

LUIZ ROBERTO GUIMARÃES GUILHERME

CALAGEM E INUNDAÇÃO EM SOLOS DE VÁRZEA CULTIVADOS COM ARROZ: ALTERAÇÕES EM pH, NITROGÊNIO, FÓSFORO E ENXOFRE

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 DE LAVRAS

LAVRAS - MINAS GERAIS

1990

LEON ROBERTO GUIMARAES GUERINHO

INFLUÊNCIA DA INUNDAÇÃO EM SOLOS DE VARZEAS ALUVIAIS
COM ALTERAÇÕES EM PH, NITROGÊNIO, FÓSFORO E ENXOFRE

Trabalho apresentado à Faculdade de Agronomia da Universidade Federal de Minas Gerais, em Belo Horizonte, Minas Gerais, em 1964.



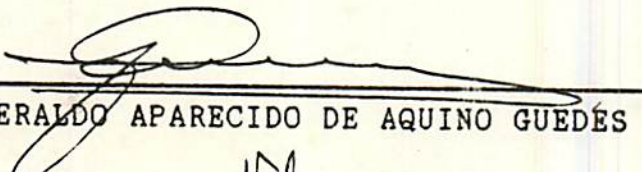
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA DE LAVRAS

LAVRAS - MINAS GERAIS


1-64

CALAGEM E INUNDAÇÃO EM SOLOS DE VARZEA CULTIVADOS COM ARROZ:
ALTERAÇÕES EM pH, NITROGÊNIO, FÓSFORO E ENXOFRE.

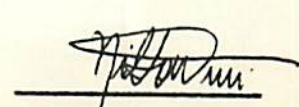
APROVADA.



GERALDO APARECIDO DE AQUINO GUEDES



FABIANO RIBEIRO DO VALE



NILTON CURI

*Aos meus pais, Teresa e Roberto,
pelo esforço dedicado à minha formação*

*A minha esposa, Cristina,
Minhas irmãs, Juliana,
Regina e Cristina,
Minha sobrinha, Andréia*

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Escola Superior de Agricultura de Lavras, pela oportunidade concedida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão de bolsa de estudos e auxílio financeiro para condução do projeto de pesquisa.

A ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, pelo auxílio financeiro para impressão deste trabalho.

Ao professor Geraldo Aparecido de Aquino Guedes, pela amizade, orientação e confiança demonstradas.

Aos professores Fabiano Ribeiro do Vale e Nilton Curi, pelas contribuições, incentivo e amizade.

Ao professor e amigo Alfredo Scheid Lopes, pelo estímulo.

A todos os colegas do Departamento de Ciência do Solo, funcionários e professores, pela disponibilidade e alegre convívio.

Aos colegas de Pós-Graduação da ESAL, em especial ao companheiro José Eduardo Corá, pelos momentos alegres de convívio.

A todos aqueles que contribuíram para a conclusão de mais esta etapa, eles bem sabem quem os são.

SUMARIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	04
2.1. Alterações provocadas pela inundação	04
2.1.1. Atividade dos íons H^+ (pH)	04
2.1.2. Condições de oxidação - redução	07
2.1.3. Nitrogênio	11
2.1.4. Fósforo	17
2.1.5. Enxofre	23
2.2. Calagem em solos de várzea	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1. Unidades de solo	32
3.2. Coleta e preparo dos materiais de solo	34
3.3. Análises de caracterização e avaliação	34
3.2.1. Análises físicas	34
3.2.2. Análises químicas	35
3.4. Condução do experimento	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1. pH	43
4.2. Nitrogênio	47
4.2.1. Alterações do N inorgânico	49
4.2.2. Alterações do N total	54

4 2.3. Variações no N inorgânico em profundida- de	56
4.3 Fósforo	60
4.3.1. Alterações do P - resina	63
4.3.2. Alterações do P orgânico	67
4.4. Enxofre	69
4.4.1. Alterações do S - sulfato	70
4.4.2. Alterações do S de "reserva"	73
4.4.3. Variações no sulfato em profundidade ...	75
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
6 CONCLUSÕES	81
7 RESUMO	83
8 SUMMARY	86
9 LITERATURA CITADA	89
APENDICE	103

LISTA DE QUADROS

QUADRO		Página
1	Seqüência termodinâmica das reações de redução em solos inundados.....	06
2	Caracterização física das unidades de solo estudadas.....	35
3	Caracterização química das unidades de solo estudadas.....	37
4	Correlação entre o teor de matéria orgânica (X) e algumas propriedades (Y) dos solos de várzea estudados.....	42
5	Correlações entre parâmetros relativos ao teor de ferro do solo e o pH após 8 semanas de submersão em solos que não receberam calagem.....	46
6	Efeito da calagem no nitrogênio dos solos de várzea estudados, antes do cultivo com arroz (Média de 6 repetições).....	48
7	Concentração de nitrogênio na parte aérea e quantidade de N absorvido pelo arroz cultivado em solos de várzea submetidos ou não à calagem e à inundação.....	52
8	Efeito da calagem no fósforo dos solos de várzea estudados, antes do cultivo com arroz (Média de 6 repetições).....	62

QUADRO

Página

9	Concentração de fósforo na parte aérea e quantidade de P absorvido pelo arroz cultivado em solos de várzea submetidos ou não à calagem e à inundação	66
10	Efeito da calagem no enxofre dos solos de várzea estudados, antes do cultivo com arroz (Média de 6 repetições).....	69
11	Concentração de enxofre na parte aérea e quantidade de S absorvido pelo arroz cultivado em solos de várzea submetidos ou não à calagem e à inundação.....	72

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Localização da área de coleta das unidades de solo estudadas (Polders Careaçu e Bela Vista)..	33
2	Ilustração esquemática do aparato de contenção do sistema radicular do arroz e do método de amostragem por camadas nas parcelas submetidas à inundação.	41
3	Variação nos valores de pH H ₂ O e pH CaCl ₂ 0,01M em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.	44
4	Variação nos teores de nitrato (N - NO ₃ ⁻) em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.	50
5	Variação nos teores de amônio (N - NH ₄ ⁺) em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.	53
6	Variação nos teores de N total em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.	55
7	Variação, em profundidade, nos teores de N - NO ₃ ⁻ em solos de várzea cultivados com arroz sob inundação, na presença e ausência de calcário. .	57

FIGURA

Página

8	Variação, em profundidade, nos teores de $N-NH_4^+$ em solos de várzea cultivados com arroz sob inundação na presença e ausência de calcário. . .	61
9	Variação nos teores de P - resina em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.	64
10	Variação nos teores de fósforo orgânico em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.	68
11	Variação nos teores de sulfato ($S - SO_4^{2-}$) em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.	71
12	Variação nos teores de enxofre de reserva em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.	74
13	Variação, em profundidade, nos teores de $S-SO_4^{2-}$ em solos de várzea cultivados com arroz sob inundação, na presença e ausência de calcário. .	76

1 INTRODUÇÃO

A implantação do Programa Nacional de Aproveitamento de Várzeas Irrigáveis - PROVARZEAS, possibilitou, nos últimos anos, a incorporação de milhares de hectares de várzeas ao processo produtivo brasileiro (BRASIL, s.d.). Com a criação do Programa Nacional de Irrigação - PRONI, muitas dessas áreas, principalmente aquelas de localização mais privilegiada, passaram a receber melhorias (O Programa Nacional de Irrigação - PRONI, em pleno processo de desenvolvimento, 1987). Embora grandes investimentos com infraestrutura tenham sido feitos nestas áreas, nota-se ainda uma grande necessidade de geração de conhecimentos científicos nestes sistemas, notadamente com relação a manejo do solo.

Por serem originados de sedimentos com grande heterogeneidade quanto à composição granulométrica e mineralógica, os solos de várzea apresentam uma diversidade muito grande de características físicas e químicas. Uma característica dominante nestes solos, entretanto, é a má drenagem ou hidromorfismo, embora aqueles situados em terraços ou níveis mais elevados possam apresentar-se menos mal drenados (CURI *et alii*, 1988). Estes solos, quando cultivados sob inundação, apresentam características bastante adversas daquelas verificadas em condições

de boa drenagem, destacando-se entre estas, a reação do solo e as condições de oxidação-redução.

A alteração destas características acarreta mudanças no comportamento dos nutrientes, tanto daqueles nativos, como dos adicionados ao solo, afetando o desenvolvimento das plantas e o aproveitamento dos fertilizantes aplicados. Para a cultura do arroz mantido sob inundação, tem-se, por exemplo, que 60 a 80% do nitrogênio absorvido durante o ciclo, deriva-se do nitrogênio nativo (Koyama *et alii*, 1973 e Broadbent, 1979, citados por SAVANT & DE DATTA, 1982). Conquanto o nitrogênio, seguido do fósforo, seja reconhecido como o nutriente mais limitante para a cultura do arroz sob inundação, o seu aproveitamento a partir dos fertilizantes aplicados tem sido, geralmente, inferior a 40% (RIGUO, 1990). Isto evidencia a importância de se avaliar o comportamento deste nutriente, bem como de outros importantes para a cultura do arroz, no intuito de melhor entender as suas transformações no solo e a sua disponibilidade para as plantas.

Dados do Ministério da Agricultura (1982), citado por FAGERIA (1989), revelam que o Brasil possui cerca de 30 milhões de hectares de várzeas irrigáveis sem aproveitamento, e que apenas no triângulo Rio de Janeiro - Belo Horizonte - São Paulo, região de melhor infra-estrutura do país, existem ainda 3 milhões de hectares de várzeas irrigáveis, dos quais a metade é irrigável por declividade natural. Também na região dos cerrados, estima-se uma ocorrência de cerca de 12 milhões de hectares de várzeas, dos quais aproximadamente 4,5 milhões já

foram efetivamente levantados (REIS & RASSINI, 1985).

Diante do grande potencial que representam as áreas de várzeas no Brasil e das poucas informações disponíveis sobre os seus solos, e considerando-se que o manejo destes, principalmente quando sob inundação, promove transformações que afetam a disponibilidade de nutrientes nestes sistemas, desenvolveu-se o presente estudo com o objetivo de avaliar as alterações em pH, nitrogênio, fósforo e enxofre em diferentes solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Alterações Provocadas Pela Inundação

Solos inundados apresentam características bastante diferentes daquelas dos solos aerados. A inundação provoca alterações nas propriedades físicas do solo e em todos os processos químicos e biológicos que nele ocorrem, alterando entre outros, a dinâmica dos nutrientes.

Algumas destas transformações são abordadas a seguir:

2.1.1. Atividade dos íons H^+ (pH)

O efeito geral da submersão é aumentar o pH dos solos ácidos e diminuir o dos solos sódicos e calcários (PONNAMPERUMA, 1972). Estudando o efeito da inundação sobre o pH de quatro solos, MORAES (1973a) observou grandes variações neste parâmetro, havendo aumento para três solos ácidos e diminuição para um solo alcalino, com valores finais estabilizando-se entre 6,5 e 7,0. Um decréscimo no pH de solos calcários, sob inundação, acompanhado de um aumento na concentração de Ca, Mg, HCO_3 , Mn, Fe e P, foi verificado por RAHMATULLAH *et alii* (1976).

