

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Área de Concentração: Solos



Dissertação

**EFEITO DA ADUBAÇÃO COM FÓSFORO E POTÁSSIO NA
TOXIDEZ DE FERRO EM ARROZ IRRIGADO**

Marla de Oliveira Farias

Pelotas, 2007

MARLA DE OLIVEIRA FARIAS

**EFEITO DA ADUBAÇÃO COM FÓSFORO E POTÁSSIO NA TOXIDEZ
DE FERRO EM ARROZ IRRIGADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área do conhecimento: Solos).

Orientador: Professor Dr. Ledemar Carlos Vahl

Co-orientador: Professor Dr. Rogério Oliveira de Sousa

Pelotas, 2007

Dados de catalogação na fonte:

(Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744)

F224e Farias, Marla de Oliveira

Efeito da adubação com fósforo e potássio na
toxidez de ferro em arroz irrigado / Marla de
Oliveira Farias. - Pelotas, 2007.

43f. : il.

Dissertação (Mestrado em Solos) –
Programa de Pós-Graduação em Agronomia.
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel.
Universidade Federal de Pelotas. - Pelotas, 2007,
Ledemar Carlos Vahl, Orientador; co-orientador
Rogério Oliveira de Sousa.

Banca examinadora

Prof. Dr. Ledemar Carlos Vahl (Presidente)
Orientador – PPGA – Solos

Prof. Dr. Leandro Souza da Silva
UFSM – Departamento de Solos

Prof^a. Dr^a. Rosa Maria Vargas Castilhos
UFPel – Departamento de Solos

Dedico:

Ao Johnny pelo simples fato de ter feito parte da
minha vida e ter me proporcionado tanta felicidade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, Pai eterno, por me iluminar e permitir alcançar mais esta vitória.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Dr. Ledemar Carlos Vahl pela orientação, confiança, amizade e contribuição na minha formação profissional.

Ao professor Dr. Rogério Oliveira de Sousa pela amizade e incentivo.

Aos professores Dr. Leandro Souza da Silva, Dra. Rosa Maria Vargas Castilhos por fazerem parte da banca examinadora.

A todos os professores do Departamento de Solos pela experiência compartilhada.

Aos amigos Magali de A. Fortes, Carla M. da Rosa, Noemi L. dos Santos, Rul Martins e Tiago Zschornack pela amizade e colaboração em várias etapas da realização do trabalho.

Ao colega e amigo José Maria Barbat Parfitt, por todo apoio, força e incentivo.

A todos os colegas do Departamento de Solos pelos momentos de descontração, amizade e troca de experiências, especialmente a Katiúscia F. dos Santos, Dioni B. Bittencourt, Adilson Bamberg e Eduardo Cardoso.

Aos funcionários do Departamento de Solos pela amizade e auxílio técnico, principalmente a Rosângela e Rosane.

Ao meu avô e amigo inesquecível, *in memoriam*, João Francisco Gervini de Oliveira, pela confiança e toda felicidade que me proporcionou.

Aos meus pais Jorge Teixeira Farias e Luci Helena de Oliveira Farias, por todo apoio, amor e incentivo durante a realização do curso.

Ao meu esposo Eder Gomes da Silva, pelo amor, compreensão, paciência e companheirismo.

A toda minha família e amigos, pela força e carinho.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para que este trabalho se tornasse possível.

A Deus, novamente, por todas estas pessoas existirem e fazerem parte da minha vida.

Resumo

FARIAS, Marla de Oliveira. **Efeito da adubação com fósforo e potássio na toxidez de ferro em arroz irrigado.** 2007. 43f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

A toxidez de ferro pode causar reduções consideráveis na produtividade do arroz, dependendo da intensidade dos sintomas e da área afetada na lavoura. É necessário identificar os fatores que determinam a ocorrência desta desordem nutricional, bem como, o possível envolvimento de outros nutrientes, como o fósforo e o potássio, na sua intensidade. Os objetivos deste trabalho foram: (1) determinar o efeito da adubação com fósforo e potássio na toxidez de ferro, (2) avaliar o desenvolvimento dos sintomas na parte aérea das plantas (cultivar BR-IRGA 409) e (3) testar a hipótese de que os sintomas ocorrem quando a concentração relativa do Fe^{2+} , em relação à soma das concentrações dos cátions divalentes (Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} e Mg^{2+}) na solução for muito alta. Para tal, foi conduzido, em casa de vegetação, um experimento fatorial 5×2 (cinco solos e dois níveis de adubação com fósforo e potássio), em delineamento completamente casualizado, com duas repetições. Os níveis da adubação foram zero e 100 mg dm^{-3} de P e K. Os indicadores avaliados foram sintomas visuais na parte aérea das plantas, produção de matéria seca da parte aérea, teores de macro e micronutrientes no tecido e concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} e Mn^{2+} na solução do solo. Os dados obtidos foram submetidos à Análise de Variância (teste de Duncan) a 5% de probabilidade. A adubação com fósforo e potássio promoveu acentuado aumento na produção de matéria seca das plantas em todos os solos, porém não houve efeito desta adubação nos teores dos cátions divalentes no tecido, nem nas concentrações dos mesmos na solução do solo. O modelo da relação entre a fração molar no tecido e a fração molar na solução do solo depende do cátion: o Ca, o Mg e o Mn mostraram tendência à saturação. A absorção do Fe ficou constante até uma fração molar de 0,4 (acima desta aumentou exponencialmente); em fração molar de Fe de até 0,6 (máxima obtida no experimento) as plantas não apresentaram sintomas de toxidez de ferro.

Palavras-chave: toxidez de ferro, *Oryza sativa*, cátions divalentes.

Abstract

FARIAS, Marla de Oliveira. **Effect of phosphorus and potassium adubation on the iron toxicity in irrigated rice.** 2007. 43f. Dissertation (Master's)– Post-Graduation Program of in Agronomy, Concentration area: Soils. Federal University of Pelotas, Pelotas – Brazil.

The iron toxicity may cause considerable reduction in rice productivity, depending on the intensity of symptoms and on the affected farming area. It is necessary to identify the factors that determine the occurrence of this nutritional disorder, as well as, the possible involvement of other nutrients, such as phosphorus and potassium, in its intensity. The objectives of this work were: (1) to determine the effect of phosphorus and potassium adubation on the iron toxicity; (2) to evaluate the development of the symptoms in the aerial part of the plants (BR-IRGA 409 cultivar) and (3) to test whether the symptoms occur when the relative concentration of Fe^{2+} , in relation to the sum of the concentrations of divalent cations (Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , and Mg^{2+}) in the solution is very high. Hence, in green house, a factorial experiment 5x2 (five soils and two adubation levels with phosphorus and potassium), completely randomized design, with two repetitions, was conducted. The adubation levels were zero and 100 mg dm^{-3} of P and K. The evaluated indicators were visual symptoms of the aerial part of the plants, production of dry matter, content of macro and micronutrients in the tissue of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} and Mn^{2+} in the soil solution. The statistical analysis were carried using Analysis of Variance (Duncan test) at 5% probability. The phosphorus and potassium adubation promoted accented increase in the production of dry matter of the plants in all soils, however there was no effect of this adubation neither in the contents of the divalent cations in the tissue, nor in the concentrations of those in the solution. The model of the relation between the molar fraction in the tissue and the molar fraction in the soil solution depended on the cation: Ca, Mg and Mn which showed tendency for saturation. The absorption of Fe remained constant up to a molar fraction of 0,4 (above that it increased exponentially). In molar fraction of Fe up to 0,6 (maximum value obtained in the experiment) the plants did not show symptoms of iron toxicity.

Keywords: iron toxicity; *Oryza sativa*; divalent cations.

Lista de Figuras

Figura 1	Relação dos teores absolutos dos cátions divalentes no tecido com as concentrações absolutas na solução do solo.....	25
Figura 2	Relação dos teores absolutos dos cátions divalentes no tecido com as concentrações relativas na solução do solo.....	27
Figura 3	Relação dos teores relativos dos cátions divalentes no tecido com as concentrações relativas na solução do solo.....	29

Lista de Tabelas

Tabela 1	Classificação dos solos utilizados no experimento.....	17
Tabela 2	Caracterização química dos solos utilizados no experimento antes do alagamento.....	18
Tabela 3	Produção de matéria seca e teores de fósforo e potássio no tecido das plantas de arroz da cultivar BR-IRGA 409, em cinco solos, com e sem adubação PK.....	20
Tabela 4	Teores de cálcio, ferro, magnésio, manganês e Σ Div no tecido de plantas de arroz da cultivar BR-IRGA 409, em cinco solos, com e sem adubação PK.....	22
Tabela 5	Concentração dos cátions e o somatório dos cátions divalentes na solução do solo. Valores médios coletados aos 35 e 48 dias de alagamento.....	23
Tabela 6	Frações molares dos divalentes (XCa, XFe, XMg e XMn) na solução do solo. Valores médios coletados aos 35 e 48 dias de alagamento.....	26
Tabela 7	Valores médios das frações molares dos divalentes (XCa, XFe, XMg e XMn) no tecido.....	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5 CONCLUSÕES.....	31
6 REFERÊNCIAS	32
7 APÊNDICES	36

1 INTRODUÇÃO

O arroz é uma das culturas mais importantes do Brasil, sendo cultivado em praticamente todos os Estados e consumido por todas as classes sociais. É uma cultura extremamente versátil, que se adapta a diferentes condições de solo e clima, tendo como maior produtor nacional o Estado do Rio Grande do Sul, que participa com 50% da produção nacional.

