequentemente estas competem com as demais espécies e aumentam sua contribuição na massa de forragem.
3. Este grupo de espécies tem maior teor de P no tecido e maiores coeficientes de diluição de nutrientes com o crescimento.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo geral**

Avaliar a dinâmica do P em três ecossistemas de pastagens naturais sob diferentes solos, onde um destes é submetido ao histórico de 13 anos de adições de fosfatos e os outros dois a recente aplicação de hiperfosfato de Gafsa e superfosfatos.

### **3.2 Objetivos específicos**

Foram elaborados três objetivos específicos, os quais serviram também de estratégia de estudo, sendo abordados um em cada artigo do presente trabalho.

a) Avaliar a disponibilidade e as formas de P no solo após aplicação de diferentes fontes de fosfato em três solos sob pastagens naturais com e sem histórico de aplicação de P.

b) Avaliar a massa de forragem total e a contribuição das principais espécies componentes da pastagem natural no total de massa de forragem, em função da adição recente de P em três solos sob pastagens naturais sem e com histórico de 13 anos de aplicação de diferentes fontes de fosfato.

c) Avaliar as curvas de diluição de P no tecido das principais espécies componentes das pastagens naturais submetidas à fertilização fosfatada.

## 4 ESTRATÉGIA DE ESTUDO

A constante pressão por aumento da produtividade em áreas de pastagens naturais pode levar a necessidade de uso de fertilizantes fosfatos para elevação dos índices de produtividade. Os critérios para prescrição da fertilização fosfatada em ambientes de alta diversidade de plantas no Rio Grande do Sul ainda são insipientes para predizer possíveis mudanças na composição botânica da pastagem. Além disso, o uso eficiente dos fertilizantes vai depender da fonte de P utilizada e da metodologia de estimativa da quantidade mais adequada e as épocas de aplicações.

A estratégia de estudo da presente dissertação de mestrado baseou-se na obtenção de dados de P no solo, massa de forragem e de teor P no tecido das espécies campestres de três experimentos instalados em áreas de pastagens naturais com diferentes históricos de uso e de adição de fertilizantes. A obtenção dos dados de campo foi realizada no período primavera verão e a interpretação foi feita com o intuito de separar os principais efeitos decorrentes da adição de fosfato no solo, na massa seca e nas mudanças dos teores de nutrientes na biomassa aérea das plantas e, principalmente, elucidar a inter-relação entre o tipo de fosfato adicionado e a biodisponibilidade de P nas plantas. Nesse sentido, os resultados foram agrupados em três artigos: O primeiro deles versa sobre as alterações provocadas pela adição de P nas principais formas de P no solo. O segundo artigo trata da quantificação de massa seca aérea das plantas em virtude da maior ou menor disponibilidade de P no solo. O terceiro avalia o teor e a diluição de P no tecido ocorrida durante o período de crescimento nas principais espécies contribuintes na massa seca total das pastagens.

## 5 ARTIGO I: FORMAS DE FÓSFORO NO SOLO SOB PASTAGEM NATURAL AFETADAS PELA ADIÇÃO DE FOSFATOS

**Resumo:** O conhecimento das formas de P no solo em ambientes naturais é importante para a sustentabilidade de produção das pastagens naturais. O objetivo do presente trabalho foi avaliar as formas de P no solo após aplicação de diferentes fontes de fosfato em três solos sob pastagens naturais com e sem histórico de aplicação de P. Os tratamentos consistiram na aplicação de P nas formas de hiperfosfato de Gafsa, superfosfato simples, superfosfato triplo e testemunha, arranjados em blocos casualizados com três repetições. Nos dois experimentos instalados em Candiota (Luvissole Úmbrico e Neossolo Litólico), foram aplicados 100 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em setembro de 2010. No experimento de Santa Maria (Argissolo Vermelho) foram aplicados 180, 90, 100 e 100 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nos anos de 1997, 1998, 2002 e 2010, respectivamente. Amostras de solo foram coletadas na camada de 0–10 cm em cinco épocas durante a estação de crescimento da pastagem. O P disponível foi extraído pelos métodos da resina trocadora de ânions e por Mehlich-1. Além disso, foi quantificado o P microbiano, o P orgânico total, o P total e o P inorgânico e orgânico extraídos por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>. O hiperfosfato de Gafsa tem menor potencial de disponibilização de P em solos sob pastagens naturais, comparado aos superfosfatos. A aplicação de fertilizantes fosfatados em solos sob pastagens naturais aumenta a importância das frações inorgânicas lábeis de P na disponibilização de P às plantas, tornando-as menos dependentes da mineralização das frações orgânicas. O P microbiano demonstrou ser um indicador com sensibilidade à aplicação de diferentes fontes de P no solo.

**Palavras-chave:** Fósforo microbiano. Ecossistemas campestres. Fosfato natural.

### PHOSPHORUS FORMS AFFECTED BY PHOSPHATE ADDITIONS ON SOILS UNDER GRASSLANDS

**Abstract:** The knowledge of P forms of soil in natural environmental is important for natural grasslands production sustainability. The objective of this work was to evaluate the soil P forms after the application of different phosphate sources in three soil types under natural pastures with or without historical of P applications. The treatments were P application as Gafsa rock phosphate, simple superphosphate, triple superphosphate and control, arranged in randomized blocks with three replicates. In two experiments located in the city of Candiota-RS (Ultisol and Entisol), 100 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were applied in September 2010. In the experiment of Santa Maria - RS (Alfisol), 180, 90, 100 e 100 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were applied in 1997, 1998, 2002 and 2010, respectively. Available P was extracted by resin of anion exchanger and by Mehlich-1 method. In addition, microbial P, total organic P, total P and inorganic and organic P extracted by NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> were quantified. The Gafsa rock phosphate has lower potential to increase available P in acid soils under natural grasslands then superphosphates were used. The application of phosphate fertilizers in soils under natural pastures increases the importance of inorganic fractions of labile P to the available P to plants, making them less dependent on the mineralization of organic fractions. Microbial P has showed to be a sensible indicator to applications of different P sources into the soil.

**Key words:** Microbial phosphorus. Grasslands ecosystems. Rock phosphates.

## 5.1 Introdução

Os solos sob ecossistemas de pastagens naturais encontradas no Rio Grande do Sul aos conceitos tradicionais de fertilidade na sua maioria são ácidos e apresentam baixa disponibilidade de P. Mesmo assim, a vegetação natural, adaptada a tal condição, consegue produzir consideráveis quantidades de biomassa vegetal. Isso é possível porque em ambientes naturais equilibrados, a biorreciclagem do P orgânico do solo, do P contido nos tecidos vegetais e na BMS atende às necessidades das plantas (RHEINHEIMER et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2011). Todavia, com o aumento populacional e da demanda de alimentos nas últimas décadas, iniciou-se uma busca contínua por maiores produtividades das áreas de exploração agropecuária em todo o mundo. Uma das práticas utilizadas para maximizar a produção das pastagens naturais do RS é a aplicação de fertilizantes fosfatados visando aumentar a disponibilidade de P no solo e, conseqüentemente, aumentar a produção de massa de forragem (GATIBONI et al., 2000). Devido ao alto custo dos fertilizantes fosfatados solúveis, a utilização de fosfatos naturais para tal fim torna-se uma alternativa economicamente interessante para os pecuaristas. Além disso, sob condições de solo com baixas concentrações de cálcio e elevada acidez, a eficiência agrônômica dos fosfatos insolúveis aumenta, podendo ser inclusive comparada aos fosfatos solúveis (GATIBONI et al., 2003; CHIEN, 2011).

O aumento da disponibilidade de P no solo dependerá diretamente da quantidade e da solubilidade do fosfato aplicado. O solo possui finitos sítios de troca de íons, com diferente afinidade pelo ânion fosfato. Dessa forma, a aplicação regular de fosfato na superfície do solo pode criar uma região de saturação dos sítios mais reativos, onde parte do fosfato aplicado será adsorvida com baixa energia, resultando em maior biodisponibilidade (RHEINHEIMER et al., 2000; RHEINHEIMER et al., 2003; TIECHER, 2011). O poder fertilizante dos fosfatos naturais é menor devido principalmente à lenta solubilidade da rocha fosfática no solo, determinando aumento no P disponível logo após a sua aplicação inferior ao obtido com a aplicação de fosfatos solúveis. Todavia, quando esse fosfato é utilizado em pastagens e culturas perenes que apresentam um longo período de crescimento e não requerem grande quantidade de P disponível em curto prazo, o seu efeito residual no solo pode disponibilizar P de forma mais condizente com as necessidades das plantas, justificando a sua utilização (SZILAS et al., 2007).

A aplicação de fertilizantes fosfatados aumenta o teor de P imobilizado na BMS (RHEINHEIMER et al., 2008). Assim, a BMS previne a sorção do fosfato pelos colóides

inorgânicos do solo através da imobilização em seus tecidos (CONTE et al. 2002), representando um reservatório dinâmico de P potencialmente disponível para as plantas. Posteriormente, com a sua morte e lise das células, o P é mineralizado de forma mais sincronizada com a demanda das plantas (MARTINAZZO et al., 2007). Com o aumento da produção de biomassa vegetal e da BMS poderá haver então maior conversão do P inorgânico aplicado via fertilizantes em P orgânico, diminuindo também a sorção do fosfato pelos colóides inorgânicos do solo.

Dessa forma, a adição de fertilizantes fosfatados pode alterar a dinâmica do P no solo, modificando a capacidade de disponibilização do nutriente no curto e no longo prazo. Por isso, o conhecimento das formas de acúmulo do P no solo após sua aplicação, em solos com e sem históricos de adubação, pode auxiliar o desenvolvimento do manejo sustentável das pastagens naturais submetidos à aplicação de fertilizantes fosfatados.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar as formas de P no solo após aplicação de diferentes fontes de fosfato em três solos sob pastagens naturais com e sem histórico de aplicação de P.

## **5.2 Material e métodos**

O presente trabalho foi constituído de três experimentos instalados em diferentes regiões fisiográficas do estado do Rio Grande do Sul (RS). Os experimentos I e II foram desenvolvidos numa propriedade de pecuária sob pastagem natural no município de Candiota, situado na zona de transição entre a região fisiográfica da Depressão Central e a região do Planalto Sulriograndense (31°25' S, 53°34' O), sob um Luvissole Úmbrico e um Neossolo Litólico, respectivamente. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo subtropical Cfa, mesotérmico, com precipitação e temperatura média anual de 1.350 mm e 18°C, respectivamente, ocorrência de geadas de abril a novembro e estiagens de novembro a maio. A precipitação pluvial e temperatura média mensal histórica e do período experimental na região de Candiota são apresentadas na Figura 1. Os experimentos de Candiota foram instalados em dois locais para atingir pastagens naturais com diferentes condições iniciais de fertilidade de solo. Esses experimentos foram instalados no dia 28 de setembro de 2010. As áreas experimentais foram cercadas e roçadas, retirando o material vegetal cortado. Logo após, os tratamentos, arranjados em blocos ao acaso com três repetições, foram formados pela aplicação superficial de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de superfosfato triplo (SFT), superfosfato simples (SFS), fosfato natural (hiperfosfato de Gafsa) e a testemunha sem P. As

parcelas possuíam 6,25 m<sup>2</sup>. Todas as parcelas receberam 30 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia. Não foi adicionado potássio no solo, pois o teor deste se encontrava naturalmente elevado nos dois solos (Tabela 1).

O experimento III foi instalado em uma área de pastagem natural do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, situada na região fisiográfica da Depressão Central do RS (29°43' S, 53°42' O), com altitude média de 95 m, sob um Argissolo Vermelho. O clima da região é classificado como subtropical úmido Cfa, segundo classificação de Köppen, com precipitação e temperatura média anual de 1.769 mm e 19,2° C, respectivamente, e ocorrência de geadas nos meses de maio a agosto. A precipitação pluvial e temperatura média mensal histórica e do período experimental na região de Santa Maria são apresentadas na Figura 1. O experimento foi instalado em 1997 e os tratamentos consistiram na aplicação superficial de 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nas formas de hiperfosfato de Gafsa, SFT, SFS mais calcário (SFS+Cal) e a testemunha sem aplicação de P. Apenas no tratamento SFS+Cal foi aplicado 3,2 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (dose para elevar o pH-H<sub>2</sub>O a 5,5). O teor de potássio no solo foi corrigido em toda a área, com a aplicação de 130 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O. Em 1998, foram reaplicados 90 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nas formas acima citadas. Em junho de 2002 as parcelas iniciais de 5,6 x 10,0 m foram divididas em três subparcelas (5,6 x 3,3 m). Uma subparcela não recebeu reaplicação de fosfato, uma recebeu reaplicação de fosfato no inverno e outra no verão, na quantidade de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Nos invernos de 1997, 1998, 2002 foram introduzidas na pastagem natural as espécies azevém (*Lolium multiflorum*) e trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*) por meio de semeadura direta após roçadas. Desde então a pastagem ficou sob crescimento livre. Em 27 de agosto de 2010, a pastagem foi roçada retirando o material vegetal cortado, sendo reaplicados 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de hiperfosfato de Gafsa, SFT e SFS, apenas nas subparcelas com reaplicação de inverno. Nessas subparcelas, onde foi aplicado ao longo do tempo 470 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, foram realizadas as avaliações do presente trabalho, em um desenho experimental de blocos ao acaso com três repetições.

Nos experimentos de Candiota, as amostras de solo foram coletadas nos dias 22/11/10, 22/01/11, 18/03/11 e 18/05/11, correspondente a 55, 116, 171 e 232 dias após a aplicação dos tratamentos (dia zero), respectivamente. Em Santa Maria as amostras de solo foram coletadas nos dias 16/10/2010, 18/11/2010, 03/01/2011, 03/02/2011 e 01/03/2011 correspondente a 50, 83, 129, 159 e 186 dias após a adição de fosfato, respectivamente. Em cada parcela as amostras foram aleatórias em cada período compostas por 8 subamostras coletadas com trado calador na camada de 0-10 cm.

Após a coleta, o solo das amostras foi acondicionado em caixas térmicas com gelo e transportado via terrestre até o laboratório de Química e Fertilidade do Solo da UFSM, onde foi peneirado em malha de 2 mm e armazenado em incubadora a  $\pm 4^{\circ}\text{C}$  até a realização da análise de P imobilizado na BMS. Posteriormente, o solo das amostras foi seco em estufa de circulação forçada de ar a  $\pm 60^{\circ}\text{C}$  e armazenado para as demais análises.

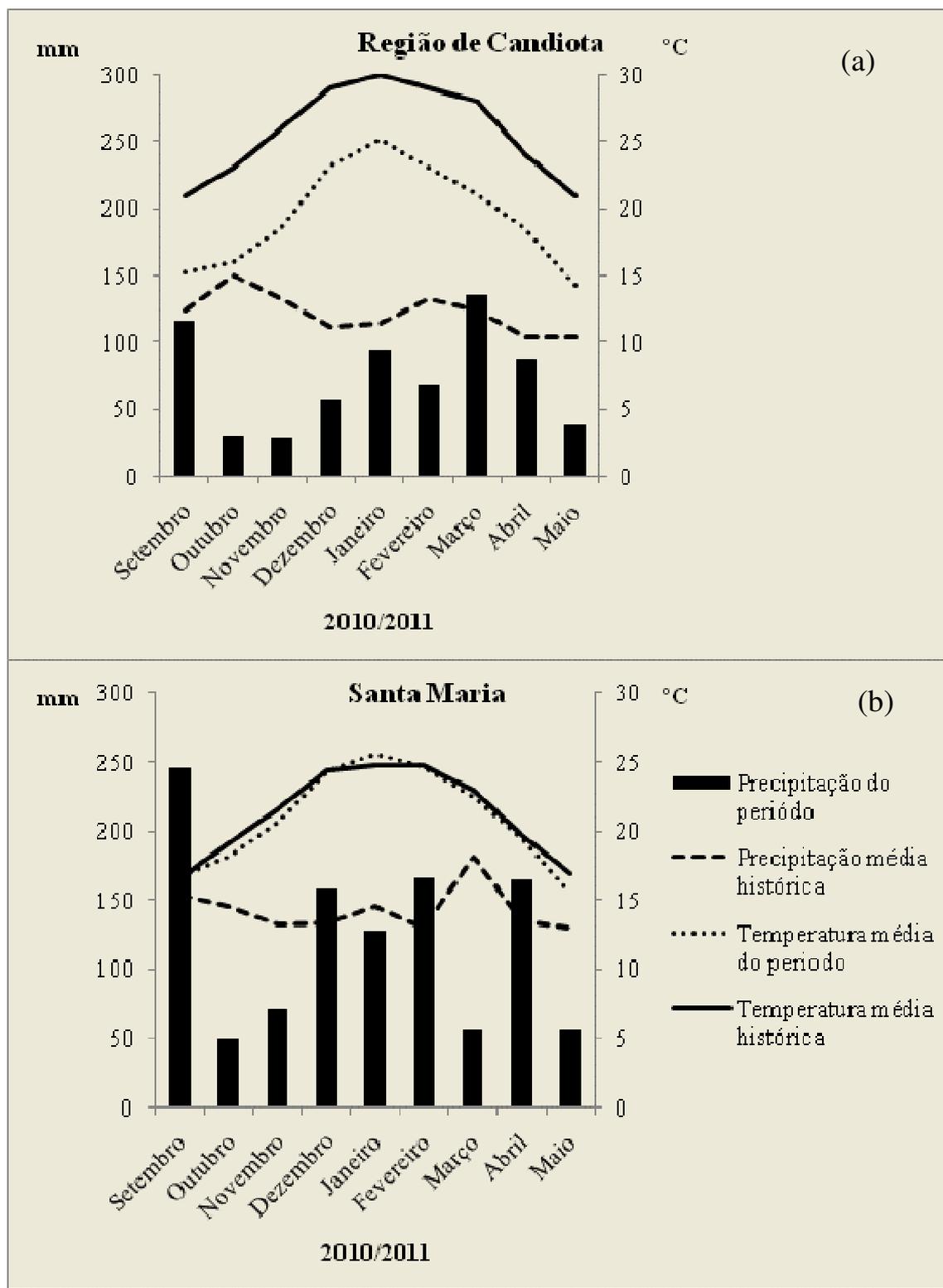


Figura 1 – Precipitação pluvial e temperatura média mensal do período experimental nas regiões de Candiota (a) e Santa Maria (b).

\*Os dados da Região de Candiota e de Santa Maria foram disponibilizados pela estação meteorológica automática da EMBRAPA Pecuária Sul, Bagé, Rio Grande do Sul e pela estação meteorológica do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, respectivamente.

Tabela 1 – Características físicas e químicas do solo da camada 0-10 cm nos solos Luvisolo Úmbrico e Neossolo Litólico de Candiota e Argissolo Vermelho de Santa Maria sob pastagens naturais.

Solo	pH <sub>H2O</sub>	Argila	M.O.	K	Ca	Mg	Al	CTC <sub>pH7</sub>	V <sup>1</sup>	m <sup>1</sup>
	(1:1)	----- g dm <sup>-3</sup> -----		mg dm <sup>-3</sup>	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				----- % -----	
Luvisolo Úmbrico	4,6	190	28	164	2,7	0,8	0,9	10,2	39	18
Neossolo Litólico	4,9	190	33	124	3,4	1,5	0,5	10,7	49	9
Argissolo Vermelho	4,5	170	18	60	1,2	0,7	1,3	8,0	40	22

<sup>1</sup> Saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m).

O conteúdo de P imobilizado na BMS foi estimado pelo método de fumigação-extração, de HEDLEY & STEWART, (1982) adaptado por RHEINHEIMER et al. (2000), descrito resumidamente a seguir: amostras 0,500 g de solo úmido foram pesadas em triplicatas (conjunto A, B e C) e acondicionadas em tubos *falcon* de 15 mL. Foi realizada uma extração de P com resina trocadora de ânions (RTA), para diminuir a concentração de P no solo. Na sequência, os tubos foram centrifugados a 2.510 g por 30 minutos e descartou-se o sobrenadante. No solo do conjunto A foi adicionado 0,5 mL de clorofórmio livre de álcool e nos conjuntos B e C, 0,5 mL de água destilada. Em seguida, os três conjuntos permaneceram em repouso por 24 horas. Após este período, nos conjuntos A e B adicionou-se 10 mL de NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> a pH 8,5 e, no conjunto C, 10 mL desse extrator contendo 50 mg L<sup>-1</sup> de P. Posteriormente, os conjuntos de frascos foram submetidos à agitação por 16 horas, em agitador tipo “sem fim” (33 rpm). Novamente, ao fim da agitação, as amostras foram centrifugadas a 2.510 g por 30 minutos retirando-se uma alíquota do sobrenadante. O extrato foi digerido de acordo com método da USEPA (1971) e o P determinado pelo método de MURPHY & RILEY (1962). O conteúdo de P imobilizado na BMS foi estimado pela equação:

$$P_{\text{imobilizado na BMS}} = \frac{50(P_A - P_B)}{0,40(P_C - P_B)}$$

onde o fator 50/(P<sub>c</sub>-P<sub>b</sub>) é o ajuste da capacidade de adsorção do solo (MOREL et al., 1996) e o fator 0,4 é usado, assumindo-se que somente 40% do P microbiano é liberado como inorgânico pelo CHCl<sub>3</sub> (BROOKES et al., 1982). Os resultados foram expressos em relação ao solo seco.

