

FERNANDO JOSÉ DE MELO BASTOS

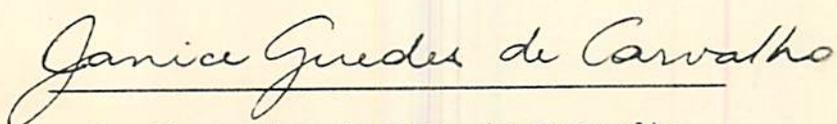
EFEITO DO FERRO, GESSO AGRÍCOLA E CALCÁRIO NA
PRODUÇÃO DE ARROZ (*Oryza sativa* L.) EM
SOLOS DE VÁRZEA INUNDADOS

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura de Lavras, como parte das exigências do curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do grau de "MESTRE".

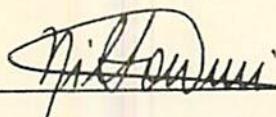
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA
LAVRAS - MINAS GERAIS
1993

EFEITO DO FERRO, GESSO AGRÍCOLA E CALCÁRIO NA PRODUÇÃO DE ARROZ
(*Oryza sativa* L.) EM SOLOS DE VÁRZEA INUNDADOS

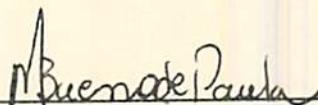
APROVADA:



Profª Janice Guedes de Carvalho
Orientadora



Prof. Nilton Curi



Pesqª Miralda Bueno de Paula

Aos meus pais,
Francisco e Maria do Carmo,
pelo carinho, apoio e incentivos,
em todas as etapas de minha vida

OFEREÇO.

Aos meus irmãos, Stela, Francisco Luís e Elizabeth,
Meus cunhados, Eugênio e Fabrino,
Meus sobrinhos, Luíza, Henrique e em
especial minha afilhada Lívia

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura de Lavras, pela oportunidade oferecida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa concedida durante a realização do curso.

À Petrofertil pelo auxílio financeiro na execução do experimento da tese.

À professora Janice Guedes de Carvalho, pela amizade, orientação e confiança demonstradas.

À pesquisadora Miralda Bueno de Paula, pelas sugestões e amizade.

Ao professor Nilton Curi pelos ensinamentos e incentivo.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Ciência do Solo, pela atenção e ajuda sempre que solicitadas.

Aos colegas de curso pela amizade e agradável convivência.

A todos que, de uma forma ou outra, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Caracterização genérica dos principais solos de várzea	4
2.2. Alterações provocadas pela inundação	7
2.3. Transformações do ferro em solos inundados	11
2.4. Transformações do enxofre em solos inundados	13
2.5. Toxicidade de ferro em arroz irrigado	14
2.6. Considerações gerais sobre o sulfato de cálcio (gesso agrícola)	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1. Material de solo	22
3.2. Análises de caracterização dos solos	23
3.2.1. Análises físicas	23
3.2.2. Análises químicas	24
3.3. Instalação e condução do experimento	26

	Página
3.4. Análises químicas da matéria seca	28
3.5. Análise estatística dos dados	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Efeito dos tratamentos sobre a concentração de ferro na solução do solo	30
4.1.1. Considerações gerais	30
4.1.2. Concentração de ferro na solução do solo .	31
4.2. Efeito dos tratamentos sobre o teor de enxofre e ferro no solo	33
4.2.1. Enxofre	35
4.2.2. Ferro	36
4.3. Efeito dos tratamentos no teor de macronutrientes na palha	38
4.3.1. Nitrogênio	39
4.3.2. Fósforo	41
4.3.3. Potássio	43
4.3.4. Cálcio	44
4.3.5. Magnésio	46
4.3.6. Enxofre	47
4.4. Efeito dos tratamentos no teor de micronutrientes na palha	49
4.4.1. Cobre	51
4.4.2. Ferro	52
4.4.3. Manganês	54
4.4.4. Zinco	56

4.5. Efeito dos tratamentos na relação entre os teores de macro e micronutrientes e o teor de ferro, na matéria seca da palha	57
4.6. Efeito dos tratamentos nos componentes da produção	61
4.6.1. Matéria seca da palha	63
4.6.2. Matéria seca da raiz	65
4.6.3. Número de perfilhos/vaso	67
4.6.4. Matéria seca de grãos cheios	69
5. CONCLUSÕES	71
6. RESUMO	72
7. SUMMARY	74
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE QUADROS

Quadro		Página
1	Ocorrência de reações de oxi-redução em solos inundados e respectivos potenciais de eletrodos em volts	9
2	Composição aproximada do gesso agrícola, em percentagem	19
3	Características físicas das classes de solo estudadas	23
4	Características químicas dos solos utilizados no experimento	25

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1	Concentração de ferro na solução do solo em função dos tratamentos aplicados	32
2	Resumo das análises de variância dos teores de enxofre e ferro no solo	34
3	Teor de enxofre (SO_4^{-2}) no solo em função dos tratamentos aplicados	36
4	Teor de ferro no solo em função dos tratamentos aplicados	37
5	Resumo das análises de variância dos teores de macronutrientes na palha de arroz	39
6	Teor de nitrogênio na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados	41
7	Teor de fósforo na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados	42

Tabela		Página
8	Teor de potássio na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados	44
9	Teor de cálcio na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados	45
10	Teor de magnésio na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados	47
11	Teor de enxofre na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados	48
12	Resumo das análises de variância dos teores de micronutrientes na palha de arroz	50
13	Teor de cobre na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados	52
14	Teor de fósforo na matéria seca da palha em função dos tratamentos aplicados	54
15	Teor de manganês na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados	55
16	Teor de zinco na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados	57
17	Relação entre os teores de macronutrientes e o teor de ferro, na palha das plantas, em função dos tratamentos	59
18	Relação entre os teores de micronutrientes e o teor de ferro, na palha das plantas, em função dos tratamentos	60

Tabela

Página

19	Resumo das análises de variância dos componentes da produção, em função dos tratamentos aplicados nos dois solos	62
----	--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Produção de matéria seca da palha em função das doses de gesso ou calcário e da adição de ferro .	64
2	Produção de matéria seca da raiz em função das doses de gesso ou calcário e da adição de ferro .	66
3	Número de perfilhos por vaso em função das doses de gesso ou calcário e da adição de ferro	68
4	Produção de matéria seca de grãos cheios em função das doses de gesso ou calcário e da adição de ferro	70

1. INTRODUÇÃO

Diante da problemática da produção de alimentos fazendo face às necessidades nacionais e à exportação dos excedentes, a utilização racional dos solos de várzea surge como uma das alternativas mais viáveis e que vem merecendo atenções maiores.

A importância destes solos para o processo produtivo brasileiro prende-se ao fato de existirem no Brasil cerca de 30 milhões de hectares de várzeas irrigáveis sem aproveitamento definido e, principalmente, pela possibilidade de irrigação de um grande percentual desta área, eliminando ou reduzindo os problemas decorrentes das secas e/ou veranicos. Além do mais, uma terça parte do potencial brasileiro em várzeas irrigáveis situa-se em regiões de boa infra-estrutura tanto para produzir como para comercializar. Apenas no Estado de Minas Gerais existem cerca de 1,5 milhão de hectares de várzeas nessas condições.

Outro aspecto que não pode ser esquecido quando se refere ao potencial dos solos de várzea, é a viabilidade do cultivo das várzeas durante 365 dias ao ano quando devidamente sistematizadas, permitindo vários sistemas de rotação de culturas, além de aumentar a produtividade.

Entretanto, é necessário não apenas incorporar esses solos ao processo produtivo brasileiro, mas também conhecer as variáveis envolvidas na produção dos solos de várzea tornando possível níveis satisfatórios de produtividade.

Os solos de várzea apresentam uma diversidade muito grande de características físicas, químicas e biológicas, uma vez que são originados de sedimentos com grande heterogeneidade quanto à composição granulométrica e mineralógica.

Nos solos de várzea, durante o período de inundação, ocorrem transformações físico-químicas, eletroquímicas e biológicas que são muito importantes para a nutrição das plantas, principalmente para o arroz, que é a cultura mais freqüentemente cultivada nestes solos. As transformações são devidas a processos biológicos de redução que resultam na diminuição do oxigênio molecular durante a respiração microbiana, causando alterações no potencial redox (Eh) e pH.

O excesso de umidade promove o desbalanço sólido-líquido-gasoso do solo, onde o déficit de oxigênio passa a comandar uma série de reações bioquímicas sob influência de alterações do potencial de oxi-redução do solo.

Nesse contexto, de acordo com PONNAMPERUMA (1972), a mais importante alteração química que ocorre quando um solo é submerso, é o fenômeno da redução dos óxidos de ferro com um conseqüente aumento da solubilidade de Fe^{+2} , podendo resultar em toxidez à planta. Para SANCHEZ (1976), isto ocorre porque compostos de ferro são usualmente mais abundantes em solos que nitratos, compostos de

manganês e de enxofre.

Por outro lado, os solos inundados apresentam-se suficientemente reduzidos e com atividade microbiana alta o bastante para reduzir SO_4^{-2} à H_2S . Desde que a redução de Fe^{+3} à Fe^{+2} precede a redução de SO_4^{-2} , o ferro reduzido estará potencialmente presente na solução do solo pelo tempo que H_2S é produzido e assim o H_2S poderá ser convertido em FeS insolúvel. Esta reação protege microrganismos e plantas superiores dos efeitos tóxicos do H_2S e Fe^{+2} .

Diante do problema que envolve a toxicidade de ferro em lavouras de arroz inundado e sabendo que o gesso agrícola (Sulfato de Cálcio) surge como um produto residual da indústria de fertilizantes fosfatados e que para cada tonelada de ácido fosfórico produzido há uma produção de aproximadamente 4 toneladas de gesso agrícola como subproduto, que estão sendo acumulados, evidenciando a necessidade de estudos sobre sua aplicação, o presente trabalho tem como objetivos avaliar a ação do sulfato de cálcio (gesso agrícola), ferro e calcário no desenvolvimento e produção de arroz em solos de várzea inundados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Caracterização genérica dos principais solos de várzea

A parte do vale de um rio que é coberta pela água deste durante uma inundação, constitui-se numa planície de inundação, popularmente conhecida como várzea. De modo geral, as várzeas são oriundas principalmente da deposição de materiais transportados pelos rios e secundariamente de materiais carreados pelas chuvas das encostas dos morros. Geralmente são planas e facilmente irrigáveis, o que permite combater os problemas da seca e/ou veranicos em certas regiões. Porém, as várzeas apresentam muitas vezes, umidade excessiva, necessitando drenagem artificial, razão principal do atraso do seu aproveitamento agropecuário racional, LAMSTER (1980).

A ocorrência de camadas de menor permeabilidade no subsolo, o relevo plano e as inundações são as causas mais comuns do excesso de umidade presente na maioria dos solos de várzea. Nestas condições, o ambiente é de redução ($Fe^{+3} \rightarrow Fe^{+2}$) e a coloração tende a ser cinza (gleizada); é a "tabatinga", presente sob a camada de matéria orgânica dos solos hidromórficos, CURI et alii (1988).

Quanto à fertilidade, existe uma idéia generalizada de que os solos de várzea são férteis, entretanto muitos trabalhos em regiões tropicais têm mostrado grande complexidade nas suas propriedades físicas e químicas, apresentando fertilidade diversificada. CORÁ (1991).

Essencialmente, as definições de solos de várzea mostram parâmetros comuns sendo possível então, caracterizar as várzeas como áreas condicionadas a um regime de excesso de umidade e a processos químicos de redução, alta variabilidade de solos, sob vegetação de mato ou campo higrófilo (Rassini et alii, 1984 e Klamt et alii, 1985 citados por FAGERIA, 1989).

Neste ambiente de formação, segundo CURI & ANDRADE (1983) os solos predominantes são:

- Hidromórficos (Glei Pouco Húmico, Glei Húmico, Solo Orgânico, Laterita Hidromórfica, Planossolo, Hidromórfico Cinzento, Podzol Hidromórfico, Plintossolo, Areias Quartzosas Hidromórficas, Vertissolo, Brunizem Hidromórfico);
- Halomórficos (Salinos, Solonetz, Solodi, Solonetz-Solodizado) e
- Aluviais.

Em Minas Gerais, conforme levantamentos realizados por EMBRAPA e Freire & Novais (s.d.), citados por ABREU (1985), são encontrados principalmente, as classes Glei Húmico, Glei Pouco Húmico, Solo Orgânico e Aluvial, cujas características serão descritas conforme EMBRAPA (1982), VIEIRA & VIEIRA (1983) e CURI et alii (1988 e 1992).

A classe Glei Húmico compreende solos minerais, com

drenagem imperfeita ou impedida, cujas características refletem as condições de redução sob as quais foram formados. Ocorrem nas várzeas onde o lençol freático se apresenta elevado ou mesmo à superfície do solo durante todo o ano ou em grande parte dele. Ocupam normalmente superfícies planas e suave onduladas. Apresentam um horizonte turfoso, A chernozêmico ou A húmico, sobre horizonte gleizado. A textura é média (menos de 35% de argila e mais de 15% de areia, excluídas as classes texturais areia e areia franca) ou argilosa (35 a 60% de argila) a muito argilosa (> 60% de argila) em todos os horizontes, apresentando ausência de gradiente textural.

As principais limitações dessa classe de solo para o uso agrícola dizem respeito ao excesso de água e/ou à baixa fertilidade natural. Contudo, desde que sejam efetuadas práticas como drenagem, adubação e calagem, os resultados podem ser satisfatórios.

A classe Glei Pouco Húmico apresenta um horizonte A moderado sobre horizonte gleizado. Caracterizam-se por apresentar condições de má drenagem. Os compostos férricos se reduzem a ferrosos ou estes se oxidam a férricos conforme a oscilação do lençol freático, provocando o aparecimento de mosqueados amarelos, avermelhados ou mesmo vermelhos, dentro do perfil. A saturação e o conteúdo de bases trocáveis, apresentam-se variáveis e estão relacionados à natureza e a idade dos sedimentos dos quais foram desenvolvidos e à qualidade da água que os saturam, ricas ou pobres em íons capazes de saturar o complexo de troca.

A classe dos solos Orgânicos diz respeito a solos hidromórficos, que diferem dos demais solos minerais de várzea por apresentarem horizonte turfoso, contendo teor de carbono orgânico $\geq [8 + 0,067 (\% \text{ argila})]$, ocupando $> 50\%$ dos primeiros 80 cm de profundidade. São vulgarmente denominados de turfas, que pegam fogo com facilidade e cuja drenagem deve ser feita com muito cuidado, para evitar a queima e a subsidência. Ocorrem nas partes mais úmidas das várzeas em relevo plano e suave ondulado.

Esta classe abrange solos geralmente álicos e distróficos (estes podendo ser epieutróficos), forte a moderadamente ácidos e com elevada relação C/N. Tanto a espessura da camada de material orgânico e seu estágio de decomposição, como a composição química, mineralógica e a textura do substrato podem variar bastante. O grau de subsidência (rebaixamento da superfície), o armazenamento de água, a densidade do solo e o espaço poroso, dentre outros, são muito afetados pelo teor de fibras do material. São de grande ajuda na identificação desses solos o aspecto orgânico e a sensação turfosa ao tato, além da sensação que eles apresentam de estar flutuando na água (sensação de colchão d'água), quando se caminha sobre eles.