O Rio Grande do Sul caracteriza-se pelo sistema de cultivo de arroz irrigado por alagamento. O sistema de alagamento altera o equilíbrio dos elementos e compostos no solo, desencadeando uma série de transformações, que fazem com que o comportamento desses solos seja completamente diferente do observado em ambientes bem drenados, tendo como uma das consequências a ocorrência de toxidez de ferro em plantas de arroz.

A toxidez de ferro é manifestada visualmente através de dois principais sintomas denominados de bronzeamento, quando causado por toxidez direta, pela excessiva absorção de ferro pela planta, e alaranjamento, quando associado a toxidez indireta, pela deficiência nutricional generalizada, induzida por altos teores de ferro na solução do solo. Os sintomas podem ocorrer em qualquer estágio de desenvolvimento da planta, porém, o final do perfilhamento e o início da floração são os estádios em que os sintomas aparecem mais nítidos, sendo estes períodos marcados pelo severo retardamento no crescimento das plantas e reduzido rendimento de grãos respectivamente. No entanto, verifica-se que não há um sintoma único que seja típico de toxidez de ferro, havendo diferença na descrição entre diferentes autores, com uma variação de matizes do amarelo ao laranja, com ou sem pontos escuros, havendo concordância entre os diversos autores na

descrição de que estes sintomas começam nas folhas mais velhas e evoluem da ponta para a base do limbo foliar.

A toxidez de ferro foi descrita, pela primeira vez, há mais de quarenta anos na Ásia, e tem sido intensamente estudada em muitos países desde então. Com o surgimento das cultivares modernas, a partir do início dos anos oitenta, sintomas de toxidez de ferro passaram a ser observados com maior frequência no Estado do Rio Grande do Sul. Porém, suas causas e mecanismos fisiológicos não estão completamente elucidados, na qual, diversos mecanismos foram propostos para explicar esse distúrbio nutricional, mas nenhum deles obteve aceitação generalizada.

Determinadas características do solo são frequentemente associadas a toxidez de ferro em arroz irrigado, como baixo pH, altos teores de óxido de ferro e baixa capacidade de troca de cátions (CTC), contudo, é comum observar sintomas de toxidez de ferro em condições diferentes das citadas. A grande variação de características de solo e de planta que estão relacionadas a estes sintomas não permite que seja feita uma previsão da toxidez a partir da análise do solo aerado. Dentro desse contexto, desenvolveu-se o presente trabalho com os objetivos de: determinar o efeito da adubação com fósforo e potássio na toxidez de ferro em diferentes solos, avaliar o desenvolvimento dos sintomas na parte aérea das plantas e mais especificamente, testar a hipótese de que os sintomas ocorrem quando a relação entre o Fe^{2+} e os cátions divalentes (Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} e Mg^{2+}) na solução for muito alta.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A toxidez de ferro é uma desordem nutricional em arroz irrigado por alagamento que diminui acentuadamente o rendimento da cultura (LOPES, 1987; RAMÍREZ et al., 2000).

Embora a maioria dos minerais presentes no solo sejam ricos em ferro, a ocorrência de toxidez deste elemento no arroz só ocorre em regime de alagamento do solo (PONNAMPERUMA, 1972). Em condições anaeróbicas, decorrente do alagamento, ocorre a redução do Fe^{+3} para Fe^{2+} , que é mais solúvel, aumentando a sua disponibilidade às plantas, podendo ocasionar toxidez (SILVEIRA et al., 1987).

Quando o ferro é absorvido em quantidades excessivas pela planta, pode ocorrer “toxidez direta” e, quando alta concentração de Fe^{2+} na solução do solo prejudica a absorção de outros nutrientes pela planta, induzindo suas deficiências, pode ocorrer a “toxidez indireta” de ferro (HOWELER, 1973; VAHL, 1991).

Os sintomas atribuídos à toxidez direta são denominados de bronzeamento (bronzing) e são caracterizados como manchas marrons minúsculas, que se propagam a partir das pontas para a base das folhas, desenvolvendo-se mais rapidamente nas folhas mais velhas do que nas novas, sendo o local onde grande quantidade de ferro é depositada (TANAKA et al., 1966; MENGEL & KIRKBY, 1987). Estas manchas minúsculas, em níveis de ferro no tecido maiores do que 50 mg.kg^{-1} , juntam-se, formando grandes áreas castanho-escuras, com as folhas tornando-se castanho-claras, conforme evidenciado em experimento desenvolvido por Tanaka et al. (1966), com folhas de arroz colocadas em tubos de ensaio, onde a base das folhas com a ponta cortada era submetida a níveis crescentes de FeSO_4 , com pH ajustado em 3,5. Este mesmo autor, em experimento posterior, testou a resistência e a suscetibilidade ao bronzeamento em duas variedades de arroz, submetidas a

níveis crescentes de ferro colocados em soluções de cultura, em dois períodos diferentes (fase vegetativa e fase reprodutiva) e constatou que: o bronzeamento não se desenvolve prontamente durante a fase inicial do crescimento da planta, fato que pode estar relacionado à maior facilidade com que o bronzeamento é induzido em folhas mais velhas; em variedades suscetíveis, os sintomas se desenvolvem quando o teor de ferro na folha excede 300 mg.kg^{-1} , mas em variedades resistentes, com este teor de ferro somente as pontas das folhas tornam-se amareladas e o bronzeamento só é visto se o teor de ferro ultrapassar este valor.

O nível de ferro tóxico para a planta de arroz varia amplamente, de 30 a 2000 mg.kg^{-1} , dependendo do tipo e fertilidade do solo e da cultivar (ISHIZUCA, 1961 e DE & MANDAL, 1957, citados por FAGERIA et al., 1984; VAN BREEMEN & MOORMANN, 1978). Abraham & Pandey (1989), citados por Audebert (2006), ressaltam que os sintomas podem ocorrer em fases de crescimento diferentes, podendo afetar a planta em qualquer fase.

A toxidez indireta é caracterizada por sintomas denominados de alaranjamento. Howeler (1973) descreveu estes sintomas ao observar plantas de arroz na Colômbia, onde após 3-10 semanas de crescimento normal, as pontas das folhas inferiores começam a desenvolver um amarelecimento, evoluindo para a base das folhas; subsequentemente, as folhas superiores são afetadas, e muitas folhas inferiores morrem; em casos severos a cor das folhas se transforma em amarelo escuro a laranja, com muitas estrias castanho-escuras; o florescimento é atrasado e os rendimentos são geralmente baixos; em casos extremos não ocorre o florescimento.

Há altas correlações entre a severidade dos sintomas e o rendimento da cultura, com perdas comuns ao redor de 35-45% (AUDEBERT & SAHRAWAT, 2000) e quando a toxidez ocorre no início do ciclo da planta, o crescimento pode ser afetado tão fortemente que ocorre perda total de rendimento (ABIFARIN, 1988, citado por AUDEBERT, 2006).

Os sintomas da toxidez indireta, também podem ser caracterizados pelo amarelecimento das folhas, conforme empregado por Ottow et al. (1982) na descrição de sintomas semelhantes aos descritos por Howeler (1973), porém, com variação na intensidade da coloração, atribuídas aos diferentes tipos de solos e variedades de arroz. Howeler (1973), por sua vez, interpreta esta variação de cores como sendo uma combinação da toxidez direta e indireta, que produz plantas com

uma gama de intensidade de sintomas de alaranjamento e estrias castanhas nas folhas.

Logo, aparentemente, não há um sintoma que seja típico de toxidez de ferro, pois há variação na descrição feita pelos autores citados, tanto quanto a coloração dos sintomas, que vão do amarelo ao laranja, como a presença ou não de manchas castanhas escuras. Porém, há uma concordância entre ambos no sentido de que os sintomas começam nas folhas mais velhas, evoluindo da ponta para a base do limbo foliar (VAHL, 1991).

Apesar dessa variabilidade nos sintomas, o estabelecimento dos parâmetros que determinam a ocorrência da toxidez de ferro é crucial para o entendimento do problema e, conseqüentemente, para a elaboração de soluções.