O P disponível foi estimado pelo método Mehlich-1, segundo TEDESCO et al. (1995) e pela extração com RTA saturada com bicarbonato. O P moderadamente lábil foi estimado pela extração com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, determinado-se o P inorgânico pelo método de DICK &

TABATABAI, (1977) e o P total obtido pela digestão do extrato com persulfato de amônia e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (UESPA, 1971). O P orgânico extraído pelo NaOH foi obtido pela diferença entre o P inorgânico e o P total.

O P total do solo foi estimado por digestão com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$  na presença de  $\text{MgCl}_2$  saturado (OLSEN & SOMMERS, 1982). A estimativa do P orgânico total foi feita pelo método de ignição do solo a  $550\text{ }^\circ\text{C}$ , com posterior extração com  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $0,25\text{ mol L}^{-1}$ , sendo a quantidade de P orgânico obtido pela diferença entre o P extraído da amostra ignificada e a não ignificada (OLSEN & SOMMERS, 1982).

O modelo estatístico adotado foi um bifatorial com parcelas subdivididas em três blocos casualizados como repetições. As fontes de fósforo foram as parcelas principais, as épocas de coletas as subparcelas. Quando os efeitos dos tratamentos foram significativos a 5% de probabilidade de erro pelo teste de F, as diferenças entre as médias das fontes de fosfatos foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) e ajustadas equações de regressão para as épocas de amostragem. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Assistat versão 7.6 Beta 2011 (SILVA & AZEVEDO, 2006).

Para comparar o efeito da aplicação das diferentes fontes de fosfato sob as formas de P no solo entre os três experimentos, foi realizada uma análise de componente principal com todas as variáveis, exceto o P Mehlich-1, para evitar redundância na análise, pois este extrator estima a mesma fração extraída por RTA.

## 5.3 Resultados

### 5.3.1 Efeito da aplicação de diferentes fontes de fosfatos

No Argissolo de Santa Maria, o P disponível extraído pela RTA com a aplicação de hiperfosfato de Gafsa foi maior que a testemunha, mas foi menor que o P disponível obtido com adição dos superfosfatos (Tabela 2). Já no Neossolo de Candiota, houve aumento no P disponível por RTA apenas com a aplicação fosfatos solúveis. No Luvisso de Candiota, o P disponível extraído pela RTA com a aplicação de hiperfosfato de Gafsa foi semelhante aos demais tratamentos, sendo superior à testemunha nos fosfatos solúveis

No Luvisso, Neossolo e Argissolo, o P disponível por RTA aumentou 1,2, 2,3 e 7,4 vezes com a aplicação de fosfatos solúveis, respectivamente, em comparação a testemunha. Além disso, em todos os experimentos o P disponível extraído por Mehlich-1 aumentou com

a aplicação de P solúvel e de baixa solubilidade e foi maior que o estimado pela RTA, principalmente quando foi aplicado hiperfosfato de Gafsa.

Nos solos de Candiota, o P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> com a adição de hiperfosfato de Gafsa foi semelhante à testemunha e aumentou com a aplicação de fosfato solúvel em 37 e 63% no Luvissole e no Neossolo, respectivamente, embora o valor para SFS tenha sido também semelhante à testemunha, no Luvissole (Tabela 2). Já no Argissolo de Santa Maria, o P inorgânico extraído por NaOH aumentou 39% com a aplicação de hiperfosfato de Gafsa e 221% com a aplicação de fosfatos solúveis em relação a testemunha.

Nos solos de Candiota, a aplicação de hiperfosfato de Gafsa não aumentou o P imobilizado na BMS, mas a adição de fosfatos solúveis aumentou em cerca de 21 e 35% o P imobilizado na BMS no Luvissole e no Neossolo, respectivamente (Tabela 2). Em Santa Maria, o P microbiano com a aplicação de hiperfosfato de Gafsa foi maior que a testemunha, mas inferior ao teor obtido com a aplicação de SFT. Já a aplicação de SFS e calcário mantiveram o P microbiano igual à testemunha.

No Luvissole de Candiota, o P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> não foi alterado com a aplicação das diferentes fontes de fosfato (Tabela 2). No Neossolo, o P orgânico foi maior com a adição de fosfatos solúveis, sendo que o teor de P nessa fração foi estatisticamente igual entre o hiperfosfato de Gafsa, o SFS e a testemunha. No Argissolo de Santa Maria, o P orgânico extraído por NaOH, com a aplicação de fosfato solúvel associado à adição de calcário (SFS), foi menor comparado à aplicação de hiperfosfato de Gafsa e SFT, os quais foram semelhantes. Nesse experimento, a testemunha apresentou P orgânico semelhante aos demais tratamentos.

O P total e o P orgânico total no solo não foram alterados com a aplicação das diferentes fontes de fosfatos nos experimentos de Candiota (Tabela 2). Já em Santa Maria, o P total aumentou com a aplicação dos fosfatos solúveis e de baixa solubilidade e o P orgânico total aumentou apenas com a aplicação dos fosfatos solúveis.

Na comparação de todos os solos avaliados, houve alta correlação positiva (0,85, p>0,05) entre o P resina e o P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (Figura 2a). Também foi observada alta correlação positiva do P total com o P microbiano (0,78, p>0,05), com o P orgânico total (0,71, p>0,05) e com o P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> (0,90, p>0,05). O P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> apresentou correlação positiva com o P microbiano (0,81, p>0,05) e com o P orgânico total (0,76, p>0,05), mas a correlação entre o P microbiano e o P orgânico total não foi significativa (0,56, p<0,05).

Juntas, os dois primeiros componentes principais representados na Figura 2b explicam 88,28% da variação total das formas de P nos três solos avaliados. O primeiro componente principal (CP1) explicou 60,86% e o segundo componente principal (CP2) explicou 27,42%. As variáveis que mais contribuíram na variação do CP1 foram o P microbiano, P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e P total, sendo que cada uma contribuiu com 20% da variação do CP1. Já no CP2, as variáveis que mais contribuíram na sua variação foram o P resina e o P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, contribuindo com 28 e 32% da variação da CP2.

Ainda a variável P microbiano apresentou maior correlação com a componente principal 1, a qual explicou maior porcentagem da variação dos resultados. Já o P resina apresentou correlação tanto com o componente principal 1 como com componente 2.

Tabela 2 – Formas de P nos solos Luvisolo Úmbrico e Neossolo Litólico de Candiota e Argissolo Vermelho de Santa Maria sob pastagens naturais em função da adição de diferentes fontes de fosfato e testemunha.

Tratamento/Solo	Disponível		Microbiano	Extraído com NaOH		Orgânico total	Total
	Resina	Mehlich-I		Inorgânico	Orgânico		
----- mg kg <sup>-1</sup> -----							
Luvisolo Úmbrico, Candiota							
Sem P	5,7 b	15,7 b	39,6 b	34,7 bc	91,0 <sup>ns</sup>	119,5 <sup>ns</sup>	329,7 <sup>ns</sup>
Gafsa	8,2 ab	35,6 a	38,6 b	30,8 c	85,8	124,5	330,9
SFT	13,5 a	26,5 ab	43,6 ab	51,5 a	97,1	122,4	333,4
SFS	12,1 a	25,4 ab	52,0 a	43,7 ab	99,4	115,7	351,3
CV, %	43,48	42,73	19,19	19,58	15,40	6,87	18,65
Neossolo Litólico, Candiota							
Sem P	2,6 b	5,2 b	35,2 c	29,2 b	68,1 b	130,4 <sup>ns</sup>	273,2 <sup>ns</sup>
Gafsa	3,9 b	19,2 a	39,1 bc	32,7 ab	69,4 ab	129,7	333,3
SFT	8,0 a	14,1 a	49,4 a	46,5 a	86,9 a	134,8	330,0
SFS	9,1 a	15,0 a	45,5 ab	48,9 a	82,3 ab	138,1	314,9
CV, %	38,24	41,55	29,71	16,59	17,20	11,66	21,96
Argissolo Vermelho, Santa Maria							
Sem P	1,4 c	4,7 b	26,9 c	15,3 c	34,2 ab	86,3 b	224,6 b
Gafsa	6,2 b	21,7 a	37,2 b	24,9 b	45,2 a	89,7 b	270,8 a
SFT	11,9 a	23,0 a	43,7 a	45,5 a	45,6 a	104,2 a	291,7 a
SFS	11,7 a	19,8 a	27,9 c	52,7 a	24,5 b	105,5 a	279,6 a
CV, %	34,69	36,77	18,82	12,41	25,61	18,95	11,18

<sup>ns</sup> = não significativo;

Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna dentro de cada solo diferem entre si pelo teste de Tuckey a 5% de probabilidade.

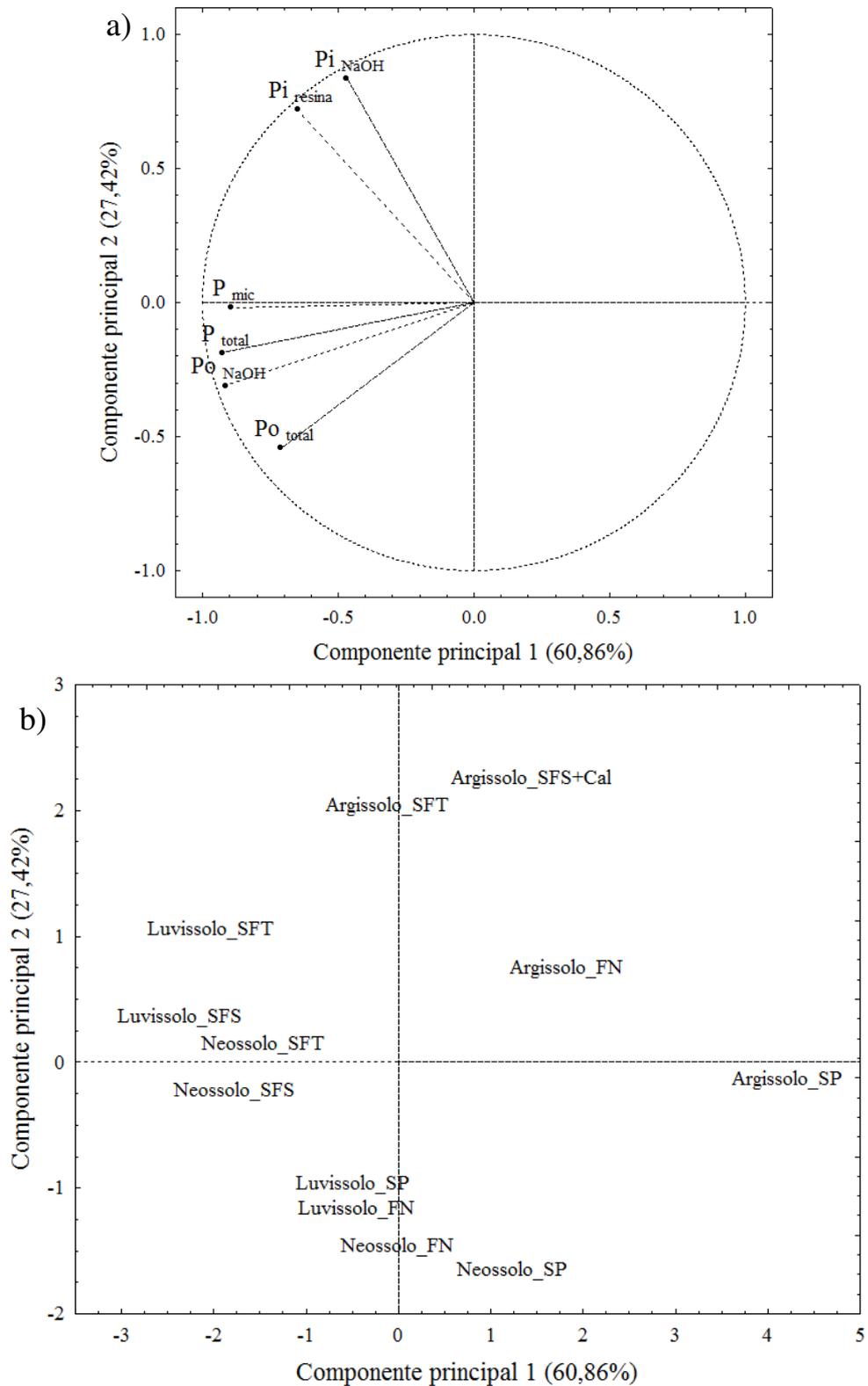


Figura 2 – Projeção das variáveis relacionadas às formas de P no solo no primeiro plano fatorial (a) e análise de componente principal (b) do solo da camada 0-10 cm do Argissolo de Santa Maria, do Luvisolo e do Neossolo de Candiota, submetidos a aplicação de diferentes fontes de fosfato (números em parênteses indicam a porcentagem da variação explicada por cada componente).

### 5.3.2 Efeito do período de amostragem

O P disponível por RTA diminuiu linearmente após a aplicação de fosfato em todos os experimentos (Tabela 3), e o P disponível estimado pelo Mehlich-1 diminuiu apenas no Luvissole de Candiota. O P imobilizado na BMS apresentou variações ao longo do tempo nos três solos. Essa flutuação foi semelhante entre os solos de Candiota, onde o menor P microbiano foi encontrado aos 114 dias após o início do experimento.

Nos solos de Candiota, o P orgânico total foi menor durante as coletas realizadas aos 114 e 170 dias (Tabela 3). Nessas datas, o P orgânico extraído por NaOH foi mais elevado. Já em Santa Maria, o P orgânico total e o P orgânico e inorgânico extraído por NaOH não foram alterados pela época de amostragem. Além disso, nos três solos, o P total foi constante durante o período de avaliação.

Tabela 3 – Formas de P nos solos Luvisolo Úmbrico e Neossolo Litólico de Candiota e Argissolo Vermelho de Santa Maria sob pastagens naturais em função do tempo decorrido após a aplicação das fontes de fosfato e testemunha.

Dias /Solo	Disponível		Microbiano	Extraído com NaOH		Orgânico total	Total
	Resina	Mehlich-I		Inorgânico	Orgânico		
----- mg kg <sup>-1</sup> -----							
Luvisolo Úmbrico, Candiota							
55	12,6 <sup>(1)</sup>	31,7 <sup>(4)</sup>	42,6 <sup>(5)</sup>	41,2 <sup>(8)</sup>	92,2 <sup>(10)</sup>	137,8 <sup>(12)</sup>	330,4 <sup>ns</sup>
116	12,5	27,5	29,2	28,6	97,9	106,3	344,5
171	8,3	22,4	54,5	46,3	103,4	102,5	338,7
232	6,1	21,6	47,4	44,8	79,8	135,6	331,8
CV, %	38,96	34,95	20,69	19,80	16,23	7,75	11,77
Neossolo Litólico, Candiota							
55	7,3 <sup>(2)</sup>	16,0 <sup>ns</sup>	43,9 <sup>(6)</sup>	43,2 <sup>(9)</sup>	72,2 <sup>(11)</sup>	145,5 <sup>(13)</sup>	309,0 <sup>ns</sup>
116	8,0	10,7	33,2	44,5	69,9	126,6	305,1
171	4,3	12,2	44,5	31,1	88,1	114,8	319,8
232	4,1	14,7	47,4	38,6	77,5	146,2	317,5
CV, %	29,69	44,64	18,39	19,43	12,22	9,37	18,41
Argissolo Vermelho, Santa Maria							
50	9,9 <sup>(3)</sup>	20,2 <sup>ns</sup>	33,3 <sup>(7)</sup>	37,1 <sup>ns</sup>	37,8 <sup>ns</sup>	90,4 <sup>ns</sup>	251,0 <sup>ns</sup>
83	8,1	14,5	28,5	32,9	37,4	100,9	251,6
129	9,3	19,1	47,1	36,1	35,1	98,2	266,3
159	5,9	14,6	18,5	33,2	39,3	95,4	280,0
186	5,8	18,1	42,2	33,8	37,2	97,2	284,5
CV, %	41,52	36,12	42,46	16,71	23,31	11,79	19,20

<sup>ns</sup> = não significativo; <sup>(1)</sup>  $y = 15,69 - 0,040 x$ ,  $R^2 = 0,90$ ; <sup>(2)</sup>  $y = 9,17 - 0,022 x$ ,  $R^2 = 0,72$ ; <sup>(3)</sup>  $y = 11,29 - 0,029 x$ ,  $R^2 = 0,72$ ; <sup>(4)</sup>  $y = 34,45 - 0,060 x$ ,  $R^2 = 0,93$ ; <sup>(5)</sup>  $y = 161,0 - 3,436 x + 0,027 x^2 - 0,00006 x^3$ ,  $R^2 = 0,99$ ; <sup>(6)</sup>  $y = 105,0 - 1,709 x + 0,012 x^2 - 0,00003 x^3$ ,  $R^2 = 0,99$ ; <sup>(7)</sup>  $y = 647,0 - 27,32 x + 0,042 x^2 - 0,00259 x^3 + 0,0000057 x^4$ ,  $R^2 = 0,99$ ; <sup>(8)</sup>  $y = 130,3 - 2,542 x + 0,019 x^2 - 0,00004 x^3$ ,  $R^2 = 0,99$ ; <sup>(9)</sup>  $y = 6,147 + 1,499 x - 0,012 x^2 + 0,00003 x^3$ ,  $R^2 = 0,99$ ; <sup>(10)</sup>  $y = 66,3 + 0,557 x - 0,002 x^2$ ,  $R^2 = 0,88$ ; <sup>(11)</sup>  $y = 141,1 - 2,087 x + 0,017 x^2 - 0,00004 x^3$ ,  $R^2 = 0,99$ ; <sup>(12)</sup>  $y = 199,9 - 1,367 x + 0,004 x^2$ ,  $R^2 = 0,99$ ; <sup>(13)</sup>  $y = 195,6 - 1,071 x + 0,003 x^2$ ,  $R^2 = 0,92$ .

## 5.4 Discussão

### 5.4.1 Efeito das fontes de adição de fosfatos

A aplicação de hiperfosfato de Gafsa demonstrou menor ter potencial de disponibilização de P nas condições dos solos sob pastagens naturais à disponibilização obtida com os superfosfatos no Luvisolo de Candiota e no Argissolo de Santa Maria, devido à lenta dissolução desse fosfato no solo. Já no Neossolo de Candiota, o pH mais elevado e principalmente a maior concentração de Ca nesse solo (Tabela 1) propiciaram menor dissolução do fosfato natural (ROBISON & SYERS, 1990), e por isso o P disponível por RTA nesse solo foi igual ao tratamento testemunha.

Uma vez que os sítios de troca do solo capazes de adsorver P são finitos e possuem diferente afinidade pelo íon fosfato (RHEINHEIMER et al., 2003), o maior incremento no P disponível por RTA com a adição de fosfatos solúveis no Argissolo de Santa Maria comparativamente aos solos de Candiota foi devido ao seu histórico de fertilização. A aplicação de  $470 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  parceladas na instalação do experimento e após 12 e 60 meses pode ter criado uma região de saturação dos sítios mais reativos maior do que nos solos de Candiota, onde foi aplicado somente  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Assim, parte do fosfato reaplicado em 2010 no Argissolo de Santa Maria pode ter sido adsorvida com menor energia, resultando em maior incremento de P disponível. Isso evidencia também que à medida que se adiciona fertilizantes fosfatados em solos pobres sob pastagens naturais, a importância das frações inorgânicas lábeis de P no suprimento da demanda das plantas aumenta, tornando-as menos dependentes da mineralização das frações orgânicas.

O P disponível foi superestimado pelo Mehlich-1 porque em solos arenosos como os do presente estudo, o Mehlich-1 possui maior capacidade de extração do que a RTA (RHEINHEIMER et al., 2003). Essa superestimação foi mais expressiva nos tratamentos com aplicação de hiperfosfato de Gafsa, devido ao fato de que esse extrator, formado pela mistura de dois ácidos fortes diluídos ( $\text{HCl}$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), dissolve a rocha fosfática, contabilizando como disponível aquele P que ainda não foi solubilizado no solo.

Em todos os solos do presente trabalho, o P inorgânico extraído pelo  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$  teve comportamento semelhante aos obtidos com a RTA e foi evidenciada a alta correlação entre as duas formas de P. O  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$  detectou inclusive o histórico de aplicação de fosfato no Argissolo, como observado pelos maiores incrementos no teor de P  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$  nesse solo com a aplicação de fosfato, comparativamente aos solos de Candiota. Teoricamente, o  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$  extrai além do P lábil, o P moderadamente lábil, tido como aquele adsorvido pelos óxidos de ferro e alumínio. Por isso esse extrator pode ser utilizado para evidenciar indícios de acumulação ou exaurimento de P no longo prazo, como verificado por Kuo et al. (2005), Gatiboni et al. (2007) e Takeda et al. (2009). Além disso, por tratar-se de um extrator básico, o  $\text{NaOH}$  não solubiliza o fosfato natural, sendo assim, mais sensível às variações ocasionadas pela adição das diferentes fontes de fosfato do que o extrator Mehlich-1.