2.2. Alterações provocadas pela inundação

Torna-se difícil extrapolar dados de sequeiro para solos de várzea, uma vez que drásticas transformações físico-químicas,

eletroquímicas e biológicas bastante especiais ocorrem nos solos inundados, afetando a disponibilidade de nutrientes às plantas, bem como o manejo de fertilizantes e corretivos para conseguir a máxima eficiência da utilização de nutrientes na produção.

Nos solos bem drenados há oxigênio disponível, do qual necessitam os microrganismos e as plantas. Esta situação muda completamente quando o solo é inundado. Após a inundaçãõ do solo, o suprimento de oxigênio é praticamente eliminado, tornando o ambiente anaeróbico devido a rápida utilização de O_2 pelos microrganismos. Assim, os organismos aeróbicos do solo tornam-se inativos ou morrem e são substituídos pelos organismos anaeróbicos verdadeiros ou facultativos (FAGERIA, 1984). De acordo com Ponnampertuma & Black, citados por MORAES (1973b) esses organismos efetuam a decomposição da matéria orgânica, usando os componentes oxidados do solo como receptores de elétrons, reduzindo-os.

Em geral as reações de redução consomem H^+ e contribuem para o aumento nos valores de pH em solos ácidos inundados. OBERMUELLER & MIKKELSEN (1974) observaram uma elevação no pH de um solo ácido, com a inundaçãõ, de um valor inicial de 4,7 a um valor de aproximadamente 7,0, após 16 dias de submersão, enquanto que no mesmo período, o pH do solo não inundado permaneceu em torno do valor inicial.

A relação entre H^+ e o número de elétrons consumidos durante a reação de redução e os teores de matéria orgânica facilmente oxidável é que vão determinar a magnitude do aumento do pH dos solos ácidos com a inundaçãõ (PONNAMPERUMA, 1972).

Observando o Quadro 1, verifica-se que a redução dos óxidos de ferro é a que apresenta a mais alta relação ($3H^+$ consumidos para cada elétron), vindo logo a seguir, a redução do manganês ($2H^+$ consumidos para cada elétron).

QUADRO 1 - Ocorrência de reações de oxi-redução em solos inundados e respectivos potenciais de eletrodos em volts.

Reação	Potencial de eletrodo (Eh) (Volts)
Consumo de O_2 $1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$	0,4 a 0,6
Consumo de NO_3^- $NO_3^- + 2e^- + 2H^+ \rightarrow NO_2^- + H_2O$	0,2 a 0,5
Produção de Mn^{+2} $MnO_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow Mn^{+2} + H_2O$	0,2 a 0,4
Produção de Fe^{+2} $FeOOH + e^- + 3H^+ \rightarrow Fe^{+2} + 2H_2O$	0,1 a 0,4
Produção de HS^- $SO_4^{2-} + 6e^- + 9H^+ \rightarrow HS^- + 4H_2O$	0,0 a -0,15

Fonte: Compilado de PONNAMPERUMA (1972).

Um fator de grande importância relacionado ao aumento do pH dos solos ácidos com a inundação diz respeito à alteração na solubilidade de vários elementos no solo. O aumento do pH com a

inundação influencia o equilíbrio de hidróxidos, carbonatos, sulfetos, fosfatos e silicatos ocasionando benefícios no tocante à eliminação da toxidez de ferro e aumento na disponibilidade de fósforo, Ponnampetuma (1977), citado por GUILHERME (1990).

A química das reações de redução em solos inundados está descrita com detalhes nos trabalhos de PONNAMPERUMA (1972), YOSHIDA (1975), LINDSAY (1979) e PAVAN & MIYAZAWA (1983). De acordo com PONNAMPERUMA (1972), as principais alterações eletroquímicas nos solos inundados são:

- Diminuição do oxigênio molecular;
- Aumento no pH dos solos ácidos e diminuição no pH dos solos sódicos e calcários, devido ao aumento da pressão parcial de CO_2 que resulta numa liberação de íons H^+ ;
- Redução química do solo ou diminuição do potencial de oxi-redução;
- Redução do Fe^{+3} para Fe^{+2} e do Mn^{+4} para Mn^{+2} ;
- Aumento na disponibilidade de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Mo e Si;
- Diminuição na disponibilidade de Zn, Cu e S;
- Geração de toxinas tais como produtos orgânicos, etileno e ácido sulfúrico. A extensão destas mudanças varia com as propriedades físicas e químicas do solo, regime de água e temperatura.

Segundo GUEDES (1983) a principal característica que separa solos inundados de solos bem drenados é seu potencial de oxi-redução. O baixo potencial de solos inundados (0,2 a -0,4 volts) reflete seu estado de redução enquanto o alto potencial dos solos bem drenados (0,3 a 0,8 volts) reflete seu estado de oxidação.

2.3. Transformações do ferro em solos inundados

A química de solos inundados é dominada mais pelo ferro do que qualquer outro elemento redox. A maior razão para esta dominância é a grande quantidade de ferro que pode sofrer redução, excedendo usualmente a quantidade total de outros elementos redutíveis por um fator de 10 ou maior. Embora compostos de ferro no solo sejam um tanto quanto difíceis de reduzir enquanto O_2 , NO_3^- e NO_2^- estão presentes, a redução uma vez começada pode sustentar considerável oxidação microbiana de compostos orgânicos.

A velocidade da redução de óxidos de ferro, segundo Fisher, 1983 citado por KÄMPF (1987), depende basicamente:

- dos tipos predominantes de microrganismos, uma vez que as reações de redução consomem elétrons, e estes são provenientes da oxidação da matéria orgânica por organismos heterotróficos do solo.
- da atividade bacteriana, que é função da quantidade e da qualidade da matéria orgânica de fácil decomposição, bem como do teor de água no ambiente.
- dos tipos e concentrações de óxidos de ferro. Os cálculos termodinâmicos mostram que possivelmente há diferenças na velocidade de redução dos diferentes óxidos de Ferro.

Tem sido observado que lepidocrocita e ferrihidrita são mais fácil e rapidamente reduzidos que goethita e hematita. Isto se deve à maior área superficial específica da ferrihidrita e lepidocrocita em relação aos outros óxidos. Por outro lado, é mais

fácil energeticamente reduzir ferrihidrita e lepidocrocita ou goethita. Conseqüentemente, os organismos reduzirão preferencialmente óxidos de ferro de baixa cristalinidade, como a ferrihidrita e em certos casos a lepidocrocita, pois a necessidade energética é significativamente menor, MUNCH & OTTOW (1980).

De acordo com SCHWERTMANN (1988) o teor de óxidos de Ferro extraíveis em ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) dificilmente se relaciona com a quantidade de ferro reduzido durante a inundação porque inclui óxidos de muito baixa solubilidade. Já o ferro extraível com oxalato de amônio 0,2 M pH 3 é constituído por uma fração de óxidos de baixa cristalinidade e provavelmente constitui a fração melhor relacionada à redução do ferro.

Entretanto, é necessário conhecer a concentração relativa de Fe^{+2} na solução do solo, que é aparentemente o fator que causa o desequilíbrio nas plantas, GOMES et alii (1987). Para isto é necessário analisar o que ocorre com o Fe^{+2} após sua solubilização no solo.

À medida que o Fe^{+2} é formado durante o processo de redução, ele está sujeito a reações de precipitação na forma de novos óxidos e de adsorção. Nas reações de adsorção são liberadas para a solução quantidades equivalentes de outros cátions inicialmente presentes no solo. Isto significa que o Fe^{+2} pode ser incorporado ao complexo de troca imediatamente à medida em que é produzido e, em conseqüência, as reações de precipitação de óxidos ferrasos são controladas também pelas reações de troca. Logo,

solos com alta CTC poderão suportar grandes quantidades de Fe^{+2} trocável antes que possam ser formadas quantidades significativas de óxidos neo-precipitados. Assim, a atividade de Fe^{+2} na solução do solo é controlada pelo complexo de troca e por reações de precipitação de fases sólidas cujo produto de solubilidade seja eventualmente ultrapassado, SCHWERTMANN (1988).

2.4. Transformações do enxofre em solos inundados

A principal reação envolvendo enxofre em solos inundados, segundo PONNAMPERUMA (1972), é a sua redução de SO_4^{-2} para sulfetos. Ainda para o referido autor, o principal produto da redução de enxofre nestas condições é o H_2S .

A produção de sulfeto em solos inundados se dá por meio de um pequeno grupo de bactérias anaeróbicas obrigatórias do gênero *Desulfovibrio*, que usam o SO_4^{-2} como receptor final nas reações de oxidação do carbono, BLAIR et alii (1978). A redução SO_4^{-2} pode também ser observada quando NO_3 não está em concentração suficiente para *Pseudomonas putida* que é uma bactéria denitrificante. Em certas condições SH^- pode atingir concentrações elevadas e causar várias doenças fisiológicas no arroz, Freney et alii (1982) citados por SIQUEIRA (1983).

A produção de H_2S a partir da redução do sulfato, embora possa atingir níveis tóxicos para o arroz, tende a ser de pouca importância, uma vez que o sulfeto produzido normalmente combina

com metais em formas reduzidas, principalmente Fe^{+2} , Mn^{+2} e Zn^{+2} , formando compostos insolúveis, de baixa ou nenhuma disponibilidade para as plantas (CONNEL & PATRICK JR., 1969).

A precipitação de certos íons metálicos na forma de sulfetos, em solos sob inundação, tem sido mencionada como um importante mecanismo na prevenção de possíveis níveis tóxicos, tanto do íon S_2^- como dos íons metálicos, GUILHERME (1990).

ENGLER & PATRICK JR. (1975) observaram que, sob condições anaeróbicas, MnS , FeS , ZnS , CuS e HgS eram altamente estáveis, e embora, em alguns casos, a alta solubilidade de alguns compostos permitisse a elevação dos teores de H_2S a níveis tóxicos, este era oxidado na região da rizosfera do arroz, sendo posteriormente absorvido na forma oxidada.

Assim, conforme PONNAMPERUMA (1972), a redução do sulfato em solos inundados, pode trazer as seguintes implicações para a cultura do arroz:

- a) O suprimento de enxofre pode tornar-se insuficiente;
- b) Zn^{+2} e Cu^{+2} podem ser transformados em sulfetos insolúveis, causando deficiências desses micronutrientes para as plantas;
- c) A toxicidade de H_2S pode ocorrer em solos com baixo teor de ferro.

2.5. Toxicidade de ferro em arroz irrigado

Dentre as principais limitações de micronutrientes ao

cultivo de arroz irrigado, destaca-se a toxicidade de ferro, PONNAMPERUMA (1975).

O distúrbio fisiológico atribuído a essa toxicidade vem sendo destacado há muitos anos. Ponnamperuma et alii (1955), citados por FREIRE et alii (1984), estudando a influência da intensidade de redução de um solo submerso sobre o desenvolvimento e produção de arroz, verificaram que alguns tratamentos exibiam sintomas que poderiam ser atribuídos à toxicidade de ferro. Esses sintomas eram bastante semelhantes aos de uma doença largamente difundida em países da Ásia e de causa desconhecida naquela época.

FAGERIA (1984), relata que os sintomas da toxicidade de ferro em lavouras de arroz irrigado são os seguintes:

- a) Crescimento e desenvolvimento retardados;
- b) Redução do perfilhamento;
- c) Folhas amareladas e
- d) Raízes curtas, grossas, pouco ramificadas e de coloração avermelhada pela deposição de óxidos de ferro na sua superfície.

Atualmente, admite-se que a toxicidade de Fe^{+2} seja um dos fatores limitantes do rendimento de arroz irrigado no Brasil. Este problema tem sido constatado nos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais e, em menor intensidade, no Estado de Goiás, BARBOSA FILHO (1987). No Rio Grande do Sul, a toxicidade de Fe^{+2} , era raramente observada até fins da década de setenta, quando predominavam as cultivares do tipo tradicional e/ou intermediário. Porém, com o surgimento das cultivares modernas, notadamente no início da década de

oitenta, o problema passou a se manifestar com maior frequência e intensidade, GOMES et alii (1990).

Embora não existam dados concretos sobre a fração da área cultivada com arroz irrigado por inundação em que ocorre o problema, a procura de informações sobre a sua solução por parte dos extensionistas e produtores junto aos órgãos de pesquisa tem aumentado anualmente.

Segundo FREIRE et alii (1984) o distúrbio da toxicidade pode ocorrer tanto por efeito direto como indireto do ferro:

- Direto: causado pela absorção excessiva do elemento, estando relacionado com um alto nível de Fe^{+2} na solução do solo. Os teores de ferro nas folhas, em geral, estão acima do nível crítico (300 ppm).
- Indireto: altos teores de ferro na solução do solo são precipitados sobre as raízes, formando uma crosta de óxido férrico, reduzindo a capacidade do sistema radicular de absorver nutrientes, especialmente P, K, Ca e Mg, de um meio que já pode ser deficiente.

BACHA & HOSSNER (1977) verificaram que, mesmo em concentrações baixas de ferro na solução, ele pode acumular-se na raiz. Já foi verificado, entretanto, que nenhum sintoma de toxicidade de ferro se desenvolve mesmo com 1680 ppm de Fe na solução do solo. Isto torna claro que o desenvolvimento de sintomas de toxicidade de Fe é complexo, SANTOS FILHO (1987).

O mecanismo de desenvolvimento do distúrbio é ainda matéria de controvérsia, mas aparentemente, a idéia do

desequilíbrio nutricional entre Fe, Ca, Mg, K e Zn desenvolvida por HOWELLER (1973) e OTTOW et alii (1983) é a mais consistente. Tal desequilíbrio é promovido por altas concentrações relativas de Fe^{+2} na solução do solo (MOORE & PATRICK JR., 1989).

Para TANAKA et alii (1966) o nível crítico de ferro em solução de cultivo para desenvolvimento dos sintomas de toxicidade difere com a idade da planta, variedade e possivelmente com o seu estado nutricional.

ISMUNADJI & ARDJASA (1989) constataram que o baixo nível de potássio no solo induziu a toxicidade de ferro em uma variedade susceptível.

PAULA et alii (1990) verificaram que as cultivares mais tolerantes à toxicidade de Fe^{+2} , apresentaram maiores relações entre os teores de (P, K, Ca, Mg, Zn) e o teor de Fe na parte aérea das plantas, e que os teores de P, K, Ca e Mg do solo tem efeito indireto na redução da toxicidade. De acordo com DUARTE et alii (1992), as cultivares tolerantes à toxicidade de ferro revelam melhor estado nutricional, com tendência a apresentarem maiores teores de N, P e Ca no tecido, o que está relacionado à menor suscetibilidade aos sintomas de amarelecimento.

Os efeitos da adubação e da calagem sobre a toxicidade de ferro e produtividade na cultura do arroz irrigado são tratados com detalhe nos trabalhos de CHEN et alii (1980), FAGERIA et alii (1981), BARBOSA FILHO et alii (1983), FREIRE et alii (1985), LOPES (1987) e FISHER et alii (1990).