No caso do alaranjamento, Howeler (1973) enfatiza que as raízes das plantas são fortemente afetadas e poucas raízes ativas são formadas após o aumento da concentração de ferro, e deste modo, ocorre a formação de uma camada de óxido de ferro nas raízes existentes, diminuindo a absorção de nutrientes, sendo que o aparecimento da doença pode ser devido a uma deficiência generalizada, principalmente de P, K, Ca e Mg, induzida pelo Fe. Este mesmo autor, conduzindo um experimento com plantas de arroz sob vários manejos de água para avaliar a severidade do alaranjamento, constatou que não há relação entre severidade de alaranjamento e teor de ferro nas folhas, porém há relação entre os sintomas e os teores de P, K, Ca e Mg nas folhas, onde as plantas menos afetadas tiveram teores considerados normais, enquanto que as plantas severamente afetadas foram consideradas deficientes nestes elementos, reforçando a idéia de que o alaranjamento não ocorre devido ao excesso de ferro na planta. A toxidez direta de ferro, para este autor, seria resultante da absorção de excesso de ferro, conduzindo aos sintomas de bronzeamento, ocorrendo somente em solos com altas concentrações de ferro em solução e agravado por deficiências de P, K e Mg.

Conforme Ottow (1982), a toxidez de ferro pode ser prevenida por um abastecimento combinado de P, K e Ca, já que com a insuficiência destes elementos, as plantas exudam pelas raízes maiores quantidades de metabólitos de baixo peso molecular que culmina com o desenvolvimento de bactérias anaeróbias, que reduzem os óxidos de ferro, quebrando o mecanismo de exclusão do ferro, resultando em excessiva absorção do elemento pelas raízes. Esta medida está de acordo com Foy (1978) e Yamauchi & Peng (1995), segundo os quais a resistência

das plantas está relacionada com a menor translocação de ferro das raízes para a parte aérea; a taxa de translocação é diminuída na presença de maiores concentrações de P, K, Mg e Ca, portanto, a planta de arroz deficiente em P, K, Mg e Ca acumula mais Fe na parte aérea ficando mais suscetível a toxidez do que as que tem maiores concentrações destes elementos.

Do experimento realizado por Ramírez et al. (2002), estudando o efeito da aplicação de fertilizantes com P, K e Zn na toxidez de Fe em variedades tolerantes e suscetíveis de arroz, alguns aspectos são levantados: a aplicação de fertilizante diminuiu a intensidade dos sintomas e aumentou o rendimento de grãos, não superando completamente o efeito da toxicidade; o efeito positivo do fertilizante não pode ser atribuído a um nutriente específico; a intensidade de sintomas não foi relacionada com a concentração de ferro nas folhas, indicando que os sintomas não ocorrem devido a uma concentração alta de ferro nas folhas, mas provavelmente devido a uma acumulação alta nas raízes.

Baseado nos resultados de pesquisa citados, fica clara a idéia do envolvimento de outros elementos, principalmente P, K, Ca e Mg na toxidez de ferro. Além disso, Vahl (1991) levanta a hipótese de inibição competitiva entre estes cátions com o ferro no processo de absorção como um fator importante para explicar o efeito negativo da alta concentração relativa do Fe^{2+} na solução sobre a absorção dos outros nutrientes e a sua própria absorção excessiva, nas mesmas circunstâncias.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Foi conduzido, em casa de vegetação do Departamento de Solos da FAEM/UFPel, um experimento fatorial 5 x 2 (5 solos x 2 níveis de adubação fosfatada e potássica), em delineamento inteiramente casualizado, com 2 repetições. Os solos utilizados são listados na Tabela 1 e os níveis de adubação foram zero e 100 mg dm⁻³ de P e K, denominados doravante de sem PK e com PK. Os solos foram escolhidos pela importância de cada um em função da área cultivada no RS e das diferenças nos atributos químicos, apresentados na Tabela 2. A fonte de P foi o superfosfato triplo e a de K, o cloreto de potássio. As doses de P e de K utilizadas foram baseadas em experimentos anteriores e visaram garantir que não houvessem deficiências destes nutrientes no tratamento com PK. O nitrogênio foi aplicado em dose única de 100 mg dm⁻³ em todos tratamentos, sendo 50 mg dm⁻³ na base e 50 mg dm⁻³ em cobertura aos 35 dias após a emergência das plântulas, na forma de uréia dissolvida em água.

Tabela 1. Solos utilizados no experimento

Solo	Unidade de mapeamento ¹	Classificação ²
1	Pelotas	Planossolo Hidromórfico eutrófico solódico
2	Vacacaí	Planossolo Hidromórfico eutrófico arênico
3	Uruguaiana	Chernossolo Ebânico carbonático típico
4	Formiga	Chernossolo Argilúvico carbonático típico
5	Virgínia	Luvissolo Crômico pálico abruptico

Fonte: ¹ Brasil (1973); ² Streck et al. (2002).

As unidades experimentais foram vasos plásticos com 7 dm³ de solo passado em peneira de 2 mm. Após a aplicação dos fertilizantes, individualmente em cada vaso, foi adicionada água destilada para elevar o teor de umidade para 80% da

capacidade de campo e os vasos foram cobertos com uma tábua e ficaram incubando por um período de 10 dias.

Tabela 2. Caracterização química dos solos utilizados no experimento, antes do alagamento

Solo	pH _{H2O}	Corg ¹ g kg ⁻¹	CTC _{pH7,0} mmol _c kg ⁻¹	Ca ²	Mg ²	K ³ mg kg ⁻¹	P ³
Pelotas	4,5	11,4	32	15,7	5,1	68	12
Vacacaí	4,5	9,9	32	16,6	7,1	63	3
Uruguaiana	4,9	20,0	176	125,1	13,2	88	4
Formiga	6,1	26,4	172	123,6	29,1	235	10
Virgínia	4,6	18,9	71	46,1	40,6	57	2

Métodos:¹ Walkley – Black; ² KCl M; ³ Mehlich – 1.

Após este período foram semeadas 16 sementes de arroz da cultivar BR-IRGA 409 (suscetível a toxidez de ferro) por vaso na profundidade de 2 cm. Aos 10 dias após a emergência das plântulas, foi realizado o desbaste, restando as 4 mais uniformes em cada vaso. Aos 14 dias após a emergência surgiram os primeiros perfilhos e os vasos foram inundados com água destilada, lentamente, para garantir a saturação do solo em toda a profundidade. O nível de água foi mantido com uma lâmina de 3 cm acima da superfície do solo até o final do experimento.

Foram coletadas amostras da solução do solo aos 35 e 48 dias de inundação para a determinação do pH, Eh, condutividade elétrica e concentrações de Ca, Mg, Fe e Mn. O sistema empregado para coletar a solução do solo foi colocado nos vasos antes do alagamento e constituiu-se de um tubo de plástico, com 250 mm de comprimento e diâmetro interno de 3 mm, com 11 furos passantes e distribuídos transversalmente nos primeiros 50 mm de uma das extremidades do tubo, a qual foi devidamente fechada. A região com as perfurações foi firmemente revestida com tecido de poliéster 180T, com seis voltas, fixada com fio de nylon, enrolado em torno de toda a extensão do tecido. Os extratores foram instalados nos vasos de forma pouco inclinada, de maneira que a região perfurada do tubo ficou na profundidade de 7 a 12 cm, aproximadamente no centro do vaso. A solução foi succionada destes tubos através de seringa descartável de 20 mL.

As determinações de pH e Eh da solução do solo foram feitas por meio de eletrodos combinados, conectados a um potenciômetro e previamente instalados em

uma célula eletrométrica construída de modo a impedir o contato da amostra com o O₂ do ar, conforme descrito por Vahl (1991).

Outras amostras de solução de aproximadamente 10 ml foram coletadas e passadas em filtro milipor 0,45 µ e colocados em frascos de vidro com 1ml de HCl 1,0 mol L⁻¹, colocado previamente. A diluição da amostra foi calculada por diferença de pesagem, antes e depois da colocação do ácido e da amostra no frasco. Nestas amostras foram determinadas as concentrações de Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ e Mn²⁺ por espectroscopia de absorção atômica.

A parte aérea das plantas foi colhida aos 63 dias após a emergência das plântulas e seca em estufa a 60° C para a determinação da produção de matéria seca. Após a moagem deste material foram determinados as concentrações de P, K, Ca, Mg, Fe e Mn, segundo os métodos descritos por Tedesco et al. (1995).

Os dados foram submetidos à análise de variância e teste de Duncan ao nível de 5%, utilizando o sistema de Análise Estatística Winstat (MACHADO, 2001).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não ocorreram sintomas visuais de toxidez de ferro na parte aérea das plantas em nenhum dos solos estudados, tanto sem adubação como com adubação PK.

Na tabela 3 são apresentados os resultados de produção de matéria seca e teores de fósforo e potássio da parte aérea das plantas.