KABEERATHUMMA & PATNAIK (1979) observaram que a inundação de alguns solos tiomórficos, em experimentos de laboratório, resultou no aumento do pH bem como ainda, da disponibili-

dade de Ca e K. Também OBERMUELLER & MIKKELSEN (1974) constataram uma elevação no pH de um solo ácido, com a inundação, 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.

De acordo com PONNAMPERUMA (1972), quando um solo ácido sob condições aeróbicas é submetido à inundação, seu pH decresce inicialmente durante os primeiros dias, aumentando posteriormente até atingir valores próximos à neutralidade, poucas semanas depois. Segundo este mesmo autor, a queda inicial do pH está ligada a um aumento na pressão parcial de CO_2 que induz também a um aumento na concentração de H^+ . BEYE *et alii* (1979) mencionam também a produção de ácidos orgânicos como uma das causas da diminuição inicial do pH dos solos inundados e citam ainda, que o posterior aumento do pH deve-se a uma redução no conteúdo de CO_2 , a um enriquecimento da solução do solo em cátions trocáveis capazes de neutralizar o efeito dos íons H^+ e à instalação de condições redutoras no solo.

A existência de condições redutoras desencadeia uma série de reações de redução que consomem íons H^+ , alterando a relação entre H^+ e OH^- na solução do solo. Estas reações estão agrupadas no quadro 1, de acordo com uma seqüência termodinâmica, expressa pelos seus respectivos potenciais de oxidação-redução (Eh).

QUADRO 1. Seqüência termodinâmica das reações de redução em solos inundados.

Forma Oxidada		Forma Reduzida	Eh* (milivolts-mv)
$O_2 + 4H^+ + 4e^-$	\rightleftharpoons	$2H_2O$	+814
$2NO_3^- + 12H^+ + 10e^-$	\rightleftharpoons	$N_2 + 6H_2O$	+741
$MnO_2 + 4H^+ + 2e^-$	\rightleftharpoons	$Mn^{2+} + 2H_2O$	+401
$CH_3COCOOH + 2H^+ + 2e^-$	\rightleftharpoons	$CH_3CHOHCOOH$	-158
$Fe(OH)_3 + 3H^+ + e^-$	\rightleftharpoons	$Fe^{2+} + 3H_2O$	-185
$SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e^-$	\rightleftharpoons	$H_2S + 4H_2O$	-214
$CO_2 + 8H^+ + 8e^-$	\rightleftharpoons	$CH_4 + 2H_2O$	-244
$NADP + 2H^+ + 2e^-$	\rightleftharpoons	$NADPH$	-317
$NAD + 2H^+ + 2e^-$	\rightleftharpoons	$NADH$	-329
$2H^+ + 2e^-$	\rightleftharpoons	H_2	-413

* Eh corrigido para o pH 7,0

Fonte: Ponnampereuma (1976), citado por PAVAN & MIYAZAWA (1983).

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. Neste contexto, a reação de redução do ferro é a que apresenta a mais alta relação: $3H^+$ consumidos para cada elétron, vindo logo a seguir, a redução do manganês, com $2H^+$ consumidos para cada elétron.

Por conseguinte, solos ácidos com altos teores de matéria orgânica e óxidos de ferro e manganês apresentarão aumentos

significativos no pH, embora, segundo PAVAN & MIYAZAWA (1983), geralmente não atinjam valores próximos à neutralidade devido à oxidação química do Fe^{2+} e Mn^{2+} em pH 6,0. Vale ressaltar ainda, que se um solo ácido apresentar um alto teor de matéria orgânica, mas porém, um baixo teor de ferro redutível, o seu pH não atingirá valores próximos à neutralidade mesmo após várias semanas de submersão (PATRICK JR. & REDDY, 1978). Esta resistência quanto ao aumento do pH até próximo à neutralidade parece estar associada também à ação tamponante da matéria orgânica do solo, mesmo sob condições de inundação, conforme sugeriram GUILHERME *et alii* (1989), em estudo envolvendo sete solos de várzea do Sul de Minas Gerais.

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 da disponibilidade de fósforo (PONNAMPERUMA, 1972).

2.1.2. Condições de oxidação-redução

A principal característica química que diferencia um solo submerso de um solo bem drenado é o seu estado de oxidação-redução. O estado de redução de um solo pode ser quantificado através do seu potencial de oxidação-redução (potencial redox-Eh) ou pela concentração total dos produtos provenientes da

redução, sendo o Eh, o mais simples, rápido e representativo método de caracterização das condições de redução do solo (PONNAMPERUMA, 1972). Segundo PATRICK JR. & MAHAPATRA (1968), os solos aerados apresentam valores de Eh entre +700 e +500 mV, os moderadamente aerados entre +400 e +200mV, os reduzidos entre +100 e -100 mV e os altamente reduzidos entre -100 e -300 mV.

Estudos mostrando o efeito da inundação sobre o potencial redox do solo têm sido efetuado por diversos autores (MORAES, 1973b; OBERMUELLER & MIKKELSEN, 1974; BEYE, 1977b). GHOSH *et alii* (1974) verificaram que a submersão decrescia o potencial redox do solo, sendo este, porém, maior em solos cultivados quando comparados a solos em pousio, bem como ainda, maior a 5 cm, quando comparado a 15 cm de profundidade do solo. Assim como o pH, o potencial redox tem também um efeito marcante na disponibilidade de nutrientes às plantas (JUGSUJINDA & PATRICK JR., 1977).

Um solo sob condições aeróbicas apresenta-se em estado oxidado, passando ao estado reduzido quando submetido à inundação, sendo esta redução, consequência da respiração anaeróbica pelas bactérias do solo (PONNAMPERUMA, 1972). Com a inundação, as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera são drasticamente reduzidas, ocorrendo, por conseguinte, um decréscimo na taxa de difusão de oxigênio para o solo. Este decréscimo no suprimento de oxigênio faz com que ocorra uma diversificação nas espécies de microrganismos existentes no solo. Assim, os orga-

nismos aeróbicos que utilizam o oxigênio como receptor final de elétrons (redução do oxigênio) nas reações de obtenção de energia dos compostos orgânicos (oxidação do carbono), são inicialmente substituídos pelos microrganismos anaeróbicos facultativos e posteriormente pelos anaeróbicos obrigatórios (PAVAN & MIYAZAWA, 1983).

Em condições de redução (ausência de oxigênio), os microrganismos passam a utilizar outros componentes do solo como receptores finais dos elétrons nas reações de oxidação do carbono, segundo a seqüência termodinâmica mostrada no quadro 1. Nesta seqüência, embora algumas reações possam se sobrepor (PATRICK JR. & REDDY, 1978), a redução de determinados componentes do solo ocorre somente a partir do momento em que o componente anterior tenha passado completamente para a forma reduzida, conforme sugere KAGAWA (1977). Deste modo, de acordo com PONNAMPERUMA (1972), assim como a presença de oxigênio retarda a redução do nitrato, a presença de uma quantidade maior de nitrato pode retardar também a redução dos demais componentes do solo, o que é corroborado por BEYE *et alii* (1979).

Dentro deste contexto, a existência de condições de redução menos intensas pode ser importante no sentido de se evitar a produção e acúmulo de ácidos orgânicos e H_2S , detrimen-
tais ao desenvolvimento e absorção de nutrientes pelas plantas (MORAES, 1973b; RAO & MIKKELSEN, 1977), bem como a toxicidade de Fe^{2+} e Mn^{2+} .

Cabe mencionar neste tópicO, que apesar de um solo sob inundação se encontrar em condições de redução, isto não implica que ele esteja totalmente desprovido de oxigênio molecular. O suprimento de O_2 ao solo, por difusão, através da fase líquida, mesmo sendo mais lento que o consumo de O_2 pelos microrganismos, proporciona a formação de uma região de oxidação na camada superficial do solo (PAVAN & MIYAZAWA, 1983). Nesta região, as transformações químicas e microbiológicas assemelham-se àquelas dos solos bem drenados (PONNAMPERUMA, 1972), e a disponibilidade de oxigênio molecular não chega a ser limitante ao desenvolvimento de bactérias aeróbicas (YOSHIDA, 1978). Segundo HOWELER & BOULDIN (1971), a espessura desta zona de oxidação pode variar de zero a aproximadamente 2 a 3 cm, dependendo da concentração de oxigênio na água de inundação.

Além desta camada, vale ressaltar ainda, que a existência de condições oxidantes também na rizosfera da planta de arroz permite a ocorrência, nesta região, de transformações mediadas por bactérias aeróbicas, tais como a nitrificação e a oxidação de Fe^{2+} , Mn^{2+} e H_2S (YOSHIDA, 1978). Esta capacidade oxidativa, que tende a ser variável em função da nutrição da planta, sendo a nutrição potássica de grande importância (TROLLDENIER, 1977), parece exercer um papel fundamental nos processos de mobilização-imobilização de fósforo na rizosfera do arroz sob inundação (ALVA *et alii*, 1980).

2.1.3. Nitrogênio

O nitrogênio existente no solo encontra-se principalmente na forma de substâncias orgânicas complexas ou de amônia (ou amônio), nitrogênio molecular, nitrito e nitrato.

Essas formas nitrogenadas apresentam diversas interconversões em reações mediadas por diferentes microrganismos do solo, sendo o ponto de equilíbrio destas dependente da natureza e conteúdo de matéria orgânica, potencial de oxidação-redução, pH e temperatura do solo (PONNAMPERUMA, 1972). Para solos mantidos sob inundação, as principais transformações do nitrogênio compreendem a acumulação de amônia (ou amônio), a desnitrificação e a fixação de nitrogênio atmosférico (PONNAMPERUMA, 1972; 1978).

Em solos inundados, a mineralização do nitrogênio orgânico resulta predominantemente na acumulação de amônia ou amônio, devido à pequena disponibilidade de oxigênio molecular necessário à conversão microbiológica da amônia a nitrato. Assim sendo, em condições de submersão, mineralização de N orgânico e amonificação são sinônimos (SIQUEIRA, 1983), pois a percentagem de amônio formado a partir da redução do nitrato é muito pequena, geralmente menos que 1% (Woldendorp, 1965, citado por PONNAMPERUMA, 1972).

Uma maior quantidade de nitrogênio mineralizado sob condições de inundação, quando comparado a condições aeróbicas, tem sido relatada por alguns autores. BROADBENT & REYES (1971) verificaram para três diferentes solos, uma mineralização média

de 5,5% e 7,3%, respectivamente, para condições aeróbicas e sob inundação. Resultados semelhantes foram obtidos por Waring & Bremner (1964), citados por BROADBENT & REYES (1971).