2.6. Considerações gerais sobre o sulfato de cálcio (gesso agrícola)

A palavra "gesso" é aplicada a diversos tipos de sulfato de cálcio (CaSO_4), sendo que "gesso agrícola" refere-se ao sulfato de cálcio obtido como subproduto na obtenção de ácido fosfórico, utilizado na fabricação de adubos fosfatados como superfosfato triplo, fosfatos de amônio, MAP e DAP. Sabe-se que para tonelada de ácido fosfórico produzido, há uma produção de aproximadamente 4 toneladas de sulfato de cálcio, que estão sendo acumulados, evidenciando a necessidade de estudos sobre sua aplicação. Em termos de toneladas produzidas, o gesso agrícola é atualmente a forma mais importante de CaSO_4 produzida em nível mundial, SUMMER (1992).

O gesso agrícola é um sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) apresentando-se na forma de pó branco amarelado, com uma composição semelhante à apresentada no Quadro 2.

QUADRO 2 - Composição aproximada do gesso agrícola, em percentagem.

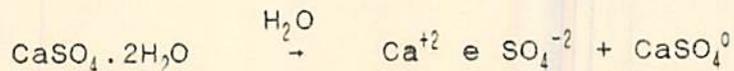
Características	%
Umidade livre	15 - 17
CaO	26 - 28
S	15 - 16
P ₂ O ₅	0,6 - 0,75
SiO ₂ (insolúvel em ácidos)	1,26
F (Fluoretos)	0,63
R ₂ O ₃ (Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	0,37

Fonte: MALAVOLTA et alii (1981).

De acordo com MALAVOLTA (1992) vários são os usos do gesso na prática agrícola:

- 1 - Fonte de Ca e S;
- 2 - Melhorador do ambiente radicular (diminuição da toxidez de alumínio);
- 3 - Correção de solos sódicos;
- 4 - Diminuição na salinidade do solo ou do adubo;
- 5 - Redução nas perdas de nitrogênio na fermentação do esterco.

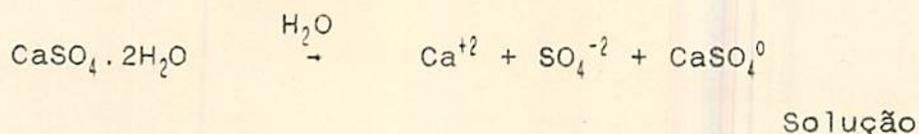
A dissociação do gesso na solução do solo irá produzir as seguintes espécies iônicas, PAVAN (1983):



Em condições de sequeiro, os íons Ca^{+2} e SO_4^{-2} irão participar das reações de troca catiônica e aniônica, respectivamente. Aproximadamente, 48% do total de cálcio solúvel está presente como CaSO_4^0 e segundo o mesmo autor, potencialmente móvel no solo. Sendo assim, a aplicação de fertilizantes, principalmente os que contém SO_4^{-2} , como o gesso, contribuem para o movimento do Ca e Mg no perfil do solo devido à formação de complexos químicos solúveis neutros (CaSO_4^0 e MgSO_4^0), sendo capaz de corrigir o Al^{+3} subsuperficialmente.

Para MALAVOLTA (1992), de modo simplificado, as reações que ocorrem quando o gesso é aplicado ao solo, são as seguintes:

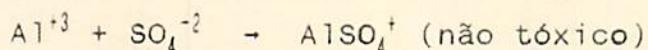
1) Dissolução e dissociação na superfície do solo:



2) Troca iônica entre o Ca^{+2} do gesso e o Al^{+3} adsorvido à argila:



3) Complexação do Al^{+3} (tóxico) pelo SO_4^{-2}

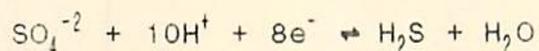


Portanto, as ligações do alumínio com ácidos fortes, por exemplo o SO_4^{-2} , proporcionam alterações na valência, raio iônico, energia livre do produto da associação, diminuindo a absorção do alumínio pelas raízes, PAVAN & BINGHAM (1982).

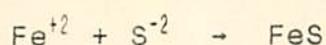
Em solos que ocorre a presença de manganês tóxico, o gesso ao ser aplicado ao solo pode acelerar ainda mais a toxidez de manganês em função da pouca estabilidade do $MnSO_4$ que é formado e que dissocia-se em Mn^{+2} e SO_4^{-2} .

O gesso pode alterar ainda outras propriedades do solo. Além da movimentação do cálcio em profundidade, o gesso pode provocar também o arrastamento de outras bases, principalmente o K e o Mg através do perfil do solo.

Entretanto, espera-se outro comportamento do gesso agrícola em condições de solo inundado (ambiente de redução), onde após a dissociação deste produto em Ca^{+2} e SO_4^{-2} , o sulfato sofrerá redução:



e o gás sulfídrico produzido poderá reagir com o ferro formando FeS insolúvel em condições de inundação:



com o que fica potencialmente diminuído o perigo da toxicidade de Fe^{+2} e do H_2S , à cultura do arroz, MALAVOLTA et alii (1981).



3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material de solo

Foram utilizados materiais de duas classes de solos de várzea (Solo Orgânico e Glei Pouco Húmico), provenientes da Fazenda Experimental da EPAMIG, localizada no município de Lambari, região sul do Estado de Minas Gerais.

O material de solo foi coletado na camada de 0-20 cm de profundidade nos dois solos, tomando-se o cuidado de retirar a vegetação presente na superfície. Posteriormente, este material foi seco ao ar (à sombra) e peneirado em malha de 2 mm de abertura, constituindo-se na fração terra fina seca ao ar (TFSA), da qual foram retiradas sub-amostras para caracterização física e química do material de solo.

3.2. Análises de caracterização dos solos

3.2.1. Análises físicas

A análise granulométrica foi feita por dispersão das amostras utilizando princípios químicos (NaOH 0,1N) e físicos (agitação com alta rotação). A fração areia (2 - 0,05 mm) foi obtida por tamizagem. As frações silte (0,05 - 0,002 mm) e argila (menor que 0,002 mm) foram determinadas segundo o método da pipeta conforme DAY (1965). O volume total de poros (VTP) do material de solo foi calculado a partir da expressão $VTP = 100 [1 - (Ds/Dp)]$ (VOMOCIL, 1965), sendo a densidade do solo (Ds), determinada com base na densidade do material de solo no vaso de cultivo, e a densidade de partículas (Dp) determinada pelo método do picnômetro (BLAKE, 1965). O Quadro 3 mostra o resultado dessas análises.

QUADRO 3 - Características físicas das classes de solo estudadas.

Características físicas	Solo	
	HGP	HO
Areia (%)	47	37
Silte (%)	31	43
Argila (%)	22	20
Ds (g/cm ³)	0,94	0,66
Dp (g/cm ³)	2,41	2,10
VTP (%)	61,0	68,5

3.2.2. Análises químicas

As análises do complexo sortivo (Ca, Mg, K e Al), P disponível, micronutrientes (Cu, Zn, Fe e Mn), $Fe_2O_3(s)$ (ataque sulfúrico) e pH H_2O foram realizadas conforme VETTORI (1969), com modificações, EMBRAPA (1979), onde Ca, Mg e Al foram extraídos com KCl 1N; P, K, Cu, Zn, Fe e Mn pelo HCl 0,05N + H_2SO_4 0,025N (extrator de Mehlich-1). O enxofre na forma de sulfato (SO_4^{-2}) foi determinado conforme BARDSLEY & LANCASTER (1965). Também foi realizada a determinação da acidez potencial (H + Al) conforme RAIJ et alii (1987).

O carbono orgânico foi determinado por oxidação com dicromato de potássio, segundo EMBRAPA (1979).

O ferro solúvel em oxalato de amônio (Fe_0) foi determinado conforme SCHWERTMANN (1964), realizando-se apenas uma extração.

O Quadro 4 apresenta as análises químicas de caracterização inicial dos materiais de solos utilizados no presente estudo.

QUADRO 4 - Características químicas dos solos utilizados no experimento.

	Solo	
	HGP	HO
pH H ₂ O	5,4	5,5
P (ppm)	20	5
K (ppm)	101	34
Ca (meq/100 cm ³)	2,2	3,8
Mg (meq/100 cm ³)	1,2	0,5
Al (meq/100 cm ³)	0,9	2,3
H + Al (meq/100 cm ³)	6,3	18,6
S (meq/100 cm ³)	3,7	4,4
t (meq/100 cm ³)	4,6	6,7
CTC (meq/100 cm ³)	10,0	23,0
m (%)	20	34
V (%)	37	19
SO ₄ ⁻² (ppm)	12	8
Matéria Orgânica	4,3	23,8
Fe ₀ (%)	0,68	0,34
Fe ₂ O ₃ (s) (%)	4,2	1,8
Fe (ppm)	590	147
Zn (ppm)	5,5	1,8
Cu (ppm)	5,3	1,4
Mn (ppm)	88,0	8,7

3.3. Instalação e condução do experimento

O experimento foi instalado em casa-de-vegetação, no Departamento de Ciência do Solo da ESAL, Lavras, MG.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial, utilizando-se 2 solos de várzea (HO e HGP), 2 doses de ferro (0 e 200 ppm) e seis tratamentos de controle da toxidez de ferro (quatro doses de gesso e duas de calcário).

As doses de gesso aplicadas foram: G_0 (0,0); G_1 (0,5); G_2 (1,0) e G_3 (2,0 ton/ha). As doses de calcário foram calculadas para fornecer as mesmas quantidades de cálcio fornecidas pelas doses 1,0 e 2,0 toneladas de gesso/ha, de modo a avaliar a influência do cálcio isoladamente no controle da toxidez de ferro.

Os tratamentos aplicados aos 2 solos em 4 repetições constituíram 96 vasos plásticos (parcelas) contendo 10 dm³ de solo (TFSA). Esses vasos possuem uma capsula porosa de porcelana que permite a coleta da solução do solo, conforme metodologia descrita por HOSSNER & PHILLIPS (1973).

As amostras de solo que receberam 200 ppm de ferro na forma de cloreto férrico, para induzir a toxidez, foram incubadas por um mês. Nesse período, o solo foi mantido inundado.

Posteriormente, os tratamentos com gesso e calcário calcítico foram aplicados com devida homogeneização destes materiais com as amostras de solo, também sendo deixados em incubação pelo período de um mês. Para proporcionar condições

reduzidas foi mantida uma lâmina de água de cerca de 2 a 3 cm de espessura em todos os vasos.

As coletas da solução do solo foram realizadas quinzenalmente a partir da aplicação do gesso e do calcário calcítico até a colheita do experimento. A determinação do ferro em solução foi realizada por colorimetria, pelo método da ortofenantrolina, segundo KRISHNA MURTI et alii (1966).

Cada vaso foi cultivado com três plantas de arroz da variedade INCA (que é uma das variedades atualmente recomendada para o cultivo de arroz inundado no Estado de Minas Gerais). As sementes foram previamente colocadas para germinar em substrato de vermiculita, e as mudas, transplantadas para os vasos plásticos 20 dias após a semeadura.

O cultivo foi conduzido até o final do ciclo (produção), sendo que nesse período o solo foi mantido inundado (lâmina d'água de 2-3 cm).

Após o período de incubação com gesso e calcário, todas as parcelas receberam uma adubação básica de plantio, com exceção do nitrogênio e potássio que foram parcelados (1/3 no plantio e 2/3 em cobertura).

A adubação com macro e micronutrientes, conforme FAGERIA et alii (1982), para experimentos com arroz em casa-de-vegetação, constou da aplicação de: 260 mg de N (uréia); 200 mg P e 40 mg de N (MAP); 200 mg de K (KCl); 60 mg de Mg ($MgCl_2$); 1 mg de B (H_3BO_3); 0,5 mg de Cu ($CuCl_2$); 0,2 mg de Mo ($MoO_3 \cdot 2H_2O$) e 5 mg de Zn ($ZnCl_2$) por kg de solo.

Antes do plantio (após a incubação com gesso e calcário), foram determinados no solo, as quantidades de ferro solúvel pelo extrator de Mehlich-1, segundo VETTORI (1969).

Ao final do cultivo, o material vegetal coletado foi seco em estufa com circulação de ar, 60-65°C até peso constante, realizando-se em seguida a pesagem da matéria seca da palha (folha + colmo), raiz e de grãos cheios.

A palha (folha + colmo) foi moída em moinho tipo Wiley, provido de peneira de aço inoxidável com 20 malhas por polegada e acondicionada em frascos de vidro para posteriores análises químicas. O número de perfilhos também foi um parâmetro considerado por ocasião da colheita, além de ser realizada a avaliação visual dos sintomas de toxicidade de ferro na parte aérea e raiz.

3.4. Análises químicas da matéria seca

As amostras da palha (folha + colmo) foram submetidas à digestão nítrico-perclórica em bloco digestor, para determinação do P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn, de acordo com MALAVOLTA et alii (1989).

O nitrogênio foi dosado pelo método de Kjeldahl. Para a determinação do boro, as amostras da palha foram submetidas à digestão por via seca (incineração), quantificando-se posteriormente o seu conteúdo através da técnica descrita por MALAVOLTA et alii (1989).

3.5. Análise estatística dos dados

Foi realizada análise de variância (Teste F) através do programa MSTAT, de maneira independente para cada solo, para os seguintes parâmetros: produção de matéria seca da palha (folha + colmo), raiz e grãos cheios, número de perfilhos por ocasião da colheita, além da concentração de macro e micronutrientes na palha.

Os teores de ferro solúvel extraídos por Mehlich-1 e a concentração de ferro na solução, avaliados nas diferentes épocas de coleta, também foram submetidos a análise de variância, de maneira independente para os solos HO e HGP.

Na diferenciação dos efeitos dos tratamentos e de épocas de coleta da solução do solo, optou-se pela aplicação do teste de médias Tukey, ao nível de significância de 5%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Efeito dos tratamentos sobre a concentração de ferro na solução do solo

4.1.1. Considerações gerais

A concentração de ferro na solução foi muito influenciada pelo manejo d'água durante o período estudado. As menores concentrações de ferro na solução dos dois solos considerados (HGP e HO), foram observadas logo após o transplante das mudas. Nesse período a umidade do solo estava próxima à capacidade de campo e, certamente ocorreu oxidação do Fe^{+2} , com conseqüente redução na concentração em solução.

De acordo com BARBOSA FILHO (1987), a dinâmica de transformação do Fe^{+2} segue uma curva aproximadamente assintótica. A concentração de ferro reduzido na solução do solo aumenta com o tempo de submersão, alcança um máximo e depois cai até atingir um nível de estabilização, que persiste por vários meses.

Entretanto, no presente estudo, durante o período de cultivo, tempo em que o solo permaneceu inundado, não foi observado

uma tendência de estabilização na concentração de Fe^{+2} na solução do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por GOMES et alii (1987), estudando a dinâmica do Fe^{+2} em solução, de três solos de várzea do RS, durante 14 semanas. Os autores mencionam que o comportamento da curva que descreve a taxa de produção de Fe solúvel no solo vai depender do pH, do teor de matéria orgânica do solo, da temperatura, da natureza e teor de óxidos de ferro. A grande variabilidade horizontal e vertical mesmo em curtas distâncias das características e propriedades dos solos de várzea explica este fato.

4.1.2. Concentração de ferro na solução do solo

As concentrações de ferro na solução do solo, em função da aplicação do ferro e do gesso ou calcário, são mostrados na Tabela 1.

Observa-se que o solo HO apresentou menores valores de concentração de ferro em solução do que o HGP. Apenas nos tratamentos onde houve adição de 200 mg de Fe/dm^3 solo, a concentração de ferro na solução do solo HO atingiu valores próximos aos observados no HGP sem a adição de ferro. Essa diferença na concentração de ferro em solução, quando se comparam os dois solos, é explicada pelo maior teor inicial de ferro do solo HGP (Quadro 4).