Tabela 3. Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) e teores de fósforo e potássio no tecido de plantas de arroz da cultivar BR-IRGA 409, em cinco solos, com e sem adubação PK. Média de duas repetições

PK	Solo				
	Pelotas	Vacacaí	Uruguiana	Formiga	Virgínia
----- MSPA (g vaso ⁻¹) -----					
Sem	37,25 Ab	12,42 Cb	21,88 Bb	41,92 Ab	12,45 Cb
Com	55,73 Ba	46,30 Ca	45,61 Ca	52,66 Ba	63,41 Aa
----- P (g kg ⁻¹) -----					
Sem	2,67 Ab	1,65 Cb	1,01 Bb	1,16 Bb	0,95 Db
Com	3,47 Aa	2,92 Ba	2,85 Ba	3,29 Aa	1,68 Ca
----- K (g kg ⁻¹) -----					
Sem	9,20 Bb	18,50 Aa	12,20 Ba	11,10 Bb	10,00 Ba
Com	13,60 Ba	13,45 Bb	15,00 Ba	21,10 Aa	8,85 Ca

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas nas linhas e minúsculas nas colunas para produção de matéria seca e teores de cada nutriente diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

A adubação PK promoveu acentuado aumento na produção de matéria seca da parte aérea em todos os solos, comparado aos rendimentos obtidos sem adubação PK, aumentando para valores entre 25 e 400% na presença da adubação PK, (tab. 3).

Os maiores teores de P e K no tecido se enquadram dentro da faixa de suficiência para o desenvolvimento de plantas (tab. 3), de acordo com as faixas de teores adequados (2,5 à 4,8 g.kg⁻¹ para P e 15 à 40 g.kg⁻¹ para K), preconizadas para a cultura do arroz irrigado por Barbosa Filho (1987) e pela Comissão de Fertilidade do Solo RS/SC (2004). Portanto, considerando estes teores, alguns solos estão abaixo da faixa adequada, porém, com algum aumento dos teores no tecido com a adubação PK. Esta deficiência de P e K na planta, conforme discutido por Howeler (1973), Kirk et al. (1990) e Weiss et al. (2003) atribui o nível de Fe na solução do solo como redutor do crescimento das raízes, diminuindo a absorção de nutrientes e estes autores atribuem isso à camada de óxidos de ferro precipitada nas raízes, que tem a função de afetar a absorção posterior de outros nutrientes, inibindo a absorção ocorrida a nível de membrana. Porém, o mecanismo proposto por Ottow et al. (1983) e também analisado por Benckiser et al. (1983), considera que a rizosfera faz dois caminhos neste processo, oferecendo condições privilegiadas para a oxidação do íon ferroso, mas também pode ser um centro para a redução, que através da liberação de exsudatos, promove maior atividade microbológica aumentando a redução do ferro e consequentemente a sua absorção.

Na tabela 4 constam os resultados obtidos para os teores de Ca, Fe, Mg, Mn e Σ Div.

Não houve efeito da adubação nos teores dos cátions divalentes (Ca, Fe, Mg e Mn) no tecido foliar, sendo significativo somente nos solos Vacacaí e Virgínia, no somatório dos divalentes (Σ Div), apesar do grande aumento na matéria seca da parte aérea quando adubados os solos, o que significa que mesmo com quantidades altas destes nutrientes na solução do solo, a planta absorve somente o necessário para suprir as suas necessidades, independente de ter uma maior ou menor produção de matéria seca (tabs. 3 e 4). Pode se aceitar que as plantas estavam bem nutridas de Ca, Fe, Mg e Mn, pois os teores se enquadram dentro da faixa adequada, ou até são levemente superiores, de acordo com as faixas de teores citadas pela Comissão de Fertilidade do Solo RS/SC (2004) para a cultura do arroz irrigado e não houve observação de nenhuma anomalia nas plantas com relação a estes nutrientes.

Tabela 4. Teores de cálcio, ferro, magnésio, manganês e Σ Div no tecido de plantas de arroz da cultivar BR-IRGA 409, em cinco solos, com e sem adubação PK. Médias de duas repetições

PK	Solo				
	Pelotas	Vacacaí	Uruguaiana	Formiga	Virgínia
-----Ca (mmol kg ⁻¹)-----					
Sem	70,75 Bb	66,38 Ba	96,25 Aa	72,13 Ba	70,13 Ba
Com	84,00 Aa	74,75 ABa	74,88 ABb	70,38 Ba	73,13 ABa
-----Fe (mmol kg ⁻¹)-----					
Sem	10,13 Aa	4,96 Ba	3,15 Ba	2,45 Ba	4,06 Ba
Com	10,13 Aa	5,50 Ba	2,78 Ba	2,25 Ba	3,98 Ba
-----Mg (mmol kg ⁻¹)-----					
Sem	131,67 Aa	74,38 Db	115,21 Ba	92,50 Ca	61,25 Eb
Com	129,79 Aa	98,75 Ca	115,83 Ba	85,00 Da	94,17 CDa
-----Mn (mmol kg ⁻¹)-----					
Sem	27,01 Ba	22,47 Cb	22,25 Cb	10,16 Da	40,40 Ab
Com	29,82 Ca	38,24 Ba	33,49 Ca	11,89 Da	53,37 Aa
----- Σ Div (mmol kg ⁻¹)-----					
Sem	239,56 Aa	168,18 Bb	236,86 Aa	177,24 Ba	175,83 Bb
Com	253,73 Aa	217,24 Ba	226,98 Ba	169,51 Ca	224,64 Ba

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas nas linhas e minúsculas nas colunas para cada nutriente diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

Os teores de ferro no tecido das plantas adubadas não diferiram daqueles encontrados nas não adubadas (tab. 4) e isto significa que a adubação PK não diminuiu a taxa de absorção de Fe pelas plantas. Além disso, mesmo nos solos em que os teores de Fe no tecido foram altos, não ocorreram sintomas do elemento. Ramírez et al. (2002), observaram que os sintomas de toxidez de ferro não foram causados por uma maior concentração de Fe nas folhas, sendo os sintomas atribuídos a uma maior acumulação de ferro nas raízes, evidenciando que o desenvolvimento de sintomas não depende diretamente dos teores de Fe no tecido, como já havia sido constatado anteriormente por Ottow et al. (1983).

A tabela 5 mostra os resultados obtidos nos parâmetros Ca, Fe, Mg, Mn e Σ Div da solução do solo.

Tabela 5. Concentrações dos cátions e o somatório dos cátions divalentes na solução do solo. Valores médios coletados aos 35 e 48 dias de alagamento. Média de duas repetições

PK	Solo				
	Pelotas	Vacacaí	Uruguaiana	Formiga	Virgínia
-----Ca (mmol L ⁻¹)-----					
Sem	1,15 Ba	1,39 Ba	3,24 Aa	1,78 Ba	2,02 Ba
Com	2,02 BCa	1,27 Ca	3,64 Aa	2,80 ABa	1,88 BCa
-----Fe (mmol L ⁻¹)-----					
Sem	2,22 Bb	3,58 Aa	1,31 Ca	0,19 Da	3,30 Aa
Com	3,56 ABa	3,90 Aa	1,35 Ca	0,25 Da	2,50 Bb
-----Mg (mmol L ⁻¹)-----					
Sem	0,75 Aa	0,62 Aa	0,96 Aa	0,69 Aa	0,73 Aa
Com	0,98 Aa	0,43 Ba	1,43 Aa	0,99 ABa	0,58 Ba
-----Mn (mmol L ⁻¹)-----					
Sem	0,33 Ca	0,55 Ba	0,59 Ba	0,06 Da	1,66 Aa
Com	0,47 Ba	0,43 Ba	0,60 Ba	0,07 Ca	1,42 Ab
-----Σ Div (mmol L ⁻¹)-----					
Sem	4,46 BCb	6,14 ABa	6,09 ABa	2,72 Ca	7,70 Aa
Com	7,03 Aa	5,02 ABa	7,01 Aa	4,11 Ba	6,38 Aa

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas nas linhas e minúsculas nas colunas em a cada nutriente diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

Analisando os teores dos cátions divalentes no tecido foliar (tab. 4) e as concentrações dos mesmos na solução do solo (tab. 5), constata-se que a ordem decrescente em relação à quantidade destes nutrientes no tecido para a média dos solos é Mg, Ca, Mn e Fe, enquanto que na solução do solo, a ordem é Fe, Mg e Mn respectivamente. Esta observação é consequência da seletividade no processo de absorção dos nutrientes pela planta. O Fe é o segundo elemento mais abundante na solução do solo, atingindo concentrações de Fe²⁺ várias vezes maior do que as necessárias para a nutrição da planta, no caso do arroz irrigado por inundação, devido ao processo de redução do solo (PONNAMPERUMA, 1972). Porém, Yoshida (1981) explica que apesar da grande quantidade de Fe na solução do solo, ocorre sua oxidação na rizosfera pelo O₂ transportado da parte aérea para as raízes via aerênquima, fazendo com que grande parte do Fe²⁺ seja oxidado e precipitado nas raízes, o que tem sido considerado como um mecanismo de exclusão do Fe, diminuindo o risco de toxidez do elemento.