O P imobilizado pela BMS mostrou-se um indicador sensível à aplicação de diferentes fontes de fosfatos e, de modo geral, aumentou com o incremento de P disponível. A imobilização do P pela BMS é temporária, sendo inclusive benéfica, pois previne a sorção de fosfato pelos grupos funcionais de superfície dos óxidos de ferro e alumínio e dos

argilominerais. Posteriormente, após a morte e lise das células da BMS, o fosfato é disponibilizado de maneira mais condizente com o crescimento das plantas (MARTINAZZO et al., 2007). Já o P orgânico extraído com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> foi pouco alterado pela adição de diferentes fontes de fosfato, mesmo no solo com longo histórico de aplicação de P, demonstrando ser um *pool* de P mais estável que o P microbiano.

No Argissolo de Santa Maria, a aplicação conjunta de SFS e calcário resultou nos menores teores de P microbiano e de P orgânico extraído por NaOH. Com a aplicação de calcário, a maior quantidade de cálcio no solo pode favorecer a formação de complexos organominerais do P orgânico com Ca, e a elevação do pH pode influenciar na quantidade e na composição da comunidade microbiana. Todavia, tais resultados devem ter ocorrido principalmente devido à condição de pH mais elevado desse tratamento, que pode ter alterado a capacidade de extração de P do NaOH e do NaHCO<sub>3</sub> (utilizado para estimar o P microbiano), que são ambos extratores básicos.

A aplicação recente de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nos solos de Candiota não foi suficiente para alterar o P orgânico total estimado pelo método de ignição, nem o P total. Já no Argissolo de Santa Maria, devido ao histórico de aplicação de fosfatos solúveis, totalizando 470 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, houve aumento no P total. Contudo, o P orgânico total não seguiu o mesmo comportamento quando foi aplicado o hiperfosfato de Gafsa. O aumento na disponibilidade de P devido às constantes aplicações de SFT e SFS promoveram aumento na produção de massa seca de forragem (GATIBONI et al., 2000). Assim, devido ao maior aporte de resíduos senescentes das plantas ao solo, houve maior transformação do P inorgânico aplicado em formas orgânicas, aumentando o P orgânico total no solo apenas quando da aplicação dos superfosfatos.

No conjunto dos solos avaliados foi verificado que o tamanho do P imobilizado é dependente do P total do solo e inclusive que as flutuações no P orgânico total do solo são refletidas no P total (correlação de 0,71 e Figura 2a). Isso demonstra a importância do conteúdo total de P no solo para a manutenção da disponibilidade das frações mais lábeis (GATIBONI et al., 2008). Também foi observada pela ausência de correlação entre P microbiano e o P orgânico total que o P da BMS é mais sensível a variações do que a estimativa do P orgânico total do solo o qual se mantém praticamente inalterado quando não há mudanças no P total do solo (MACHADO et al., 1993).

#### 5.4.2 Efeito do período de amostragem

Em todos os solos, a estimativa do P disponível por RTA mostrou-se mais sensível do que o Mehlich-1 para detectar as flutuações no P disponível. A diminuição no teor de P disponível por RTA ao longo do tempo após a aplicação de P ocorreu devido à adsorção do fosfato nos grupos funcionais dos argilominerais e óxidos de ferro e alumínio e, em menor importância, devido à absorção de fosfato pelas plantas. O fosfato solúvel após realizar troca de ligante nesses sítios (ligação monodentada), pode ainda ligar-se a mais um grupo funcional de superfície formando uma ligação bidentada, que pode ser mono ou binuclear, de acordo com o número de metais estruturais que o adsorbato está ligado. A evolução dessas reações é favorecida pelo tempo de reação, que aumenta a energia de ligação do fosfato pela matriz mineral do solo, diminuindo assim a sua disponibilidade (PARFITT, 1989).

O P microbiano apresentou flutuações ao longo do tempo que ocorreram independentemente da utilização ou da fonte de fertilizante fosfatado, e sem qualquer relação com a variação no teor de P disponível estimado pela RTA, demonstrando que o efeito da imobilização de P pela BMS é temporário (MARTINAZZO et al., 2007). O desenvolvimento da BMS depende das fontes de energia no sistema, como a oferta de carbono de fácil decomposição (RHEINHEIMER et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2011), que possui estreita relação com os ciclos de crescimento e morte da vegetação, que por sua vez é consequência principalmente da disponibilidade de temperatura, radiação e água. Por isso, devido às condições climáticas parecidas (Figura 1), a variação temporal no conteúdo de P armazenado na BMS foi semelhante entre os solos de Candiota (Tabela 3), onde os menores valores de P microbiano foram observados aos 116 dias após a aplicação dos tratamentos, sendo diferente da variação temporal no Argissolo de Santa Maria, onde os menores teores de P microbiano ocorreram aos 83 e 159 dias após a aplicação dos tratamentos.

Nas pastagens naturais exploradas pela atividade pecuária por longos períodos de tempo, o conteúdo de P total do solo pode diminuir devido ao esgotamento das suas reservas de fosfato orgânico e inorgânico pela absorção das plantas (GATIBONI et al., 2008) e posterior exportação do elemento pela produção animal. Durante o período avaliado não houve exportação de P das pastagens, apenas a absorção do nutriente pelas plantas, o que não foi suficiente para alterar o P total do solo, mantendo-o constante em todos os solos.

## 5.5 Conclusões

1. O hiperfosfato de Gafsa tem menor potencial de disponibilização de P em solos ácidos e com baixo teor de cálcio sob pastagens naturais, comparado aos superfosfatos.
2. A aplicação de fertilizantes fosfatados em solos pobres, sob pastagens naturais, aumenta a importância das frações inorgânicas lábeis de P na disponibilização de P para as plantas, tornando-as menos dependentes da mineralização das frações orgânicas.
3. O P microbiano é indicador sensível a aplicação de diferentes fontes de P.

## 5.6 Referências

- BROOKES, P. C.; POWLSON, D. S.; JENKINSON, D. S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, p. 319-329, 1982.
- CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; TU, S.; SNYDER, C. S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.89, p.229–255, 2011.
- CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D. S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicações de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 925-930, 2002.
- DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, v. 6, p. 82-85, 1977.
- GATIBONI, L. C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 691-699, 2007.
- GATIBONI, L. C. et al. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 1085-1091, 2008.
- GATIBONI, L. C. et al. Influência da adubação fosfatada e da introdução de espécies forrageiras de inverno na oferta de forragem de pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1663-1668, 2000.

GATIBONI, L. C. et al. Superphosphate and rock phosphates as P-source for grass-clover pasture on a limed acid soil of Southern Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.42, p.1-12, 2003.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B. Method to measure microbial phosphate in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, p. 377-385, 1982.

KUO, S.; HUANG, B.; BEMBENEK, R. Effects of long-term phosphorus fertilization and winter cover cropping on soil phosphorus transformations in less weathered soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 41, p. 116–123, 2005.

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

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**, v. 31, p. 563-570, 2007.

MOREL, C.; TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B. Correction for P sorption in the measurement of soil microbial biomass P by  $\text{CHCl}_3$  fumigation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 28, p. 1699-1706, 1996.

NABINGER, C et al. Produção animal com base no campo nativo: aplicações de resultados de pesquisa. In: Pillar V. P. de; Müller S. C.; Castilhos Z. M. S.; Jacques A. V. A. (Ed.). **Campos Sulinos “conservação e uso sustentável da biodiversidade”**. Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p.175-198.

OLIVEIRA, L. B. et al. Fósforo microbiano em solos sob pastagem natural afetado por queima e pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1509-1515, 2011.

OLSEN, S. R.; SOMMERS, L. E.; Phosphorus. Methods of Soil Analysis, Part 2. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, Q. R. (Eds). **Chemical and Microbiological Properties**. ed. 1. Soil Science Society of America. Madison, p. 403-430, 1982.

PARFITT, R. L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **Journal of Soil Science**, v. 40, p. 359-369, 1989.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, v.33, p.1053-1059, 2003.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. & CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, p. 589-597, 2000.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Amplitude no fósforo microbiano em um Argissolo em pastagem nativa submetida à roçada e à introdução de espécies forrageiras com fertilização fosfatada em diferentes épocas. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 30, p. 561-567, 2008.

ROBISON, J. S.; SYERS, J. K. A critical evaluation of the factors influencing the dissolution of Gafsa phosphate rock. *Journal of Soil Science*, v. 41, p. 597-605, 1990.

SILVA, F. DE A. S. E.; AZEVEDO, C. A. V. de. A new version of the assistat-statistical assistance software. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 4, Orlando-FL-USA: Anais... Orlando: **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 2006.p.393-396.

SZILAS, C.; SEMOKA, J. M. R.; BORGGAARD, O. K. Can local Minjingu phosphate rock replace superphosphate on acid soils in Tanzania? *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 77, p. 257–268, 2007.

TAKEDA, M. et al. Phosphorus transformation in a soybean-cropping system in Andosol: effects of winter cover cropping and compost application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 85, p. 287–297, 2009.

TEDESCO, M. J. et al. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

TIECHER, T. **Dinâmica do fósforo em solo muito argiloso sob diferentes prepares de solo e culturas de inverno**. 2011.79p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Methods of chemical analysis for water and wastes**. Cincinnati: USEPA, 1971.

## 6 ARTIGO II: MASSA DE FORRAGEM DE PASTAGENS NATURAIS SUBMETIDAS A DIFERENTES HISTÓRICOS DE ADIÇÃO DE FONTES DE FOSFATO

**Resumo:** Em ecossistemas de pastagens naturais deficientes em P disponível, a fertilização fosfatada pode ser uma alternativa para aumentar a massa de forragem. O objetivo deste trabalho foi avaliar a massa de forragem total e a contribuição das principais espécies componentes da pastagem natural na massa de forragem, em função da aplicação recente ou de um histórico de 13 anos da adição de fosfato. Os tratamentos consistiram na aplicação de P nas formas de hiperfosfato de Gafsa, superfosfato simples, superfosfato triplo e testemunha, arranjados em blocos casualizados com três repetições. Nos dois experimentos instalados em Candiota (Luvissole Úmbrico e Neossolo Litólico), foram aplicados  $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  em setembro de 2010. No experimento de Santa Maria (Argissolo Vermelho) foram aplicados 180, 90, 100 e  $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  nos anos de 1997, 1998, 2002 e 2010 (em agosto), respectivamente, totalizando  $470 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . A massa de forragem foi avaliada por cortes no período primavera-verão, após a última aplicação dos tratamentos em cada experimento. A resposta da pastagem natural à fertilização fosfatada foi maior onde havia significativa contribuição de espécies anuais. O histórico de adição de fertilizantes fosfatados solúveis alterou a contribuição das principais espécies na massa seca total das pastagens naturais. Assim, as espécies campestres de crescimento rápido têm maior potencial de resposta em massa seca total à aplicação de fosfatos.

**Palavras-chave:** Fertilização fosfatada. Solubilidade de fosfato. Composição botânica. Pastagem nativa

### HERBAGE MASS OF GRASSLAND UNDER DIFFERENT HISTORICAL ADDITIONS' FROM PHOSPHATE SOURCES

**Abstract:** In natural grasslands where available P is deficient, the phosphate fertilization may be an alternative to increase forage mass. The purpose of this study was to evaluate the total mass and the contribution of the main species from natural pasture into the total mass related to phosphate fertilizations, added recently or since 13 years. The treatments were the application of P from Gafsa rock phosphate, single and triple superphosphate and a control treatment organized according to a randomized blocks design with three replications. The experiments to evaluate the effect of recent additions were carried out under a Ultisol and a Entisol in Candiota – RS, where  $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  was added in September, 2010. In Santa Maria – RS, was carried out the experiment of historical of fertilization under an Alfisol, where additions of 180, 90, 100 and  $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  were done in 1997, 1998, 2002, and August 2010, respectively, representing  $470 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ . The pasture was harvested on spring-summer season after the last P fertilization and those responses were evaluated by the total dry mass. The P fertilization response was higher where annual species contribution prevailed. In pastures with historical of fertilization, the contribution of main species to the total dry mass of pasture has changed. It was shown that native species with faster growth rates have higher response capacity to P fertilizations.

**Key words:** Phosphate fertilization. Phosphate solubility. Botanical composition. Native pastures.

## 6.1 Introdução

As pastagens naturais do Rio Grande do Sul (RS) encontram-se distribuídas nos Biomas Pampa e Mata Atlântica compondo os Campos Sulinos. São exploradas economicamente principalmente pela bovinocultura de corte e pela ovinocultura. A produção forrageira deste ecossistema campestre é consequência da disponibilidade de temperatura e radiação, sendo limitada por fatores como água, nutrientes e estratégias de manejo do pastejo. A utilização intensiva dos Campos Sulinos nas últimas décadas, com excesso de lotação animal e sem reposição dos nutrientes exportados, acarretou no seu depauperamento, reduzindo a capacidade de suporte animal e o potencial produtivo sustentável. Além disso, a maioria dos solos sob pastagens naturais no RS naturalmente apresentam baixa fertilidade podendo ser limitante ao crescimento e desenvolvimento de plantas, possuindo elevada acidez e baixa disponibilidade de fósforo (P) (NABINGER et al., 2009; RHEINHEIMER et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2011). Dessa forma, a fertilização fosfatada e a calagem podem ser necessárias para aumentar a produtividade do sistema. O alto custo da aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis torna essa prática inviável economicamente para grande parte dos pecuaristas do RS. Nesse sentido, os fosfatos naturais podem ser utilizados como alternativa de baixo custo para elevar o teor de P disponível no solo. Em solos com baixo pH e baixo teor de cálcio, a dissolução dos fosfatos naturais é acelerada e a eficiência agrônômica aumenta, podendo ser comparada até mesmo com fertilizantes fosfatados solúveis (GATIBONI et al., 2003; CHIEN et al., 2011).

Outra característica importante do Bioma Pampa é que a maioria das espécies forrageiras são gramíneas megatérmicas (BOLDRINI et al., 2009) que apresentam crescimento na estação quente do ano. Para suprir a demanda forrageira durante o período hibernal, espécies alóctones de inverno, como o trevo e o azevém, são comumente introduzidas nesse ambiente, mantendo a comunidade de plantas nativas (JACQUES et al., 2009). Neste sistema, a adubação fosfata pode aumentar a produção de matéria seca das pastagens devido à resposta das espécies hibernais introduzidas (MACEDO et al., 1985; GATIBONI et al., 2000; GATIBONI et al., 2003). Da mesma forma, a calagem pode promover incrementos na produção forrageira devido à resposta de espécies leguminosas introduzidas (OLIVEIRA e BARRETO, 1976; MACEDO et al., 1979; MACEDO e GONÇÁLVES, 1980; GATIBONI et al., 2000). Dentre as espécies nativas, componentes das pastagens naturais, as espécies de maior exigência nutricional, como *Axonopus affinis*, *Briza minor*, *Paspalum dilatatum* e *Mnesithea selloana*, podem ser favorecidas pela fertilização

fosfatada (MACEDO et al., 1985). Em contrapartida, o melhoramento pode diminuir a participação de espécies como *Vernonia* sp., *Baccharis* sp., *Schizachyrium mycrostachyum* e *Erygium* sp. (SILVA e JACQUES, 1993; CASTILHOS e JACQUES, 2000).

De acordo com o exposto, as alterações provocadas pela fertilização, calagem e introdução de espécies podem interferir nas estratégias adaptativas das espécies e beneficiar uma espécie em detrimento de outra ou de um grupo de espécies. Contudo, as informações sobre o potencial de resposta individual das espécies nativas à fertilização fosfatada são incipientes (NABINGER et al., 2009). Além disso, o efeito da adubação fosfatada sobre a composição botânica e a produção de massa seca não é imediato (BARRETO et al., 1986; BANDINELLI et al., 2005), especialmente quando são utilizados fontes de fosfato com diferentes solubilidades. Assim, estudos de longa duração relacionando comunidades vegetais e características físico-químicas do solo são importantes para verificar as modificações dessas pastagens naturais no longo prazo.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a massa de forragem total e a contribuição das principais espécies componentes da pastagem natural na massa seca total de forragem, em função da aplicação recente e do histórico de 13 anos de aplicação de diferentes fontes de fosfato.

## **6.2 Material e métodos**

O presente trabalho foi constituído de três experimentos instalados em diferentes regiões fisiográficas do estado do RS. Os experimentos I e II foram desenvolvidos numa propriedade de pecuária sob pastagem natural no município de Candiota, situado na zona de transição entre a região fisiográfica da Depressão Central e a região do Planalto Sulriograndense (31°25' S, 53°34' O), sob um Luvissole Úmbrico e um Neossolo Litólico, respectivamente. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo subtropical Cfa, mesotérmico, com precipitação e temperatura média anual de 1.350 mm e 18° C, respectivamente, ocorrência de geadas de abril a novembro e estiagens de novembro a maio (Tabela 1). Os experimentos de Candiota foram instalados em dois locais para atingir pastagens naturais com diferentes condições iniciais de fertilidade de solo e com diferente composição botânica. Esses experimentos foram instalados no dia 28 de setembro de 2010. As áreas experimentais foram cercadas e roçadas, retirando o material vegetal cortado. Logo após, os tratamentos, arranjados em blocos ao acaso com três repetições, foram formados pela

aplicação superficial de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de superfosfato triplo (SFT), superfosfato simples (SFS), hiperfosfato de Gafsa e a testemunha sem P. As parcelas possuíram  $6,25 \text{ m}^2$ . Todas as parcelas receberam  $30 \text{ kg ha}^{-1}$  de N na forma de uréia. Não foi adicionado potássio, pois o teor deste se encontrava naturalmente elevado nos dois solos (Tabela 2).

O experimento III foi instalado em área de pastagem natural no Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, situada na região fisiográfica da Depressão Central do RS ( $29^\circ 43' \text{ S}$ ,  $53^\circ 42' \text{ O}$ ), com altitude média de 95 m, sob um Argissolo Vermelho (Tabela 2). O clima da região é classificado como subtropical úmido Cfa, segundo classificação de Köppen, com precipitação e temperatura média anual de 1.769 mm e  $19,2^\circ \text{ C}$ , respectivamente, e ocorrência de geadas nos meses de maio a agosto (Tabela 1). O experimento foi instalado em 1997 e os tratamentos consistiram na aplicação superficial de  $180 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  nas formas de hiperfosfato de Gafsa, SFT, SFS mais calcário (SFS+Cal) e a testemunha sem aplicação de P. Apenas no tratamento SFS+Cal foi aplicado  $3,2 \text{ Mg ha}^{-1}$  de calcário (dose para elevar o pH- $\text{H}_2\text{O}$  a 5,5). O potássio no solo foi corrigido em toda a área, com a aplicação de  $130 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  na forma de cloreto de potássio. Em 1998, foram reaplicados  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  nas formas acima citadas. Em junho de 2002 as parcelas de  $5,6 \times 3,3 \text{ m}$  receberam reaplicação de fosfato na quantidade de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Nos invernos de 1997, 1998, 2002 foram introduzidas na pastagem natural as espécies azevém (*Lolium multiflorum*) e trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*) por meio de semeadura direta, após roçadas. Desde então a pastagem ficou sob crescimento livre. Em 27 de agosto de 2010, a pastagem foi roçada retirando o material vegetal cortado, sendo reaplicados  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de hiperfosfato de Gafsa, SFT e SFS. Atingiu-se, assim, uma adição total de  $470 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ao longo do tempo. As avaliações do presente trabalho foram realizadas em um desenho experimental de blocos ao acaso com três repetições.

Tabela 1 – Precipitação pluvial e temperatura média mensal do período experimental nas regiões de Candiota e Santa Maria.

Mês	Precipitação pluvial		Temperatura média mensal	
	Candiota	Santa Maria	Candiota	Santa Maria
	----- mm -----		----- °C -----	
	Ano 2010			
Setembro	115,6	244,9	15,3	16,7
Outubro	30,2	49,3	16,0	18,1
Novembro	28,5	71,3	18,6	20,7
Dezembro	57,4	157,9	23,2	24,3
	Ano 2011			
Janeiro	93,6	127,1	25,1	25,6
Fevereiro	68,4	165,8	23,0	24,6
Março	135,0	54,9	21,1	22,5
Abril	86,2	164,9	18,4	19,4
Maio	38,2	54,9	14,3	15,5

\*Os dados de Candiota e de Santa Maria foram disponibilizados pela estação meteorológica automática da EMBRAPA Pecuária Sul, Bagé, Rio Grande do Sul e pela estação meteorológica do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, respectivamente.