TABELA 1 - Concentração de ferro na solução do solo em função dos tratamentos aplicados.

	Fe na solução (ppm)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	102 a	215 b	159 b	9 b	49 e	29 e
G ₁	99 a	243 a	171 a	10 b	78 c	44 c
G ₂	52 c	195 c	124 c	11 b	89 b	50 b
G ₃	47 c	210 b	129 c	23 a	111 a	67 a
C ₁	76 b	143 d	110 d	7 b	76 c	42 c
C ₂	79 b	185 c	132 c	10 b	60 d	35 d
Média	76 B	199 A		12 B	78 A	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

GOMES et alii (1987) também constataram que o solo Orgânico apresentou menores valores de ferro solúvel, quando foram comparadas as concentrações de ferro em solução, de solos utilizados com arroz irrigado no RS.

A adição de 200 mg de Fe/dm³ solo, promoveu um aumento médio na concentração de ferro em solução, da ordem de 2,6 e 6,5 vezes nos solos HGP e HO, respectivamente.

No solo HGP, a aplicação de gesso resultou em menores

concentrações de Fe^{+2} em solução, quando não foi adicionado ferro. Esta redução da concentração de ferro em solução foi observada nas duas maiores doses de gesso ($G_2 = 1,0$ e $G_3 = 2,0$ ton/ha).

A combinação do sulfeto com o ferro reduzido, explica a diminuição da concentração de Fe^{+2} em solução nestes tratamentos.

Na menor dose de gesso ($G_1 = 0,5$ ton/ha), a quantidade de sulfato adicionada pode não ter sido suficiente para promover a formação de FeS .

No solo HO, a aplicação de gesso ou calcário, resultou em maiores concentrações de ferro em solução, principalmente quando foi adicionado ferro. Isto pode ser explicado pela alta CTC deste solo (Quadro 4), adsorvendo maiores quantidades de Fe^{+2} trocável, antes que fossem formadas quantidades significativas de FeS . Assim, o cálcio adicionado pelo gesso ou calcário, pode ter deslocado o ferro do complexo de troca para a solução do solo.

Entretanto, em todos os tratamentos, a concentração de ferro em solução no solo HO, está bem abaixo do nível crítico de toxidez estabelecido por TANAKA et alii (1966).

4.2. Efeito dos tratamentos sobre o teor de enxofre e ferro no solo

Na Tabela 2, é mostrado o resumo das análises de variância dos teores de enxofre ($S-SO_4^{2-}$) e ferro disponíveis nos dois solos estudados.

Observam-se efeitos altamente significativos da aplicação do gesso ou calcário e de ferro sobre os teores de enxofre ($S-SO_4^{2-}$) e ferro disponível. Apenas a adição de 200 mg Fe/dm³ solo, não resultou em alteração significativa na quantidade de ferro disponível extraído pelo Mehlich-1.

TABELA 2 - Resumo das análises de variância dos teores de enxofre e ferro no solo.

Nutriente	Solo							
	HGP				HO			
	Causas de variação ¹				Causas de variação ¹			
	A	B	AxB	CV (%)	A	B	AxB	CV (%)
Valor de F				Valor de F				
S	37,50**	518,09*	6,45**	11,17	130,20**	1076,11**	23,50**	8,97
Fe	0,02ns	13,96**	4,16**	7,55	0,96ns	6,81**	4,03**	10,09

¹ A: Dose de ferro

B: Gesso/Calcário

CV (%): Coeficiente de variação

** Significativo ao nível de 1%

* Significativo ao nível de 5%

ns Não significativo

4.2.1. Enxofre

O efeito dos tratamentos nos teores de enxofre ($S-SO_4^{-2}$) disponível nos dois solos estudados, está mostrado na Tabela 3.

Nota-se que a adição de gesso promoveu um efeito marcante no teor de SO_4 disponível nos dois solos.

O solo HO apesar de possuir maior teor de matéria orgânica, tendeu a apresentar menores teores de S (SO_4) quando comparado ao solo HGP. De acordo com NASCIMENTO & MORELLI (1980) não se deve esperar uma mineralização do enxofre orgânico proporcional ao seu teor no solo, pois não se observa correlação significativa entre o enxofre total ou enxofre orgânico e a forma de sulfato.

A aplicação da maior dose de gesso ($G_3 = 2,0$ ton/ha) elevou os teores de S (SO_4) a valores próximos a 60 ppm nos dois solos estudados. Isto indica que grande parte do sulfato adicionado não sofreu redução no intervalo de 1 mês, já que a determinação do S (SO_4) disponível foi realizada após a incubação com gesso, período em que o solo foi mantido inundado.

A adição de 200 mg Fe/dm³ solo, propiciou uma redução nos teores de SO_4 disponível nos dois solos, o que pode ser explicado pela maior formação de FeS nesses tratamentos.

TABELA 3 - Teor de enxofre ($S-SO_4^{-2}$) no solo em função dos tratamentos aplicados.

	SO_4^{-2} (ppm)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	8,31 d	6,37 d	7,34 d	5,70 d	3,86 d	4,78 d
G ₁	29,27 c	15,78 c	22,52 c	20,90 c	11,24 c	16,07 c
G ₂	39,59 b	31,52 b	35,55 b	41,20 b	24,71 b	32,96 b
G ₃	64,58 a	62,72 a	63,65 a	56,52 a	53,24 a	54,88 a
C ₁	10,54 d	8,14 d	9,34 d	5,73 d	3,75 d	4,74 d
C ₂	9,43 d	8,13 d	8,78 d	5,53 d	3,89 d	4,70 d
Média	26,95 A	22,11 B		22,60 A	16,78 B	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

4.2.2. Ferro

A Tabela 4 mostra os teores de ferro disponível extraídos pelo Mehlich-1 em função dos tratamentos aplicados nos dois solos.

Observa-se que a aplicação de gesso, reduziu os teores de ferro disponível nos dois solos, principalmente nas maiores doses aplicadas ($G_2 = 1,0$ e $G_3 = 2,0$ ton/ha).

Nos tratamentos onde foi aplicado calcário, só ocorreu uma redução significativa dos teores de ferro disponível no solo HGP. No HO, em função do seu maior poder tampão, os teores de ferro extraídos pelo Mehlich-1 nos tratamentos com calcário foram semelhantes aos observados na testemunha (G_0).

TABELA 4 - Teor de ferro no solo em função dos tratamentos aplicados.

	Fe (ppm)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G_0	621 ab	712 a	666 a	122 ab	136 ab	129 ab
G_1	661 a	605 b	633 ab	113 b	120 abc	117 b
G_2	547 b	532 c	539 c	125 ab	129 abc	127 ab
G_3	555 b	479 c	517 c	111 b	109 bc	110 b
C_1	572 b	567 bc	569 bc	146 a	108 c	127 ab
C_2	529 b	578 b	554 c	148 a	140 a	144 a
Média	581 A	579 A		127 A	124 A	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

A determinação do ferro no solo extraído pelo Mehlich-1 representa a quantidade total desse micronutriente adsorvido na

fase sólida e que se apresenta em equilíbrio com uma dada quantidade na solução do solo. Observando a Tabela 4, verifica-se que a adição de ferro (200 mg/dm^3 solo) não alterou os teores de ferro extraído pelo Mehlich-1 nos dois solos estudados.

4.3. Efeito dos tratamentos no teor de macronutrientes na palha

O resumo das análises de variância dos teores de macronutrientes na palha de arroz, para os dois solos estudados, está mostrado na Tabela 5.

De maneira geral, observa-se efeitos altamente significativos das doses de ferro (0 e 200 mg/dm^3 solo) e da aplicação de gesso ou calcário nos teores de macronutrientes na palha, à exceção do fósforo, quando as plantas foram cultivadas no HGP. Vários trabalhos têm demonstrado que a absorção de macronutrientes, especialmente P, K e Ca, é bastante afetada pelo excesso de Fe no solo (CHEN et alii, 1980), PAULA et alii (1990) e FISCHER et alii (1990).

No presente estudo, a adição de 200 mg de Fe por dm^3 de solo, reduziu na maioria das vezes a absorção de macronutrientes pela planta. Entretanto, não foram observados sintomas de toxicidade de ferro, em função do alto nível de nutrientes utilizado no experimento conforme FAGERIA et alii (1982). Segundo BARBOSA FILHO et alii (1983), o nível tóxico de Fe^{+2} que propicia o aparecimento de sintomas de toxicidade vai depender do balanço

nutricional da planta.

TABELA 5 - Resumo das análises de variância dos teores de macronutrientes na palha de arroz.

Nutrientes	Solo							
	HGP				HO			
	Causas de variação ¹			CV (%)	Causas de variação ¹			CV (%)
	A	B	A x B		A	B	A x B	
Valor de F			Valor de F					
N	129,40**	34,93**	3,70**	7,75	161,69**	1255,92**	29,11**	4,21
P	2,91ns	2,60ns	0,82ns	8,11	1,49ns	57,12**	3,84**	11,45
K	130,34**	28,64*	8,57**	6,91	105,56**	31,72**	38,88**	11,22
Ca	9,14**	8,08**	3,00*	8,94	3,37ns	4,84**	8,12**	8,40
Mg	67,45**	1,98ns	2,89ns	7,90	49,80**	2,63*	7,29**	6,74
S	6,26*	37,41**	2,03*	16,9	16,32*	89,78**	8,60**	26,53

¹ A: Dose de Fe

B: Gesso/Calcário

** Significativo ao nível de 1%

* Significativo ao nível de 5%

ns Não significativo

4.3.1. Nitrogênio

Os teores de nitrogênio na palha do arroz em função dos diferentes tratamentos são apresentados na Tabela 6.

Observa-se efeito pronunciado dos tratamentos no teor de nitrogênio na palha do arroz, nos dois solos estudados.

A adição de gesso resultou numa diminuição dos teores de nitrogênio. Esse decréscimo está relacionado a um efeito de

diluição, uma vez que a omissão de gesso promoveu uma redução na biomassa da palha.

A adição de ferro provocou um aumento no teor de nitrogênio das plantas, em todos os tratamentos, o que concorda com o ocorrido no trabalho de FISHER et alii (1990). O menor crescimento apresentado pelas plantas dos tratamentos onde foi adicionado ferro, promoveu uma maior concentração de nitrogênio na palha.

A menor disponibilidade de enxofre também pode ter contribuído para um maior teor de nitrogênio nos tratamentos que não receberam gesso. Há diversas evidências na literatura com relação ao acúmulo de formas de nitrogênio não protéico, quando diferentes espécies de plantas são submetidas ao estresse de enxofre, DIJKSHOORN & VAN WIJK (1967).

Observa-se também que as plantas cultivadas no solo HO apresentaram, em geral, maiores teores de N no tecido, do que aquelas cultivadas no HGP. Isto pode ter ocorrido por um efeito de diluição, pois a produção de matéria seca da palha das plantas cultivadas no solo HGP foi maior que no solo HO.

TABELA 6 - Teor de nitrogênio na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados.

	Teor de N (%)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	1,00 a	1,40 a	1,20 a	1,59 a	1,89 b	1,74 b
G ₁	0,75 b	0,96 d	0,85 b	0,64 bc	0,64 c	0,64 c
G ₂	0,75 b	1,00 cd	0,88 b	0,56 c	0,68 c	0,62 c
G ₃	0,69 b	1,05 cd	0,87 b	0,69 b	0,64 c	0,67 c
C ₁	1,08 a	1,30 ab	1,19 a	1,66 a	2,06 a	1,86 a
C ₂	1,04 a	1,15 bc	1,09 a	1,69 a	2,06 a	1,88 a
Média	0,88 B	1,14 A		1,14 B	1,33 A	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

4.3.2. Fósforo

A Tabela 7 mostra os teores de fósforo na palha do arroz em função dos tratamentos nos dois solos estudados.

Os teores de fósforo nas plantas cultivadas no HGP foram semelhantes e suficientes em todos os tratamentos mostrando a alta disponibilidade do elemento nesse solo, conforme demonstrado no

Quadro 4.

Apesar da deficiência de enxofre provocar decréscimo na concentração de carboidratos solúveis que seriam a principal fonte de energia para a absorção do ânion fosfato, CARVALHO (1987), no solo HO, a aplicação de gesso resultou em menores teores de fósforo na palha do arroz, devido provavelmente a uma inibição competitiva entre sulfato e fosfato, reduzindo assim a absorção de P, MALAVOLTA (1980).

TABELA 7 - Teor de fósforo na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados.

	Teor de P (%)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	0,23	0,22	0,23 a.	0,22 a	0,20 a	
G ₁	0,21	0,22	0,22 a	0,15 bc	0,10 b	
G ₂	0,24	0,24	0,24 a	0,13 c	0,13 b	
G ₃	0,25	0,24	0,24 a	0,12 c	0,10 b	
C ₁	0,24	0,24	0,24 a	0,20 ab	0,22 a	
C ₂	0,23	0,21	0,22 a	0,20 ab	0,22 a	
Média	0,23 A	0,23 A		0,17 A	0,16 A	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

4.3.3. Potássio

O efeito dos tratamentos nos teores de potássio na palha do arroz para os dois solos estudados é mostrado na Tabela 8.

Observa-se que as doses de ferro e a aplicação gesso ou calcário afetaram de maneira diferenciada os teores de potássio na palha, quando se comparam os dois solos.

Os maiores teores de K no tecido, foram obtidos com a aplicação da dose máxima de gesso (2 ton/ha) no solo HGP, e com o fornecimento de calcário no solo HO.

A adição de ferro provocou uma redução nos teores de K na palha, quando as plantas foram cultivadas no HGP. Resultados semelhantes foram obtidos por FAGERIA et alii (1981), quando os autores observaram que a absorção de K diminuiu com o aumento da concentração de ferro em solução nutritiva. Já no solo HO, a adição de Fe (200 mg/dm^3) aumentou a concentração de potássio na palha, em função dos menores teores iniciais de ferro desse solo (Quadro 4).

Segundo FISCHER et alii (1990) é consenso que plantas com sintomas de toxicidade de ferro possuem menores teores de potássio que plantas saudias. A toxidez de ferro diminui o fornecimento de carboidratos para as raízes das plantas, conseqüentemente, a absorção de nutrientes é dificultada, especialmente do potássio.

TABELA 8 - Teor de potássio na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados.

	Teor de K (%)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	1,22 ab	0,95 ab	1,08 ab	0,64 ab	0,63 c	0,64 b
G ₁	1,20 ab	0,86 b	1,03 b	0,49 b	0,66 c	0,57 b
G ₂	1,11 abc	0,96 ab	1,04 b	0,66 ab	0,55 c	0,60 b
G ₃	1,24 a	1,06 a	1,15 a	0,61 ab	0,70 c	0,65 b
C ₁	1,07 bc	1,05 a	1,06 ab	0,51 ab	1,36 a	0,94 a
C ₂	0,98 c	0,55 c	0,76 c	0,68 a	1,13 b	0,90 a
Média	1,14 A	0,90 B		0,60 B	0,84 A	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

4.3.4. Cálcio

O efeito dos tratamentos nos teores de cálcio na matéria seca da palha do arroz para os dois solos estudados é apresentado na Tabela 9.