Baseado nos experimentos de Ottow et al. (1982), alicerçados a explicação de Yoshida (1981), fica a idéia do envolvimento da disponibilidade de outros nutrientes na manutenção do mecanismo de exclusão do Fe, sendo que deste modo, adubação implica na menor exudação de metabólitos de baixo peso molecular, que são responsáveis pelo desenvolvimento de bactérias anaeróbias que reduzem os óxidos de Fe e Mn precipitados sobre as raízes, quebrando o mecanismo de exclusão do Fe. Além disso, é importante ressaltar que a planta possui mecanismos de tolerância ao excesso de micronutrientes, sendo que Dechen et al. (1999) explicam que estes se dão através de mecanismos fisiológicos e/ou bioquímicos como: limitação na absorção e/ou exclusão do elemento químico no processo de absorção; compartimentação interna, retendo o metal nas raízes e vasos; compostos excretados pelas raízes, diminuindo a disponibilidade do elemento na rizosfera; imobilização do elemento químico na parede celular e vacúolo; desintoxicação bioquímica através da produção de compostos seqüestrantes e inativadores; tolerância dos sistemas enzimáticos ativados por elementos químicos.

Os teores de Fe na planta (tab. 4) diminuíram a medida que a concentração de K na solução aumentou (apêndice E), o que está de acordo com os resultados obtidos por Vahl (1982), que concluiu que quanto maiores foram as concentrações de K, Ca e Mg na solução, maior deverá ser a concentração de Fe^{2+} para alcançar níveis tóxicos. Neste experimento que, por exemplo, o solo Vacacaí apesar de ter maiores concentrações de Fe na solução que o solo Pelotas, acumulou menos Fe no tecido e uma explicação provável para este comportamento estaria no efeito da diferente concentração e absorção dos outros cátions, como o K e, especialmente, o Ca e Mg, que estão relacionados com a seletividade de absorção do Fe, semelhante aos resultados obtidos por Silva et al. (2000).

Houve relação apenas razoável entre os teores absolutos de Fe no tecido e as concentrações absolutas de Fe^{2+} na solução (tabs. 4 e 5), como pode ser visualizado na figura 1.

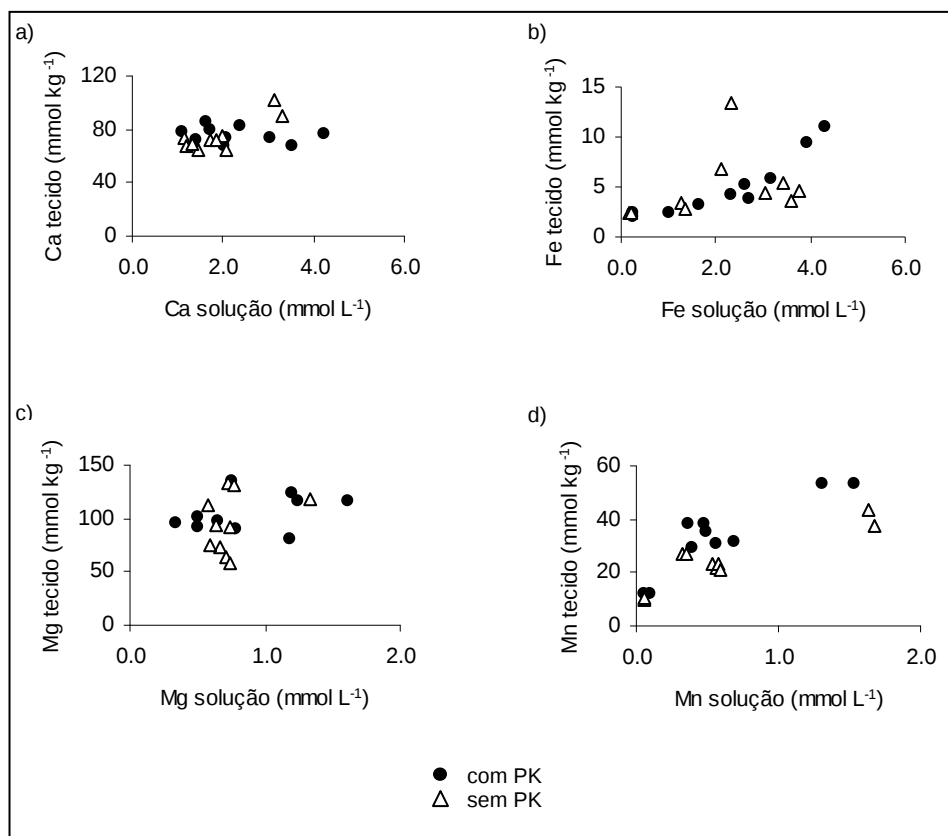


Figura 1. Relação dos teores absolutos dos cátions divalentes no tecido com as concentrações absolutas na solução do solo.

Apesar da grande dispersão dos pontos, a relação absoluta entre os teores de Ca, Mg e Mn no tecido e as suas concentrações na solução mostra que há uma tendência de estabilização entre o que a planta absorve e o que tem na solução, sendo quase que linear no caso do Ca. Entretanto, mesmo que também com muita dispersão dos pontos, o Fe não obedece esta tendência, sendo que nas concentrações mais altas de Fe²⁺, o modelo da relação é semelhante ao observado por Schwab & Lindsay (1983), onde até certa concentração na solução, ao redor de 2 mmol L⁻¹, a absorção aumenta pouco e acima deste valor, o teor no tecido da planta aumenta mais rápido com o aumento da concentração de Fe²⁺ na solução. Este é de fato o modelo comumente observado entre a concentração de nutrientes no solo e os seus teores no tecido das plantas, mas o aumento da declividade da curva sob altas concentrações é muito maior do que normalmente observado para um nutriente qualquer, deixando a causa deste fenômeno não bem esclarecida.

Vahl (1991), baseado em resultados experimentais em solução nutritiva, levantou a hipótese de que o fenômeno ocorre a nível de membrana, onde o Fe^{2+} prejudica a seletividade devido ao deslocamento do Ca^{2+} ligado à membrana responsável por manter a sua integridade. Até certos níveis de Fe^{2+} a membrana permanece intacta, mas acima de um dado teor, a seletividade é prejudicada e os cátions serão absorvidos em proporções semelhantes às encontradas na solução. Levando em consideração esta hipótese, a tabela 6 mostra as frações molares dos cátions divalentes na solução do solo e a figura 2 a relação entre os teores absolutos dos cátions divalentes no tecido com a fração molar dos divalentes na solução.

Tabela 6. Frações molares dos divalentes (XCa, XFe, XMg e XMn) na solução do solo. Valores médios coletados aos 35 e 48 dias de alagamento. Média de duas repetições

PK	Solo				
	Pelotas	Vacacaí	Uruguaiana	Formiga	Virgínia
-----XCa-----					
Sem	0,263 Ca	0,218 Da	0,533 Ba	0,655 Aa	0,258 Cb
Com	0,287 Ca	0,250 Da	0,525 Ba	0,675 Aa	0,293 Ca
-----XFe-----					
Sem	0,489 Ba	0,601 Aa	0,202 Da	0,069 Ea	0,440 Ca
Com	0,500 Ba	0,590 Aa	0,191 Da	0,063 Ea	0,413 Ca
-----XMg-----					
Sem	0,173 Ba	0,091 Ca	0,176 Ba	0,254 Aa	0,089 Ca
Com	0,146 Ca	0,074 Da	0,200 Ba	0,245 Aa	0,077 Da
-----XMn-----					
Sem	0,074 Da	0,088 Ca	0,098 Ba	0,021 Ea	0,213 Aa
Com	0,068 Ca	0,084 Ba	0,084 Bb	0,017 Da	0,218 Aa

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas nas linhas e minúsculas nas colunas em a cada nutriente diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

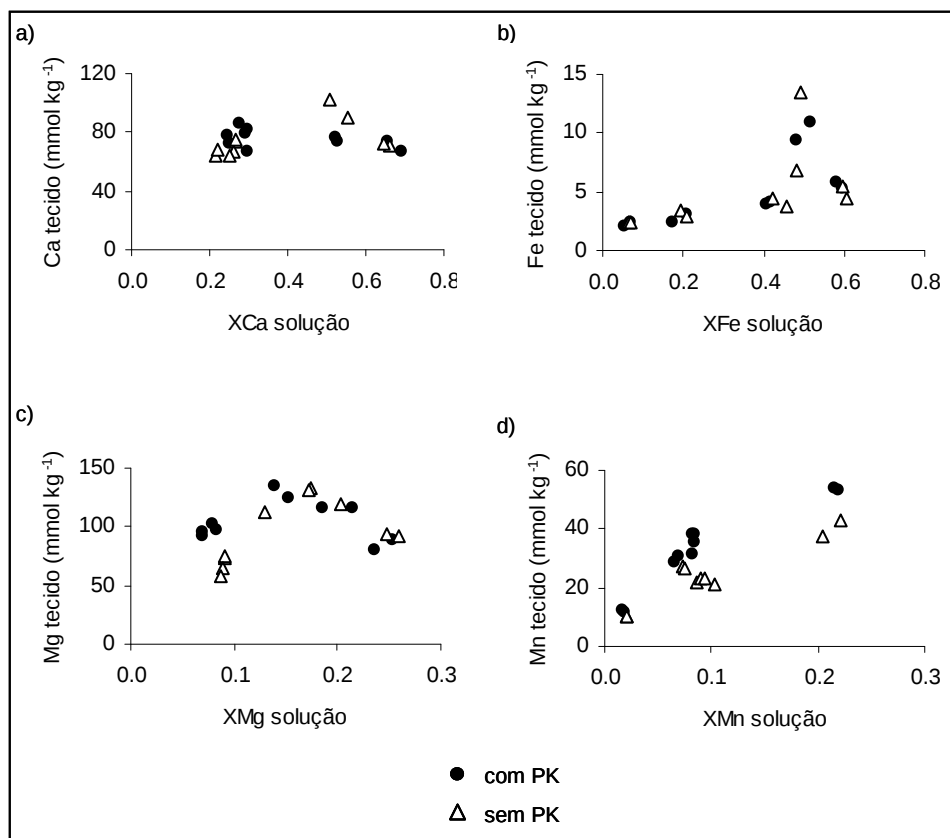


Figura 2. Relação dos teores absolutos dos cátions divalentes no tecido com as concentrações relativas na solução do solo.