Tabela 2 – Características físicas e químicas do solo da camada 0-10 cm nos experimentos I e II de Candiota (Luvissole Úmbrico e Neossolo Litólico, respectivamente) e no experimento de Santa Maria (Argissolo Vermelho).

Solo	pH <sub>H2O</sub>	Argila	M.O.	P <sup>1</sup>	K	Ca	Mg	Al	CTC <sub>pH7</sub>	V <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
	(1:1)	--- g dm <sup>-3</sup> ---		mg dm <sup>-3</sup>				----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		--- % ---	
Luvissole Úmbrico	4,6	190	28	5,7	164	2,7	0,8	0,9	10,2	39	18
Neossolo Litólico	4,9	190	33	2,6	124	3,4	1,5	0,5	10,7	49	9
Argissolo Vermelho	4,5	170	18	1,4	60	1,2	0,7	1,3	8,0	40	22

<sup>1</sup>Fósforo por resina <sup>2</sup>Saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m).

As amostras de massa de forragem, nos experimentos instalados em Candiota, foram coletadas nos dias 22/11/10, 22/01/11, 18/03/11 e 18/05/11, correspondente a 55, 116, 171 e 232 dias após a roçada (dia zero), respectivamente. Em Santa Maria, as coletas de massa de forragem foram realizadas nos dias 16/10/2010, 18/11/2010, 03/01/2011, 03/02/2011 e 01/03/2011, correspondente a 50, 81, 129, 160 e 188 dias após a roçada, respectivamente. Nos três experimentos foram coletadas quatro subamostras de 0,25 m<sup>2</sup> em cada parcela, para compor uma amostra representativa, coletando toda a vegetação existente acima do solo. Essas amostras foram destinadas a separação botânica e posterior secagem em estufa com

circulação forçada de ar a  $\pm 60$  °C até atingir peso constante (aproximadamente 72 horas), para posterior pesagem e estimativa de massa seca de forragem.

A separação botânica consistiu do aparte do material senescente (material morto – MM) e da classificação das espécies que mais contribuía no total de massa seca da pastagem com ocorrência em todas as parcelas. Todas as espécies selecionadas para serem avaliadas foram gramíneas, sendo elas no experimento I: *Axonopus affinis* e *Sporobulus indicus*, e no experimento II: *Axonopus affinis*, *Axonopus argentinus*, *Bothriochloa laguroides*, *Mnesithea selloana*, *Sporobulus indicus* e *Paspalum notatum*, e em Santa Maria (experimento III): *Paspalum notatum*, *Paspalum plicatulum*, *Eustachys uliginosa*, *Dichantherium sabulorum* e *Aristida laevis*. O restante do material vegetal foi agrupado no componente chamado de outras espécies (OUES). Além disso, em Santa Maria, foi separado também o azevém, que esteve presente apenas nas duas primeiras coletas e foi incluído no componente OUES para a realização da análise estatística.

A análise estatística da massa seca total foi realizada por um teste de comparação de médias via aleatorização, utilizando a distância euclidiana como medida de semelhança em que as fontes de fósforo e o período foram os fatores de agrupamento, sendo consideradas as diferenças apenas quando  $p < 0,05$ . A análise estatística da dinâmica da contribuição na massa seca das espécies, em função das fontes de fósforo nas diferentes épocas de avaliação foi baseada em ordenação das médias, sendo a distância euclidiana a medida de semelhança entre as unidades amostrais. Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do software MULTIV (PILLAR, 2004). A escolha da abordagem analítica com estatísticas não paramétricas se deveu a falta de normalidade e homocedastidase dos erros experimentais nos dados coletados, pressupostos para a análise de variância paramétrica.

## 6.3 Resultados

### 6.3.1 Massa de forragem total da pastagem natural

Nos experimentos I e II de Candiota, com histórico recente de aplicação de fertilizantes fosfatados, não foram encontradas diferenças na MS total de forragem ( $p=0,588$  e  $p=0,264$ , respectivamente) (Tabela 3). Além disso, não houve interação significativa entre período de avaliação e fontes de fósforo ( $p=0,780$  e  $p=0,464$ , respectivamente) e a MS da pastagem foi diferente apenas entre os períodos avaliados ( $p=0,003$  e  $p=0,024$ ,

respectivamente). O acúmulo de MS diário na pastagem dos 55 aos 232 dias foi de 4,13 e 4,74 kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> nos experimentos I e II, respectivamente.

Em Santa Maria, a MS total de forragem com aplicação de hiperfosfato de Gafsa foi igual à testemunha (Tabela 3). Já a aplicação de fosfato solúvel (SFT e SFS+Cal) proporcionou maior MS total de forragem em todos os períodos avaliados ( $p \leq 0,01$ ). A produção de MS de forragem obtida com aplicação de SFS+Cal foi 800 e 100 kg maiores do que a obtida com aplicação de SFT, na primeira e na segunda avaliação respectivamente. A MS de forragem aumentou ao longo do período avaliado ( $p \leq 0,001$ ) sem interação significativa entre o período de avaliação e as fontes de P ( $p = 0,8$ ). A MS senescente e acumulada diariamente dos 50 aos 186 dias de avaliação foi de 24,3, 21,9, 30,7 e 25,5 kg ha<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> para os tratamentos testemunha, Gafsa, SFT e SFS+Cal, respectivamente.

Tabela 3 – Massa seca total das pastagens naturais de Santa Maria e Candiota em função do período de crescimento e das fontes de fosfato.

Data	Dias	Fonte de fosfato			
		Testemunha	Gafsa	SFT	SFS <sup>1</sup>
		----- kg ha <sup>-1</sup> -----			
Experimento I, Candiota <sup>2</sup>					
22/11/2010	55	2284	2046	2318	2321
22/01/2011	116	2709	3016	2552	2666
18/03/2011	171	2982	2857	3362	2953
18/05/2011	232	2945	2455	3289	3633
	Média	2730 <sup>ns</sup>	2594	2878	2893
Experimento II, Candiota <sup>3</sup>					
22/11/2010	55	2157	2246	2189	1700
22/01/2011	116	1840	2383	2329	2908
18/03/2011	171	2131	2357	2795	2813
18/05/2011	232	2495	2887	3278	2559
	Média	2156 <sup>ns</sup>	2468	2648	2495
Experimento III, Santa Maria <sup>4</sup>					
16/10/2010	50	1635	1546	1851	2651
18/11/2010	83	2066	2115	2514	3514
03/01/2011	129	2630	2871	3785	3736
03/02/2011	159	3108	3883	5216	5303
01/03/2011	186	4885	4481	5962	6074
	Média	2865b <sup>*</sup>	2979b	3866a	4256a

<sup>1</sup>No experimento III onde lê-se SFS leia-se SFS+Calcário.

<sup>\*</sup>Médias seguidas por letras distintas nos experimentos na linha diferem entre si pelo teste de aleatorização  $p < 0,05$ .

### 6.3.2 Contribuição das principais espécies e componentes da pastagem natural na massa de forragem total

#### 6.3.2.1 *Efeito do histórico recente de aplicação de diferentes fontes de fosfato*

Os experimentos I e II apresentaram trajetórias semelhantes em todos os tratamentos em relação aos componentes de contribuição na MS total entre os períodos (Figuras 1 e 2). No experimento I, no primeiro período, a pastagem foi composta basicamente por *Axonopus affinis*. No segundo período, todos os tratamentos foram compostos por maior quantidade do componente MM. Já nos períodos 3 e 4 a pastagem apresentou maior relação com a contribuição do *Sporobulus indicus* e dos componentes OUES.

No experimento II, no primeiro período, a pastagem foi composta basicamente por *Axonopus affinis* e *Mnesithea selloana* (Figura 2). No segundo período, todos os tratamentos foram compostos por maior quantidade do componente MM. As espécies *Bothriochloa laguroides*, *Axonopus argentinus* apresentaram relação de pouca contribuição na MS total em todos os tratamentos e igualmente distribuídas entre os períodos. Já as espécies *Paspalum notatum*, *Sporobulus indicus* e os componentes OUES apresentaram maior contribuição no 3º e 4º períodos em todas as fontes de fosfato.

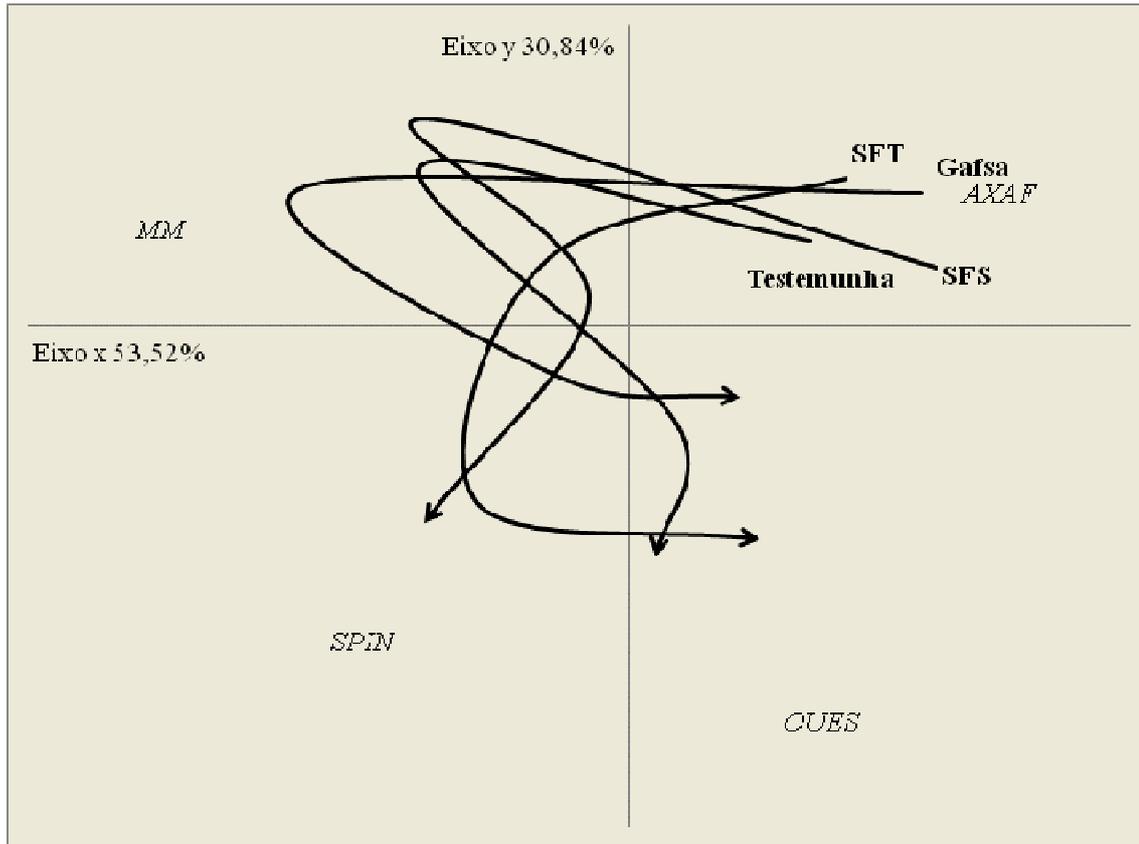


Figura 1 – Diagrama de ordenação das principais espécies componentes da pastagem natural de Candiota, do experimento I em função da trajetória das fontes de fosfatos no período de avaliação.

Tratamentos: **Testemunha**, **Gafsa** = hiperfosfato Gafsa, **SFT** = superfosfato triplo e **SFS** = superfosfato simples; Espécies: *AXAF* = *Axonopus affinis*, *SPIN* = *Sporobolus indicus*, *MM* = material morto e *OUES* = Outras espécies.

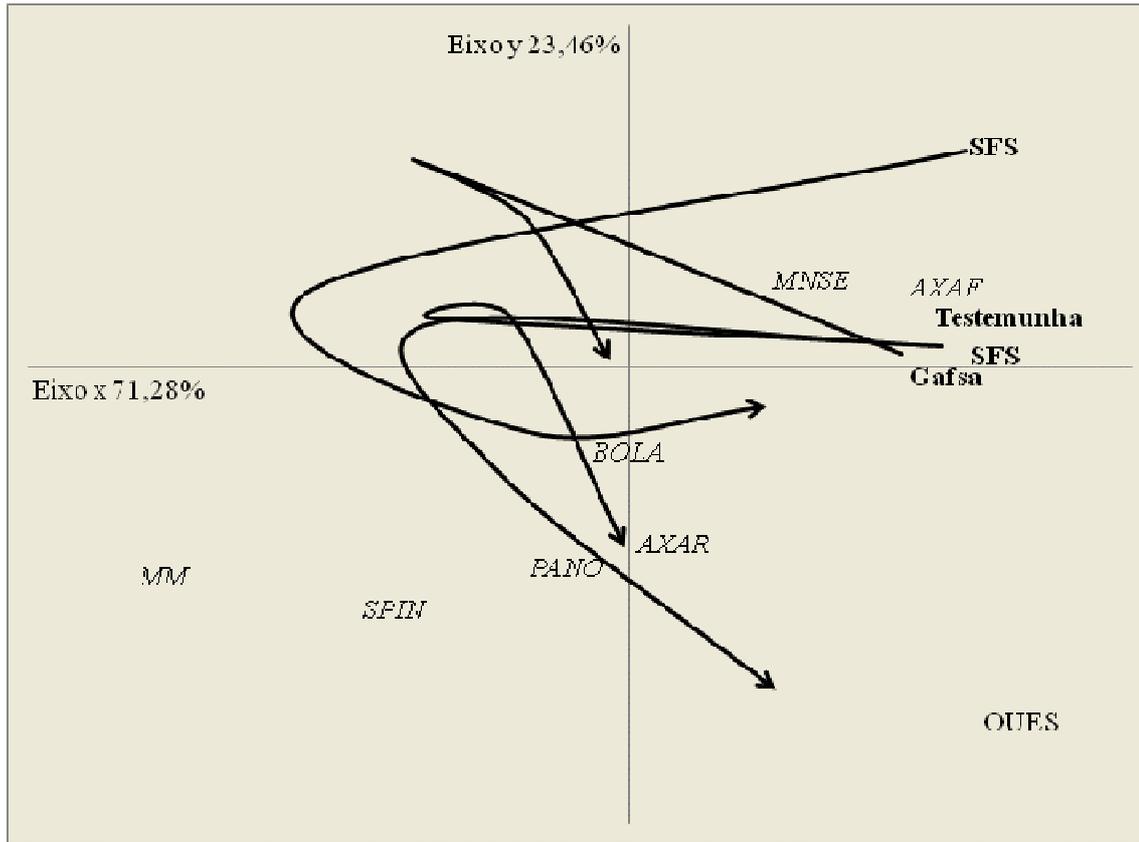


Figura 2 – Diagrama de ordenação das principais espécies componentes da pastagem natural de Candiota, do experimento II em função da trajetória das fontes de fosfatos no período de avaliação.

Tratamentos: **Testemunha**, **Gafsa** = hiperfosfato Gafsa, **SFT** = superfosfato triplo e **SFS** = superfosfato simples; Espécies: **AXAF** = *Axonopus affinis*, **AXAR** = *Axonopus argentinus*, **BOLA** = *Bothriochloa laguroides*, **COSE** = *Mnesithea selloana*, **PANO** = *Paspalum notatum*, **SPIN** = *Sporobolus indicus*, **MM** = material morto e **OUES** = Outras espécies.

### 6.3.2.2 Efeito do histórico de 13 anos de aplicação de diferentes fontes de fosfatos

No experimento III, a trajetória da contribuição das espécies componentes no total de MS foi semelhante entre os tratamentos que receberam aplicação de fosfatos solúveis, diferindo do hiperfosfato de Gafsa e da testemunha, que foram semelhantes entre si (Figura 3).

Os componentes de OUES apresentaram maior contribuição na MS total da pastagem em todos os tratamentos e em todos os períodos avaliados. Nos dois primeiros períodos avaliados, nos tratamentos SFT e SFS+Cal, esses componentes representaram mais de 50% do total de MS. Nestes componentes, o azevém contribuiu com 292 e 1103 kg ha<sup>-1</sup> no tratamento SFT no primeiro e segundo período, respectivamente, e 196 e 133 kg ha<sup>-1</sup> no tratamento SFS+Cal no primeiro e segundo período, respectivamente. Já no tratamento hiperfosfato de

Gafsa a contribuição de azevém nos componentes OUES foi de 4,9 e 37,7 kg ha<sup>-1</sup>, no primeiro e segundo período, respectivamente, e no tratamento testemunha foi de apenas 6,8 e 53,8 kg ha<sup>-1</sup> nos mesmos períodos.

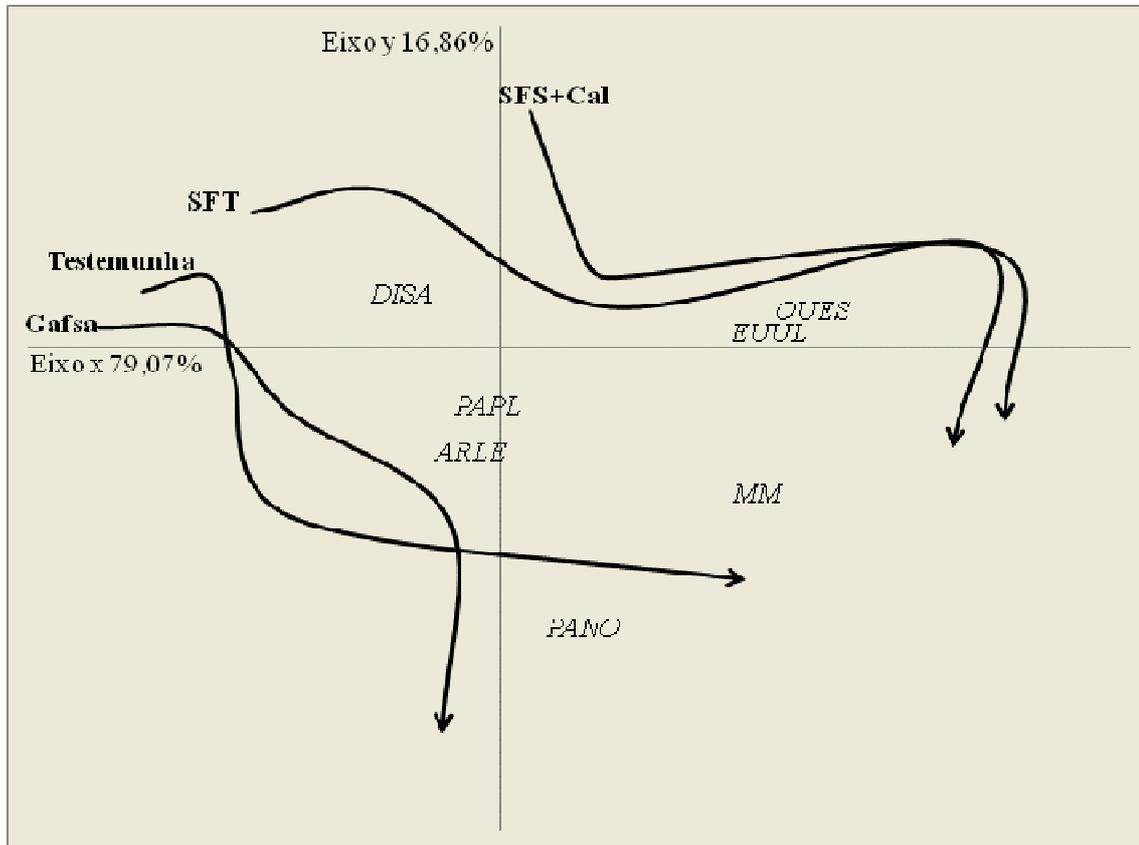


Figura 3 – Diagrama de ordenação das principais espécies componentes da pastagem natural de Santa Maria experimento III em função da trajetória das fontes de fosfatos no período de avaliação.

Tratamentos: **Testemunha**, **Gafsa** = hiperfosfato de Gafsa, **SFT** = superfosfato triplo e **SFS+Cal** = superfosfato simples + calcário; Espécies: **ARLA** = *Aristida laevis*, **DISA** = *Dichanthelium sabolorum*, **EUUL** = *Eustachys ulignosa*, **MM** = material morto **OUES** = Outras espécies, **PANO** = *Paspalum notatum* e **PAPL** = *Paspalum plicatulum*.

A gramínea nativa *Paspalum notatum* apresentou maior contribuição na MS total nos tratamentos hiperfosfato de Gafsa e testemunha, comparativamente aos tratamentos que receberam aplicação de fosfatos solúveis (Figura 3). Esta contribuição aumentou ao longo das avaliações em todos os tratamentos, com contribuição média nos períodos de 19, 25, 8 e 6% para a testemunha, Gafsa, SFT e SFS + Cal, respectivamente. As espécies *Dichanthelium sabolorum*, *Paspalum plicatulum* e *Aristida laevis* ficaram centralizadas no diagrama de ordenação, apresentando pequena contribuição na MS total em todos os tratamentos. A espécie *Eustachys ulignosa* e o MM relacionaram-se com a aplicação dos fosfatos solúveis.