Os teores de cálcio encontrados na matéria seca da palha, bem superiores ao nível crítico de deficiência estabelecido por

YOSHIDA (1981), conduzem à suposição de que nos solos estudados existia cálcio suficiente para a nutrição adequada das plantas. Assim, o fornecimento de gesso ou calcário não aumentou a concentração de cálcio na palha. Entretanto, a aplicação de ferro, reduziu os teores de Ca na palha, quando as plantas foram cultivadas no solo HGP. Resultados semelhantes foram obtidos por BARBOSA FILHO et alii (1983) quando trabalharam com dois solos da região da Zona da Mata, em Minas Gerais.

TABELA 9 - Teor de cálcio na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados.

	Teor de Ca (%)					
	Solo			Solo		
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	0,41 a	0,35 ab	0,38 a	0,58 ab	0,52 a	0,55 a
G ₁	0,39 ab	0,33 abc	0,36 a	0,43 c	0,49 ab	0,46 ab
G ₂	0,35 abc	0,33 abc	0,34 a	0,59 a	0,43 b	0,51 ab
G ₃	0,34 bc	0,38 a	0,36 ab	0,43 c	0,51 ab	0,47 ab
C ₁	0,32 c	0,30 bc	0,31 b	0,50 bc	0,47 ab	0,49 b
C ₂	0,32 c	0,28 c	0,30 b	0,51 abc	0,50 ab	0,50 b
Média	0,36 A	0,33 B		0,51 A	0,49 A	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

4.3.5. Magnésio

Os teores de magnésio encontrados na matéria seca da palha em função dos tratamentos, são mostrados na Tabela 10.

Como o magnésio é translocado das folhas e colmos para os grãos MALAVOLTA (1980), observou-se pequena variação nos teores desse nutriente na palha. Os valores ficaram compreendidos entre 0,14 e 0,19% nas plantas cultivadas no HGP e 0,18 e 0,25% no HO.

Yoshida et alii (1969) citados por MORAES (1973a) reportam que os sintomas de deficiência de magnésio são aparentes quando as quantidades deste nutriente nos talos e folhas do arroz, são da ordem de 0,10% em relação ao peso. Assim, as concentrações de magnésio medidas na palha foram, em todos os tratamentos, superiores a esse nível crítico.

A aplicação de gesso ou calcário não afetou os teores de magnésio na palha das plantas cultivadas no HGP, devido a alta disponibilidade desse nutriente nesse solo (Quadro 4).

Nos dois solos estudados a aplicação de ferro (200 mg/dm³) resultou em maiores níveis de magnésio na palha. Isto pode ter ocorrido, em decorrência do deslocamento do magnésio adsorvido ao complexo de troca para a solução do solo pelo ferro que foi adicionado aos solos.

TABELA 10 - Teor de magnésio na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados.

	Teor de Mg (%)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	0,15	0,19	0,17 a	0,21 abc	0,24 ab	0,22 ab
G ₁	0,15	0,15	0,15 a	0,22 ab	0,25 ab	0,23 a
G ₂	0,14	0,18	0,16 a	0,23 a	0,25 b	0,24 ab
G ₃	0,14	0,19	0,16 a	0,22 abc	0,22 ab	0,22 ab
C ₁	0,15	0,19	0,17 a	0,19 bc	0,23 ab	0,21 b
C ₂	0,16	0,18	0,17 a	0,18 c	0,23 a	0,22 ab
Média	0,15 B	0,18 A		0,21 B	0,24 A	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

4.3.6. Enxofre

O efeito dos tratamentos nos teores de enxofre na matéria seca da palha do arroz, para os dois solos estudados é mostrado na Tabela 11.

Observa-se que a adição de gesso nos dois solos, promoveu um acentuado incremento na concentração de enxofre na palha das

plantas. Vários trabalhos têm salientado o efeito do gesso como fonte de enxofre para a cultura do arroz (SOUZA et alii, 1992).

TABELA 11 - Teor de enxofre na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados.

	Teor de S (%)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	0,02 d	0,03 c	0,02 c	0,02 c	0,03 c	0,03 cb
G ₁	0,05 bc	0,06 b	0,06 b	0,05 bc	0,03 c	0,04 c
G ₂	0,06 ab	0,08 ab	0,07 b	0,08 b	0,06 b	0,07 b
G ₃	0,08 a	0,09 a	0,09 a	0,18 a	0,11 a	0,15 a
C ₁	0,02 d	0,03 c	0,03 c	0,03 c	0,03 c	0,03 c
C ₂	0,03 cd	0,01 c	0,02 c	0,02 c	0,03 c	0,03 c
Média	0,04 A	0,05 A		0,06 A	0,04 B	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Os maiores teores de enxofre na palha foram obtidos com a maior dose de gesso (2 ton/ha), valores esses de 4 a 9 vezes superiores aos teores encontrados nos tratamentos com calcário e

testemunha. Nesses tratamentos, a pequena absorção de enxofre, limitou consideravelmente o desenvolvimento das plantas, sendo observados sintomas de deficiência de enxofre.

A adição de ferro reduziu os teores de enxofre na palha das plantas cultivadas no HO. Neste solo, o sulfeto ferroso proveniente da combinação do H_2S (ácido sulfídrico) com o Fe^{+2} adicionado, pode ter diminuído a quantidade de enxofre disponível para as plantas.

4.4. Efeito dos tratamentos no teor de micronutrientes na palha

O resumo das análises de variância dos teores de micronutrientes na palha de arroz, para os dois solos estudados, está mostrado na Tabela 12.

Observa-se de uma maneira geral efeitos altamente significativos das doses de ferro (0 e 200 mg/dm³ solo) e da aplicação de gesso ou calcário na concentração de micronutrientes na palha do arroz.

Apesar dos micronutrientes cobre e zinco não participarem diretamente em sistemas de oxi-redução em solos, eles podem ter sua solubilidade influenciada devido a interações com outros compostos ou íons resultantes das condições de redução dos solos inundados, GUEDES (1983). Assim, a redução do sulfato contido no gesso, as alterações proporcionadas pela aplicação de calcário nas reações de troca, e a redução do Fe^{+3} adicionado, alteraram a disponibilidade

dos micronutrientes para as plantas.

A adição de ferro nos dois solos, proporcionou na maioria das vezes, um aumento no teor de cobre, ferro, manganês e zinco na palha do arroz. Interações antagônicas entre Fe e outros micronutrientes (Mn, Zn e Cu) têm sido observadas em diversos trabalhos em solos aerados. Entretanto, no presente estudo, as quantidades excessivas de ferro adicionadas (200 mg/dm³) solo) podem ter combinado com H₂S (proveniente da redução do sulfato) formando FeS, e desta forma, deixando maior quantidade de zinco, cobre e manganês em solução, favorecendo a absorção destes pelas plantas.

TABELA 12 - Resumo das análises de variância dos teores de micronutrientes na palha de arroz.

Micro-nutrientes	Solo							
	HGP				HO			
	Causas de variação ¹			CV (%)	Causas de variação ¹			CV (%)
	A	B	A x B		A	B	A x B	
Valor de F			Valor de F					
Cu	7,64ns	80,46**	14,39**	8,64	294,98**	16,78**	1,97ns	6,61
Mn	63,43**	11,60**	6,97**	3,38	0,07ns	61,54**	8,55**	8,53
Zn	74,90**	16,30**	3,31**	5,55	4,19*	7,67**	1,41ns	11,73
Fe	2713,60**	160,90**	64,83**	6,50	170,18**	56,68**	5,74**	14,28

¹ A: Dose de Fe

B: Gesso/Calcário

** Significativo ao nível de 1%

* Significativo ao nível de 5%

ns Não significativo

4.4.1. Cobre

A Tabela 13 mostra os teores de cobre na palha do arroz em função dos tratamentos.

No solo HGP, a aplicação de gesso resultou numa diminuição dos teores de cobre na palha das plantas. As maiores concentrações de cobre no tecido foram observadas nos tratamentos onde foi aplicado calcário.

De acordo com PONNAMPERUMA (1972) a redução dos solos devido a inundação provoca a redução do sulfato a sulfeto, o que pode provocar uma diminuição na disponibilidade de cobre. A redução do sulfato do gesso e a conseqüente formação do sulfeto de cobre, um composto de baixa ou nenhuma disponibilidade para as plantas, explica os menores teores de cobre encontrados no tecido, nos tratamentos onde foi aplicado gesso. Entretanto, os teores de cobre na palha nesses tratamentos, estão acima dos níveis críticos de deficiência citados para a cultura do arroz (YOSHIDA, 1981).

TABELA 13 - Teor de cobre na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados.

	Teor de Cu (ppm)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	13 c	20 b	16 cd	25	35	30 bc
G ₁	15 c	16 c	16 cd	22	34	28 cd
G ₂	19 b	17 bc	18 bc	22	31	27 cd
G ₃	23 b	18 bc	21 b	23	30	26 d
C ₁	29 a	25 a	27 a	28	36	32 ab
C ₂	32 a	26 a	27 a	27	39	33 ac
Média	22 A	20 A		24 B	34 A	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

4.4.2. Ferro

Os teores de ferro encontrados na matéria seca da palha em função dos tratamentos, são mostrados na Tabela 14.

A adição de 200 mg de Fe/dm³ solo, resultou num aumento médio na concentração de ferro na matéria seca da palha, da ordem de 567 e 145 ppm, quando as plantas foram cultivadas nos solos HGP

e HO, respectivamente.

As maiores concentrações de ferro na palha das plantas cultivadas nos dois solos, foram observadas nos tratamentos onde foi aplicado gesso.

De acordo com Ottow et alii (1982) citados por FISHER et alii (1990), compostos reduzidos de enxofre, como H_2S e FeS , podem acentuar a toxicidade de ferro, porque prejudicam os mecanismos de oxidação na superfície das raízes (rizosfera). Como o ferro é o micronutriente mais influenciado pelos processos de oxi-redução em solos inundados, a absorção desse nutriente é facilitada, podendo atingir níveis tóxicos para a planta, mesmo que a sua concentração não aumente na solução do solo.

Isto explica em parte, o fato de não existir uma correlação entre o teor de ferro disponível e a toxicidade de ferro, conforme caracteriza a literatura.

Entretanto, no presente estudo as altas concentrações de ferro encontradas na palha, principalmente nos tratamentos onde foi adicionado gesso, não foram suficientes para promover a toxicidade de ferro, em função das doses ótimas dos demais nutrientes utilizados.

ABELA 14 - Teor de ferro na matéria seca da palha em função dos tratamentos.

	Teor de Fe (ppm)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	230 c	767 d	499 d	146 bc	267 c	207 c
G ₁	326 b	856 c	591 c	212 b	395 b	303 b
G ₂	297 bc	1082 b	690 b	217 b	362 b	290 b
G ₃	426 a	1281 a	854 a	323 a	567 a	445 a
C ₁	259 bc	589 e	424 e	158 bc	211 c	184 c
C ₂	239 c	605 e	421 e	119 c	238 c	179 c
Média	296 B	863 A		195 B	340 A	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

4.4.3. Manganês

Os teores de manganês na palha do arroz em função dos tratamentos, são apresentados na Tabela 15.

Observa-se que a concentração de manganês no tecido das plantas de arroz, foi influenciada de maneira distinta, pelo efeito dos tratamentos nos dois solos estudados.

A adição de ferro não alterou os teores de manganês na palha das plantas cultivadas no HO, o que pode estar relacionado ao menor teor inicial de ferro deste solo. VAN DER VORM & VAN DIEST (1979) também não observaram interação significativa na absorção de Fe-Mn em plantas de arroz cultivadas sob inundação.

TABELA 15 - Teor de manganês na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados.

	Teor de Mn (ppm)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	646 c	768 a	707 bc	519 a	607 a	563 a
G ₁	731 a	732 ab	732 ab	387 b	346 b	367 b
G ₂	718 ab	780 a	749 a	406 b	294 b	350 b
G ₃	684 abc	770 a	726 ab	376 b	333 b	355 b
C ₁	678 bc	692 b	685 c	537 a	591 a	564 a
C ₂	650 c	697 b	674 c	492 a	565 a	528 a
Média	685 B	740 A				

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

No solo HGP, que apresentava inicialmente alto teor de manganês extraído pelo Mehlich-1 (Quadro 4), as menores

concentrações de manganês na palha foram observadas quando não foi adicionado ferro. Este fato pode ser explicado pela maior formação de MnS em relação à FeS que é indisponível às plantas.

4.4.4. Zinco

Os teores de zinco na palha de arroz em função dos tratamentos são apresentados na Tabela 16.

SAJWAN & LINDAY (1986), estudando o efeito do potencial redox na deficiência de zinco em arroz inundado, observaram que em solos submersos há um aumento na disponibilidade do manganês e do ferro, os quais se tornam antagônicos ao zinco. Entretanto, no presente trabalho, a adição de ferro (200 mg/dm^3 solo) resultou num aumento no teor de zinco no tecido, indicando maior disponibilidade desse micronutriente, principalmente nos tratamentos onde foi adicionado gesso. Isto pode ter ocorrido, devido a uma maior formação de FeS em relação aq ZnS, nos tratamentos com gesso, aumentando assim, a disponibilidade de zinco para as plantas.

Observa-se que as maiores concentrações de zinco na palha, foram observadas nos tratamentos onde foi aplicado gesso. Segundo ENGLER & PATRICK JR. (1975), mesmo em condições anaeróbicas, o sulfeto de zinco formado é parcialmente oxidado no solo adjacente à zona radicular do arroz inundado, sendo o enxofre absorvido pelas plantas como SO_4^{-2} e, o zinco, liberado para a solução do solo.

TABELA 16 - Teor de zinco na palha do arroz em função dos tratamentos aplicados.

	Teor de Zn (ppm)					
	Solo					
	HGP			HO		
	S/Fe	C/Fe	Média	S/Fe	C/Fe	Média
G ₀	110 a	121 c	116 b	108	100	104 b
G ₁	120 a	149 a	135 a	120	138	129 a
G ₂	121 a	137 ab	129 a	115	118	117 ab
G ₃	107 a	143 a	133 a	115	135	125 a
C ₁	110 a	126 bc	116 b	99	99	98 b
C ₂	110 a	114 c	112 b	94	108	101 b
Média	114 B	132 A		108 B	116 A	

Na mesma coluna, valores seguidos por letras minúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

Na mesma linha, médias seguidas por letras maiúsculas distintas diferem entre si (Tukey 5%).

4.5. Efeito dos tratamentos na relação entre os teores de macro e micronutrientes e o teor de ferro, na matéria seca da palha

Com base nos resultados da análise química na palha das plantas, foi calculada a relação entre os teores de macro e micronutrientes e o teor de ferro em função dos tratamentos

(Tabelas 17 e 18).

De acordo com BARBOSA FILHO et alii (1983) o conhecimento destas relações é importante para compreender o comportamento diferencial de uma mesma cultivar de arroz em função do tipo de solo e da concentração de ferro na parte aérea, pois tem sido publicado que a severidade da toxicidade de ferro está associada, principalmente aos teores de P, K, Ca e Mg nas folhas.

Uma análise comparativa dos dados, mostra que, de uma maneira geral, o solo HO apresentou maiores relações entre os teores de macro e micronutrientes e o teor de ferro na palha que o solo HGP. Neste solo, o teor de ferro na palha foi superior ao de enxofre (relação S/Fe < 1) em todos os tratamentos, exceto naqueles onde foi aplicado gesso e não foi adicionado ferro, demonstrando o efeito do gesso como fonte de enxofre.