De fato, a relação entre os teores absolutos no tecido foliar com a fração molar dos divalentes na solução do solo é mais clara do que quando compara com as concentrações absolutas de Fe^{2+} na solução, sendo mais clara ainda quando se compara os teores relativos dos cátions no tecido foliar com os relativos na solução (tabs. 6 e 7 e figura 3) onde se percebe nitidamente que a partir de 0,4 a absorção aumenta bruscamente, relacionando-se de forma exponencial.

Tabela 7. Valores médios das frações molares dos divalentes (XCa, XFe, XMg e XMn) no tecido. Média de duas repetições

PK	Solo				
	Pelotas	Vacacaí	Uruguaiana	Formiga	Virgínia
-----XCa-----					
Sem	0,30 Bb	0,40 Aa	0,41 Aa	0,41 Aa	0,40 Aa
Com	0,33 Ba	0,34 Bb	0,33 Bb	0,42 Aa	0,33 Bb
-----XFe-----					
Sem	0,042 Aa	0,030 ABa	0,013 Ca	0,014 Ca	0,023 BCa
Com	0,040 Aa	0,025 Ba	0,012 Ba	0,013 Ba	0,018 Ba
-----XMg-----					
Sem	0,55 Aa	0,44 Da	0,49 Ca	0,52 Ba	0,35 Eb
Com	0,51 Ab	0,45 Ba	0,51 Aa	0,50 Aa	0,42 Ca
-----XMn-----					
Sem	0,11 Ca	0,13 Bb	0,10 Db	0,06 Eb	0,23 Aa
Com	0,12 Da	0,18 Ba	0,15 Ca	0,07 Ea	0,24 Aa

Médias seguidas de letras maiúsculas distintas nas linhas e minúsculas nas colunas em relação aos teores de cada nutriente diferem estatisticamente pelo teste de Duncan a 5% de probabilidade.

Os modelos da relação entre a fração molar no tecido e a fração molar na solução (figura 3) variam entre os quatro cátions divalentes. O Ca e o Mg mostram uma tendência a saturação, isto é, atingem uma fração molar no tecido constante a partir de uma certa fração na solução. No caso do Ca, não é possível estabelecer a partir de que XCa isto ocorre, porque nos menores valores de XCa usados (0,22) este patamar já foi atingido. No Mg aparentemente a XMg em torno de 0,15 é o limite acima do qual estabiliza a XMg na planta. No Mn não foi atingido o patamar, aparentemente, sendo que a fração molar no tecido aumentou com a XMn até os maiores valores encontrados nos solos. O Fe, entretanto, mostrou um comportamento completamente diferente. O Fe no tecido se apresenta aproximadamente constante até um certo valor e então aumenta rapidamente com posteriores aumentos da XFe na solução.

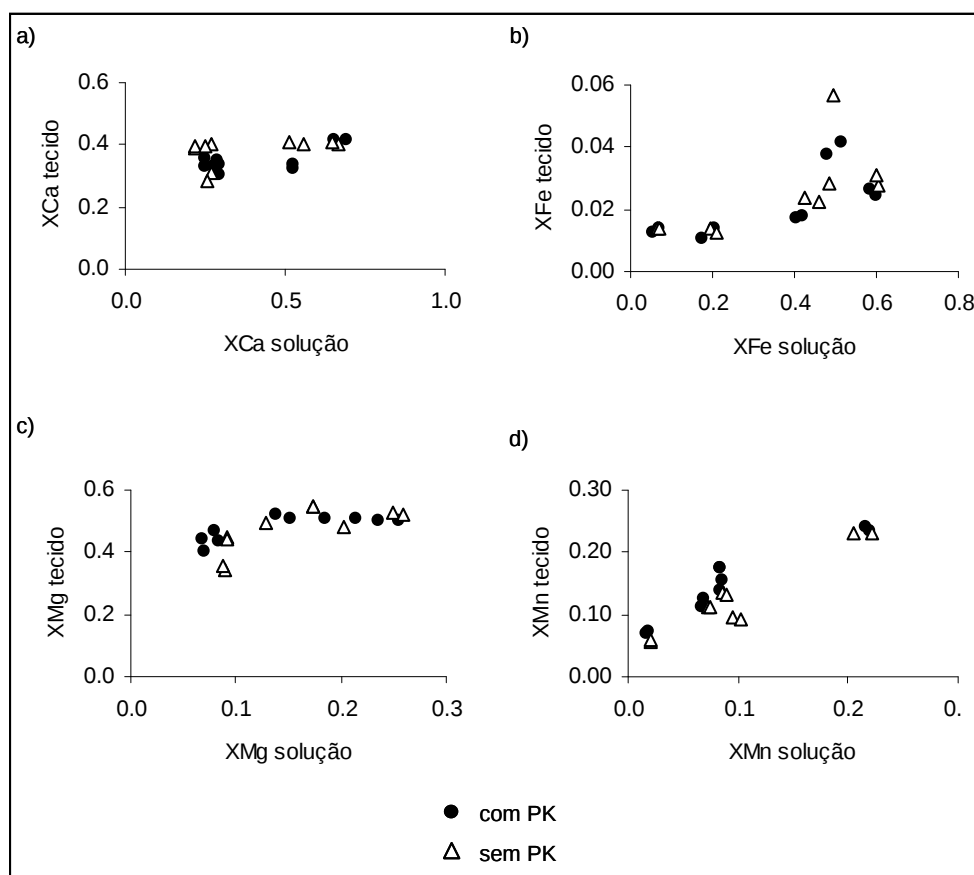


Figura 3. Relação dos teores relativos dos cátions divalentes no tecido com as concentrações relativas na solução do solo.

Porém, devem haver outros fatores que controlam a absorção porque o comportamento dos solos Pelotas e Vacacaí, por exemplo, que apresentam as maiores XFe (tab. 6), diferem entre si, pois a absorção foi muito maior no Pelotas do que no Vacacaí (tab. 4). É possível que existam interações mais específicas entre o Fe e os outros cátions. Por outro lado, os resultados mostram que não houve efeito da adubação PK nem nas concentrações dos cátions divalentes na solução, nem nos teores de Fe no tecido e isto também é importante explorar em pesquisas futuras.

Apesar desta variabilidade pode-se estabelecer, em princípio, uma concentração de 2 mmol.L^{-1} de Fe na solução do solo e uma relação $\text{Fe}/\sum\text{Div}$ ao redor de 0,4 como valores críticos. Acima destes valores a absorção de Fe pela planta aumenta muito rápido em resposta ao aumento de Fe no solo. Em que nível pode ocorrer sintomas de toxidez de ferro, entretanto, não é possível estabelecer, pois não houve sintomas típicos observados que pudessem determinar esta relação. Pode-se, contudo, concluir que sob relações $\text{Fe}/\sum\text{Div}$ de até 0,6, que foi o valor

máximo neste experimento, as plantas não apresentam sintomas visuais de toxidez de ferro. Isto está de acordo com as constatações de Moore & Patrick (1989), que estabeleceram como nível crítico uma relação ao redor de 0,75, acima da qual pode ocorrer toxidez de ferro.

5 CONCLUSÕES

Em face dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- a) A adubação com fósforo e potássio promoveu acentuado aumento na produção de matéria seca das plantas em todos os solos;
- b) Não houve efeito da adubação PK nos teores dos cátions divalentes no tecido, nem nas concentrações dos cátions na solução do solo;
- c) O modelo da relação entre a fração molar no tecido e a fração molar na solução do solo, depende do cátion: o Ca, o Mg e o Mn mostraram tendência à saturação e a absorção do Fe ficou aproximadamente constante até uma fração molar de 0,4, sendo este o valor crítico acima do qual a absorção de Fe pela planta torna-se descontrolada, aumentando muito rápido em resposta ao Fe no solo acima deste valor;
- d) Em fração molar de Fe de até 0,6 as plantas não apresentaram sintomas de toxidez de ferro.