Além disso, a contribuição do componente MM na MS total aumentou cerca de cinco vezes, em todos os tratamentos, dos 49 até os 183 de acúmulo de MS diário da pastagem.

#### 6.4 Discussão

Em Santa Maria, o aumento da MS de forragem da pastagem com a aplicação de fosfatos solúveis ocorreu devido à maior disponibilidade de P no solo para as plantas, assim como observado também por GATIBONI et al. (2000) e GATIBONI et al. (2003). A maior disponibilidade de P nesses tratamentos aliado ao efeito da roçada em agosto beneficiou o azevém, que é uma espécie anual de crescimento rápido e com maior exigência nutricional quando comparado as espécies nativas. Assim, o azevém encontrou condições de crescer e ter maior contribuição no total da MS de forragem. Todavia, o mesmo não ocorreu na testemunha e com a aplicação de hiperfosfato de Gafsa devido aos teores mais baixos de P disponível no solo. Dessa forma, a diferença encontrada na MS total de forragem ocorreu pela contribuição do azevém antes dos 49 dias, pois após esta data o acúmulo de MS diário foi semelhante entre os tratamentos. Esses resultados são um possível indicador de que o sucesso da introdução de azevém nas pastagens naturais é dependente do teor de P disponível no solo. A maior contribuição de azevém no tratamento SFS+Cal demonstra que a persistência dessa espécie é influenciada também pela correção da acidez do solo (GATIBONI et al., 2003). Como o azevém foi contabilizado nos componentes de OUES, a sua presença nos tratamentos com a adição dos fosfatos solúveis (SFT e SFS+Cal) relacionou esses tratamentos com os componentes de OUES, nos períodos iniciais. Já nos períodos seguintes, as trajetórias dos fosfatos solúveis mantiveram relação com o componente MM devido à contabilização do azevém senescente neste componente.

Além disso, deve-se destacar a diferença entre as trajetórias (Figuras 1 e 2 com a Figura 3) ao histórico de manejo das áreas experimentais. Os experimentos I e II foram estabelecidos em áreas submetidas ao pastejo contínuo de bovinos e ovinos, com cargas elevadas, durante centenas de anos até o período de instalação do experimento. Em contraste, a área do experimento III é uma pastagem natural cujo histórico de pastejo foi interrompido nos últimos 30 anos, quando a área foi incorporada ao Departamento de Solos da UFSM.

*Eustachys uliginosa* é uma gramínea típica de locais modificados pela ação antrópica e protegidos do pastejo de animais e possui grande potencial de produção de MS. A sua relação com a adição de fosfatos solúveis em Santa Maria demonstra que ela é exigente em fósforo.

Dessa forma, essa espécie contribuiu para o maior acúmulo de MS diário ( $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ ) da pastagem que recebeu aplicação de SFT.

A baixa disponibilidade de P no solo sob aplicação de hiperfosfato de Gafsa e na testemunha limitou a contribuição de espécies mais exigentes como a *E. uliginosa*, devido a dominância competitiva de espécies com maior capacidade de formar associações micorrízicas, como o *Paspalum notatum* (RHEINHEIMER & KAMINSKI, 1995), que foram favorecidas em condições naturais de fertilidade do solo. Nesse sentido, a elevação do pH e dos níveis de P disponíveis do solo no tratamento SFS+Cal, pode ter prejudicado a associação do *P. notatum* com micorrizas (RHEINHEIMER & KAMINSKI, 1994) e, conseqüentemente, diminuído a capacidade de absorção de P, água e outros nutrientes, reduzindo seu potencial na competição por luz. Como *P. notatum* contribuiu mais na MS total de forragem da testemunha e do hiperfosfato de Gafsa (Figura 3), a menor MS nesses tratamentos pode ser explicada em parte à sua característica de crescimento estolonífero, planta prostrada de baixo porte, menor teor de matéria seca nas lâminas foliares e rápida renovação de tecidos sem acúmulo de material senescente. Além disso, a menor contribuição *P. notatum* nos tratamentos que receberam fosfatos solúveis pode ter ocorrido também devido à competição exercida pelo azevém.

Em Candiota, o crescimento da pastagem natural foi limitado pelo déficit hídrico na região durante o período de avaliação, evidenciado pelo baixo acúmulo de MS diário. Por isso, o aumento da disponibilidade de P no solo devido à aplicação das fontes de fosfato não alterou a MS total de forragem. Aliado à estiagem, o período entre a adição de fosfato e as avaliações pode ter sido pequeno para verificar alterações na contribuição das espécies em função da fertilização nos dois experimentos (Figura 1 e 2). A estiagem promoveu sucessão entre os componentes que mais contribuíram na MS de forragem. As plantas que mais contribuíram nos períodos iniciais (*Axonopus affinis* no experimento I, e *A. affinis* e *Mnesithea selloana* no experimento II), foram gradativamente substituídas por espécies provavelmente mais tolerantes a restrição hídrica, como *Sporobulus indicus* no experimento I e *Bothriochloa laguroides* e *S. indicus* no experimento II. Períodos de estiagem frequentemente limitam o potencial de resposta das pastagens naturais em experimentos com fertilização na metade Sul do RS (SANTOS et al., 2008; CARASSAI et al., 2008), mas as informações geradas sob essas condições são importantes, pois refletem a realidade da região.

Algumas plantas apresentaram relação com todos os tratamentos. Uma delas foi à gramínea *Dichanthelium sabulorum*, que é uma espécie de baixo porte, de captura de recursos e que contribui pouco na MS total de forragem. Ela é beneficiada após a ocorrência de

queimadas e ou pastejo devido ao seu crescimento rápido (QUADROS & PILLAR, 2001), mas é também facilmente dominada por espécies de porte maior. Dessa forma, a sua relação com todos os tratamentos em Santa Maria pode ter ocorrido devido ao histórico de manejo com roçadas da pastagem. Já *Paspalum plicatulum* e *Sporobolus indicus* são plantas de formação de touceiras, com acúmulo de material senescente, menor taxa de crescimento e maior adaptação a solos pobres. Em Santa Maria, a relação de *Paspalum plicatulum* com todos os tratamentos possivelmente ocorreu devido à sua alta e uniforme ocorrência em toda a pastagem, conforme verificado por Bandinelli et al. (2005) na mesma área experimental. *Sporobolus indicus* aumenta seu potencial de rebrote com a fertilização fosfatada (OYARZABAL & OESTERHELD 2009). Todavia, devido à estiagem ocorrida em Candiota, essa espécie pode não ter encontrado condições adequadas para expressar esse potencial, relacionando-se com todos os tratamentos aplicados.

Por fim, pode-se verificar que onde o teor de P disponível é menor (experimentos II e III, com 2,6 e 1,4 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente) existe maior número de espécies contribuintes na MS total das pastagens. A limitação de P no solo pode inibir a dominância de espécies de maior exigência nutricional, promovendo a diversidade de plantas (DURU et al., 2005; VENTERINK, 2011). Assim os resultados obtidos nesse trabalho demonstram de maneira geral, pequena resposta da pastagem natural à adição de fertilizantes fosfatados (GATIBONI et al., 2000) por que as espécies componentes das pastagens naturais do Bioma Pampa se adaptaram ao longo de sua evolução aos solos desta região.

## 6.5 Conclusões

1. A resposta da pastagem natural à fertilização fosfatada é dependente da presença de espécies campestres de crescimento rápido, por exemplo, a *Eustachys uliginosa*.
2. No longo prazo, a adição de fertilizantes fosfatados e a introdução de espécies alteram a contribuição das principais espécies na massa seca total das pastagens naturais.

## 6.6 Referências

BANDINELLI, D. G. et al. Composição florística de pastagem natural afetada por fontes de fósforo, calagem e introdução de espécies forrageiras de estação fria. **Revista Ciência Rural**, v. 35, p. 84-94, 2005.

BARRETO, I. L.; VINCENZI, M. L.; NABINGER, C. Melhoria e renovação de pastagens. In: PEIXOTO, A. M.; MOURA, J. C.; FARIA, V. (Ed.). **Pastagens: fundamentos de exploração racional**, Piracicaba. Piracicaba: FEALQ, 1986. p. 295-309.

BOLDRINI, I. L. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: Pillar V. P. de; Müller S. C.; Castilhos Z. M. S.; Jacques A. V. A. (Ed.). **Campos Sulinos “conservação e uso sustentável da biodiversidade”**. Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p. 63-77.

CARASSAI, I. J.; et al. Recria de cordeiras em pastagem nativa melhorada submetida à fertilização nitrogenada. 1. Dinâmica da pastagem. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, p. 1338-1346, 2008.

CASTILHOS, Z. M. S.; JACQUES, A. V. A. Pastagem natural melhorada pela sobressemeadura de trevo branco e adubação. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 6, p. 19-25, 2000.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; TU, S.; SNYDER, C. S. Agronomic and environmental aspects of phosphate fertilizers varying in source and solubility: an update review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, p. 229–255, 2011.

DURU, M.; TALLOWIN, J.; CRUZ, P. Functional diversity in low-input grassland farming systems: characterisation, effect and management. **Agronomy Research**, v. 3, p. 125-138, 2005.

GATIBONI, L. C.; et al. Influência da adubação fosfatada e da introdução de espécies forrageiras de inverno na oferta de forragem de pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1663-1668, 2000.

GATIBONI, L. C. et al. Superphosphate and rock phosphates as P-source for grass-clover pasture on a limed acid soil of Southern Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, p. 1-12, 2003.

JACQUES, A. V. A.; HERINGER, I.; SCHEFFER-BASSO, S. M. Aspectos do manejo e melhoria da pastagem nativa. In: Pillar, V. P. de; Müller, S. C.; Castilhos, Z. M. S.; Jacques A. V. A. (Ed.). **Campos Sulinos “conservação e uso sustentável da biodiversidade”**. Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p. 237-247.

MACEDO, W.; BRASIL, N. E.; PATELLA, J. F. Calcário na implantação em cobertura de leguminosa de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 14, p. 125-134, 1979.

MACEDO, W.; GONÇALVES, J. O. N. Resposta da cultura de trevo branco (*Trifolium repens*) cv. Bagé à calagem e à adubação fosfatada e potássica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 4, p. 39-44, 1980.

MACEDO, W.; GONÇALVES, J. O. N.; GIRARDI-DEIRO, A. M. Melhoramento de pastagem natural com fosfatos e introdução de leguminosas em solo da fronteira oeste do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 9, p. 231-235, 1985.

NABINGER, C. et al. Produção animal com base no campo nativo: aplicações de resultados de pesquisa. In: Pillar V. P. de; Müller S. C.; Castilhos Z. M. S.; Jacques A. V. A. (Ed.). **Campos Sulinos “conservação e uso sustentável da biodiversidade”**. Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente, 2009. p. 175-198.

OLIVEIRA, L. B. et al. Fósforo microbiano em solos sob pastagem natural afetado por queima e pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1509-1515, 2011.

OLIVEIRA, O. L.; BARRETO, I. L. Efeito de calcário e método de semeadura no comportamento de espécies forrageiras temperadas no melhoramento de pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 11, p. 49-56, 1976.

OYARZABAL, M.; OESTERHELD, M. Phosphorus reserves increase regrowth after defoliation. **Oecologia**, v. 159, p. 717-724, 2009.

PILLAR, V. D. **MULTIV**, Multivariate Exploratory Analysis, Randomization Testing and Bootstrap Resampling. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. Disponível em <<http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br/>>.

QUADROS, F. L. F.; PILLAR, V. P. Dinâmica vegetacional em pastagem natural submetida a tratamentos de queima e pastejo. **Ciência Rural**, v. 31, p. 863-868, 2001.

RHEINHEIMER, D. S. et al. **Situação da fertilidade dos solos do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: UFSM, Departamento de Solos, 2001. 41p.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Intensidade de colonização do córtex radicular e sua relação com a absorção de fósforo pelo capim-pensacola. **Ciência Rural**, v. 25, p. 223-228, 1995.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J. Resposta do capim-pensacola à adubação fosfatada e à micorrização em solo com diferentes valores de pH. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p. 201-205, 1994.

SANTOS, D. T et al. Eficiência bioeconômica da adubação de pastagem natural no sul do Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, p. 437-444, 2008.

SILVA, J. L. S.; JACQUES, A. V. A. Disponibilidade de forragem de uma pastagem natural sobressemeada com leguminosas perenes de estação quente. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, v. 22, p. 920-929, 1993.

VENTERINK, O. H. Does phosphorus limitation promote species-rich plant communities? **Plant and Soil**, v. 345 p. 1-9, 2011.

## 7 ARTIGO III: FÓSFORO NA BIOMASSA AÉREA DE ESPÉCIES NATIVAS DOS CAMPOS SULINOS

**Resumo:** O teor de P no tecido das plantas de pastagens naturais pode ser um indicador da nutrição mineral das espécies campestres. O objetivo deste trabalho foi avaliar o P do tecido e a diluição do P e N no tecido das principais gramíneas de três pastagens naturais submetidas à adição de diferentes fontes de fosfato em solos com e sem histórico de aplicação de P. Os tratamentos consistiram da testemunha e da aplicação de hiperfosfato de Gafsa e superfosfatos simples e triplo, arranjados em blocos casualizados com três repetições. Foram instalados dois experimentos sob aplicação de  $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  em setembro de 2010, um deles num Luvissole e outro num Neossolo. Em outro experimento, sobre um Argissolo, foram aplicados 180, 90, 100 e  $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  nos anos de 1997, 1998, 2002 e 2010, respectivamente. As amostras de tecido da pastagem foram coletadas em  $1,0 \text{ m}^2$  durante a estação de crescimento das pastagens naturais para estimativa da massa seca e determinação do teor de P e N no tecido. No Argissolo as espécies *Paspalum notatum*, *Aristida laevis* e o componente Outras Espécies aumentaram a biomassa aérea e diluíram o P do tecido ao longo dos períodos. A espécie *Eustachys uliginosa* responde à adição de superfosfatos. O teor de P no tecido das espécies nativas é diferente entre as espécies. *Aristida laevis* tem menor teor de P no tecido e é adaptada a solos pobres em P disponível no solo. A aplicação de fosfatos não altera a diluição de N no tecido das espécies nativas.

**Palavras-chave:** Espécies campestres. Adição de fosfatos. Diluição de P no tecido.

### PHOSPHORUS IN BIOMASS OF NATIVE SPECIES SOUTHERN BRAZILIAN CAMPOS

**Abstract:** The P content in grassland's plants tissue can be an indicator of mineral nutrition of grassland species. The aim of this study was to evaluate the P content in the tissue of the major grasses and its P and N dilution at three grasslands subjected to the addition of different phosphate sources in soils with and without P application history. The treatments were composed by the control plot and by plots under Gafsa rock phosphate and single and triple superphosphate applications, arranged in a randomized blocks design with three replicates. Two experiments, one located at an Ultisol and another at an Entisol, received application of  $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  in September 2010. The third experiment, located at an Alfisol, received application of 180, 90, 100 and  $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  in 1997, 1998, 2002 and 2010, respectively. Pasture tissue samples were collected in  $1,0 \text{ m}^2$  during the growing season of grassland to estimate their dry mass and P and N contents. At the Alfisol, *Paspalum notatum*, *Aristida laevis* and the Other Species component increased their biomass and diluted the tissue P content during the evaluated period. *Eustachys uliginosa* responds to the superphosphates addition. The tissue P content is different between the native species. *Aristida laevis* has a lower P content in tissue and is adapted to soils with poor P availability. The phosphate application does not alter the N dilution in the tissue of the native species.

**Key words:** Grassland species. Phosphate addition. Dilution of P content in tissue.

## 7.1 Introdução

No Rio Grande do Sul, as áreas de pastagens naturais estão sendo marginalizadas, sendo que sua exploração é restrita principalmente aos locais com algum impedimento às práticas agrícolas. Essas áreas apresentam, na sua maioria, elevada acidez e baixa disponibilidade de P como limitantes ao crescimento das plantas (OLIVEIRA et al., 2011). Dessa maneira, a calagem e a adubação fosfatada podem ser utilizadas como alternativa para aumentar a produtividade forrageira (GATIBONI et al., 2000; GATIBONI et al., 2003), garantindo assim a manutenção deste ecossistema.

Tradicionalmente, a recomendação de adubação das pastagens naturais tem sido realizada mediante análise de solo. Contudo, essa metodologia pode ser insuficiente para identificar as variações nas necessidades nutritivas das espécies campestres. Isso ocorre devido à vasta biodiversidade das pastagens, às diferenças entre os ciclos de crescimento e o desconhecimento da capacidade de exploração do sistema radicular das plantas (DURU & DUCROCQ, 1997). Além disso, os métodos de análises de solos de rotina são ineficazes em prever a disponibilidade de P quando do uso de fertilizantes de baixa solubilidade, como os fosfatos naturais.

Estudos utilizando análises de tecido da biomassa aérea têm demonstrado que o diagnóstico de deficiência de N e P em pastagens pode ser baseado na relação entre o teor desses nutrientes no tecido vegetal e a produção de biomassa aérea (DURU et al., 1977; BENNETT & ADAMS, 2001). O teor de N da biomassa aérea é negativamente relacionado ao acúmulo de massa seca (MS) em gramíneas crescendo sob condição não limitante de N e pode ser representado pelo modelo  $Y = b0(X)^{-b1}$ , onde  $Y$  é o teor de nutriente da biomassa,  $b0$  é a disponibilidade inicial do nutriente,  $X$  é o peso da biomassa aérea, e  $b1$  é o coeficiente de diluição do nutriente durante o crescimento (LEMAIRE & SALETTE, 1984). Como existe semelhança entre a diminuição dos teores de N e P com o aumento da biomassa da parte aérea, a utilização da relação linear entre P e N pode ser utilizada para estabelecer o teor de P crítico (DURU & DUCROCQ, 1997). Segundo Duru & Ducrocq (1997), o teor de P crítico no tecido da biomassa aérea de pastagens perenes na França pode ser expresso pela equação  $P(\%) = 1,5 + 0,065*N(\%)$ . Essa relação tem sido validada nas mais diversas condições. Nesse sentido, Bélanger & Richards (1998) encontraram uma relação muito semelhante para a gramínea *Phleum pratense* no Canadá ( $P(\%) = 1,46 + 0,069*N(\%)$ ). Já Bennett & Adams (2001) utilizaram a relação N:P em ecossistemas naturais sub-tropicais e semi-áridos sob

restrição de P para detectar o nutriente mais restritivo ao crescimento em pastagens naturais da Austrália.

As curvas de diluição de nutrientes demonstram as necessidades de cada espécie para a máxima taxa de crescimento. Sob condições não limitantes ao suprimento de N, as plantas C4 requerem somente 75% do N requerido pelas plantas C3 para produção da mesma biomassa (LEMAIRE & GASTAL 1997), devido às diferenças existentes nos caminhos para assimilação de CO<sub>2</sub> (BÉLANGER & GASTAL, 1999). As pastagens naturais do RS são formadas majoritariamente por gramíneas megatérmicas C4, com ocorrência de algumas espécies C3 (BOLDRINI, 2009). Dentre as espécies ocorrentes nos campos sulinos, estudos analisando curvas de diluição de P para gramíneas ainda são escassos. Entretanto, a curva de diluição de N já foi descrita para as gramíneas C4, *Paspalum urvillei* e *Andropogon lateralis*, para as gramíneas C3, *Piptochaetium montevidense* e *Briza subaristata* (COSTA, 2003), e as curvas de diluição de N e P foram descritas para a leguminosa nativa C3 *Desmodium incanum* (SILVA et al., 2001).

As gramíneas nativas podem apresentar diferentes mecanismos adaptativos de captação e uso de P em ambientes limitados por esse nutriente (LATJHA & HARRISON, 1995; AERTS & CHAPIN, 2000), resultando em diferente teor de P na biomassa da parte aérea. Além disso, a anatomia foliar pode alterar a eficiência da interceptação de luz e assim, dentro do mesmo grupo de eficiência metabólica, a diluição de N e P pode ser diferente (LEMAIRE et al., 2008). Dessa forma, o entendimento da dinâmica de N e P pelo estudo da diluição desses nutrientes em diferentes espécies nativas, pode servir como base para recomendações de manejo da adubação das pastagens naturais do RS.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar (a) o teor de P no tecido e (b) a diluição do P e N na biomassa aérea das principais gramíneas de três pastagens naturais submetidas à aplicação de diferentes fontes de fosfato em solos com e sem histórico de aplicação de P.