Observando os dados da Tabela 18, verifica-se que na maioria das vezes, a absorção de manganês pelas plantas foi maior que a de ferro. Apenas nos tratamentos onde foi aplicado gesso e ferro, as plantas apresentaram maior teor de ferro em comparação ao teor de manganês na palha.

A adição de 200 mg Fe/dm³ solo reduziu consideravelmente as relações entre os teores de macro e micronutrientes e o teor de ferro na palha das plantas cultivadas nos dois solos considerados. Entretanto, mesmo nesses tratamentos, onde as plantas apresentaram alta concentração de ferro, as relações obtidas foram maiores do que aquelas encontradas em trabalhos onde a toxicidade de ferro foi constatada (BARBOSA FILHO et alii, 1983).

TABELA 17 - Relação entre os teores de macronutrientes e o teor de ferro, na palha das plantas, em função dos tratamentos.

Tratamentos	N/Fe		P/Fe		K/Fe		Ca/Fe		Mg/Fe		S/Fe	
	S/Fe	C/Fe	S/Fe	C/Fe	S/Fe	C/Fe	S/Fe	C/Fe	S/Fe	C/Fe	S/Fe	C/Fe
	Solo HGP											
G ₀	43,48	18,25	10,00	2,87	53,04	12,38	17,83	4,56	6,52	2,48	0,87	0,39
G ₁	23,00	11,21	6,44	2,57	36,80	10,05	11,96	3,85	4,60	1,75	1,53	0,70
G ₂	25,25	9,24	9,08	2,22	37,37	8,87	11,78	3,05	4,71	1,66	2,02	0,74
G ₃	16,20	8,20	5,87	1,80	29,11	8,27	7,98	2,97	3,29	1,48	1,88	0,70
C ₁	41,70	22,07	9,27	4,07	41,31	18,17	12,35	5,09	5,79	3,22	0,77	0,51
C ₂	43,51	19,00	9,62	3,47	41,00	16,20	13,39	4,63	6,69	2,98	0,96	0,17
Solo HO												
G ₀	108,90	70,75	15,06	7,49	43,84	23,60	39,72	19,48	14,38	8,99	1,37	1,12
G ₁	30,19	16,20	7,07	2,53	23,11	16,71	20,28	12,40	10,38	6,33	2,36	0,76
G ₂	25,80	18,78	5,99	3,59	30,41	15,19	27,19	11,88	10,60	6,90	3,69	1,66
G ₃	21,36	11,29	3,72	1,76	18,88	12,35	13,31	8,99	6,81	3,88	5,57	1,94
C ₁	105,06	97,63	12,66	10,43	32,28	64,45	31,65	22,27	12,02	10,90	1,90	1,42
C ₂	142,02	86,55	16,80	9,24	57,63	47,48	42,85	21,00	15,13	9,66	1,68	1,26

TABELA 18 - Relação entre os teores de micronutrientes e o teor de ferro na palha das plantas, em função dos tratamentos.

Tratamentos	Cu/Fe		Mn/Fe		Zn/Fe	
	S/Fe	C/Fe	S/Fe	C/Fe	S/Fe	C/Fe
Solo HGP						
G ₀	0,0565	0,0260	2,8087	1,0013	0,4783	0,1578
G ₁	0,0460	0,0187	2,2423	0,8551	0,3681	0,1740
G ₂	0,0639	0,0157	2,4175	0,7209	0,4074	0,1266
G ₃	0,0540	0,0140	1,6056	0,6011	0,2840	0,1116
C ₁	0,1120	0,0424	2,6178	1,1749	0,4131	0,2139
C ₂	0,1339	0,0429	2,7197	1,1521	0,4602	0,1884
Solo HO						
G ₀	0,1712	0,1311	3,5547	2,2734	0,7397	0,3745
G ₁	0,1038	0,0860	1,8255	0,8759	0,5660	0,3494
G ₂	0,1013	0,0856	1,8710	0,8122	0,5299	0,3260
G ₃	0,0712	0,0529	1,1641	0,5873	0,3560	0,2380
C ₁	0,1772	0,1706	3,3987	2,8010	0,6266	0,4692
C ₂	0,2269	0,1639	4,1344	2,3739	0,7899	0,4538

Isto indica que a relação entre macro e micronutrientes e o teor de ferro na palha das plantas é mais importante do que a quantidade absoluta de ferro no tecido e que o nível tóxico de ferro vai depender do balanço nutricional da planta, o que explica a ausência de sintomas de toxicidade de ferro no presente estudo.

4.6. Efeito dos tratamentos nos componentes da produção

As análises de variância cujos resumos estão mostrados na Tabela 19 mostraram efeitos altamente significativos dos fatores gesso/calcário e adição de ferro nos componentes da produção das plantas de arroz.

Observa-se que, de uma maneira geral, o comportamento das plantas seguiu a mesma tendência em função dos tratamentos aplicados nos dois solos, sendo que apenas o número de perfilhos/vaso e a produção de matéria seca da raiz no solo HGP não sofreram alteração significativa com a adição de ferro.

TABELA 19 - Resumo das análises de variância dos componentes da produção, em função dos tratamentos aplicados nos dois solos.

Componentes da produção	Solo								
	HGP				CV (%)	HO			
	Causas de variação ¹			Valor de F		Causas de variação ¹			CV (%)
	A	B	A x B		A	B	A x B		
Matéria seca da palha	263,80**	69,07**	2,39*	4,07	86,72**	605,48**	20,77**	4,32	
Matéria seca da raiz	0,15ns	63,38**	6,79**	7,86	7,91**	245,75**	22,76**	10,66	
Matéria seca grãos	152,81**	79,25**	7,49**	8,03	9,66**	1653,12**	23,24**	6,27	
Número perfilhos/vaso	0,03ns	86,91**	4,88**	7,76	3,86ns	129,98**	9,95**	10,15	

¹ A: Dose de Fe

B: Gesso/Calcário

** Significativo ao nível de 1%

* Significativo ao nível de 5%

ns Não significativo

4.6.1. Matéria seca da palha

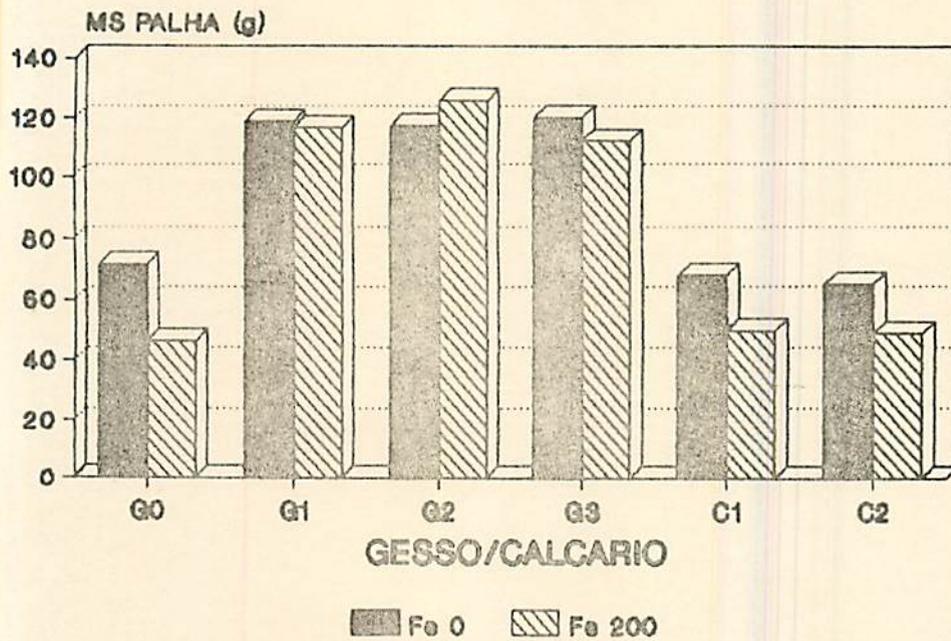
A Figura 1 mostra a produção de matéria seca da palha das plantas de arroz em função dos diferentes tratamentos, nos dois solos considerados.

Observa-se que nos tratamentos onde foi adicionado ferro (Fe 200) ocorreu uma diminuição da matéria seca da palha produzida das plantas cultivadas nos dois solos. Resultados semelhantes foram obtidos por FISHER et alii (1990), quando constataram uma drástica redução no crescimento das plantas de arroz, o que impediu que completassem o seu ciclo de desenvolvimento, em decorrência da adição de 600 mg de ferro/dm³ solo.

No presente estudo, a redução na matéria seca da palha quando foi adicionado ferro, foi mais acentuada no solo HGP. O alto teor inicial de ferro nesse solo explica esse comportamento.

A aplicação de gesso, nas três quantidades utilizadas, promoveu as maiores produções de matéria seca da palha, nos dois solos. Este efeito benéfico do gesso no crescimento das plantas está, basicamente relacionado ao suprimento de enxofre, já que nos tratamentos com calcário e na testemunha, as plantas apresentaram sintomas característicos de deficiência de enxofre.

SOLO ORGANICO



GLEI POUCO HUMICO

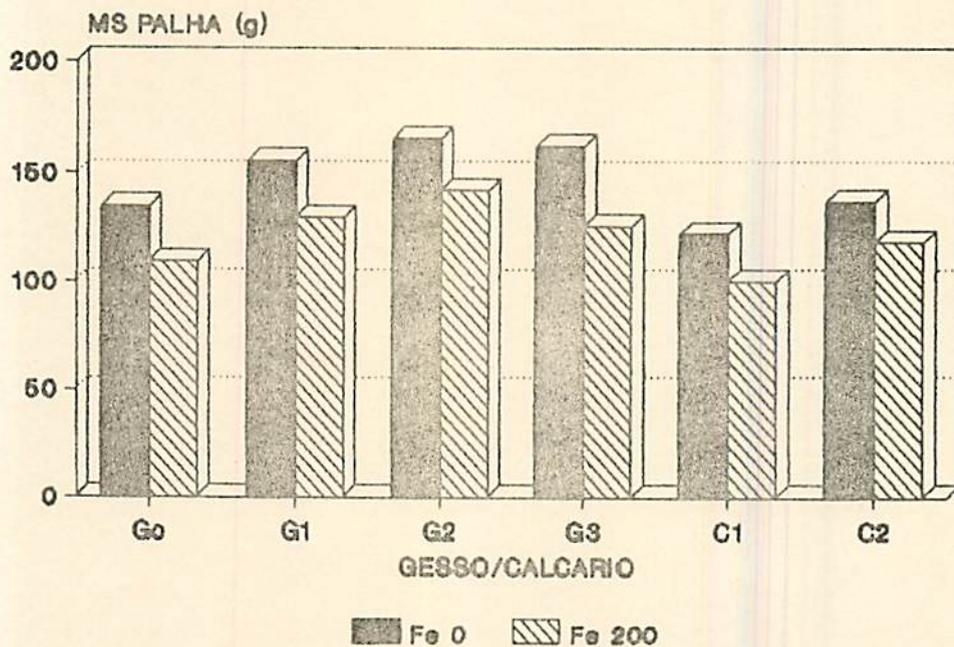


FIGURA 1 - Produção de matéria seca da palha em função das doses de gesso ou calcário e da adição de ferro.

4.6.2. Matéria seca da raiz

A produção de matéria seca da raiz em função dos tratamentos aplicados nos dois solos é mostrada na Figura 2.

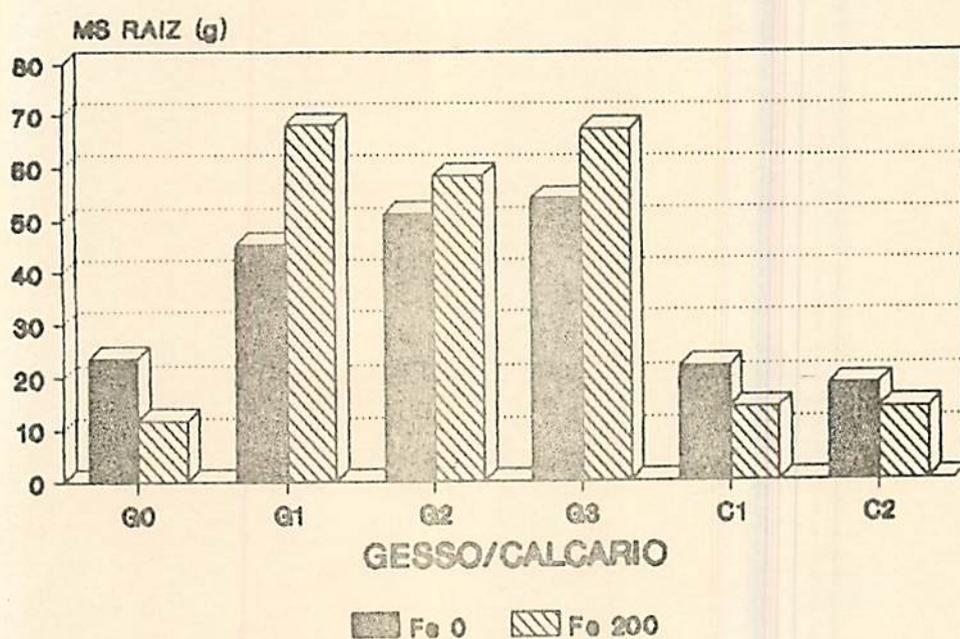
Nota-se que a aplicação de gesso promoveu um aumento considerável na produção de matéria seca da raiz, independente da adição de ferro. O efeito benéfico do gesso foi mais evidente no solo HO, o que é explicado pela menor disponibilidade inicial de sulfato neste solo (Quadro 4).

Nos tratamentos onde foi aplicado calcário o peso da matéria seca da raiz foi semelhante ao observado na testemunha indicando que a deficiência de enxofre nesses tratamentos limitou o crescimento do sistema radicular.

No solo HGP, a adição de ferro não influenciou a produção de matéria seca da raiz. Resultados semelhantes foram obtidos por FAGERIA et alii (1987), quando verificaram que a parte aérea foi mais afetada pelas altas concentrações de ferro no solo do que as raízes. Segundo os autores, isto indica que a parte aérea do arroz é mais sensível à toxicidade de ferro do que as raízes, podendo ser considerada como melhor parâmetro para avaliação de cultivares com tolerância à toxicidade de ferro.

NOLDIN (1985) constatou que o aumento da concentração de ferro em solução nutritiva, propiciou um incremento no comprimento total das raízes e que este aumento pode ser considerado como um mecanismo que as plantas dispuseram para compensar a área de absorção recoberta com a crosta de óxido de ferro na superfície das raízes.