Esta maior liberação de nitrogênio inorgânico deve-se principalmente à diminuição na imobilização de nitrogênio em condições anaeróbicas (CAMPBELL, 1978). Neste contexto BROADBENT & NAKASHIMA (1970) observaram que o fator nitrogênio (peso em gramas de N imobilizado por 100g de material a ser decomposto) era maior sob condições aeróbicas quando comparado a condições de submersão, sendo porém, em ambos os casos, considerável. Também sob condições aeróbicas, a concentração mínima de N para que haja mineralização líquida da palha de arroz é maior, estando entre 1,7 a 1,9%, enquanto que sob condições anaeróbicas, esta situa-se entre 0,45 a 0,50% (Sicar *et alii*, 1940, citados por PATRICK JR., 1982).

Embora haja ainda pouca informação sobre o efeito de diferentes propriedades do solo na amonificação do N orgânico em solos cultivados com arroz sob inundação, trabalho conduzido por SAHRAWAT (1983), com 39 solos das Filipinas evidenciou uma correlação altamente significativa da produção de amônio com o teor de N total ($r=0,94$), carbono orgânico ($r=0,91$) e relação C/N ($r=-0,46$), bem como uma correlação não significativa com CTC, teor de argila e pH, o que levou o autor a sugerir o conteúdo de carbono orgânico como um bom índice da mineralização de N em solos tropicais cultivados com arroz inundado.

Conforme menciona YOSHIDA (1978), a mineralização ou amonificação do nitrogênio é uma das transformações de maior importância no solo, em termos de crescimento das culturas. Nas condições da cultura do arroz cultivado sob inundaçãõ, este processo assume papel relevante, mesmo em campos adubados com N mineral (SAHRAWAT, 1983). O fato de alguns estudos terem revelado que na cultura do arroz inundado, 60 a 80% do nitrogênio absorvido durante o ciclo deriva-se do N nativo (Koyama *et alii*, 1973 e Broadbent, 1979, citados por SAVANT & DE DATTA, 1982), reforça a significância deste processo.

Tendo em vista a importância deste processo na nutrição nitrogenada do arroz sob inundaçãõ, diversos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de se avaliar o comportamento do amônio em solos inundados. BEYE (1977a), estudando a dinâmica do nitrogênio amoniacal na solução de um solo submerso cultivado com arroz, verificou um teor máximo deste elemento, duas semanas após a repicagem do arroz, com um subsequente decréscimo até a colheita. Este autor verificou que o teor máximo obtido por ocasião da segunda semana foi maior nos tratamentos onde se incorporou palha de arroz, embora ao final do experimento, os teores de nitrogênio amoniacal tendessem a se igualar, independentemente do tratamento aplicado. Comportamento semelhante com relação a um aumento na disponibilidade de NH_4^+ após duas semanas de submersão foi verificado por PARISCHA & SINGH (1977), sendo o posterior decréscimo, atribuído pelos autores, a um consumo de N pelas plantas bem como a uma ligeira perda por

nitrificação e subsequente desnitrificação.

Também BEYE *et alii* (1979) estudaram as transformações do nitrogênio amoniacal na solução de diferentes solos submersos e verificaram que o teor e o grau de decomposição da matéria orgânica do solo tiveram grande influência nestas transformações, sendo a ação da matéria orgânica estreitamente ligada à textura, ao pH e ao estado de redução do solo.

Aumentos consideráveis nos teores de amônio extraível por KCl 2N, após a submersão do solo, foram observados por MACRAE *et alii* (1968) em 6 diferentes solos tropicais, sendo estes aumentos, estreitamente relacionados ao teor de matéria orgânica do solo. Este comportamento, segundo os autores, reflete uma alta capacidade de suprimento de nitrogênio de alguns solos tropicais cultivados com arroz. Neste contexto, vale ressaltar entretanto, que em solos inundados, as perdas de amônio por volatilização de amônia são bastante facilitadas (WATANABE, 1978), principalmente sob condições de baixa percolação de água no solo (MOHANTY & MOSIER, 1990) e adequado transporte de gases por difusão através da lâmina d'água de inundação (ROLSTON *et alii*, 1990), o que pode prejudicar o suprimento de N às plantas.

Com relação ao nitrato, a transformação de maior importância em solos inundados corresponde à desnitrificação, sendo este o principal mecanismo de perda de N nestes solos (PATRICK JR. & MAHAPATRA, 1968). Em estudo envolvendo dois solos do Estado do Rio Grande do Sul, MORAES *et alii* (1975), observaram

que o teor de nitrogênio na forma nítrica atingiu valores praticamente nulos no solo, num prazo de 3 semanas após a inundação.

A desnitrificação em solos inundados é decorrente da falta de oxigênio molecular em condições de redução. Nestas condições, determinados microrganismos anaeróbicos facultativos utilizam as formas oxidadas de nitrogênio como receptores de elétrons produzidos na oxidação do carbono, em alternativa ao oxigênio (vide quadro 1). Ressalta-se, contudo, que embora possa se iniciar mesmo antes da completa remoção do O_2 (PATRICK JR. & REDDY, 1978), esta reação ocorre em maior intensidade somente quando a maior parte do oxigênio molecular do solo tiver sido consumida (PATRICK JR. & MAHAPATRA, 1968), e desde que haja um adequado suprimento de carbono como fonte de energia.

Sendo a matéria orgânica do solo a principal fonte de carbono nestes sistemas, além também de fonte de H^+ , elétrons e amônia para a síntese celular (PONNAMPERUMA, 1972), então solos com maior teor de matéria orgânica perderão mais nitrato por desnitrificação e vice-versa. Este comportamento foi bem evidenciado no trabalho de MACRAE *et alii* (1968), e, também, SHEARD & LEYSHON (1976) demonstraram que a adição de uma fonte de carbono solúvel (sucrose) estimulou a atividade microbiana anaeróbica, acelerando a queda no potencial redox e na remoção de $N-NO_3^-$ do sistema.

Além da matéria orgânica, também o pH exerce uma forte influência na taxa de desnitrificação, sendo esta mais lenta em

solos ácidos e mais rápida em solos com pH elevado (Brenner & Show, 1958, citados por BROADBENT & CLARK, 1965). A presença de outras formas intermediárias de óxidos de N no processo de desnitrificação parece não interferir na taxa de redução do NO_3^- (FIRESTONE, 1982).

Ainda com relação ao nitrato, a ocorrência de nitrificação e posterior desnitrificação em solos inundados tem sido sugerida e comprovada em diversos estudos (YOSHIDA, 1978; HASEBE *et alii*, 1980; MOHANTY & MOSIER, 1990). Segundo SIQUEIRA & FRANCO (1988), este processo pode ocorrer em microsítios, na rizosfera do arroz, onde há a liberação de O_2 pelas raízes. Neste caso, o N nitrificado e não absorvido pela planta sofrerá desnitrificação quando se difundir na água de inundação.

De modo análogo, vale ressaltar também, que a aplicação de fertilizantes nitrogenados, mesmo na forma amoniacal, na camada superficial oxidada dos solos inundados, pode levar a grandes perdas de N por desnitrificação, visto que o nitrato, formado a partir da oxidação de amônio na camada aeróbica, se movimenta por difusão para a camada reduzida, participando posteriormente das reações de desnitrificação conduzidas por bactérias anaeróbicas facultativas (PAVAN & MIYAZAWA, 1983; ROLSTON *et alii*, 1990). Também a difusão de amônia da camada reduzida para a camada oxidada do solo, seguida de um posterior movimento descendente do nitrato, pode levar a perdas semelhantes (PONNAMPERUMA, 1972), embora estas possam ser diminuídas substancialmente com a redução do fluxo descendente de água

no solo (ROSLTON *et alii*, 1990).

Da mesma forma, ciclos alternados de umedecimento e secagem aumentam as perdas por desnitrificação, pois o nitrogênio convertido a nitrato durante o período em que o solo está drenado é perdido por desnitrificação quando este é submetido à inundação (PATRICK JR. & MAHAPATRA, 1968) e, neste contexto, a inundação contínua ajuda a minimizar este problema.

Embora alguns autores mencionem o desaparecimento das formas nítricas e a acumulação das formas amoniacais como sendo as principais transformações do nitrogênio mineral em solos submersos (Ruby, 1969 e Yamane, 1969, citados por BEYE *et alii*, 1979), vale ressaltar que em solos cultivados com arroz sob inundação, o processo de fixação de N_2 pode apresentar também um grande significado agronômico, principalmente se não ocorrerem condições de baixa fertilidade natural do solo que possam prejudicar o processo de fixação biológica, conforme observou Matsuguchi (1975; 1976), citado por WATANABE (1978), em solos da Tailândia. Acréscimos no teor de nitrogênio do solo sob condições favoráveis ao processo de fixação de N_2 , principalmente sob baixo potencial redox, têm sido relatados na literatura (PONNAMPERUMA, 1978).

2.1.4. Fósforo

O fósforo, assim como o nitrogênio, existe nos estados de valência entre +5 e -3 e embora, termodinamicamente, fosfito, hipofosfito e fosfina possam ser formados a partir do

fosfato em meio anaeróbico, as principais transformações que ocorrem com o fósforo nestas condições, estão relacionadas às alterações do íon ortofosfato (PONNAMPERUMA, 1972).

Quando um solo é submerso e as condições de redução são estabelecidas, ocorre um aumento na concentração de fósforo solúvel em água e na disponibilidade de P. Este comportamento tem sido evidenciado por diversos autores (MORAES, 1973a; MANDAL & KHAN, 1975; BASU, 1977), sendo sugerido como uma explicação para a baixa resposta, ou até mesmo, para a falta de resposta do arroz inundado à aplicação de fósforo no solo (GUPTA & SINGH, 1977; BRANDON & MIKKELSEN, 1983).

ALVA *et alii* (1980) sugeriram que esta falta de resposta do arroz à adição de P está ligada à existência de um mecanismo fisiológico na planta de arroz, que faz com que a disponibilidade de fósforo na rizosfera seja regulada de acordo com a necessidade da planta e com o fósforo disponível no solo. Estes autores observaram que, numa fase inicial de crescimento, principalmente em solos que não receberam fósforo na adubação, o teor de fósforo do solo em parcelas cultivadas era maior que naquelas não cultivadas, o que sugeria uma grande capacidade de mobilização do fósforo pelas raízes do arroz, nesta fase. Foi verificado ainda, que à medida que avançava o ciclo da cultura, o teor de fósforo no solo das parcelas cultivadas decrescia acentuadamente, tornando-se inferior ao teor de fósforo no solo das parcelas não cultivadas. Fazendo a correção dos valores de fósforo no solo através do acréscimo do fósforo absorvido pela

cultura, estes autores verificaram que esta situação persistia e concluíram então, que durante o seu desenvolvimento, com o incremento da capacidade oxidativa das raízes, a planta de arroz passa a exercer uma forte influência na imobilização do P no solo, sendo esta influência tanto menor e mais tardia, quanto menor era o teor de P no solo.