6 REFERÊNCIAS

AUDEBERT, A. Iron toxicity in rice-environmental conditions and symptoms. In: AUDEBERT, A.; NARTCH, L. T.; KIEPE, P.; MILLAR, D.; BEKS, B. **Iron toxicity in Rice-based systems in West Africa**. África: Rice Center (WARDA), Cotonou, Benin, 2006. p. 18-31.

AUDEBERT, A.; SAHRAWAT, K. L. Mechanisms for iron toxicity tolerance in lowland rice. **J. Plant Nutr.**, v.23, p. 1877-1885, 2000.

BARBOSA FILHO, M. P. **Nutrição e adubação do arroz: (sequeiro e irrigado)**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1987. 129p. (Boletim Técnico, n. 9).

BENCKISER, G.; SANTIAGO, S.; NEUE, H. U.; WATANABE, I.; OTTOW, J. C. G. Effect of fertilization on exudation, dehydrogenase activity, iron-reducing population and Fe^{2+} formation in rhizosphere on rice (*Oryza sativa* L.) in relation to iron toxicity. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 79, p. 305-316. 1984.

BRASIL. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife: Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária, 1973. 431p.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Comissão de Fertilidade do Solo/ Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Porto Alegre, 2004. 387p.

DECHEN, A. R.; FURLANI, A. M. C.; FURLANI, P. R. Tolerância e adaptação de plantas aos estresses nutricionais. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; NETO, A. E. F.; CARVALHO, J. G. **Inter-relação Fertilidade, Biologia do solo e Nutrição de plantas**. Lavras:SBCS, 1999, p. 337-361.

FAGERIA, N. K.; FILHO, M. P. B.; CARVALHO, J. R. P.; RANGEL, P. H. N.; CUTRIN, V. A. Avaliação preliminar de cultivares de arroz para tolerância à toxidez de ferro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 10, p. 1271-1278, 1984.

FOY, C. D.; CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. The physiology of toxicity in plants. **Annu. Rev. Plant Physiol.** v. 29, p. 511-566. 1978.

HOWELER, R. H. Iron-induced orange disease of rice in relation to physico-chemical changes in a flooded oxisol. **Soil Science of America Proceedings**, Madison, v. 37, p. 898-903, 1973.

KIRK, G. J. D.; NYE, P. H.; AHMAD, A. R. Diffusion and oxidation of iron in the rice rhizosphere. **Transactions 14th International Congress of Soil Science**. Kyoto, Japan, 1990. v. 2, p. 153-157.

LOPES, M. S. Efeito da adubação e da calagem sobre a produtividade e a toxidez de ferro no cultivar BR-IRGA 409. In: Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 1987. Balneário Camboriú. **Anais**. Florianópolis: EMPASC, 1987.

MACHADO, A. **Sistema de análise estatística para o Windows (WINSTAT)**. Universidade Federal de Pelotas, 2001. Pelotas.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 4 ed. International Potash Institute. Bern Switzerland, 1987. 655p.

MOORE, P. A.; PATRICK, W. H. Iron availability and uptake by rice in Acid Sulfate Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53. p. 471-476.

OTTOW, J. C. G.; BENCKISER, G.; WATANABE, I. Iron toxicity of rice as a multiple nutritional soil stress. In: **Proceedings International Symposium on Distribution, Characteristics and Utilization of Problem Soils**. Tropical Agricultura Research Center, Ibaraki, 1982. p. 167-179.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 24, p. 29-96, 1972.

RAMÍREZ, L. M.; CLAASSEN, N.; UBIERA, A. A.; MOAWAD, A. M. Effect of phosphorus, potassium and zinc fertilizers on iron toxicity in wetland rice (*Oryza sativa* L.). **Plant and Soil**, Netherlands, v. 239, p. 197-206, 2002.

SCHWAB, A. P.; LINDSAY, W. L. Effect of redox on the solubility and availability of iron. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 201-205, 1983.

SILVA, L. S.; SOUSA, R. O.; BOHNEN, H. Dinâmica de ferro e de potássio na solução de solo alagado em diferentes profundidades, na presença e na ausência de plantas de arroz. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 3. 2000, Pelotas. **Anais**. Pelotas. NRS/SBCS, 2000. P. 331-337.

SILVEIRA, P. M.; RIBEIRO, A. C.; COSTA, L. M. Disponibilidade de ferro em solo submerso em relação à calagem e ao manejo da água. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 34, n. 194, p. 400-406, 1987.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. 1 ed. Porto Alegre: EMATER/RS – UFRGS, 2002. 126p.

TANAKA, A.; LOE, R.; NAVASERO, S. A. Some mechanisms involved in the development of iron toxicity symptoms in the rice plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokio, v. 12, n. 4, p. 32-38, 1966.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A. BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. ver. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS. 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, n. 5).

VAHL, L. C. **Disponibilidade de nutrientes para o arroz em solos do Rio Grande do Sul**. 1982. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VAHL, L. C. **Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento**. 1991. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VAN BREEMEN, N.; MOORMANN, F. R. Iron-toxic soils. In: **International Rice Research Institute**. Soil an Rice, Los Banos, Philippines, 1978. p. 781-800.

WEISS, J. V.; EMERSON, D.; BACKER, S. M.; MEGONICAL, J. P. Enumeration of Fe(II)-oxidizing and Fe(III)-reducing bacteria in the root zone of wetland plants.: Implications for a rhizosphere iron cycle. **Biogeochemistry**, Netherlands, v. 64, p. 77-96, 2003.

YAMAUCHI, M.; PENG, X. X. Iron toxicity and stress-induced ethylene production in rice leaves. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 173, p. 21-28. 1995.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of Rice Crop Science**. Los Banos, Phillippines: IRRI, 1981. 269p.

7 APÊNDICES

APÊNDICE A. Resultados obtidos no experimento para os caracteres concentração de cátions trocáveis na solução do solo, somatório dos cátions divalentes (Σ Div) e XFe em mmol.L⁻¹ das vinte amostras dos cinco solos estudados, sob 35 dias de inundação.

Solo	Adubação	Repetição	Fe	Mn	Ca	Mg	Σ Div	XFe
1	Com	1	4,298	0,459	2,030	0,683	7,470	0,575
1	Com	2	4,817	0,608	2,575	1,029	9,029	0,534
Média			4,558	0,534	2,303	0,856	8,250	0,555
1	Sem	1	2,794	0,408	1,368	0,825	5,395	0,518
1	Sem	2	3,152	0,451	1,440	0,925	5,968	0,528
Média			2,973	0,430	1,404	0,875	5,682	0,523
2	Com	1	2,095	0,264	0,813	0,175	3,347	0,626
2	Com	2	2,095	0,284	0,745	0,125	3,249	0,645
Média			2,095	0,274	0,779	0,150	3,298	0,636
2	Sem	1	3,116	0,370	0,853	0,250	4,589	0,679
2	Sem	2	2,847	0,380	0,815	0,233	4,275	0,666
Média			2,982	0,375	0,834	0,242	4,432	0,673
3	Com	1	1,338	0,471	3,318	0,846	5,973	0,224
3	Com	2	0,806	0,404	2,735	1,071	5,016	0,161
Média			1,072	0,438	3,027	0,959	5,495	0,193
3	Sem	1	0,537	0,306	1,635	0,583	3,061	0,175
3	Sem	2	0,519	0,295	1,518	0,529	2,861	0,181
Média			0,528	0,301	1,577	0,556	2,961	0,178
4	Com	1	1,721	0,794	1,150	0,225	3,890	0,442
4	Com	2	1,501	0,663	0,918	0,117	3,199	0,469
Média			1,611	0,729	1,034	0,171	3,545	0,456
4	Sem	1	2,274	1,079	1,305	0,342	5,000	0,455
4	Sem	2	3,671	1,240	1,425	0,400	6,736	0,545
Média			2,973	1,160	1,365	0,371	5,868	0,500
5	Com	1	0,285	0,076	2,305	0,825	3,491	0,082
5	Com	2	0,331	0,109	4,018	1,133	5,591	0,059
Média			0,308	0,093	3,162	0,979	4,541	0,071
5	Sem	1	0,208	0,082	1,890	0,679	2,859	0,073
5	Sem	2	0,269	0,084	2,035	0,796	3,184	0,084
Média			0,239	0,083	1,963	0,738	3,022	0,079

APÊNDICE B. Resultados obtidos no experimento para os caracteres pH, potencial redox (Eh) em Volt e condutividade elétrica (CE) em dS.m^{-1} das vinte amostras de solução do solo, dos cinco solos estudados, sob 35 dias de inundação.