SOLO ORGANICO



GLEI POUCO HUMICO

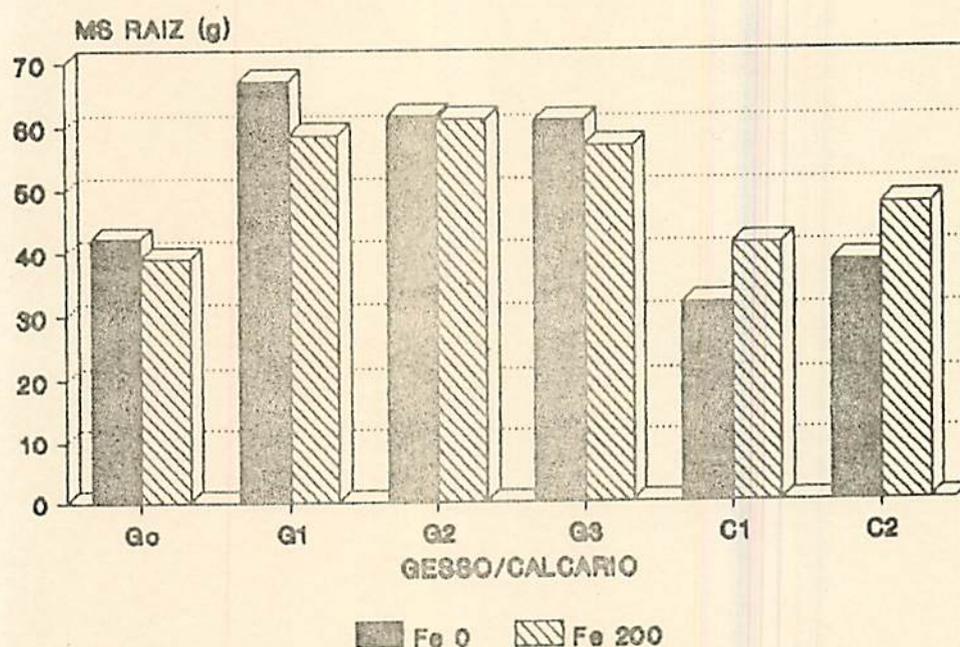


FIGURA 2 - Produção de matéria seca da raiz em função das doses de gesso ou calcário e da adição de ferro.

4.6.3. Número de perfilhos/vaso

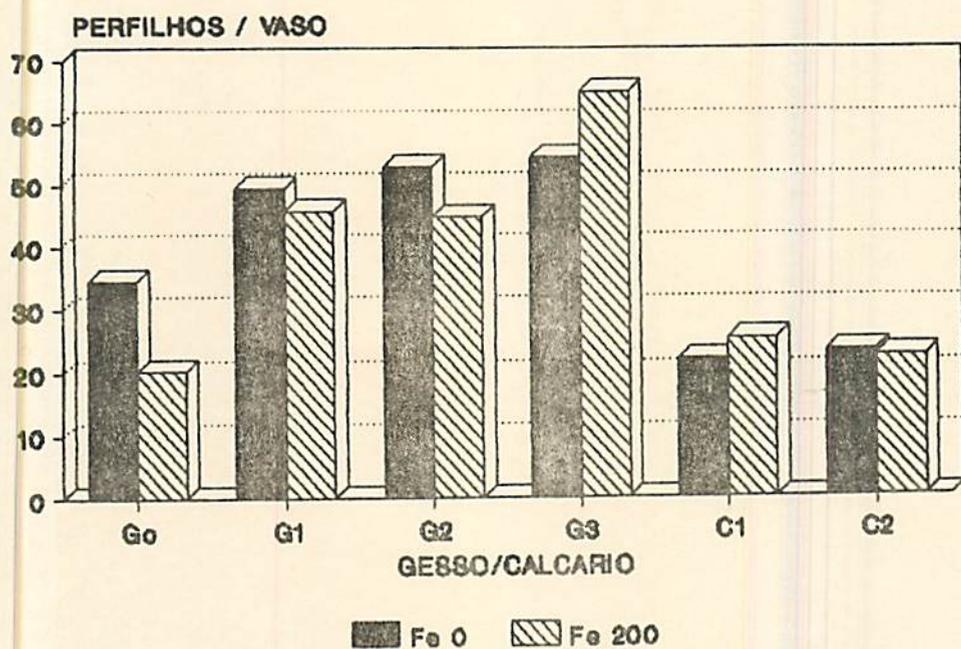
O número de perfilhos/vaso em função dos tratamentos aplicados nos dois solos é mostrado na Figura 3.

Verifica-se que a adição de ferro não alterou significativamente o número de perfilhos/vaso nos dois solos considerados. Embora FAGERIA (1989) mencione que a redução no perfilhamento seja um sintoma da toxicidade de ferro em arroz inundado, FREIRE et alii (1987) citam que o número de perfilhos não é um parâmetro adequado para ser utilizado como critério na seleção de materiais quanto à toxicidade de ferro.

Os maiores números de perfilhos/vaso foram verificados com a aplicação da maior dose de gesso nos dois solos. Nos tratamentos onde foram aplicadas as duas doses de calcário e na testemunha (G_0) observou-se uma redução no perfilhamento das plantas. O menor suprimento de enxofre, com conseqüente acúmulo de nitrogênio não protéico, retardando o crescimento das plantas, explica esta tendência.

SOLO ORGANICO

68



GLEI POUCO HUMICO

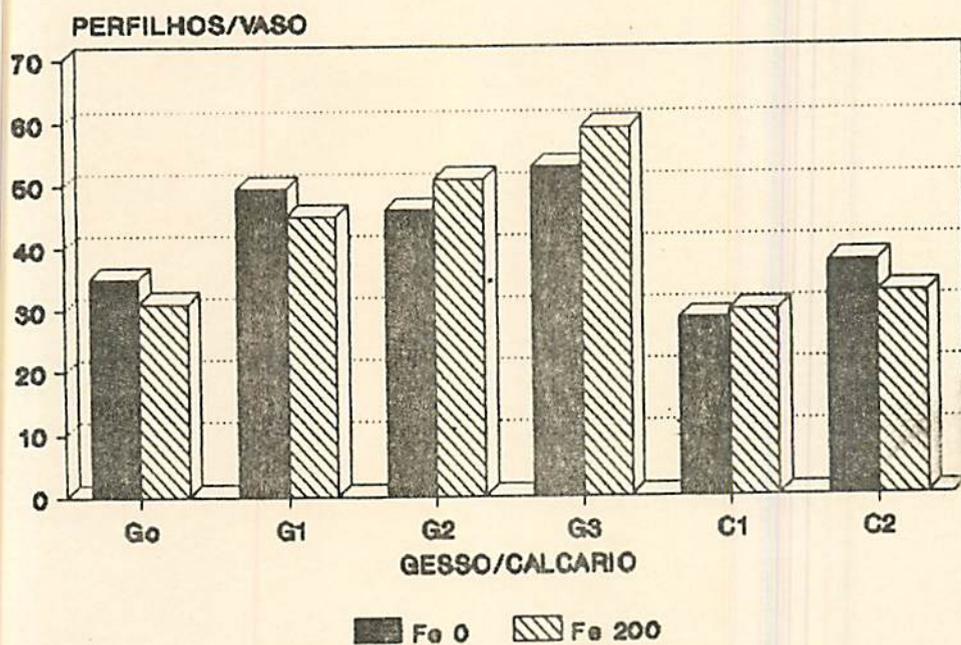


FIGURA 3 - Número de perfilhos por vaso em função das doses de gesso ou calcário e da adição de ferro.

4.6.4. Matéria seca de grãos cheios

A Figura 4 mostra a produção de matéria seca de grãos cheios em função dos tratamentos, nos dois solos considerados.

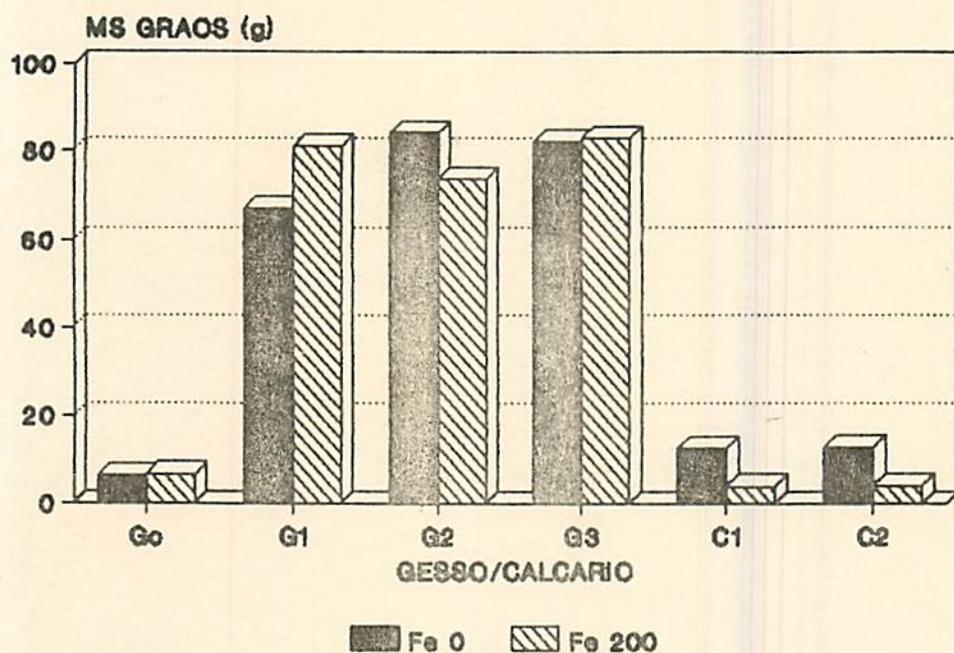
Observa-se que a aplicação de gesso, nas três doses utilizadas, resultou nas maiores produções de grãos cheios, independentemente da adição de ferro. A razão deste comportamento é explicada pelo efeito do gesso como fonte de enxofre. Resposta de arroz cultivado em casa-de-vegetação sob inundação à aplicação de gesso também foram observadas por Cassol et alii (1991) citados por ERNANI et alii (1992).

No solo HO, o efeito benéfico do gesso foi mais acentuado, o que está relacionado à menor disponibilidade inicial de sulfato deste solo. Entretanto, não foram observadas diferenças significativas entre as quantidades de gesso utilizadas.

No HGP, nota-se que apesar da aplicação de gesso resultar nas maiores produções de grãos cheios, o aumento das doses de gesso causou uma redução nesse parâmetro. A maior absorção de ferro pelas plantas, quando foram utilizadas maiores quantidades de gesso, provavelmente contribuiu para reduzir a produção de grãos nesses tratamentos. De acordo com GONZALEZ (1984) a maior ou menor quantidade de grãos é resultado da relação entre a fotossíntese e a respiração que são atividades influenciadas direta ou indiretamente pelo conteúdo de nutrientes.

SOLO ORGANICO

70



GLEI POUCO HUMICO

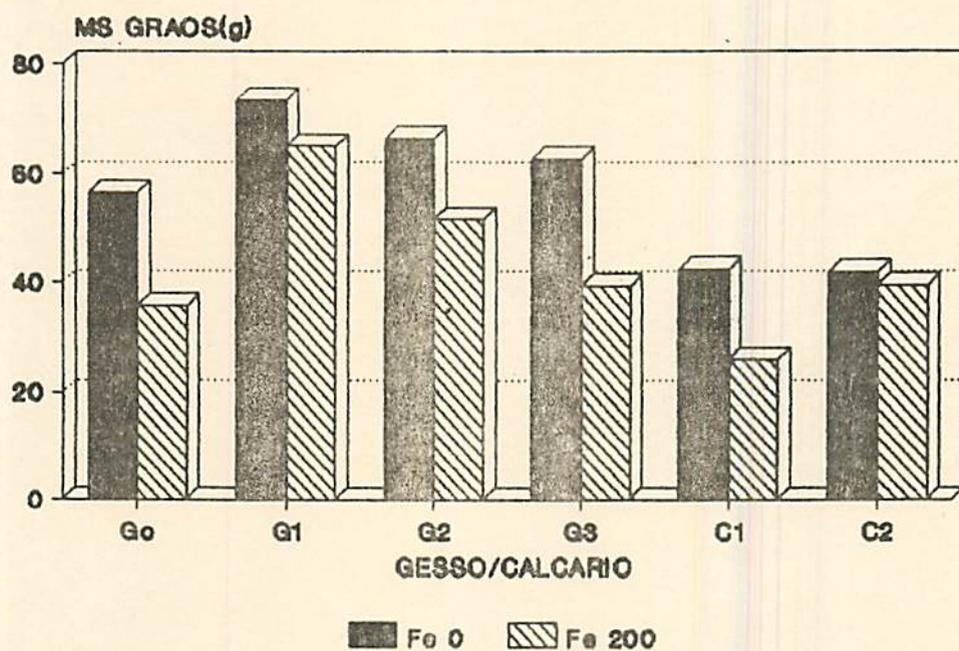


FIGURA 4 - Produção de matéria seca de grãos cheios em função das doses de gesso ou calcário e da adição de ferro.

5. CONCLUSÕES

a) A aplicação de gesso alterou positivamente os componentes da produção, em razão do maior suprimento de enxofre.

b) Devido à aplicação dos demais nutrientes em doses altas e equilibradas, não foram observados sintomas de toxicidade de ferro.

c) A aplicação de gesso não reduziu de maneira significativa a concentração de ferro na solução do solo, entretanto reduziu os teores de ferro extraídos pelo Mehlich-1.

d) Para a maioria dos parâmetros avaliados os resultados obtidos nos tratamentos onde foi aplicado calcário foram semelhantes à testemunha.

5. RESUMO

Nos solos de várzea, durante o período de inundação, ocorrem transformações físico-químicas, eletroquímicas e biológicas que são muito importantes para a nutrição das plantas, principalmente para o arroz, que é a cultura freqüentemente cultivada nestes solos. Nesse contexto, uma das mais importantes alterações químicas que ocorrem quando um solo é submerso, é o fenômeno da redução dos óxidos de ferro com um conseqüente aumento da solubilidade de Fe^{+2} , podendo resultar em toxidez à planta.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o efeito do ferro, gesso agrícola e calcário no crescimento e produção de arroz em solos de várzea inundados.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial, utilizando-se dois solos de várzea (Solo Orgânico e Gleia Pouco Húmico), duas doses de ferro (0 e 200 ppm) e seis tratamentos de controle da toxidez de ferro (quatro doses de gesso e duas de calcário). As doses de gesso aplicadas foram: 0,0; 0,5; 1,0 e 2,0 t/ha. As doses de calcário foram calculadas para fornecer as mesmas quantidades de cálcio fornecidas pelas doses 1,0 e 2,0 toneladas de gesso/ha. O

experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura de Lavras, em vasos plásticos contendo 10 dm^3 de solo. Cada vaso foi cultivado com três plantas de arroz da variedade INCA até o final do ciclo (produção), sendo o solo mantido inundado (lâmina d'água 2-3 cm).

Foram realizadas coletas da solução do solo quinzenalmente a partir da aplicação do gesso e do calcário até a colheita do experimento, para a determinação da concentração do ferro em solução. Ao final deste período foram avaliados os seguintes parâmetros: matéria seca da palha (folha + colmo), matéria seca da raiz, número de perfilhos/vaso, matéria seca de grãos cheios, teor de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn na palha das plantas.

Verificou-se que a aplicação de gesso ou calcário não reduziu de maneira significativa a concentração de ferro na solução dos dois solos estudados, entretanto, o fornecimento de gesso afetou positivamente os componentes da produção (número de perfilhos/vaso, matéria seca da palha, raiz e de grãos cheios), como consequência do maior suprimento de enxofre.

A adição de 200 mg de ferro por dm^3 solo, reduziu a absorção de macronutrientes pela planta. Contudo, não foram observados sintomas de toxicidade de ferro, devido ao alto nível de nutrientes utilizado no experimento.