O efeito da inundação sobre a disponibilidade de fósforo foi estudado também por MORAES & FREIRE (1974), em quatro solos do Rio Grande do Sul, tendo sido constatado que, em solos não adubados, a liberação de P para a solução do solo atingiu um máximo ao redor de 4 a 6 semanas após o início da inundação, decrescendo, posteriormente, até o final do ensaio (126 dias). O aumento inicial foi atribuído à redução dos fosfatos férricos e o decréscimo posterior, à readsorção dos fosfatos pelas argilas e hidróxidos de alumínio. Neste mesmo ensaio, porém com solos adubados, enquanto que em dois solos os teores de P na solução se mantiveram praticamente constantes, em outros dois, que apresentavam inicialmente altos teores de P na solução, houve uma queda acentuada do P até a quarta semana seguida de um acréscimo máximo entre a quinta e sexta semanas, acompanhado de um posterior decréscimo até o final do ensaio. Também neste último caso, a queda inicial do teor de P na solução do solo foi atribuída à fixação do P aplicado.

Segundo PONNAMPERUMA (1972), o aumento da disponibilidade de fósforo em solos ácidos, quando inundados, resulta de:

- a) hidrólise dos fosfatos de Fe^{3+} e Al;

- b) liberação do fósforo ligado por troca iônica nas argilas e óxidos (termo incluso para óxidos, oxidróxidos e hidróxidos) de Fe^{3+} e Al; e,
- c) redução do Fe^{3+} a Fe^{2+} com liberação do fósforo adsorvido ou quimicamente ligado.

Os dois primeiros mecanismos ocorrem devido ao aumento do pH, ocasionado pela redução do solo. Com a inundação, os fosfatos de alumínio, estáveis em pH ácido, dissociam-se a partir de pH 5,3, liberando íons HPO_4^{2-} para a solução do solo, havendo ainda, o efeito do aumento do pH na diminuição das cargas positivas dos colóides do solo, com diminuição da adsorção de ânions e, conseqüentemente, aumento da concentração de íons HPO_4^{2-} na solução do solo (PAVAN & MIYAZAWA, 1983).

O aumento na difusão do fósforo no solo também tem sido utilizado para explicar o aumento da disponibilidade de fósforo em solos inundados. Esta proposição foi levantada inicialmente por TURNER & GILLIAM (1976a) que observaram uma maior acumulação de fósforo em resinas aniônicas mantidas em contato com solos saturados quando comparados a solos apenas úmidos, acumulação esta que, por ter ocorrido antes mesmo que as condições de redução se instalassem efetivamente no solo, foi atribuída ao aumento da difusão ocasionado pela diminuição da tortuosidade. Também estes autores verificaram, posteriormente, em outro estudo envolvendo dez solos da Índia, Peru e E.U.A. (TURNER & GILLIAM, 1976b), que enquanto alguns fatores ligados ao suprimento de P para as plantas, tais como capacidade e intensidade,

não apresentavam aumentos consistentes com a saturação do solo, o fator difusividade, medido pelo coeficiente de difusão do ^{32}P , cresceu pelo menos 10 vezes com o aumento da umidade do solo.

Conquanto ocorra um aumento na difusão de fósforo com o aumento no teor de água do solo, este parece ser variável também em função da solubilidade do composto fosfatado. Neste contexto, PORANANOND & SEARLE (1977) observaram que a disponibilidade de fósforo proveniente de diferentes fertilizantes fosfatados era função não só da movimentação do fosfato no solo, mas também da solubilidade do fertilizante, o que, de uma maneira geral, pode ser extrapolado para as condições dos diferentes compostos fosfatados do solo. Nestas condições, tanto o potencial redox quanto o pH exercem um importante papel.

→ Um ponto essencial a ser ressaltado com relação à disponibilidade de fósforo em solos de várzea é o que diz respeito aos ciclos alternados de umedecimento e secagem a que muitos destes solos estão expostos. Embora em muitos casos tenham sido observados aumentos na disponibilidade de fósforo com a inundação, alguns autores têm demonstrado que esta situação se reverte completamente com a drenagem posterior do solo, causando sérios problemas para as culturas subseqüentes (BRANDON & MIKKELSEN, 1979; 1983).

WILLETT (1979) verificou que o decréscimo da disponibilidade de fósforo no solo, para culturas subseqüentes ao arroz sob inundação, estava associado ao aumento na adsorção de

fósforo ocasionado por inundação e secamento alternados. Este autor observou que, juntamente com o aumento no parâmetro capacidade máxima de adsorção de fósforo, havia também, um aumento nos teores de ferro extraíveis pelo oxalato, em solos previamente inundados, indicando que os óxidos de ferro destes solos eram de pior grau de cristalinidade que naqueles não inundados.

WILLETT & HIGGINS (1980) observaram ainda, que embora os teores de ferro extraíveis pelo oxalato bem como a adsorção de fósforo (acompanhados da oxidação dos óxidos de ferro) sofressem um rápido declínio com a drenagem, os níveis não retornavam àqueles existentes antes da inundação. Estes autores verificaram que os novos óxidos de ferro (3+) formados após a drenagem do solo eram mais facilmente extraíveis pelo oxalato e portanto, de menor grau de cristalinidade e mais hábeis a adsorver uma maior quantidade de fósforo. ←

A redução biológica do ferro durante o período de inundação, seguida por sua reoxidação durante o período de secagem, resulta no aumento da reatividade da fração de óxidos do solo, levando ao aumento da capacidade de adsorção de fósforo (ALVA *et alii*, 1980). Nestas condições, tem-se verificado que o efeito do aumento do pH, com a inundação, no aumento da disponibilidade de fósforo, passa a ser sobrepujado pelo efeito dos ciclos de redução e oxidação no aumento da reatividade dos óxidos, exceção feita apenas nos casos de solos adubados recentemente, onde o fósforo ainda pode se encontrar em formas prontamente extraíveis (WILLETT, 1990).

Além das formas inorgânicas, também o P orgânico apresenta, sob condições anaeróbicas, um comportamento diferente daquele verificado em condições aeróbicas. Dentro deste contexto, estudos desenvolvidos por CAMPBELL & RACZ (1975), demonstraram uma maior mineralização desta forma de P em solos sob inundação quando comparados a solos mantidos com teor de umidade próximo à capacidade de campo. Koyama *et alii* (1973) e Han & Yoshida (1977), citados por YOSHIDA (1978), evidenciaram ainda a possibilidade de bactérias da rizosfera do arroz mineralizarem o fósforo orgânico, tornando este nutriente disponível para a planta. Este comportamento, bem como a possibilidade de maior mineralização sob condições anaeróbicas sugerem que a contribuição do fósforo orgânico possa ter algum significado na nutrição de plantas em solos inundados, contrariando as observações de PATRICK JR. & MAHAPATRA (1968). Esta suposição é limitada, entretanto, pela carência de estudos sobre o efeito do teor de umidade do solo na mineralização do fósforo orgânico (DALAL, 1977), bem como a respeito dos diversos fatores envolvidos na mineralização microbiológica do fósforo orgânico em solos inundados, como por exemplo, atividade enzimática e nível crítico de fósforo (YOSHIDA, 1978).

2.1.5. Enxofre

As transformações do enxofre em solos inundados são predominantemente biológicas, sendo as seguintes, as principais reações que ocorrem nestes sistemas (FRENEY & BOONJAWAT, 1983):

- a) mineralização ou decomposição dos compostos orgânicos de enxofre com liberação de compostos inorgânicos de enxofre;
- b) imobilização ou conversão do enxofre inorgânico em compostos orgânicos de enxofre;
- c) produção de sulfeto a partir da redução do sulfato ou de outros compostos inorgânicos de enxofre;
- d) produção de compostos voláteis de enxofre; e,
- e) oxidação do enxofre elementar e dos compostos inorgânicos de enxofre.

Também no que diz respeito ao enxofre, poucos são os estudos relacionados à mineralização e imobilização deste elemento em condições de inundação. SACHDEV & CHHADRA (1974), trabalhando com ^{35}S , verificaram que, sob condições de inundação, 37,8% do sulfato inorgânico adicionado ao solo tinham sido convertidos a S orgânico, enquanto que em condições aeróbicas este teor caiu para 28,1%. Zhu *et alii* (1983), citados por FRENEY & BOONJAWAT (1983), em um experimento com diferentes solos mantidos sob condições saturadas, observaram que a mineralização do S orgânico após 10 semanas de incubação variou de 3,8 a 15,6% (média = 9,6%).

É inegável que sob condições de inundação, os processos de mineralização e imobilização ocorrerão de maneira diferente daquela dos solos aerados, devido às alterações no regime de umidade, pH e disponibilidade de nutrientes, entre outros, associados a uma diversificação nas espécies de microrganismos.

Ressalta-se ainda, que mesmo no ecossistema de solos inundados, a mineralização na zona aeróbica (camada superficial do solo) pode ser diferente daquela da zona reduzida, o mesmo podendo ocorrer na rizosfera do arroz (YOSHIDA, 1978). De modo análogo ao já descrito para o fósforo, também com relação ao enxofre há evidências de que bactérias da rizosfera do arroz possam mineralizar o S orgânico, tornando este nutriente disponível para a planta (Koyama *et alii*, 1973 e Han & Yoshida, 1977, citados por YOSHIDA, 1978).

Com relação às transformações das formas inorgânicas de enxofre, a reação de redução do sulfato a sulfeto é a que tem sido mais estudada sob condições de inundação.

A produção de sulfeto em solos inundados se dá em virtude do sulfato produzido na camada oxidada ou aquele adicionado ao solo difundir-se para a camada reduzida, sendo então reduzido a sulfeto por 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 (PONNAMPERUMA, 1972). Embora a bactéria anaeróbica *Desulfovibrio desulfuricum* seja considerada a principal responsável pela redução do sulfato em solos inundados (BLOOMFIELD & COULTER, 1973), existe alguma evidência de que esta redução possa ocorrer pela ação de dois microrganismos, trabalhando por etapas: espécies de *Bacillus* reduzem o sulfato a sulfito, que é reduzido a sulfeto por *Clostridium* (Krouse & McCready, 1979, citados por FRENEY & BOONJAWAT, 1983).

A intensidade do processo de redução do sulfato em solos inundados é determinada pelo estoque inicial de sulfato no solo e pelas condições de redução do meio (BEYE *et alii*, 1979). Devido às condições de potencial redox extremamente baixo (vide quadro 1), a redução do sulfato não ocorre logo após a inundação do solo, visto que anteriormente ao sulfato, ocorre a redução de oxigênio, nitrato, óxidos manganícos, ácidos orgânicos e óxidos férricos.