## 7.2 Material e métodos

O presente trabalho foi constituído de três experimentos instalados em diferentes regiões fisiográficas do estado do Rio Grande do Sul (RS). Os experimentos I e II foram desenvolvidos numa propriedade de pecuária sob pastagem natural no município de Candiota, situado na zona de transição entre a região fisiográfica da Depressão Central e a região do Planalto Sulriograndense (31°25' S, 53°34' O), sob um Luvisolo Úmbrico e um Neossolo Litólico, respectivamente. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo

subtropical Cfa, mesotérmico, com precipitação e temperatura média anual de 1.350 mm e 18° C, respectivamente, ocorrência de geadas de abril a novembro e estiagens de novembro a maio (Tabela 1). Os experimentos de Candiota foram instalados em dois locais para atingir pastagens naturais com diferentes condições iniciais de fertilidade de solo e com diferente composição botânica. Esses experimentos foram instalados no dia 28 de setembro de 2010. As áreas experimentais foram cercadas e roçadas, retirando o material vegetal cortado. Logo após, os tratamentos, arranjados em blocos ao acaso com três repetições, foram formados pela aplicação superficial de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de superfosfato triplo (SFT), superfosfato simples (SFS), hiperfosfato de Gafsa e a testemunha sem P. As parcelas possuíam 6,25 m<sup>2</sup>. Todas as parcelas receberam 30 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia. Não foi adicionado potássio, pois o teor deste se encontrava naturalmente elevado nos dois solos (Tabela 2).

O experimento III foi instalado em área de pastagem natural no Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, situada na região fisiográfica da Depressão Central do RS (29°43' S, 53°42' O), com altitude média de 95 m, sob um Argissolo Vermelho (Tabela 2). O clima da região é classificado como subtropical úmido Cfa, segundo classificação de Köppen, com precipitação e temperatura média anual de 1.769 mm e 19,2° C, respectivamente, e ocorrência de geadas nos meses de maio a agosto (Tabela 1). O experimento foi instalado em 1997 e os tratamentos consistiram na aplicação superficial de 180 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nas formas de hiperfosfato de Gafsa, SFT, SFS mais calcário (SFS+Cal) e a testemunha sem aplicação de P. Apenas no tratamento SFS+Cal foi aplicado 3,2 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário (dose para elevar o pH-H<sub>2</sub>O a 5,5). O potássio no solo foi corrigido em toda a área, com a aplicação de 130 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio. Em 1998, foram reaplicados 90 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nas formas acima citadas. Em junho de 2002 as parcelas de 5,6 x 3,3 m receberam reaplicação de fosfato na quantidade de 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Nos invernos de 1997, 1998, 2002 foram introduzidas na pastagem natural as espécies azevém (*Lolium multiflorum*) e trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*) por meio de semeadura direta após roçadas. Desde então a pastagem ficou sob crescimento livre. Em 27 de agosto de 2010, a pastagem foi roçada retirando o material vegetal cortado, sendo reaplicados 100 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de hiperfosfato de Gafsa, SFT e SFS. Assim, com a adição total de 470 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ao longo do tempo foram realizadas as avaliações do presente trabalho, em um desenho experimental de blocos ao acaso com três repetições.

Tabela 1 – Precipitação pluvial e temperatura média mensal do período experimental nas regiões de Candiota e Santa Maria.

Mês	Precipitação pluvial		Temperatura média mensal	
	Candiota	Santa Maria	Candiota	Santa Maria
	----- mm -----		----- °C -----	
	Ano 2010			
Setembro	115,6	244,9	15,3	16,7
Outubro	30,2	49,3	16,0	18,1
Novembro	28,5	71,3	18,6	20,7
Dezembro	57,4	157,9	23,2	24,3
	Ano 2011			
Janeiro	93,6	127,1	25,1	25,6
Fevereiro	68,4	165,8	23,0	24,6
Março	135,0	54,9	21,1	22,5
Abril	86,2	164,9	18,4	19,4
Maior	38,2	54,9	14,3	15,5

\*Os dados da Região de Candiota e de Santa Maria foram disponibilizados pela estação meteorológica automática da EMBRAPA Pecuária Sul, Bagé, Rio Grande do Sul e pela estação meteorológica do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, respectivamente.

Tabela 2 – Características físicas e químicas do solo da camada 0-10 cm nos experimentos I e II de Candiota (Luvisolo Úmbrico e Neossolo Litólico, respectivamente) e no experimento de Santa Maria (Argissolo Vermelho).

Solo	pH <sub>H2O</sub>	Argila	M.O.	K	Ca	Mg	Al	CTC <sub>pH7</sub>	V <sup>1</sup>	m <sup>1</sup>
	(1:1)	--- g dm <sup>-3</sup> ---		mg dm <sup>-3</sup>	----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----				--- % ---	
Luvisolo Úmbrico	4,6	190	28	164	2,7	0,8	0,9	10,2	39	18
Neossolo Litólico	4,9	190	33	124	3,4	1,5	0,5	10,7	49	9
Argissolo Vermelho	4,5	170	18	60	1,2	0,7	1,3	8,0	40	22

<sup>1</sup>Saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m).

As amostras de massa de forragem, tecido vegetal e solo, nos experimentos instalados em Candiota, foram coletadas nos dias 22/11/10, 22/01/11, 18/03/11 e 18/05/11, correspondente a 55, 116, 171 e 232 dias após a roçada (dia zero), respectivamente. Em Santa Maria, as coletas foram realizadas nos dias 16/10/2010, 18/11/2010, 03/01/2011, 03/02/2011 e 01/03/2011, correspondente a 50, 81, 129, 160 e 188 dias após a roçada, respectivamente. Nos três experimentos foram coletadas quatro subamostras de 0,25 m<sup>2</sup> em cada parcela, para compor uma amostra representativa, coletando toda a vegetação existente acima do solo. Essas amostras foram destinadas a separação botânica e posterior secagem em estufa com circulação forçada de ar a ±60 °C até atingir peso constante (aproximadamente 72 horas), para posterior pesagem e estimativa de massa seca de forragem. O solo foi coleta no mesmo local

após o tecido sendo duas sub amostras por quadro (0,25 m<sup>2</sup>) totalizando 8 subamostras coletadas com trado calador na camada de 0-10 cm. O solo foi seco em estufa de circulação forçada de ar a  $\pm 60$  °C. Posteriormente, o P disponível foi estimado pela extração com resina trocadora aniônica (RTA) saturada com bicarbonato.

A separação botânica consistiu do aparte do material senescente (material morto – MM) e da classificação das espécies que mais contribuíam no total de massa seca da pastagem com ocorrência em todas as parcelas. Todas as espécies selecionadas para serem avaliadas foram gramíneas, sendo elas no experimento I: *Axonopus affinis* e *Sporobulus indicus*, e no experimento II: *Axonopus affinis*, *Axonopus argentinus*, *Bothriochloa laguroides*, *Mnesithea selloana*, *Sporobulus indicus* e *Paspalum notatum*, e em Santa Maria (experimento III): *Paspalum notatum*, *Paspalum plicatulum*, *Eustachys uliginosa*, *Dichantelium sabulorum* e *Aristida laevis*. O restante do material vegetal foi agrupado no componente chamado de outras espécies (OUES). Além disso, em Santa Maria, foi separado também o azevém, que esteve presente apenas nas duas primeiras coletas e foi incluído no componente OUES para a realização da análise estatística.

A análise de P total no tecido das espécies e dos componentes da pastagem foi realizada conforme o descrito por Tedesco et al. (1995), com a digestão de 0,200 g de tecido em ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) juntamente com peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) em bloco a 350 °C e posterior de determinação do P conforme Murphy & Riley (1962).

O modelo estatístico adotado para o P disponível do solo foi um bifatorial com parcelas subdivididas em três blocos casualizados como repetições, onde as fontes de fósforo foram as parcelas principais e as épocas de avaliação foram as subparcelas. Para a comparação do teor de P no tecido entre as espécies na média das cinco épocas, o modelo estatístico utilizado foi blocos casualizados com três repetições. A comparação da diluição do teor de P no tecido das espécies nativas foi realizada pelo modelo estatístico bifatorial tendo como parcelas principais as fontes de fósforo e subparcelas os períodos de avaliação. Os dados qualitativos foram submetidos à análise de variância e, quando os efeitos foram significativos ( $p < 0,05$ ), aplicou-se o teste de comparação de médias Scott-Knot, tomando por base os níveis de significância maiores que 95%. Para os resultados quantitativos, foram ajustadas equações de regressão quando a análise de variância apontou significância no efeito dos tratamentos. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Assistat versão 7.6 Beta 2011 (SILVA & AZEVEDO, 2006).

## 7.3 Resultados

### 7.3.1 Fósforo disponível no solo

No Luvissole de Candiota e no Argissolo de Santa Maria, o P disponível por RTA com a aplicação de hiperfosfato de Gafsa foi maior que a testemunha (8,2; 5,7 e 6,2; 1,4 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente), mas foi menor que o P disponível obtido com adição dos superfosfatos (12,8 e 11,8 mg kg<sup>-1</sup>). Já no Neossolo de Candiota, houve aumento no P disponível por RTA em relação a testemunha apenas com a aplicação fosfatos solúveis (2,6 a 8,5 mg kg<sup>-1</sup>). Além disso, o P disponível por RTA diminuiu linearmente (segundo os respectivos modelos, (a)  $y = 15,69 - 0,040 x$ ,  $R^2 = 0,90$ ; (b)  $y = 9,17 - 0,022 x$ ,  $R^2 = 0,72$  e (c)  $y = 11,29 - 0,029 x$ ,  $R^2 = 0,72$ ) após a aplicação de fosfato sem diferença entre as fontes de P de 12,6, 7,3 e 9,9 mg kg<sup>-1</sup> para 6,1, 4,1 e 5,9 mg kg<sup>-1</sup> no Luvissole, Neossolo e Argissolo respectivamente.

### 7.3.2 Efeito da aplicação de fontes de fosfato no teor de P no tecido das espécies nativas

No experimento I, a gramínea *Sporobolus indicus* e o componente Outras Espécies aumentaram o teor de P no tecido com a adição de fosfatos solúveis comparativamente ao hiperfosfato de Gafsa e a testemunha (Tabela 3). O teor de P do componente Material Morto foi maior com a aplicação de fosfatos, independentemente da fonte, comparativamente à testemunha. Já a espécie *Axonopus affinis* não aumentou o teor de P do tecido com a adição de fosfatos.

No experimento II o teor de P no tecido de todas as espécies e do componente “Outras Espécies”, foi maior a adição de fosfatos solúveis em relação à testemunha e ao hiperfosfato de Gafsa. O teor de P no tecido dos componentes “Outras Espécies” e *P. notatum* foram maiores com a aplicação de SFS do que com a adição do SFT. Já o teor de P no tecido do componente Material Morto foi maior apenas com aplicação de SFS.

Na pastagem de Santa Maria, o teor de P no tecido de todas as espécies foi maior com a adição do hiperfosfato em relação à testemunha, mas foi inferior ao teor obtido com a adição dos superfosfatos com exceção ao teor de P no *Paspalum notatum*, o qual teve menor aumento no solo que recebeu calcário. O teor de P no tecido do *P. plicatulum* com a aplicação de SFS foi maior do que com a adição de hiperfosfato de Gafsa, mas inferior ao teor obtido com o SFT. Contrariamente, o teor de P no tecido da *Aristida laevis* foi maior com a aplicação de SFS. O teor de P no tecido da *Aristida laevis* aumentou menos em relação as demais

espécies de Santa Maria. O teor de P no tecido do componente Material Morto não foi alterado pela aplicação de fosfatos.

Tabela 3 – Teor de fósforo no tecido dos componentes e espécies nativas das pastagens naturais de Candiota e Santa Maria em função das aplicações de diferentes fontes de fosfato.

	Fontes de fosfato				CV
	Testemunha	Gafsa	SFT	SFS	
	----- g kg <sup>-1</sup> -----				%
<b>Experimento I (Candiota)</b>					
<i>Axonopus affinis</i>	1,63 aA	1,62 aA	1,73 aB	1,83 aA	7,20
<i>Sporobulus indicus</i>	1,36 bB	1,35 bB	1,63 aB	1,61 aB	6,15
Outras espécies	1,67 bA	1,66 bA	1,92 aA	1,78 bA	4,38
Material Morto	0,86 bC	1,04 aC	1,04 aC	1,12 aC	7,86
CV, %	3,91	9,78	6,09	4,89	
<b>Experimento II (Candiota)</b>					
<i>Axonopus affinis</i>	1,25 bA	1,20 bA	1,56 aA	1,70 aA	7,91
<i>Axonopus argentinus</i>	0,99 bC	1,03 bA	1,40 aA	1,36 aB	6,27
<i>Bothriochloa laguroides</i>	1,03 bC	1,08 bA	1,44 aA	1,42 aB	10,04
<i>Mnesithea selloana</i>	1,08 bC	1,11 bA	1,53 aA	1,62 aA	6,96
<i>Paspalum notatum</i>	1,12 cB	1,15 cA	1,42 bA	1,57 aA	5,17
<i>Sporobulus indicus</i>	0,95 bC	1,05 bA	1,47 aA	1,62 aA	11,98
Outras espécies	0,99 cC	1,08 cA	1,29 bA	1,64 aA	7,00
Material Morto	0,67 bD	0,80 bB	0,75 bB	1,03 aC	10,89
CV, %	6,53	7,06	6,42	7,17	
<b>Experimento III (Santa Maria)</b>					
<i>Eustachys uliginosa</i>	0,94 cA	2,12 bA	2,58 aA	2,70 aA	7,16
<i>Dichanthelium sabulorum</i>	0,92 cA	2,14 bA	2,73 aA	2,46 aA	7,17
Outras Espécies	0,98 cA	1,62 bB	1,96 aB	2,02 aB	9,92
<i>Paspalum notatum</i>	0,99 cA	1,51 bB	1,85 aB	1,66 bC	6,43
<i>Paspalum plicatulum</i>	0,87 dA	1,35 cC	1,88 aB	1,61 bC	8,31
<i>Aristida laevis</i>	0,89 dA	1,12 cD	1,26 bC	1,49 aC	8,77
Material Morto	0,63 aB	0,72 aE	1,06 aC	1,05 aD	26,93
CV, %	12,43	4,68	10,06	9,41	

Médias seguidas de mesmas letras minúsculas nas linhas e maiúsculas nas colunas não diferem a 5 % pelo teste de Scott-Knot.

### 7.3.3 Comparação do P no tecido entre as espécies nativas das pastagens naturais submetidas a aplicação de fontes de fosfatos

No experimento I, o teor de P no tecido do componente Material Morto foi menor, em relação às demais espécies, em todos os tratamentos. O teor de P no tecido entre a gramínea

*Axonopus affinis* e o componente “Outras espécies” foi semelhante em todos os tratamentos e superiores ao teor de P no tecido da espécie *Sporobulus indicus*.

No experimento II, o teor de P no tecido do componente Material Morto foi menor que as demais espécies em todos os tratamentos. Na testemunha, o teor de P no tecido da espécie *Paspalum notatum* foi maior em relação às demais espécies, mas foi inferior a gramínea *Axonopus affinis*. O teor de P no tecido com as aplicações de hiperfosfato de Gafsa e SFT foi semelhantes entre as espécies e o componente “Outras Espécies”. Já com a aplicação de SFS o teor de P no tecido das gramíneas *Bothriochloa laguroides* e *Axonopus argentinus* foram semelhantes, mas inferiores aos obtidos para as demais espécies e componente “Outras Espécies”.

Na testemunha do experimento III, o teor de P no tecido de todas as espécies nativas e componentes da pastagem foi semelhante. Com a aplicação do hiperfosfato de Gafsa o teor P no tecido foi maior para as espécies *Eustachys ulignosa* e *Dichantelium sabulorum* em relação aos demais componentes. Os componentes *Paspalum notatum* e o componente “Outras espécies” tiveram teores de P no tecido semelhantes e superiores aos das espécies abaixo citadas. O teor P no tecido da gramínea *Paspalum plicatum* foi maior que o da espécie *Aristida laevis*. Nos tratamentos com a adição de fosfatos solúveis, o teor P no tecido das gramíneas *Eustachys ulignosa* e *Dichantelium sabulorum* foi maior em relação aos demais componentes. Com a aplicação de SFT o teor P do tecido das gramíneas *Paspalum notatum*, *Paspalum plicatum* e componente “Outras Espécies” foi maior em relação à *Aristida laevis* e ao componente Material Morto. Já com a adição de SFS+Cal o teor de P no tecido do componente “Outras Espécies” foi maior em relação ao teor das espécies *Paspalum notatum*, *P. plicatum* e *Aristida laevis*.

#### 7.3.4 Biomassa aérea das espécies e componentes das pastagens

Em Candiota, a massa seca de todas as espécies e componentes foi diferente estatisticamente entre os períodos, porém não foi encontrado aumento contínuo na massa seca das plantas (Tabela 4 e Figura 1 e 2). Assim, a matéria seca de nenhuma espécie nativa das pastagens em Candiota foi alterada pela adição de fosfatos.

Em Santa Maria as espécies *Paspalum plicatum* e *Dichantelium sabulorum* não aumentaram a massa seca ao longo do período. As gramíneas *Paspalum notatum* e *Aristida laevis* aumentaram em 747 e 172 kg ha<sup>-1</sup> a massa seca (Figura 3) do início do período até o fim, respectivamente, sem diferença estatística entre as fontes de fosfatos (Tabela 4). A massa

seca do componente “Outras Espécies” aumentou no período de avaliação e foi maior com a adição de fosfatos solúveis. Já a gramínea *Eustachys ulignosa* aumentou a massa seca apenas com a adição dos superfosfatos, mas principalmente quando essa fonte foi associada ao calcário. A massa seca do componente Material Morto aumentou durante o período (Figura 3) e não foi diferente entre as fontes de fosfatos (Tabela 4).

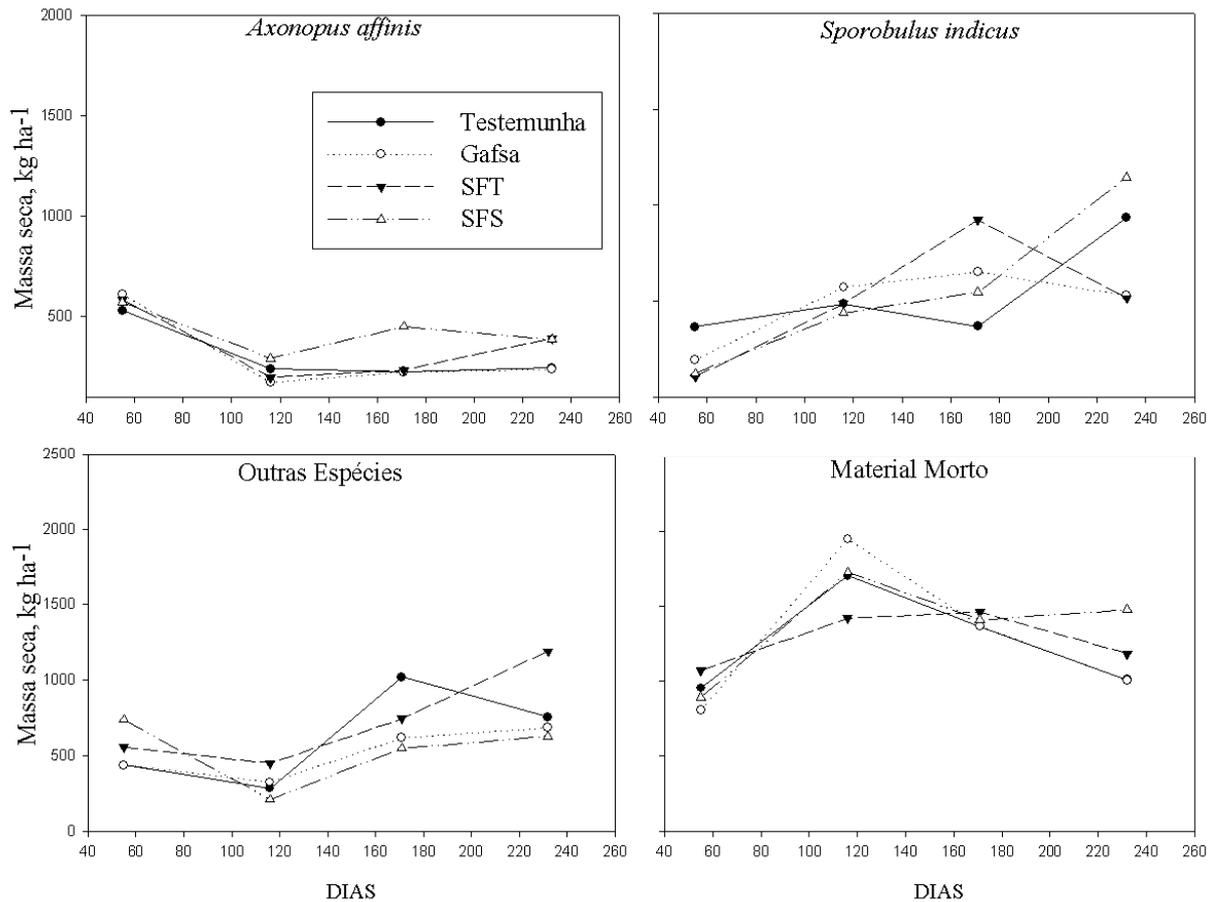


Figura 1 – Massa seca (kg ha<sup>-1</sup>) das espécies e componentes da pastagem natural de Candiota, experimento I, em função do período de amostragem em dias.