6. SUMMARY

EFFECT OF IRON, AGRICULTURAL GYPSUM AND LIME UPON PRODUCTION OF RICE (*Oryza sativa* L.) IN WATERLOGGED LOWLAND SOILS OF MINAS GERAIS STATE, BRAZIL

In lowland soils, during the period of waterlogging, occur physicochemical, electrochemical and biological transformations, which are very important for plant nutrition, mainly for rice, which is the crop frequently cultivated in these soils. In this sense, one of the more important chemical alterations which occur when the soil is submerged, is the phenomenon of reduction of iron oxides with a consequent increase in Fe^{+2} solubility, which can result in toxicity to plant.

The present work had as objective to evaluate the effect of iron, agricultural gypsum and lime upon growth and production of rice in waterlogged lowland soils.

The experimental design was completely randomized, in a factorial scheme, utilizing two lowland soils (Bog and Low Humic Gley), two doses of iron (0 and 200 ppm) and six treatments of iron

toxicity control (four doses of gypsum and two of lime). The doses of applied gypsum were: 0.0, 0.5, 1.0 and 2.0 t/ha. The doses of lime were calculated to furnish the same quantities of calcium furnished by the doses of 1.0 and 2.0 t of gypsum/ha. The experiment was conducted in a greenhouse of Soil Science Department of Escola Superior de Agricultura de Lavras, Minas Gerais State, Brazil, in plastic pots containing 10 dm³ of soil. Each pot was cultivated with three rice plants of INCA variety until the final of the cycle (production), being the soil maintained waterlogged (water lamina of 2-3 cm).

It was performed the sampling of soil solution at each 15 days since the gypsum and lime application up to the harvest of the experiment, for the determination of iron concentration in solution. At the final of this period it were evaluated the following parameters: dry matter of stalk (stalk + colm), dry matter of root, number of tillers/pot, dry matter of full grain, and amounts of N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn in stalk of plants.

It was verified that the application of gypsum or lime did not reduce, in a significant manner, the iron concentration in the solution of the two studied soils, although the furnishment of gypsum positively affected the components of production (number of tillers/pot, dry matter of stalk, root and full grains), as consequence of the higher furnishment of sulfur.

The addition of 200 mg of iron/dm³ of soil reduced the absorption of macronutrients by plant. However, it were not observed symptoms of Fe toxicity, due to the high level of nutrients utilized in the experiment.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABREU, C.A. de. Identificação de deficiências de macronutrientes em três solos de várzeas de Minas Gerais. Lavras, ESAL, 1985. 93p. (Tese MS).
2. BACHA, R.E. & HOSSNER, L.R. Characteristics of coatings formed on rice roots as affected by iron and manganese additions. Soil Science Society of American Journal, Madison, 41(5):931-5, 1977.
3. BARBOSA FILHO, M.P. Nutrição e adubação do arroz: sequeiro e irrigado. Piracicaba, PÓTAPOS, 1987. 129p. (Boletim Técnico, 9).
4. ———; FAGERIA, N.K. & STONE, L.F. Manejo d'água e calagem em relação à produtividade e toxicidade de ferro em arroz. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 18(8): 903-10, ago. 1983.

5. BARDSLEY, C.E. & LANCASTER, J.O. Sulfur. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of analysis: chemical and microbiological properties.** Madison, American Society of Agronomy, 1965. pt. 2, cap.79, p.1102-16.
6. BLAIR, G.J.; MANUEL, C. & MONVAT, G. Sulfur nutrition of wetland rice. **IRRI Research paper series**, Los Baños, 21, 1978.
7. BLAKE, G.R. Particle density. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of soil analysis; physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling.** Madison, American Society of Agronomy, 1965. pt.1, cap.29, p.371-3. (Agronomy, 9).
8. CARVALHO, J.G. de. Efeito de deficiências minerais na absorção de fósforo pelo arroz (*Oryza sativa* L.). Piracicaba, ESALQ, 1987. 88p. (Teşe de doutorado).
9. CHEN, C.C.; DIXON, J.B. & TURNER, F.T. Iron crating on rice roots: mineralogy and qualtiy influencing factors. **Soil Science of American Journal**, Madison, 44:635-9, 1980.

10. COONNELL, W.E. & PATRICK JR., W.H. Reduction of sulfate to sulfide in waterlogged soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 33(5):711-15, Sept./Oct. 1969.
11. CORÁ, J.E. Avaliação da disponibilidade de Boro, Cobre e Zinco em solos de várzea do Estado de Minas Gerais. Lavras, ESAL, 1991. 135p. (Tese MS).
12. CURI, N. & ANDRADE, H. Solos de várzea. Lavras, s.ed., 1983. 12p. (Mimeografado).
13. ———; RESENDE, M. & SANTANA, D.P. Solos de várzea de Minas Gerais. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, 13(152):3-10, 1988.
14. ———; LARACH, J.O.I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A.C. & FONTES, L.E.F. Vocabulário de Ciência do Solo. In: CURI, N., Coord. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. (No prelo).

15. DAY, P.R. Particle fractionation and particle size analysis. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis; physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. pt.1, cap.43. p.545-66.
16. DIJKSHOORN, W. & VAN WIJK, A.L. The sulfur requirements of plants as evidenced by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter. A review of published data. *Plant and Soil*, The Hague, 26:129-57, 1967.
17. DUARTE, A.P.; VOLTAN, R.B.P. & FURLANI, P.R. Amarelecimento do arroz de sequeiro devido ao encharcamento em solo de baixa fertilidade. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20, Piracicaba, 1992. *Anais...* Piracicaba, SBCS, 1992. p.75-6.
18. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro. Rio de Janeiro, 1982. 526p. (Boletim de Pesquisa, 1).
19. ————. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, 1979. n.p.

20. ENGLER, R.M. & PATRICK JR., W.H. Stability of sulfides of manganese, iron, zinc, copper, and mercury in flooded and nonflooded soil. *Soil Science*, Madison, 119(3):217-21, Mar. 1975.
21. ERNANI, P.R.; CASSOL, P.C. & PERUZO, G. Eficiência agrônômica do gesso agrícola no sul do Brasil. In: SEMIÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2, Uberaba, 1992. *Anais...* Uberaba, IBRAFOS, 1992. p.263-76.
22. FAGERIA, N.K. *Adubação e nutrição mineral da cultura do arroz*. Rio de Janeiro, Campus, 1984. 341p.
23. ————. Química de solos de várzea. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 2, Piracicaba, 1989. *Anais...* Campinas, Fundação Cargill, 1989. p.93-114.
24. ————; BARBOSA FILHO, M.P. & CARVALHO, J.R.P. de. Influência de ferro no crescimento e na absorção de P, K, Ca e Mg pela planta de arroz em solução nutritiva. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 16(4):483-88, jul./ago. 1981.
25. ————; ———— & GARBER, M.J. Nível de nutriente e densidade de plantio adequados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 17(9):1279-84, set.1982.

26. FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P.; RANGEL, P.H.N. & CUTRIM, V.D. Efeitos do Fe na absorção de nutrientes, práticas de manejo e avaliação de cultivares de arroz para tolerância a Fe. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1, Goiânia, 1987. Anais... Goiânia, EMBRAPA/CNPAF, 1987. p.97-112.
27. FISHER, R.G.; EIMORI, I.E.; MILAN, P.A. & BISSANI, C.A. Efeito do calcário e fontes de silício sobre a toxidez de ferro em arroz irrigado. Lavoura Arrozeira, Porto Alegre, 43(390):6-10, mar./jun. 1990.
28. FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F. de; SOARES, P.C. & COSTA, L.M. da. Toxicidade de ferro e seu controle em arroz irrigado. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, 10(114):45-51, 1984.
29. ———; ———; ———; ——— & FARIA, E.A. Calagem, adubação orgânica e manejo da água no controle da toxicidade de ferro em arroz irrigado. Revista Ceres, Viçosa, 32(180):162-9, mar./abr. 1985.
30. ———; PAULA, M.B. de & ABREU, C.A. de. Avaliação de cultivares/linhagens de arroz para tolerância a ferro. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1, Goiânia, 1987. Anais... Goiânia, EMBRAPA, CNPAF, 1987. p.144-47.

37. HOWELLER, R.H. Iron-induced orangine disease of rice in relation to physicochemical changes in a flooded oxisol. *Soil Science Society of America Proceedings*, Wisconsin, 37(6):898-903, Nov./Dec. 1973.
38. ISMUNADJI, B.M. & ARDJASA, W.S. Potash fertilization for lowland rice can prevent iron toxicity losses. *Better Crops International*, Atlanta, 5(2):12-14, 1989.
39. KÄMPF, N. O ferro no solo. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1, Goiânia, 1987. *Anais...* Goiânia, EMBRAPA/CNPAF, 1987. P.35-71.
40. KRISHNA MURTI, G.S.R.; VOLK, V.V. & JACKSON, M.L. Colorimetric determination of iron of mixed valency by orthophenanthroline. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 30(5):664-4, Sept./Oct. 1966.
41. LAMSTER, E.C. Programa nacional de aproveitamento de várzeas - Provárzeas Nacional. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, 6(65):3-8, maio 1980.
42. LINDSAY, W.L. *Chemical equilibria in soils*. New York, John Wiley, 1979.

43. LOPES, M.S. Efeito da adubação e da calagem sobre a produtividade e a toxidez de ferro na cultivar BR-IRGA 409. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 16., Balneário Camboriú, 1987. Anais... Florianópolis, EMPASC, 1987. p.187-93.
44. MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo, Editora Agronômica Ceres Ltda., 1980.
45. ————. O gesso agrícola no ambiente e na nutrição da planta. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2, Uberaba, 1992. Anais... Uberaba, IBRAFOS, 1992. p.41-66.
46. ————; ROMERO, J.P.; LIEM, T.H. & VITTI, G.G. Gesso agrícola - seu uso na adubação e correção do solo. Piracicaba, Ultrafértil. Departamento de Serviços Técnicos Agronômicos, 1981. 30p. (Série Divulgação Técnica, 8).
47. ————; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. de. Avaliação do estado nutricional das plantas - princípios e aplicações. Piracicaba, Potafos, 1989. 201p.
48. MOORE, P.A. & PATRICK JR., W.H. Iron availability and uptake by rice in acid sulfate soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, 53:471-6, 1989.

49. MORAES, J.F.V. Efeitos da inundação do solo. II. Influência sobre a absorção de nutrientes e o crescimento do arroz (*Oryza sativa* L.). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 8(7):103-8, 1973A.
50. ————. Efeitos da inundação do solo. I. Influência sobre o pH, o potencial de óxido-redução e a disponibilidade do fósforo no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 8(7): 93-101, 1973B.
51. MUNCH, J.C. & OTTOW, J.C.G. Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxides by bacterial activity. *Soil Science*, Madison, 129:15-21, 1980.
52. NASCIMENTO, J.A.L. & MORELLI, M. Enxofre em solos do Rio Grande do Sul. II. Disponibilidade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 4(3):135-8, set./dez. 1980.
53. NOLDIN, J.A. Reações de genótipos de arroz irrigado à três concentrações de ferro em solução nutritiva. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 14, Pelotas, 1985. *Anais...* Pelotas, EMBRAPA, 1985. p.235-9.

54. OBERMUELLER, A.J. & MIKKELSEN, D.S. Effects of water management and soil aggregation on the growth and nutrient uptake of rice. *Agronomy Journal*, Madison, 66(5):627-32, Sept./Oct. 1974.
55. OTTOW, J.C.G.; BENCKISER, G.; WATANABE, I. & SANTIAGO, S. Multiple nutritional soil stress as the prerequisite for iron toxicity of wetland rice (*Oryza sativa* L.). *Tropical Agriculture*, Trinidad, 60:102-6, 1983.
56. PAULA, M.B. de; CARVALHO, J.G. de & SOARES, A.A. Estudo da tolerância à toxidez de ferro por cultivares e linhagens de arroz irrigado. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 4, Goiânia, 1990. *Anais...* Goiânia, EMBRAPA/CNPAF, 1990. p.122.
57. PAVAN, M.A. Ação dos corretivos e fertilizantes na dinâmica de íons no solo. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM FERTILIDADE DO SOLO. Londrina, IAPAR/ANDA/PPI/IPI, 1983. p.47-63.
58. ——— & BINGHAM, F.T. Toxicity of aluminum to coffee seedlings grown in nutrient solution. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 46:993-7, 1982.
59. ——— & MIYAZAWA, M. Química de solos inundados. Londrina, IAPAR, 1983. 21p.

60. PONNAMPERUMA, F.M. The chemistry of submerged soils. *Advances in Agronomy*, New York, 24:29-96, 1972.
61. ————. Limitaciones de microelementos en suelos acidos arroceros tropicales. In: BORNEMIZA, E. & ALVARADO, A., ed. *Manejo de suelo en la America Tropical*. Raleigh, North Carolina State University, 1975. p.336-54.
62. RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S. & BATAGLIA, O.C. *Análise química do solo para fins de fertilidade*. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 170p.
63. SAJWAN, K.S. & LINDSAY, W.L. Effects of redox on zinc deficiency in poddy rice. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 50:1264-9, 1986.
64. SANCHEZ, P.A. *Properties and management of soil in the tropics*. New York, John Wiley, 1976. 618p.
65. SANTOS FILHO, B.G. dos. Ferro na planta. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1, Goiânia, 1987. *Anais...* Goiânia, EMBRAPA/CNPAF, 1987. p.72-93.

66. SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammonium-oxalate-Lösung. Zeitschrift für Pflanzenernährung, Berlin, 105(3):194-202, 1964.
67. ————. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: STUCKY, J.W.; GOODMAN, B.A. & SCHWERTMANN, U., eds. Iron in soils and clay minerals. Holland, D. Reidel Publishing Company, 1988. Cap.11, p.267-308.
68. SIQUEIRA, J.O. Microbiologia e bioquímica de solos sob inundação. Lavras, MEC/ESAL/DCS, 1983. 16p. (mimeografado).
69. SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E.; RITCHEY, K.D. & REIN, T.A. Resposta de culturas anuais e leucena a gesso no cerrado. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2, Uberaba, 1992. Anais... Uberaba, IBRAFOS, 1992. p.277-306.
70. SUMNER, M.E. Uso atual do gesso no mundo em solos ácidos. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2, Uberaba, 1992. Anais... Uberaba, IBRAFOS, 1992. p.7-40.
71. 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, Tokyo, 12(4):32-8, 1966.

72. van der VORM, P.D.I. & van DIEST, A. Aspects of the Fe and Mn nutrition of rice plants. *Plant and Soil*, Netherlands, 52(1):19-29, June 1979.
73. VETTORI, L. *Métodos de análise do solo*. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7).
74. VIEIRA, L.S. & VIEIRA, M.N.F. *Manual de morfologia e classificação de solos*. São Paulo, Agronômica Ceres, 1983. 313p.
75. VOMOCIL, J.A. Parasity. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis, physical and mineralogical properties including statistics of measurement and sampling*. Madison, American Society Agronomy, 1965. p.299-314. (Agronomy, 9).
76. YOSHIDA, L.S. *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños, IRRI, 1981. 269p.
77. YOSHIDA, S. Microbiological metabolism of flooded soils. In: PAUL, E.A. & McLAREN, A.D., ed. *Soil Biochemistry*. New York, Marcel Dekker, 1975. p.83-122.