BEYE *et alii* (1979) verificaram, para alguns solos do Senegal, que a redução do sulfato era caracterizada por duas fases: um período de aumento na concentração de sulfato, de curta duração, atribuído à liberação do SO_4^{2-} dos sítios de troca aniônica, seguido de uma conversão do sulfato a compostos reduzidos, com teores mínimos de SO_4^{2-} por volta da 12ª semana, ocasião em que as condições de redução eram intensas. Estudos envolvendo as transformações do sulfato em condições aeróbicas e sob inundação, desenvolvidos por SACHDEV & CHHABRA (1974), mostraram que após 4 meses de incubação, em condições aeróbicas, aproximadamente 68% do sulfato adicionado na forma de ^{35}S se encontravam ainda como sulfato, enquanto que sob inundação este teor caiu para 12,7%.

Os produtos finais da redução do sulfato são os íons sulfeto e o gás sulfeto de hidrogênio (H_2S) (FRENEY & BOONJAWAT, 1983), podendo esta redução, trazer as seguintes implicações para a cultura do arroz sob inundação (PONNAMPERUMA, 1972):

- a) o suprimento de enxofre pode tornar-se deficiente;
- b) zinco e cobre podem ser imobilizados; e,
- c) toxicidade de H_2S pode ocorrer em solos com baixo teor de ferro.

A produção de H_2S a partir da redução do sulfato, embora possa atingir níveis tóxicos ao arroz, tende a ser de pouca importância em solos com níveis mais elevados de ferro e outros cátions metálicos, com os quais o sulfeto forma compostos insolúveis (CONNELL & PATRICK JR., 1969). AYOTADE (1977) verificou que a concentração de H_2S solúvel em água, em diferentes solos, atingiu um pico máximo por volta da 3^a semana de submersão, decrescendo posteriormente ao final de 10 semanas. A possibilidade de toxicidade de H_2S em alguns solos ácidos com baixo teor de Fe, foi também ressaltada por este autor.

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. Um estudo neste sentido foi efetuado por ENGLER & PATRICK JR. (1975), tendo sido observado que, sob condições anaeróbicas, e em ordem decrescente de solubilidade, 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 S^{2-} a níveis tóxicos, este era oxidado na região da rizosfera do arroz, sendo posteriormente absorvido na forma oxidada.

A existência de uma região oxidada na rizosfera da planta de arroz possibilita o desenvolvimento de bactérias do gênero *Beggiatoa* que oxidam o sulfeto de hidrogênio a enxofre elementar (Joshi & Hollis, 1977, citados por YOSHIDA, 1978), sendo este um dos mecanismos que permite ao arroz desenvolver-se bem em solos inundados com alta concentração de sulfeto (FRENEY & BOONJAWAT, 1983). De maneira semelhante, também na camada superficial oxidada dos solos submersos, o sulfeto pode ser oxidado a sulfato por bactérias autotróficas do gênero *Thiobacillus* (YOSHIDA, 1978).

2.2 Calagem em Solos de Várzea

A calagem é uma prática que visa, entre outros, o aumento no pH dos solos ácidos a um nível tal que permita o melhor aproveitamento da maioria dos nutrientes, proporcionando um ambiente mais favorável ao desenvolvimento das plantas. Têm sido observadas ainda, como consequência deste aumento de pH, reduções significativas no processo de adsorção de ânions, principalmente de fosfato e sulfato (COLEMAN & THOMAS, 1967; NEPTUNE *et alii*, 1975).

Tendo em vista que, sob baixo pH, o processo de nitrificação tende a ocorrer lentamente (ALEXANDER, 1965), então outro efeito importante da calagem é o incremento da taxa de nitrificação do amônio em solos ácidos, conforme evidenciaram SILVA *et alii* (1990). Vale ressaltar, que a reação de nitrifi-

cação de "per si" resulta na acidificação do meio, o que tende a tornar o ambiente do solo cada vez mais inapto às bactérias nitrificadoras. Esta grande sensibilidade das bactérias dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter* (responsáveis pela oxidação do amônio a nitrato) à alta acidez do solo, faz com que a mineralização da matéria orgânica sob condições ácidas ($\text{pH} < 6,0$) resulte predominantemente no acúmulo de amônio, sendo o nitrato acumulado somente em $\text{pH} > 6,0$ (JACKSON, 1967).

Além do efeito sobre o nitrogênio, a calagem pode apresentar também, uma grande influência sobre as taxas de mineralização de fósforo e enxofre, as quais tendem a ser aceleradas pela redução da acidez do solo (JACKSON, 1967).

Em se tratando de solos ácidos mantidos sob inundação, onde o pH tende a aumentar com o tempo de submersão, a simples preocupação com o baixo pH do solo, torna-se desnecessária. Entretanto, nestas condições, a prática da calagem tem-se mostrado eficiente no controle da toxicidade de ferro (FREIRE *et alii*, 1985), na redução dos níveis de H_2S em solos tiomórficos (AYOTADE, 1977) e no aumento da produção de arroz em solos que apresentam problemas de exposição do horizonte subsuperficial - Cg (OLIVEIRA *et alii*, 1989). Considerando-se ainda, o fato de que também o processo de desnitrificação ocorre de maneira mais lenta em solos ácidos (Bremner & Show, 1958, citados por BROADBENT & CLARK, 1965), espera-se então que a prática da calagem nestes solos resulte numa maior facilidade inicial de perda de N por desnitrificação, quando da inundação.

O efeito da calagem sobre a disponibilidade de alguns nutrientes essenciais às plantas, em solos mantidos sob inunda-ção, tem sido estudado por alguns autores. Decréscimos na con-centração de fósforo, nitrogênio e zinco na planta de arroz têm sido verificados em alguns estudos (SINGH & SINGH, 1980a; 1980b; 1981; PEREIRA, 1985).

SINGH & SINGH (1980a) mencionam que o decréscimo na absorção de fósforo decorrente da adição de calcário em solos inundados pode estar relacionado à fixação de P nativo em pre-sença do CaCO_3 , devido à formação de fosfatos de cálcio de baixa solubilidade. Esta hipótese é perfeitamente aceitável, visto que a solubilidade dos fosfatos de cálcio tende a diminuir com o aumento do pH verificado nos solos ácidos inundados. Neste contexto, MANDAL (1964) sugere que, para solos ácidos culti-vados com arroz sob inundaçã, a calagem inicial seguida da adição de matéria orgânica pode aumentar a disponibilidade do fósforo nativo do solo, pois a primeira prática permitiria a conversão dos fosfatos de ferro e alumínio a fosfatos de cálcio que seriam solubilizados pelo CO_2 formado a partir da decom-posição da matéria orgânica adicionada.

Com relação à produção, embora alguns trabalhos tenham mostrado um efeito nulo da calagem (LEITE *et alii*, 1970; SCHMIDT & GARGANTINI, 1970; FAGERIA *et alii*, 1977), aumentos significativos no rendimento do arroz, ocasionados pela ele-vação dos níveis de Ca e Mg em solos com baixos teores destes nutrientes foram observados no Estado do Rio Grande do Sul

(VAHL, 1978).

Segundo BARBOSA FILHO (1987), em cultura irrigada em solos ácidos, onde ocorre uma elevação natural do pH pela inundação, com conseqüente inibição da ação do alumínio, respostas do arroz à calagem podem ocorrer principalmente em solos de extrema acidez e com baixos teores de cálcio e magnésio. Nestas condições, deve-se considerar não só a importância do cálcio na planta e no solo cultivado com arroz irrigado (PATELLA, 1976), mas também o papel do magnésio, nutriente de grande importância, entre outros, na absorção do fósforo pela planta de arroz (FAGERIA, 1984; GUILHERME *et alii*, 1989).

Sabendo-se que sob baixos teores de cálcio no solo o desenvolvimento do sistema radicular da maioria das plantas é prejudicado (MENGEL & KIRKBY, 1982), e ainda, que no cultivo do arroz sob inundação, a oxidação da rizosfera exerce um papel de grande importância nas transformações dos nutrientes (YOSHIDA, 1978), espera-se que a calagem dos solos ácidos a serem submetidos à inundação, por possibilitar um maior desenvolvimento do sistema radicular, resulte no aumento da difusão de oxigênio ao solo, através das raízes, alterando, com isso, a dinâmica de todas as reações de redução-oxidação características de solos inundados.

3. MATERIAL E METODOS

3.1. Unidades de Solo

Foram utilizados materiais de quatro unidades de solos representativos dos "polders" Bela Vista e Careaçu, localizados no Vale do Rio Sapucaí, Sul de Minas Gerais, região de localização privilegiada entre três grandes centros de consumo - São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, e que apresenta uma área de aproximadamente 40.000 hectares de várzea com alto potencial agrícola (Figura 1).

Os "polders" Bela Vista e Careaçu estendem-se por uma área de cerca de 2.000 hectares, sendo 58,5% desta representada pelas unidades de solo em estudo (BRASIL, 1974), as quais foram classificadas por AVELAR & SOUZA (1976) e GRANDE *et alii* (1986), como:

Al - Solo Orgânico (HO) referente à unidade Aliança, localizada no "Polder" Careaçu;

Sd - Solo Glei Húmico (HGH) referente à unidade Sangra d'água, localizada no "Polder" Bela Vista;

Ja - Solo Glei Pouco Húmico (HGP) referente à unidade Jacareaquara, localizada no "Polder" Careaçu;