Solo	Adubação	Repetição	pH	Eh	CE
1	Com	1	6,49	0,23	0,74
1	Com	2	6,53	0,23	0,65
Média			6,51	0,23	0,70
1	Sem	1	6,21	0,23	0,36
1	Sem	2	6,25	0,22	0,34
Média			6,23	0,23	0,35
2	Com	1	6,45	0,23	0,98
2	Com	2	6,31	0,24	0,56
Média			6,38	0,24	0,77
2	Sem	1	6,38	0,20	0,80
2	Sem	2	6,43	0,17	0,66
Média			6,41	0,19	0,73
3	Com	1	6,95	0,17	1,39
3	Com	2	6,63	0,22	0,77
Média			6,79	0,20	1,08
3	Sem	1	6,73	0,14	0,79
3	Sem	2	6,64	0,12	0,73
Média			6,69	0,13	0,76
4	Com	1	6,84	0,18	1,18
4	Com	2	6,74	0,12	0,80
Média			6,79	0,15	0,99
4	Sem	1	6,72	0,06	0,94
4	Sem	2	6,66	0,06	0,93
Média			6,69	0,06	0,94
5	Com	1	6,32	0,28	0,80
5	Com	2	6,54	0,25	1,23
Média			6,43	0,27	1,02
5	Sem	1	6,25	0,26	0,34
5	Sem	2	6,35	0,24	0,62
Média			6,30	0,25	0,48

APÊNDICE C. Resultados obtidos no experimento para o caracter potássio em mmol.L^{-1} das vinte amostras de solução do solo, dos cinco solos estudados, sob 35 dias de inundação.

Solo	Adubação	Repetição	K
1	Com	1	0,170
1	Com	2	0,070
Média			0,120
1	Sem	1	0,030
1	Sem	2	0,016
Média			0,023
2	Com	1	0,013
2	Com	2	0,013
Média			0,013
2	Sem	1	0,067
2	Sem	2	0,064
Média			0,066
3	Com	1	0,060
3	Com	2	0,060
Média			0,060
3	Sem	1	0,013
3	Sem	2	0,016
Média			0,015
4	Com	1	0,007
4	Com	2	0,007
Média			0,007
4	Sem	1	0,030
4	Sem	2	0,027
Média			0,029
5	Com	1	0,219
5	Com	2	0,287
Média			0,253
5	Sem	1	0,112
5	Sem	2	0,125
Média			0,119

APÊNDICE D. Resultados obtidos no experimento para os caracteres concentração de cátions trocáveis na solução do solo, somatório dos cátions divalentes (Σ Div) e XFe em mmol.L⁻¹ das vinte amostras dos cinco solos estudados, sob 48 dias de inundação.

Solo	Adubação	Repetição	Fe	Mn	Ca	Mg	Σ Div	XFe
1	Com	1	2,070	0,320	1,270	0,840	4,500	0,460
1	Com	2	3,060	0,510	2,200	1,360	7,130	0,430
Média			2,565	0,415	1,735	1,100	5,815	0,445
1	Sem	1	1,460	0,230	0,910	0,630	3,230	0,450
1	Sem	2	1,490	0,240	0,900	0,620	3,250	0,460
Média			1,475	0,235	0,905	0,625	3,240	0,455
2	Com	1	4,280	0,690	2,050	0,840	7,860	0,540
2	Com	2	3,110	0,460	1,490	0,560	5,620	0,550
Média			3,695	0,575	1,770	0,700	6,740	0,545
2	Sem	1	4,400	0,760	2,070	1,070	8,300	0,530
2	Sem	2	3,960	0,680	1,830	0,940	7,410	0,530
Média			4,180	0,720	1,950	1,005	7,855	0,530
3	Com	1	2,000	0,920	5,170	2,390	10,480	0,190
3	Com	2	1,240	0,590	3,340	1,420	6,590	0,190
Média			1,620	0,755	4,255	1,905	8,535	0,190
3	Sem	1	2,020	0,850	4,670	2,080	9,620	0,210
3	Sem	2	2,160	0,900	5,120	0,640	8,820	0,240
Média			2,090	0,875	4,895	1,360	9,220	0,225
4	Com	1	3,670	2,280	2,950	1,090	9,990	0,370
4	Com	2	3,110	1,960	2,500	0,880	8,450	0,370
Média			3,390	2,120	2,725	0,985	9,220	0,370
4	Sem	1	3,780	2,200	2,660	1,080	9,720	0,390
4	Sem	2	3,490	2,100	2,680	1,090	9,360	0,370
Média			3,635	2,150	2,670	1,085	9,540	0,380
5	Com	1	0,180	0,030	1,820	0,760	2,790	0,060
5	Com	2	0,210	0,080	3,060	1,230	4,580	0,050
Média			0,195	0,055	2,440	0,995	3,685	0,055
5	Sem	1	0,140	0,030	1,540	0,600	2,310	0,060
5	Sem	2	0,150	0,040	1,650	0,680	2,520	0,060
Média			0,145	0,035	1,595	0,640	2,415	0,060

APÊNDICE E. Resultados obtidos no experimento para o caracter potássio em mmol.L^{-1} das vinte amostras de solução do solo, dos cinco solos estudados, aos 48 dias de inundação.

Solo	Adubação	Repetição	K
1	Com	1	0,013
1	Com	2	0,010
Média			0,012
1	Sem	1	0,015
1	Sem	2	0,008
Média			0,012
2	Com	1	0,085
2	Com	2	0,012
Média			0,049
2	Sem	1	0,060
2	Sem	2	0,024
Média			0,042
3	Com	1	0,012
3	Com	2	0,188
Média			0,100
3	Sem	1	0,068
3	Sem	2	0,069
Média			0,069
4	Com	1	0,025
4	Com	2	0,125
Média			0,075
4	Sem	1	0,059
4	Sem	2	0,011
Média			0,035
5	Com	1	0,125
5	Com	2	0,048
Média			0,087
5	Sem	1	0,075
5	Sem	2	0,121
Média			0,098

APÊNDICE F. Resultados obtidos no experimento para o caracter peso da matéria seca da parte aérea (MSPA) em g.Vaso⁻¹.

Solo	Adubação	Repetição	MSPA
1	Com	1	55,21
1	Com	2	56,25
Média			55,73
1	Sem	1	38,26
1	Sem	2	36,24
Média			37,25
2	Com	1	45,64
2	Com	2	46,95
Média			46,30
2	Sem	1	11,69
2	Sem	2	13,14
Média			12,42
3	Com	1	48,23
3	Com	2	42,99
Média			45,61
3	Sem	1	21,36
3	Sem	2	22,39
Média			21,88
4	Com	1	68,92
4	Com	2	57,89
Média			63,41
4	Sem	1	11,71
4	Sem	2	13,19
Média			12,45
5	Com	1	52,30
5	Com	2	53,02
Média			52,66
5	Sem	1	42,48
5	Sem	2	41,36
Média			41,92

APÊNDICE G. Resultados obtidos no experimento para os caracteres concentrações de nutrientes na parte aérea das plantas em g.Kg⁻¹.

Solo	Adubação	Repetição	Fe	Mn	Zn	Ca	Mg	P	K
1	Com	1	0,609	1,590	0,047	3,430	3,240	3,430	15,000
1	Com	2	0,522	1,686	0,050	3,290	2,990	3,500	12,200
Média			0,566	1,638	0,0485	3,360	3,115	3,465	13,600
1	Sem	1	0,380	1,496	0,048	2,970	3,180	2,630	8,400
1	Sem	2	0,751	1,472	0,056	2,690	3,140	2,700	10,000
Média			0,566	1,484	0,052	2,830	3,160	2,665	9,200
2	Com	1	0,321	2,113	0,050	2,880	2,450	2,990	15,000
2	Com	2	0,293	2,089	0,044	3,100	2,290	2,850	11,900
Média			0,307	2,101	0,047	2,990	2,370	2,920	13,450
2	Sem	1	0,252	1,211	0,049	2,560	1,750	1,680	19,800
2	Sem	2	0,302	1,258	0,049	2,750	1,820	1,610	17,200
Média			0,277	1,235	0,049	2,655	1,785	1,645	18,500
3	Com	1	0,174	1,733	0,045	3,050	2,770	2,850	15,000
3	Com	2	0,137	1,947	0,049	2,940	2,790	2,850	15,000
Média			0,156	1,840	0,047	2,995	2,780	2,850	15,000
3	Sem	1	0,192	1,282	0,049	4,080	2,850	1,970	12,200
3	Sem	2	0,160	1,163	0,042	3,620	2,680	2,040	12,200
Média			0,176	1,223	0,046	3,850	2,765	2,005	12,200
4	Com	1	0,215	2,944	0,049	2,690	2,330	1,750	10,300
4	Com	2	0,229	2,920	0,045	3,160	2,190	1,610	7,400
Média			0,222	2,932	0,047	2,925	2,260	1,680	8,850
4	Sem	1	0,247	2,374	0,042	3,020	1,550	0,950	10,300
4	Sem	2	0,206	2,065	0,043	2,590	1,390	0,950	9,700
Média			0,227	2,220	0,043	2,805	1,470	0,950	10,000
5	Com	1	0,137	0,665	0,040	2,940	2,140	3,430	22,000
5	Com	2	0,114	0,641	0,039	2,690	1,940	3,140	20,200
Média			0,126	0,653	0,040	2,815	2,040	3,285	21,100
5	Sem	1	0,137	0,546	0,042	2,860	2,230	2,120	11,600
5	Sem	2	0,137	0,570	0,042	2,910	2,210	2,190	10,600
Média			0,137	0,558	0,042	2,885	2,220	2,155	11,100