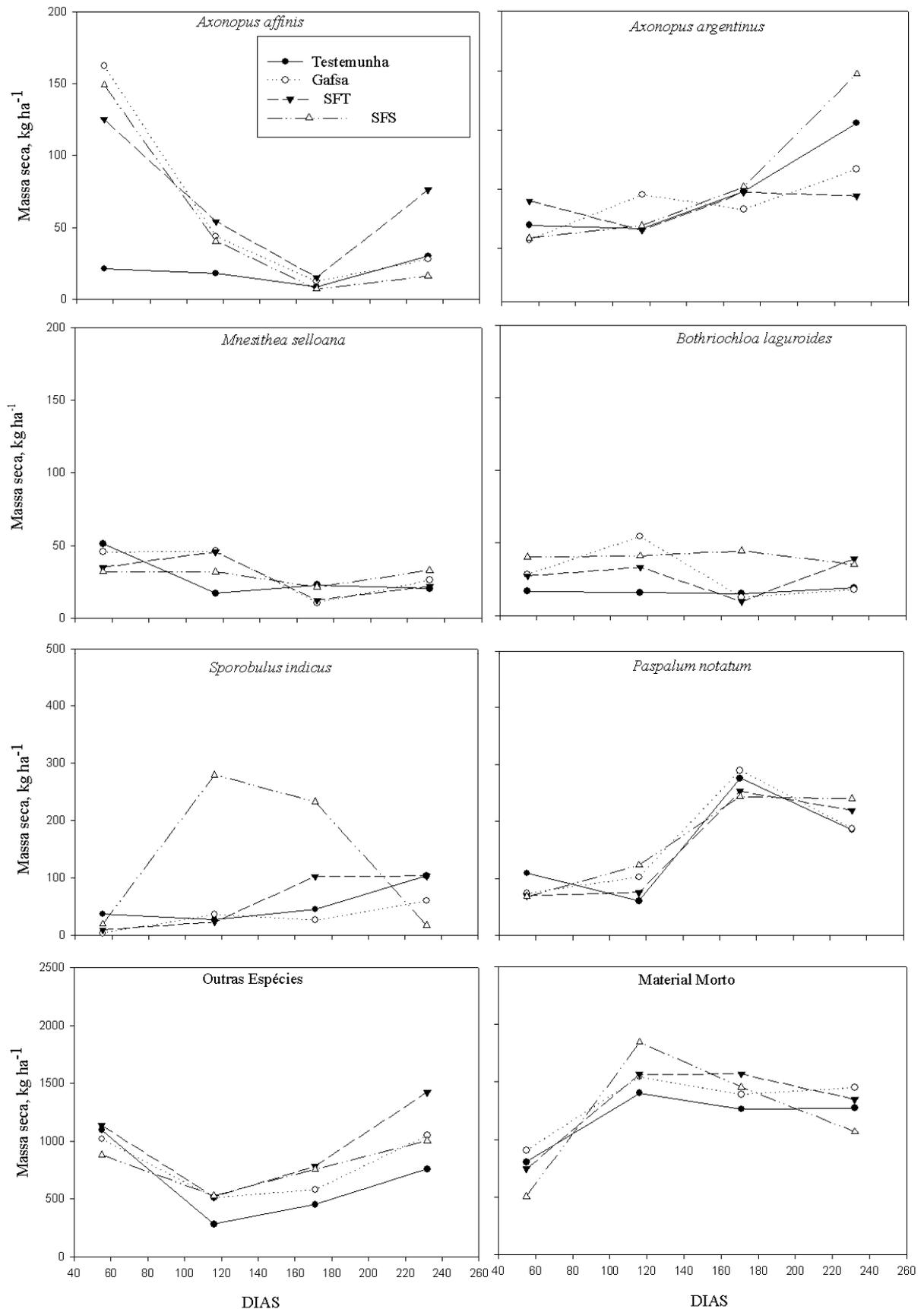


Figura 2 – Massa seca (kg ha<sup>-1</sup>) das espécies e componentes da pastagem natural de Candiota, experimento II, em função do período de amostragem em dias.

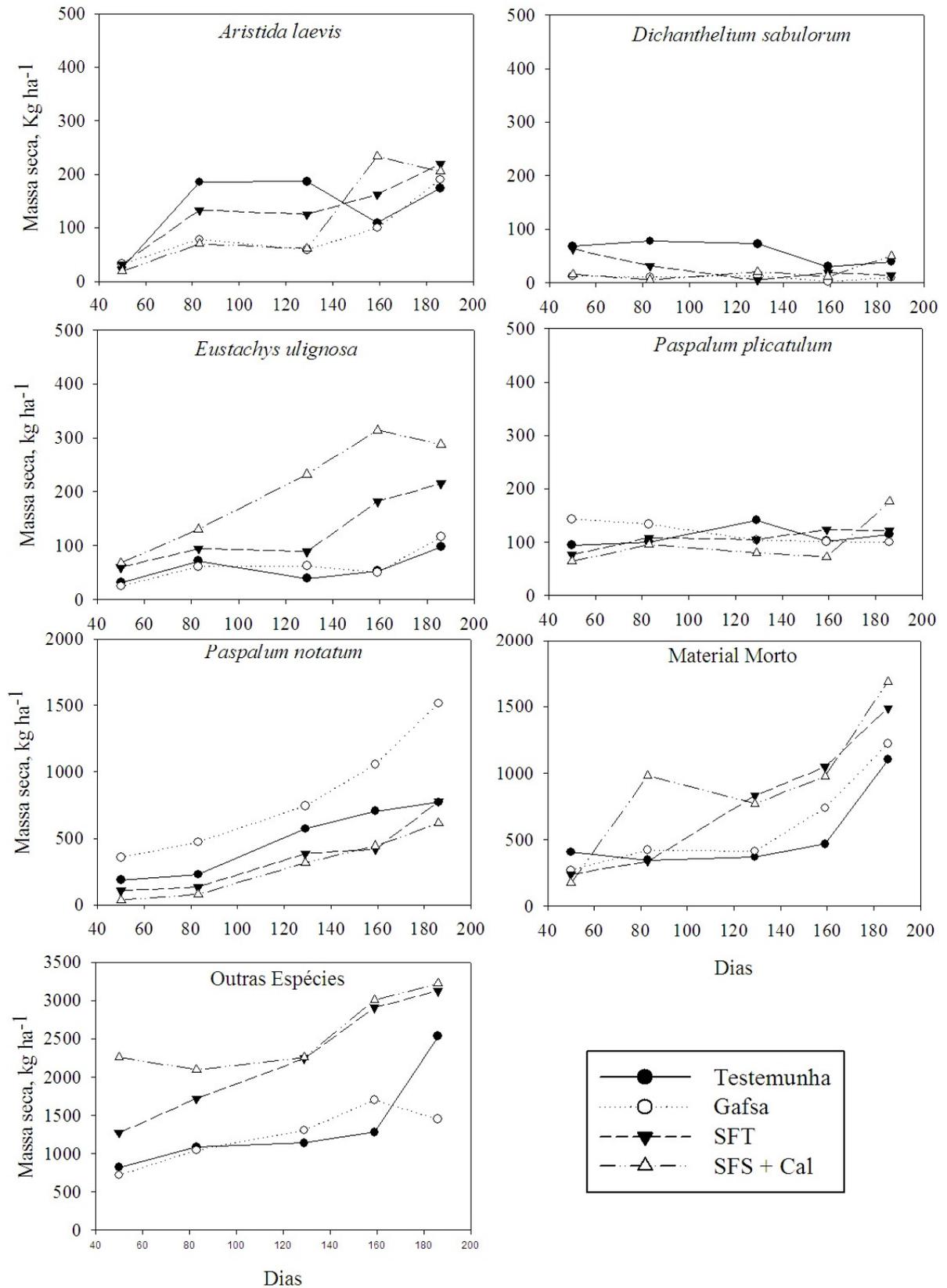


Figura 3 – Massa seca (kg ha<sup>-1</sup>) das espécies e componentes da pastagem natural de Santa Maria em função do período de amostragem em dias.

Tabela 4 – Significância da massa seca e do teor de P e N das espécies e dos componentes da pastagem de Candiota e Santa Maria em função das fontes de fósforo (F) e do período (P).

Experimento/Espécie	Massa seca			P no tecido			N no tecido		
	F	P	F x P	F	P	F x P	F	P	F x P
Experimento I									
Outras Espécies	ns	**	*	**	**	*	ns	**	ns
<i>Axonopus affinis</i>	ns	**	ns	ns	**	ns	ns	**	ns
<i>Sporobolus indicus</i>	ns	**	ns	*	**	*	ns	**	ns
Material Morto	ns	**	ns	*	*	ns	ns	**	ns
Experimento II									
Outras Espécies	*	**	ns	**	**	ns	*	**	**
<i>Paspalum notatum</i>	ns	**	ns	**	**	ns	ns	**	ns
<i>Axonopus affinis</i>	ns	**	ns	**	**	ns	*	**	**
<i>Axonopus argentinus</i>	ns	ns	ns	**	**	**	ns	**	**
<i>Mnesithea selloana</i>	ns	*	ns	**	**	ns	**	**	**
<i>Bothriochloa laguroides</i>	ns	ns	ns	*	**	**	**	**	**
<i>Sporobolus indicus</i>	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	**	ns
Material Morto	ns	**	ns	*	**	*	*	**	**
Experimento III									
Outras Espécies	*	**	ns	**	**	**	ns	**	ns
<i>Paspalum notatum</i>	ns	**	ns	**	**	ns	ns	**	*
<i>Paspalum plicatulum</i>	ns	*	ns	**	**	ns	ns	**	ns
<i>Aristida laevis</i>	ns	**	ns	**	**	*	ns	**	**
<i>Dichanthelium sabulorum</i>	ns	ns	ns	**	*	ns	ns	**	**
<i>Eustachys uliginosa</i>	*	ns	ns	**	**	**	ns	**	**
Material Morto	ns	**	ns	ns	*	ns	**	**	**

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

### 7.3.5 Diluição do P e N no tecido das espécies nativas das pastagens naturais

Os teores de P e N no tecido das espécies para as quais a massa seca não aumentou durante o período de avaliação, tanto em Santa Maria quanto em Candiota, não foram ajustadas às curvas de diluição. O P e N no tecido destas plantas foram variáveis ao longo dos períodos.

Em Santa Maria, houve diluição do teor de P no tecido com o aumento da massa seca aérea nas espécies *Aristida laevis*, *Paspalum notatum* e o componente “Outras Espécies” (Figura 6). O teor de P no tecido da gramínea *Paspalum notatum* e do componente “Outras Espécies” aumentou com a aplicação do hiperfósforo de Gafsa em relação à testemunha, mas foi inferior ao encontrado com a aplicação dos superfosfatos. O teor de P no tecido na *Aristida laevis* apresentou interação entre as fontes de fósforo utilizadas e os períodos de avaliação

(Tabela 5), mas a adição das fontes solúveis aumentou em pequena proporção o teor de P no tecido desta espécie.

Em Santa Maria, não foram encontradas diferenças significativas no N do tecido com a aplicação das fontes de fosfatos. O N do tecido diluiu com o aumento da massa para o componente Outras Espécies e para as espécies *Paspalum notatum* e *Aristida laevis* (Figura 7).

O teor de P das espécies *Paspalum notatum* e *Aristida laevis* e do componente “Outras Espécies” foi comparado ao nível crítico de P proposto por Duru & Ducrocq (1997) (Figura 8). Para as duas espécies nativas o teor de P não se aproximou do teor crítico de P estimado pelo modelo, mas o componente “Outras Espécies” com a aplicação de fosfatos solúveis o teor de P se assemelhou com o teor ideal estimado pelo modelo.

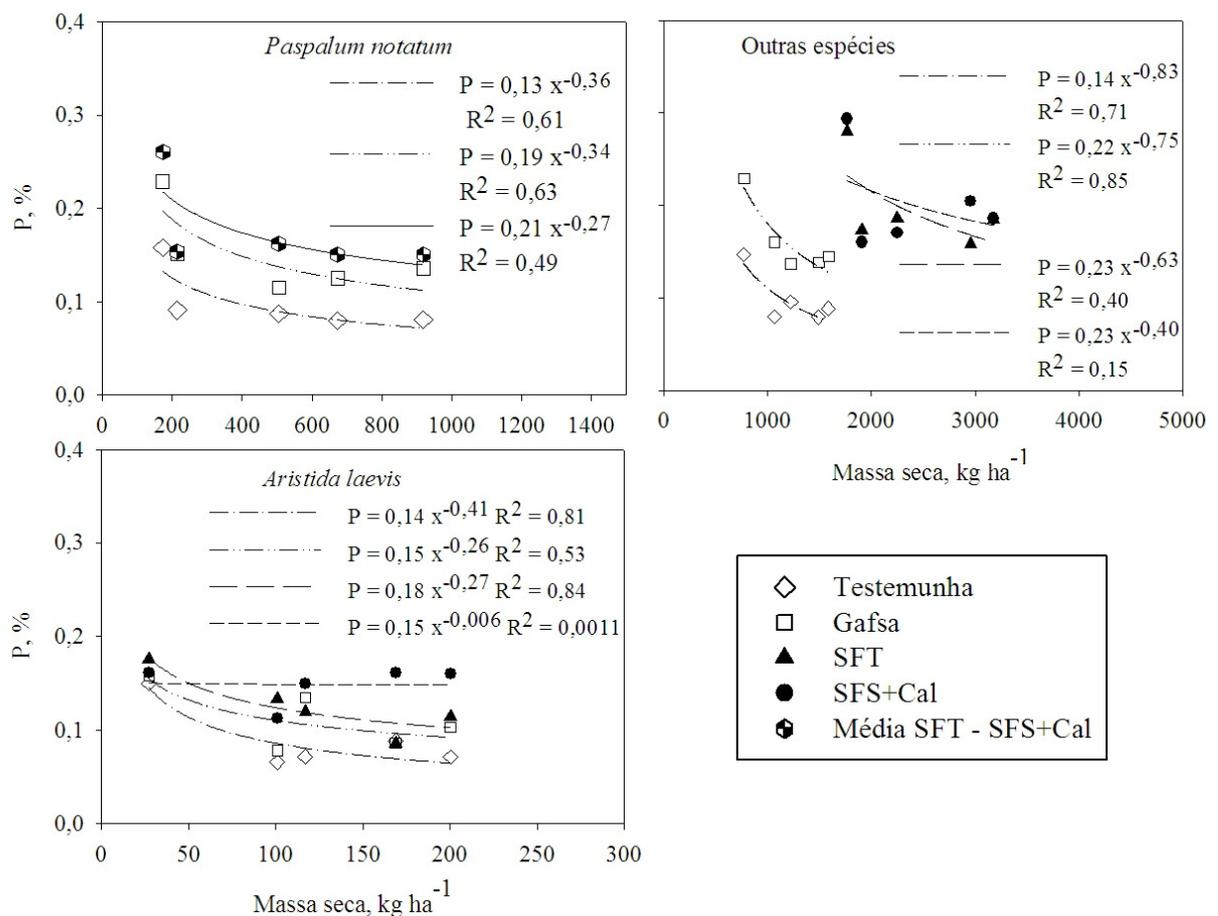


Figura 6 – Fósforo do tecido das espécies da pastagem natural de Santa Maria em função da massa seca da biomassa aérea.

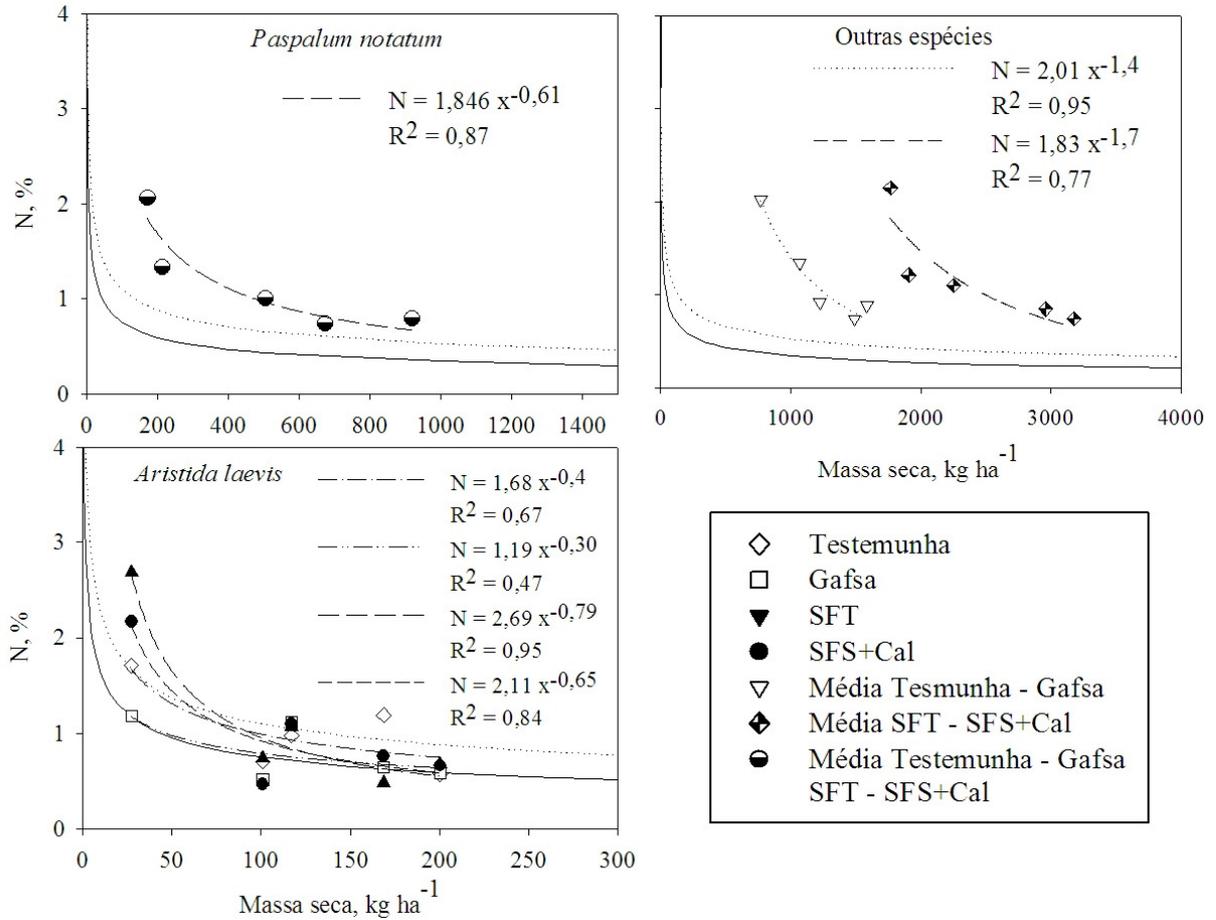


Figura 7 – Nitrogênio do tecido das espécies da pastagem natural de Santa Maria em função da contribuição de massa seca e em comparação com o N crítico espécies de plantas C3 e C4 [( $N = 4,8 * (MS^{-0,32})$ ) e ( $N = 3,6 * (MS^{-0,34})$ ) LEMAIRE E GASTAL, (1984) visto em BÉLENGER & GASTAL, (1999)].