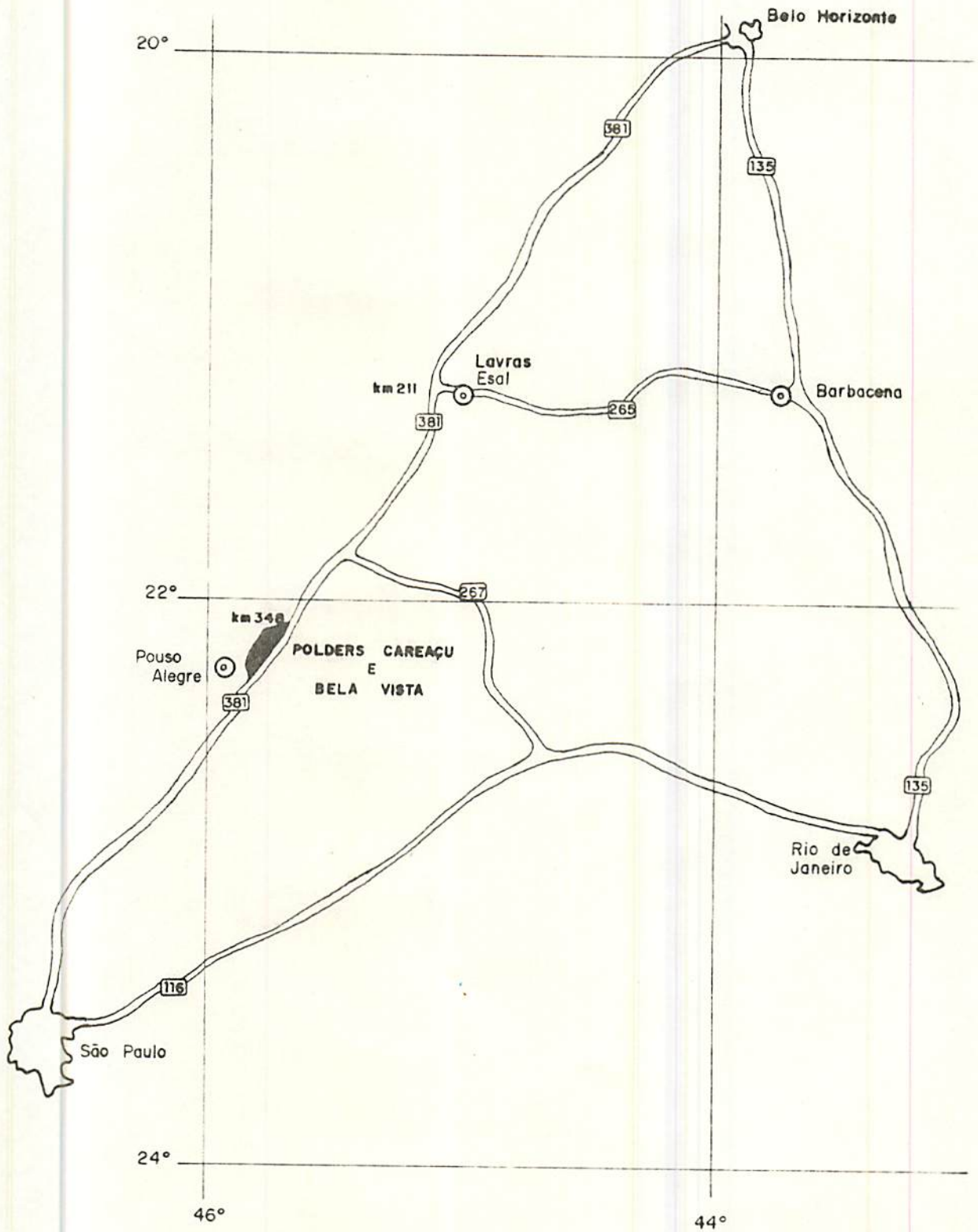


FIGURA 1. Localização da área de coleta das unidades de solo estudadas (Polders Careaçú e Bela Vista).
Fonte: Adaptado de BRASIL (1974).

Bv - Cambissolo (C) referente à unidade Bela Vista, localizada no "Polder" Careaçú.

A escolha destas unidades visou não somente abranger diferentes classes de solos de várzea, mas também obter uma variação considerável de características químicas e físicas.

3.2. Coleta e Preparo dos Materiais de Solos

Nas diferentes unidades de solo estudadas, o material de solo foi coletado na camada de 0 a 20 cm, 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 2mm de abertura, constituindo-se na fração terra fina seca ao ar (TFSA), da qual foram retiradas sub-amostras para caracterização física e química das unidades.

3.3. Análises de Caracterização e Avaliação

3.3.1. Análises Físicas

A análise granulométrica foi efetuada mediante dispersão das amostras usando princípios químicos (NaOH 0,1N) e físicos (agitação com alta rotação), sendo a separação da fração areia (2 a 0,05mm) feita por tamisagem úmida e a determinação de argila (<0,002mm), feita segundo o método da pipeta (DAY, 1965). O volume total de poros (VTP) do material de solo no

vaso foi calculado a partir da expressão $VTP = 100 \left[1 - \left(D_s / D_p \right) \right]$ (VOMOCIL, 1965), sendo a densidade do solo (D_s) determinada com base na densidade do material de solo no vaso de cultivo, e a densidade de partículas (D_p) determinada pelo método do picnômetro (BLAKE, 1965). O quadro 2 apresenta o resultado destas análises.

QUADRO 2. Caracterização física das unidades de solo estudadas.

Solo	Areia	Silte	Argila	Classe Textural	D_s^1	D_p	VTP
	%				g/cm ³		%
C	30	35	35	Franco Argiloso	0,92	2,45	62
HGP	38	35	27	Franco Argiloso	0,69	2,32	70
HGH	60	31	9	Franco Arenoso	0,61	2,12	71
HO	37	40	23	Franco	0,60	2,02	70

1/ D_s . Densidade do material de solo no vaso.

3.3.2. Análises Químicas

Análises de pH H₂O, pH CaCl₂ 0,01M, carbono orgânico, Ca, Mg e Al (extraídos por KCl 1N), K (extraído por HCl 0,05N+ H₂SO₄ 0,025N) e Fe₂O₃ (ataque sulfúrico) foram feitas conforme VETTORI (1969), com modificações (EMBRAPA, 1979). Para determinação do P extraído por resina trocadora de ions bem como da acidez extraída com solução de acetato de cálcio 1N a pH 7,0 (H+Al), seguiu-se metodologia descrita por RAIJ *et alii* (1987).

O nitrogênio total e o inorgânico ($N-NO_3^-$ e $N-NH_4^+$) foram determinados segundo BREMNER & MULVANEY (1982) e KEENEY & NELSON (1982), respectivamente.

O fósforo orgânico foi determinado pelo método de ignição, conforme descrito por OLSEN & SOMMERS (1982).

O enxofre na forma de sulfato ($S-SO_4^{2-}$) foi determinado segundo HOEFT *et alii* (1973). Na determinação do enxofre "total" e de "reserva", seguiu-se metodologia descrita por TABATABAI & BREMNER (1970).

O ferro solúvel em ditionito - citrato - bicarbonato (Fe_d) e em oxalato de amônio (Fe_o) foi determinado conforme MEHRA & JACKSON (1960) e SCHWERTMANN (1964), respectivamente, realizando-se duas extrações no primeiro caso e uma no segundo.

O quadro 3 apresenta algumas análises químicas de caracterização inicial dos materiais de solos utilizados no presente estudo.

3.4. Condução do Experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no Departamento de Ciência do Solo da ESAL, Lavras, MG. Utilizaram-se 4 solos num delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 4 x 5 (4 tratamentos e 5 épocas de amostragem). Os 4 tratamentos aplicados aos 4 diferentes solos em 3

QUADRO 3. Caracterização química das unidades de solo estudadas

	SOLO			
	C	HGP	HGH	HO
pH H ₂ O	5,4	5,1	4,6	4,2
pH CaCl ₂ 0,01M	4,8	4,0	3,8	3,7
Ca (meq/100 cm ³)	2,7	0,5	0,5	1,0
Mg (meq/100 cm ³)	2,3	0,2	0,4	0,4
Al (meq/100 cm ³)	0,3	1,4	1,9	2,2
K (ppm)	67	69	45	59
H+Al (meq/100 cm ³)	9,8	16,5	17,6	24,2
S (meq/100 cm ³)	5,1	0,9	1,0	1,5
CTC (meq/100 cm ³)	14,9	17,4	18,6	25,7
V (%)	34	5	5	6
Matéria orgânica (%)	5,8	12,0	15,5	20,0
Fe ₂ O ₃ (%)	10,5	4,1	2,8	1,9
Fe _o (%)	0,79	0,72	0,66	0,36
Fe _d (%)	5,87	1,50	0,97	0,44
Relação Fe _o /Fe _d	0,13	0,48	0,68	0,82

repetições constituíram 48 vasos plásticos contendo 2 dm³ de solo (TFSA), de onde eram retiradas as amostras por ocasião de cada uma das 5 épocas de avaliação. Cada vaso foi cultivado com duas plantas de arroz da variedade INCA, sendo as sementes previamente colocadas para germinar em substrato de vermiculita, e as mudas, transplantadas para os vasos, por ocasião do início do experimento, 20 dias após a semeadura.

Os tratamentos constaram de:

- i) manutenção da unidade do solo em torno de 60% do volume total de poros, conforme FREIRE *et alii* (1980) - (60% VTP);
- ii) inundação completa por ocasião do transplântio das mudas, com manutenção de uma lâmina d'água de aproximadamente 4 cm até o final do experimento - (inundado);
- iii) incubação com calcário seguida de manutenção da unidade em torno de 60% do VTP - (60% + cal.); e,
- iv) incubação com calcário seguida de inundação completa por ocasião do transplântio - (inund. + cal.).

A calagem foi efetuada com base em curvas de neutralização obtidas previamente para cada solo (GUILHERME *et alii*, 1988), visando atingir um valor de pH CaCl_2 0,01M igual a 5.0. A escolha do pH CaCl_2 0,01M como parâmetro para recomendação de calagem deu-se em virtude da leitura deste ser menos influenciada pela produção de sais, o que já não ocorre com o pH H_2O (SCHOFIELD & TAYLOR, 1955).

Após o período de incubação com calcário, todas as parcelas receberam uma adubação básica de plantio constituída de 118 mg de P e 149 mg de K por vaso, na forma do sal KH_2PO_4 , 40 mg de N, como sulfato de amônio e 20 mg de Zn, como sulfato de zinco. Efetuaram-se ainda, no decorrer do experimento, duas adubações nitrogenadas em cobertura, com 100 mg de N na forma de uréia, aplicadas aos 14 e 42 dias após o transplântio, o qual se deu 10 dias após a adubação básica de plantio.

As épocas de avaliação iniciaram-se no transplante e estenderam-se até a oitava semana, num total de cinco amostragens (de duas em duas semanas), ocasiões em que foram avaliados os seguintes parâmetros no solo:

- . Nitrogênio total;
 - . Nitrogênio inorgânico ($N-NO_3^-$ e $N-NH_4^+$);
 - . Fósforo extraído por resina trocadora de íons;
 - . Fósforo orgânico;
 - . Enxofre na forma de sulfato ($S-SO_4^{2-}$);
 - . Enxofre "total" e de "reserva";
- pH H_2O e pH $CaCl_2$ 0,01M.

Amostras provenientes de parcelas submetidas à inundação foram analisadas quanto a P-resina, nitrato, amônio e sulfato, em condições de pasta de solo saturado, tomando-se como base a massa da amostra saturada convertida para volume de terra fina seca ao ar (TFSA). De modo análogo, as amostras de solos das parcelas submetidas a um nível de água correspondente a 60% do VTP, foram analisadas nestas condições. Estas medidas visaram evitar possíveis transformações decorrentes do secamento da amostra por ocasião das análises, conforme evidencia a literatura (ALVA *et alii*, 1980; TABATABAI, 1982).

Para evitar que as amostragens (principalmente a partir da 4^a semana de condução do experimento) incluíssem quantidades excessivas de raízes do arroz, o que poderia prejudicar o seu desenvolvimento, foi feito um aparato de contenção parcial do sistema radicular com uma tela de nylon em forma de cilindro

(tendo como molde um tubo de P.V.C. de 100 mm), a qual ficou localizada no centro do vaso, sendo as amostras retiradas externa e lateralmente (Figura 2).

Parcelas constituídas de solos mantidos sob inundação foram amostradas por camadas (0 a 3 cm; > 3 cm), a partir da segunda semana, com a finalidade de se avaliar os parâmetros $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$ e $S-SO_4^{2-}$, distintamente, na camada superficial e naquela subjacente   superficial (Figura 2).

Ao final do experimento (56 dias), foi colhida e seca em estufa com ventilação forçada a 70  C, toda a parte aérea do arroz para determinação da concentração de N, P e S, segundo HUNTER (s.d.), bem como das quantidades destes nutrientes absorvidas e translocadas para a parte aérea, em cada tratamento.

A exceção do pH H_2O e pH $CaCl_2$ 0,01M, todos os demais parâmetros foram submetidos à análise de variância (Teste F) através do programa SANEST, sendo os efeitos dos tratamentos, avaliados nas cinco épocas de amostragem, de maneira independente para cada solo. Nas parcelas inundadas, onde os parâmetros $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$ e $S-SO_4^{2-}$ foram avaliados por camadas, efetuou-se também a análise de variância, considerando-se, entretanto, o efeito das profundidades de amostragem com e sem a aplicação de calcário, nas cinco épocas de amostragem, e de maneira independente para cada solo.

Na diferenciação dos efeitos de tratamentos e de épocas bem como das profundidades de amostragem, optou-se pela aplicação do teste de médias-Tukey, ao nível de significância de 5%.

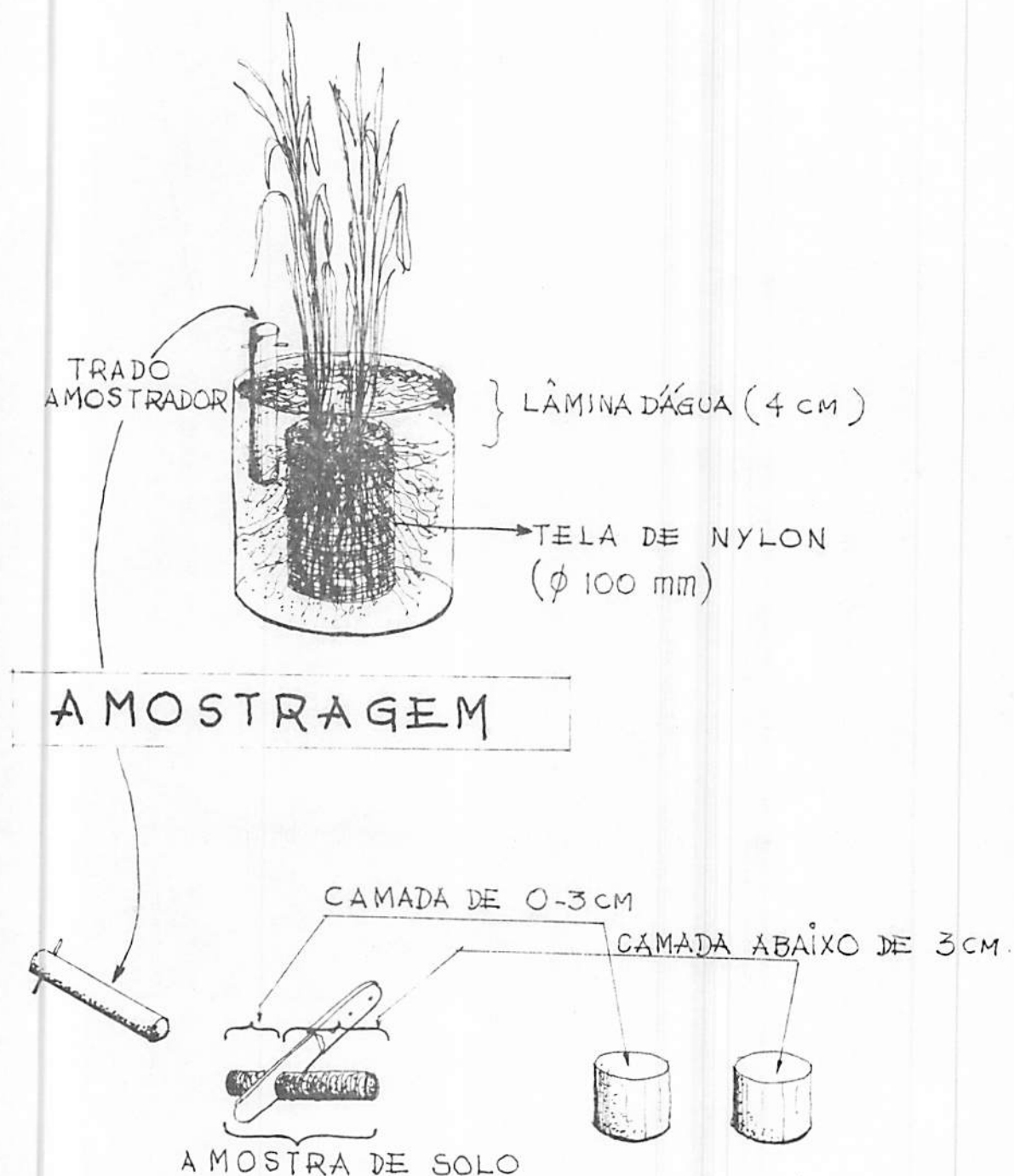


FIGURA 2. Ilustração esquemática do aparato de contenção do sistema radicular do arroz e do método de amostragem por camadas nas parcelas submetidas à inundação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As caracterizações física e química dos solos estudados (Quadros 2 e 3) mostram a variabilidade de características e/ou propriedades entre estes, embora, de uma maneira geral, todos se apresentem como sendo de baixa fertilidade natural. Vale ressaltar, quanto a estes dados, a correlação existente entre o teor de matéria orgânica (M.O.) e algumas propriedades destes solos, conforme mostra o quadro 4.

QUADRO 4. Correlação entre o teor de matéria orgânica (X) e algumas propriedades (Y) dos solos de várzea estudados.

Propriedade	Equação	Coefficiente de Correlação (r)
pH H ₂ O	Y = 5,98 - 0,09 X	- 0,979*
pH CaCl ₂ 0,01M	Y = 6,38 - 0,92 ln X	- 0,987*
CTC	lnY = 2,45 + 0,04 X	0,950*
D ₉ ^{1/}	Y = 1,39 - 0,27 ln X	- 0,883*
D _p	Y = 2,65 - 0,03 X	- 0,981*
Fe ₂ O ₃	lnY = 2,97 - 0,12 X	- 0,990**
Fe _o	Y = 1,01 - 0,03 X	- 0,800 n.s
Fe _d	lnY = 2,73 - 0,18 X	- 0,995**
Fe _o /Fe _d	Y = -0,13 + 0,05 X	0,992**

1/ Densidade do material de solo no vaso.

* Significativo ao nível de 5%.

** Significativo ao nível de 1%.

n.s. Não significativo ao nível de 5%.

4.1. pH

A variação do pH nas unidades de solo estudadas, durante o período de condução do experimento, está demonstrada na figura 3. Inicialmente, verifica-se que a calagem resultou na elevação do pH CaCl_2 0,01M a valores entre 5,0 e 5,3, enquanto que o pH H_2O situou-se entre 5,5 e 5,9.

Conforme já observado por outros autores (PONNAMPERUMA, 1972; MORAES, 1973a; KABEERATHUMMA & PATNAIK, 1979; GUILHERME *et alii*, 1989), a inundação provocou um aumento geral no pH dos solos estudados. Embora em solos com menores teores de matéria orgânica - Cambissolo (C) e Glei Pouco Húmico (HGP), o efeito da inundação sobre o pH H_2O tenha sobrepujado o efeito da calagem isolada, ao final do experimento, vale ressaltar, pelas leituras de pH CaCl_2 0,01M, que a simples inundação do solo não foi suficiente para substituir a calagem em termos de correção da acidez. É interessante observar ainda, que o efeito da inundação sobre pH H_2O tendeu a ser maior que sobre o pH CaCl_2 0,01M.

A ação tamponante da matéria orgânica (M.O.) sobre o pH em solos inundados, conforme sugerem GUILHERME *et alii* (1989), parece ter ocorrido também no presente estudo, ao final do período de submersão (8^a semana), principalmente em amostras que não receberam calagem (pH H_2O = 6,40 - 0,05 M.O.; $r = -0,99$; $p \leq 0,01$, e, pH CaCl_2 0,01M = 6,70 - 0,75 ln M.O.; $r = -0,99$; $p \leq 0,01$). O fato das diferenças de pH, ao final do experimento,

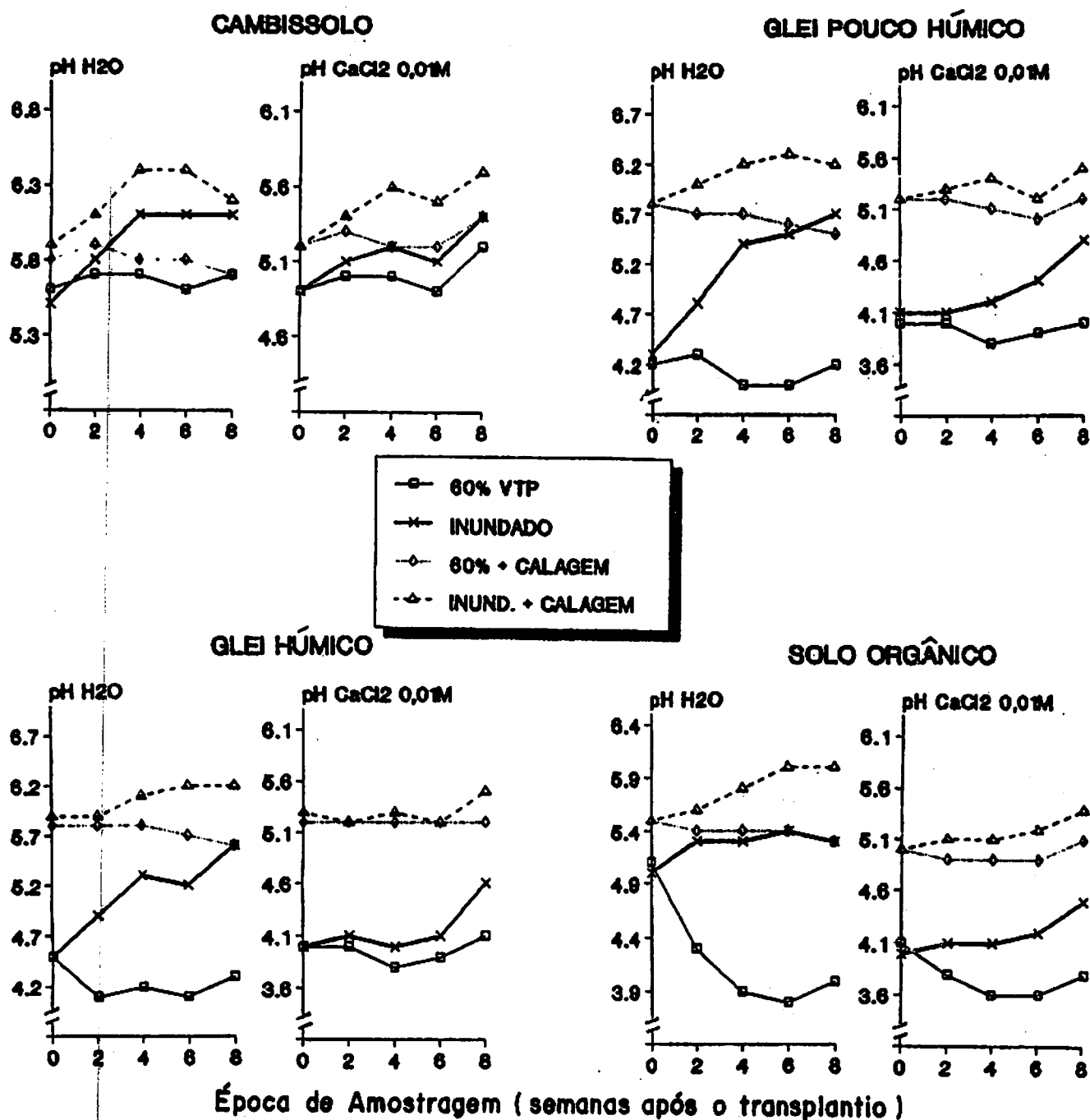


FIGURA 3. Variação nos valores de pH H₂O e pH CaCl₂ 0,01M em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundaçãõ.