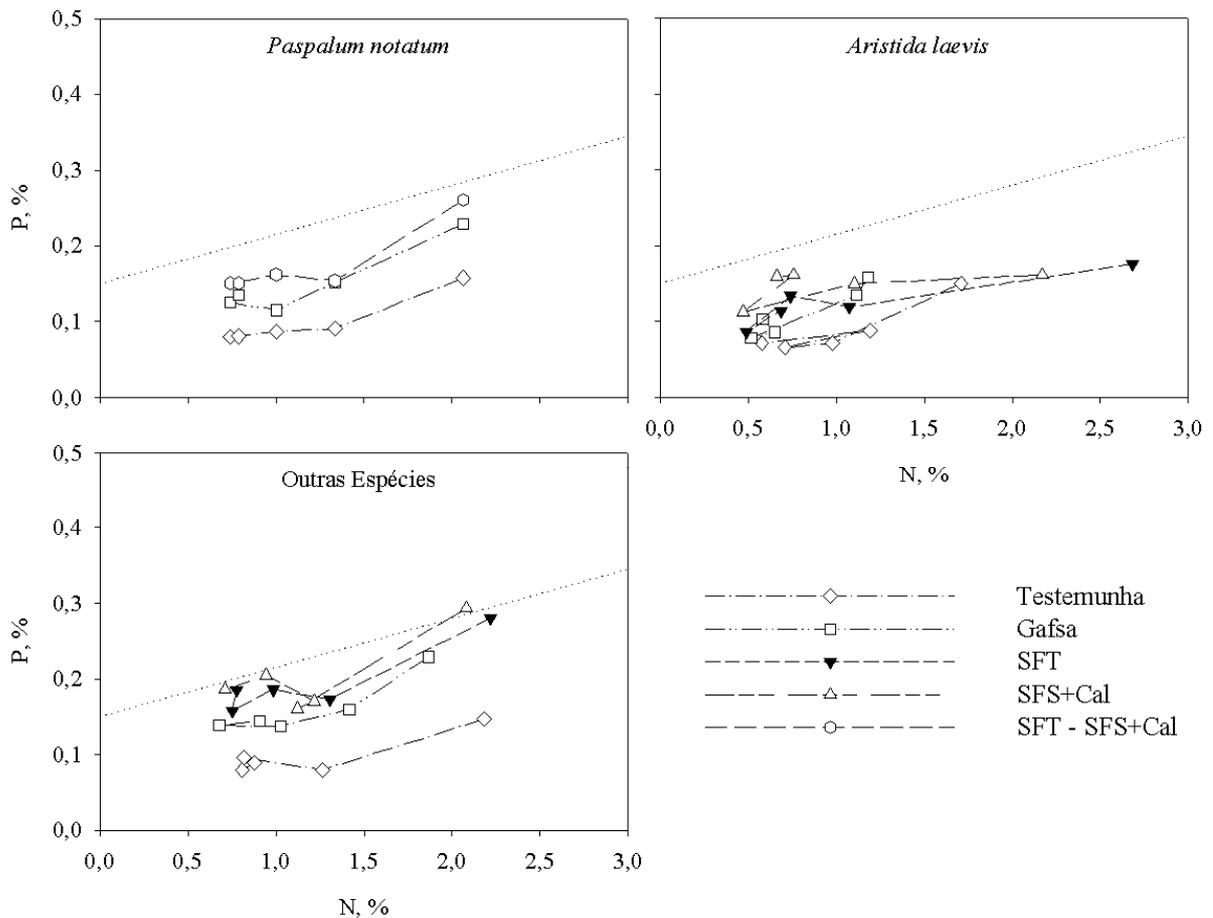


Figura 8 – Relação fósforo nitrogênio para as espécies da pastagem de Santa Maria em comparação com o teor P crítico proposto por DURU & DUCROQC, 1997 ( $\%P = 0,15 + 0,065 * \%N$  (DURU et al., 1997)).

## 7.4 Discussão

### 7.4.1 Comparação do teor de P no tecido entre as fontes de fosfato e as espécies nativas

O maior teor de P no tecido das pastagens com a adição de fosfato solúvel ocorreu devido ao aumento da absorção de P em virtude da maior disponibilidade de P no solo. Nos experimentos de Candiota a aplicação recente de hiperfosfato de Gafsa não elevou o P disponível do solo e por isso não houve aumento no P do tecido das pastagens nesse tratamento. Já em Santa Maria, devido ao histórico de adições de hiperfosfato de Gafsa, foi observado aumento da disponibilidade de P no solo e, conseqüentemente, maior teor de P no tecido das espécies em relação a testemunha.

A gramínea nativa *Aristida laevis* é de hábito de crescimento cespitoso com formação de touceira, com alto teor de matéria seca e baixa área foliar específica (CARVALHO et al.,

2007). Isso implica em grande tempo de vida foliar e, conseqüentemente, lenta taxa de crescimento relativo, o que sugere que esta espécie tenha menor exigência nutricional e menor capacidade de absorção de nutrientes (CHAPIN, 1980). Essas duas características justificam o menor teor de P no tecido e menor aumento de P no tecido com a adição de fosfato comparativamente às demais espécies e explicam ainda a ocorrência e grande adaptabilidade desta espécie em solos de baixa fertilidade.

O maior teor de P no tecido das espécies *Axonopus affinis* de Candiota e *Eustachys uliginosa* e *Dichantelium sabulorum* de Santa Maria em relação às demais espécies pode ser devido à maior capacidade de absorção de P dessas plantas. As espécies *Axonopus affinis* e *Dichantelium sabulorum* apresentam elevada área foliar específica e baixo teor de matéria seca (QUADROS et al., 2009), o que resulta em menor tempo de duração de vida de folha e alta taxa de crescimento (DURU et al., 2008) que são indicativos da alta capacidade de absorção de nutrientes (AERST & CHAPIN, 2000).

#### 7.4.2 Biomassa aérea e diluição do P e N no tecido das espécies nativas

Os efeitos dos fertilizantes sobre a matéria seca acima do solo em pastagens perenes são complexos (DURU & DUCROCQ, 1997), devido à competição entre as espécies de plantas pelos recursos edáficos em ambientes de alta diversidade. Plantas em solos com maior disponibilidade de P gastam menor energia na captura deste recurso e deslocam os fotossintatos assimilados para o crescimento aéreo, para poder competir com as demais espécies pela luz (CHAPIN, 1980; SILVA et al. 2001). O aumento da massa seca total da pastagem com a adição de fertilizantes já foi evidenciado por Gatiboni et al. (2000) em pastagem natural do RS. Porém, os resultados obtidos na pastagem de Santa Maria demonstram que, com exceção do componente “Outras Espécies” e a gramínea *Eustachys uliginosa*, as demais espécies nativas individualmente não aumentaram a massa seca com o aumento da disponibilidade do P proporcionado pela adição das fontes de fosfatos. Dessa forma, o aumento da massa seca obtida com a aplicação de fosfatos solúveis em Santa Maria (ver Artigo I) é resultado do aumento de massa das espécies de crescimento rápido como *Eustachys uliginosa*, e espécies como o azevém e *Paspalum urvillei*, que foram contabilizadas no componente “Outras Espécies”. Assim, pode se estabelecer a hipótese que, de maneira geral, a taxa de crescimento relativo da vegetação nativa é adaptada ao ritmo de disponibilização de P dos solos em que se adaptaram.

A diluição do P e N com o acúmulo de matéria seca em uma comunidade de plantas é consequência de dois fenômenos. Na planta individual, o decréscimo pode ser devido ao fato de que à medida que a planta cresce, a proporção de material estrutural e de reservas que contêm menor concentração de N e P aumenta na população, esse decréscimo pode ser resultado da não uniformidade da distribuição dos nutrientes entre folhas, por causa do nível de irradiação recebida no interior do dossel (SILVA et al., 2001). Teoricamente as plantas individuais podem ser divididas em compartimento metabólico, representado pelo N e P associado à fotossíntese e a atividade meristemática; e compartimento estrutural, que consiste de nutrientes em estoque e na estrutura da planta. Admitindo-se que o conteúdo de nutrientes no compartimento metabólico é muito maior do que no compartimento estrutural, a evolução do conteúdo de nutrientes, principalmente N, da planta é determinada pela evolução do tamanho relativo desses dois compartimentos (LEMAIRE et al., 2008). Quando da fertilização, as plantas diminuem a relação folha caule na competição pela luz (CAVIEÁRE & DURU, 2001) e assim, há maior crescimento das partes estruturais da planta, resultando na diluição de nutrientes.

Nos experimentos de Candiota, devido à restrição hídrica, as plantas não apresentaram crescimento. Portanto, o compartimento estrutural não aumentou em relação ao compartimento metabólico explicando a manutenção dos teores de P e N no tecido das espécies nativas.

Em Santa Maria, o crescimento da gramínea *Paspalum plicatulum* não foi detectado pela metodologia utilizada e por isso não foi ajustado ao modelo matemático de diluição. Já para a espécie *Dichantelium sabulorum*, não se ajustou o modelo de diluição porque não houve aumento da sua massa seca. Isso pode ter ocorrido devido ao seu porte baixo e rápida renovação de tecidos sem acúmulo de material estrutural, mantendo constante o teor de nutrientes nos seus tecidos ao longo dos períodos de avaliação.

O modelo de diluição do N pode ser facilmente adaptado para outros nutrientes (SALETTE et al., 1989). Entretanto, as curvas de diluição foram criadas para plantas individuais e sob máximo crescimento. Por isso, em razão das condições experimentais do presente trabalho, onde as espécies nativas se encontravam em competição por água, luz e nutrientes, não é possível assumir nenhuma das equações ajustadas como referência para a diluição de N e P. Apesar disso, os resultados obtidos no presente trabalho sugerem que os efeitos de diluição são mais acentuados sobre o N do que sobre o P. Dentre as espécies avaliadas, a gramínea *Aristida laevis*, foi a que apresentou mais acentuada diluição de N. Isso pode ter ocorrido por esta espécie foliar ser uma gramínea cespitosa ereta com elevada taxa de

expansão (MACHADO, 2009) e com maior relação folha colmo do que as demais, e maior acúmulo de material estrutural foi capaz de diluir o N de forma mais expressiva.

O modelo de diluição do P depende da disponibilidade de N, pois existe interação entre a quantidade de N aplicado e a concentração de P na pastagem (DURU & THELIER-HUCHE, 1997 visto em SILVA et al., 2001). Esses autores propõem um modelo representado pela equação  $\%P = 0,24(\%N)^{0,64}$ . Nesse sentido, Duru & Ducrocq (1997) trabalhando com pastagens perenes identificaram que a adição de N em condições de restrição de P aumenta a diluição do P na biomassa aérea. Já a adição de fosfatos, com ou sem adição de N, aumenta o teor de N nas plantas. Porém, os nossos resultados demonstram que a maior disponibilidade de P pela aplicação das fontes de fosfato não aumentou o teor de N na parte aérea das plantas. Isso pode ter ocorrido por três motivos. Primeiro, porque o crescimento das plantas foi pequeno mantendo as altas concentrações de P e N na parte aérea. Segundo, porque o N não foi limitante ao crescimento, ficando inclusive acima do nível crítico estimado pelo modelo de Gastal & Lemaire (1997) (visto em BELENGER & GASTAL, 1999), tanto para as plantas C3, quanto para as C4 (Figura 7). Terceiro, porque a comunidade de microrganismos fixadores assimióticos de N do solo não foi limitada pela baixa disponibilidade de P e, conseqüentemente, o N fixado por estes microrganismos e mineralizados após sua morte e lise das células juntamente com a mineralização da matéria orgânica do solo e o N aplicado no início do experimento, podem ter fornecido quantidades aproximadas as demanda das plantas nativas. Convém lembrar que a diluição do N na planta não é estática, e por ser um fenômeno biológico apresenta uma dinâmica. O modelo de diluição de N apresenta algumas restrições quanto ao uso: primeiro que ele foi desenvolvido para culturas isoladas e segundo é que ele só poderia ser usado quando a massa seca das espécies atingisse massa maior ou igual a 1,0 Mg ha<sup>-1</sup>. Nesse sentido, Hernández & Aguilar (2007) sugerem que a diluição do N em forrageiras através de modelos matemáticos que considerem e incluam o tempo devem ser modelos mecanísticos dinâmicos.

A diluição do teor de P no tecido das espécies *Paspalum notatum* e *Aristida laevis* em Santa Maria foi semelhantes entre os tratamentos, mas em níveis distintos, sendo mais elevado quando da adição dos superfosfatos. Isso ocorreu devido à maior disponibilidade de P no solo com a aplicação de fosfatos solúveis, caracterizando um “consumo de luxo” (MARSCHNER, 1995), onde a planta absorve e acumula em seus tecidos, quantidades de nutriente maiores que a sua necessidade. Além disso, a diluição do teor de P no tecido dessas plantas pode ter sido favorecida pelo decréscimo no teor de P disponível no solo com o

período de avaliação (Tabela 3), pois a energia de ligação do fosfato pela matriz mineral do solo aumenta com o tempo de reação, diminuindo a sua biodisponibilidade (PARFITT, 1989).

A ferramenta diagnóstica utilizando a relação linear entre o P e N no tecido das plantas proposta por Duru & Ducrocq (1997) (Figura 8) demonstrou que em Santa Maria, para as espécies *Paspalum notatum* e *Aristida laevis* o teor de P no tecido ainda está abaixo do necessário para o máximo crescimento. Isto pode evidenciar que o nível crítico para as espécies nativas dos campos sulinos é inferior ao do modelo utilizado. Por outro lado, isto ocorreu por que o teor de P disponível por RTA no solo está abaixo do nível crítico de 20 mg kg<sup>-1</sup> proposto para plantas cultivadas pela CQFS-RS-SC (2004). Já o componente “Outras Espécies” com aplicação de fosfatos solúveis se aproximou do nível ótimo de P no tecido, justificando a resposta em massa seca deste componente com a adição dos fertilizantes. Essa interpretação só pôde ser realizada com o uso da ferramenta de análise de tecido, demonstrando a importância de estudos das relações de nutrientes nas plantas com os níveis de nutriente no solo.

## 7.5 Conclusões

1. O teor de P no tecido é variável entre as gramíneas nativas e dependente da sua taxa de crescimento, aumentando com a aplicação de superfosfatos.
2. *Aristida laevis* é uma espécie com menor teor de P no tecido, indicando ser altamente adaptada a solos pobres em P disponível.
3. A aplicação de fosfatos solúveis ou insolúveis não altera a diluição de N no tecido das gramíneas nativas em pastagens naturais.
4. A diluição de P no tecido das gramíneas nativas ocorre com o aumento da massa seca.

## 7.6 Referências

AERTS, R.; CHAPIN, S. F. III. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns. **Advances in ecological research**, v. 30, p. 1-67, 2000.

BÉLANGER G.; RICHARDS, J. E. Relationship between P and N concentrations in timothy. **Canadian Journal of plant science**, v. -, p. 65-70, 1998.

BELENGER, G.; GASTAL, F. Nitrogen utilization by forage grasses. **Canadian Journal of Plant Science**, v. -, p. 11-20, 1999.

BENNETT, L. T.; ADAMS, M. A. Response of a perennial grassland to nitrogen and phosphorus additions in sub-tropical, semi-arid. **Australia Journal of Arid Environments**, v. 48: p. 289-308, 2001.

BOLDRINI, I. L. A flora dos campos do Rio Grande do Sul. In: Pillar V. P. de; Müller S. C.; Castilhos Z. M. S.; Jacques A. V. A. (Ed.). **Campos Sulinos “conservação e uso sustentável da biodiversidade”**. Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente, p. 63-77, 2009..

CARVALHO et al. Oferta de forragem como condicionadora da estrutura do pasto e do desempenho animal. In. DALL’AGNOL, M.; NABINGER, C.; SANTANA, D. M.; SANTOS, R. J. (Eds). **Sustentabilidade produtiva do Bioma Pampa**. Porto Alegre, p. 23-60, 2007.

CAVIEÁRE, I.; DURU, M. The effect of N and P fertilizer application and botanical composition on the leaf/stem ratio patterns in spring in Pyrenean meadows. **Grass and Forage Science**, v. 54, p. 255-266, 2001.

CHAPIN, F. S. III. The mineral nutrition of wild plants. **Annual review of ecology and systematic**, v. 11 p. 233-260, 1980.

DURU, M.; THELIER-HUCHE, L. N and P-K status of herbage: use for diagnosis of grasslands. In: LES COLLOQUES, INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE, 82., 1995, Poitiers. Diagnostic procedures for crop N management. Paris : INRA, p. 125-137, 1997.

DURU, M., LEMAIRE, G.; CRUZ, P. Grasslands. In G. Lemaire, ed. Diagnosis of the nitrogen status in crops. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany. p. 59–72, 1997.

DURU, M.; DUCROCQ, H. A nitrogen and phosphorus herbage nutrient index as a tool for assessing the effect of N and P supply on the dry matter yield of permanent pastures. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 47, p. 59-69, 1997.

DURU, M. et al. Do plant functional types based on leaf dry matter content allow characterizing native grass species and grasslands for herbage growth pattern? **Plant Ecology**, DOI 10.1007/s11258-008-9516-9, 2008.

GASTAL, F.; LEMAIRE, G. Nutrition azotée et croissance des peuplements végétaux cultivés. In: Morot-Gaudry J. F., ed. Assimilation de l’azote chez les plantes: aspects physiologiques, biochimiques et moléculaires. INRA-Editions, Collections ‘Mieux Comprendre’, p. 355–367, 1997.

GATIBONI, L.C. et al. Influência da adubação fosfatada e da introdução de espécies forrageiras de inverno na oferta de forragem de pastagem natural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1663-1668, 2000.

GATIBONI, L.C. et al. Superphosphate and rock phosphates as P-source for grass-clover pasture on a limed acid soil of Southern Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 42, p. 1-12, 2003.

HERNÁNDEZ, J. J.; AGUILAR, E. D. B. Las curvas de diluición de la proteína como alternativa para la evolucion de pastos tropicales. **Universidad y ciência**, v. 23, p. 81-90, 2007.

LAJTHA, K.; HARRISON, A. F. Strategies of phosphorus acquisition and conservation by plant species and communities. In: TIESSEN, H. (Ed). **Phosphorus in the global environmental: transfers, cycles and management**. Ed. 1. Chichester, U.K: Wiley, p. 139-147, 1995.

LEMAIRE G, SALETTE J. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de pre`levement d'azote pour um peuplement de gramine`es fourrage`res. I. Etude de l'effet du milieu. **Agronomie**, v. 4, p. 423-430, 1984.

LEMAIRE A. G.; JEUFFROY, M. B.; GASTAL, F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage Theory and practices for crop N management. **European Journal Agronomy**, v. 28, p. 614-624, 2008.

LEMAIRE, G.; GASTAL, F. N uptake and distribution in plant canopies. In. G. Lemaire, ed. **Diagnosis of the nitrogen status in crops**. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany. p. 3-43, 1997.

MACHADO, J. M. **Morfogênese de gramíneas nativas sob níveis de adubação nitrogenada**. 2010. 78 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Santa Maria, 2010.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. New York: Academic Press, 1995. 889p.

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

NASSEY, H. Phosphate absorption by plants from habitats of different phosphate status. II Absorption and incorporation of phosphate by intact plants. **New Phytologist**, v. 69, p. 197-203, 1970.

OLIVEIRA, L. B. et al. Fósforo microbiano em solos sob pastagem natural afetado por queima e pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1509-1515, 2011.

PARFITT, R. L. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **Journal of Soil Science**, v. 40, p. 359-369, 1989.

QUADROS et al. A abordagem funcional da ecologia campestre como instrumento de pesquisa e apropriação do conhecimento pelos produtores rurais. In: Pillar V. P. de; Müller S. C.; Castilhos Z. M. S.; Jacques A. V. A. (Ed.). **Campos Sulinos “conservação e uso sustentável da biodiversidade”**. Brasília-DF: Ministério do Meio Ambiente, p. 206-213, 2009.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. & CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 589-597, 2000.

SALETTE, J.; HUCHÉ, L.; LEMAIRE, G. Modelling nitrogen and mineral nutrient uptake by a grass sward: short term studies during the sward growth. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 16., 1989, Nice. Proceedings... Nice : **The French Grassland Society**, p. 61-62, 1989.

SILVA et al. Produção e partição da biomassa de *Desmodium incanum* em resposta à aplicação de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 541-548, 2001.

TEDESCO, M.J et al. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou a complexibilidade dos ecossistemas campestres e que os efeitos da adubação fosfatada, calagem e introdução de espécies têm repercussão sob o “equilíbrio” em que o sistema natural se encontrava antes das adições de fertilizantes. No solo, a maior parte do fósforo aplicado via fertilizantes, em doses racionais ao longo dos anos, não aumentou os níveis de fósforo a ponto de promover grandes alterações na dinâmica de suas formas. Porém, foi evidenciado que as formas inorgânicas tornam-se mais importante na manutenção da disponibilidade em detrimento às formas orgânicas. Estas últimas, por consequência das mudanças na quantidade de material vegetal produzido começam a mostrar evidências de aumento. Todas essas alterações foram mais evidentes com a adição dos superfosfatos porque esses apresentam maior solubilidade comparativamente aos fosfatos naturais. Dessa maneira, quando se analisou os teores de nutrientes nos tecidos das plantas foi observado que o extrator resina é muito representativo do que a planta tem acumulado de P em seu tecido, principalmente quando há aumento da disponibilidade. Essa metodologia foi capaz de detectar as elevações da disponibilidade com a aplicação do hiperfosfato de Gafsa, os quais não causaram aumentos na massa seca da parte aérea em relação à testemunha. Além disso, a aplicação do hiperfosfato de Gafsa não promoveu mudança na contribuição das principais espécies da pastagem, isso foi fundamental para a produção, por exemplo, do *Paspalum notatum*. Já a adição de fosfatos solúveis promoveu alterações na contribuição das principais espécies da pastagem e isso foi o principal fator de aumento da matéria seca principalmente quando esses eram associados à calagem. Nesses tratamentos, a espécie *Eustachys uliginosa*, apresentou resposta em matéria seca e alto teor de P no tecido, demonstrando que embora seja uma espécie nativa é relativamente mais exigente em fertilidade que as demais. Dessa forma, pode-se notar que em ambientes complexos onde há a interação de várias espécies, a simples utilização de fertilizantes fosfatados não garante o aumento na massa seca produzida. O importante para o sucesso da utilização de fosfatos é o diagnóstico da interação entre os teores de nutrientes no solo com as espécies ocorrentes nas pastagens. De porte dessas informações, a utilização de fosfatos pode ser maximizada.