entre os tratamentos "inundado" e "inundado + calagem", serem maiores nos solos com maiores teores de matéria orgânica, principalmente nas leituras de pH CaCl_2 0,01M, serve para reforçar esta hipótese. Deve-se ressaltar entretanto, que além da matéria orgânica, também os teores de óxidos de ferro assumem papel importante no comportamento do pH com a inundação (PATRICK JR. & REDDY, 1978; PAVAN & MIYAZAWA, 1983). Neste contexto, correlações estabelecidas entre parâmetros relativos ao teor de ferro dos solos em estudo e o pH medido após oito semanas de submersão, revelaram uma influência mais significativa do ferro extraível pelo ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_d) e do Fe_2O_3 (ataque sulfúrico), embora a relação-ferro oxalato/ferro ditionito (Fe_o/Fe_d) também tenha revelado uma correlação significativa, (Quadro 5).

Considerando-se que sob condições de inundação, a reação de redução do ferro é a que apresenta o maior consumo de H^+ por elétron (vide quadro 1), com conseqüente aumento do pH, pode-se inferir pelos dados constantes no quadro 5, que a determinação do teor de ferro extraível pelo ditionito-citrato-bicarbonato, bem como do teor de Fe_2O_3 do ataque sulfúrico apresentam-se como estimativas em potencial dos teores de ferro em solos de várzea passíveis de redução sob condições de inundação.

Com relação às parcelas mantidas com umidade em torno de 60% do volume total de poros (VTP), um fato importante revelado pela figura 3 é a tendência de queda do pH, principal-

QUADRO 5. Correlações entre parâmetros relativos ao teor de ferro do solo e o pH após 8 semanas de submersão em solos que não receberam calagem.

Parâmetro (X)	Equação	Coefficiente de Correlação (r)
	pH CaCl ₂ 0,01M(Y)	
Fe ₂ O ₃	Y = 4,43 + 0,10 X	0,997**
Fe _o	lnY = 1,37 + 0,33 X	0,758 n.s.
Fe _d	Y = 4,47 + 0,16 X	0,989*
Fe _o /Fe _d	Y = 5,52 - 1,33 X	- 0,985*
	pH H ₂ O(Y)	
Fe ₂ O ₃	Y = 5,07 + 0,45 ln X	0,987*
Fe _o	lnY = 1,56 + 0,28 X	0,912 n.s.
Fe _d	Y = 5,58 + 0,30 ln X	0,997**
Fe _o /Fe _d	Y = 6,25 - 1,08 X	- 0,981*

* Significativo ao nível de 5%.

** Significativo ao nível de 1%.

n.s. Não significativo ao nível de 5%.

mente nos solos com maiores teores de matéria orgânica. Como esta queda ocorreu de maneira mais consistente nos valores de pH H₂O em solos que receberam calagem, poder-se-ia atribuir, de início, como causa deste comportamento, a produção de sais decorrente da calagem, a qual apresenta pouca influência nas leituras de pH CaCl₂ 0,01M, mas tende a deprimir as leituras de pH H₂O (SCHOFIELD & TAYLOR, 1955). Considerando-se, entretanto, a queda de pH ocorrida nas parcelas que não receberam calcário, queda esta observada inclusive nas leituras de pH CaCl₂ 0,01M,

pode-se admitir como causa adicional deste comportamento, a ocorrência do processo de nitrificação, o qual leva à acidificação do solo (ALEXANDER, 1965). Embora esta última hipótese seja um pouco limitada devido ao baixo valor do pH em alguns solos que não receberam calagem, vale ressaltar a grande tendência de queda observada entre a segunda e a quarta semanas, ocasião em que foi efetuada a primeira adubação nitrogenada em cobertura.

Por se tratar de uma determinação menos influenciada pela presença de sais, o pH CaCl_2 0,01M mostrou-se menos variável que o pH H_2O em decorrência dos tratamentos aplicados, sendo, provavelmente, um melhor parâmetro de avaliação em trabalhos desta natureza. Esta sugestão é limitada, entretanto, pela carência de estudos nesta área, principalmente em se tratando de solos com elevados teores de matéria orgânica e mantidos sob inundação.

4.2. Nitrogênio

As variações nos teores das diferentes formas de nitrogênio durante o período experimental estão ilustradas nas figuras 4 a 8. Tendo em vista o grande número de informações geradas, e a utilização, no caso das formas inorgânicas (N-NO_3^- e N-NH_4^+), de critérios diferentes na avaliação dos efeitos dos tratamentos e das profundidades de amostragem, optou-se, assim, pela apresentação e discussão dos resultados separadamente.

De início, cabe mencionar entretanto, o efeito da calagem sobre o teor de nitrogênio nos solos, antes da diferenciação dos níveis de umidade, conforme demonstra o quadro 6. Verifica-se por estes dados, que a calagem favoreceu sensivelmente o processo de nitrificação, principalmente naqueles solos com maiores teores de matéria orgânica, nos quais, o pH inicialmente ácido, retardava este processo, fato este que concorda com as evidências da literatura (ALEXANDER, 1965). Nota-se ainda, à exceção do solo Orgânico, uma tendência de estímulo à mineralização do nitrogênio com a calagem, tendência esta dada pelo aumento das formas inorgânicas de N ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$), bem como da relação N inorgânico/N total, nos solos C (Cambissolo), HGP (Glei Pouco Húmico) e HGH (Glei Húmico).

QUADRO 6. Efeito da calagem no nitrogênio dos solos de várzea estudados, antes do cultivo com arroz (Média de 6 repetições).

Parâmetro	SOLO							
	C		HGP		HGH		HO	
	s/cal.	c/cal.	s/cal.	c/cal.	s/cal.	c/cal.	s/cal.	c/cal.
$N-NO_3^-$ (meq/100cm ³)	1,33	1,35	1,43	1,86	0,92	1,52	0,82	2,55
$N-NH_4^+$ (meq/100cm ³)	0,26	0,25	0,50	0,20	0,66	0,21	2,51	0,27
$N-NO_3^- + N-NH_4^+$ (meq/100cm ³)	1,59	1,60	1,93	2,06	1,58	1,73	3,33	2,82
N total (%)	0,55	0,50	0,82	0,82	0,87	0,88	1,20	1,18
$N-NO_3^- + N-NH_4^+$ / N total (%)	4,0	4,5	3,3	3,5	2,5	2,8	3,9	3,3

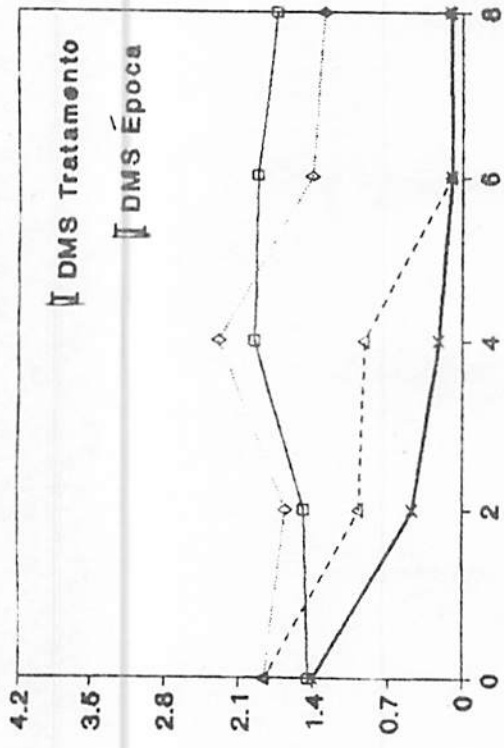
4.2.1. Alterações do N Inorgânico ($N-NO_3^-$ e $N-NH_4^+$)

Para comparação dos efeitos dos tratamentos bem como das épocas de amostragem nos teores de N inorgânico, utilizou-se, nas parcelas inundadas, os resultados das análises efetuadas na camada abaixo de 3 cm. As figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, as variações observadas nos teores de nitrato e amônio.

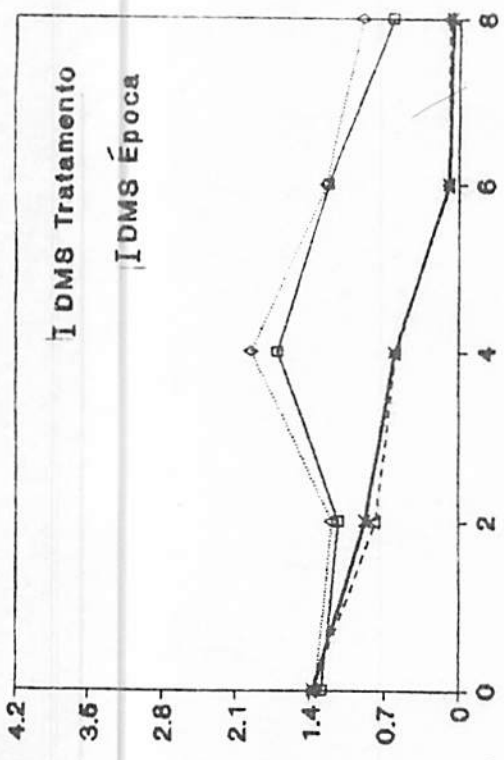
Com relação ao nitrato (Figura 4), pode-se confirmar, a princípio, o efeito da calagem favorecendo o processo de nitrificação nos solos ácidos. Sabendo-se que sob condições de inundação, grande parte do nitrato existente no solo é perdido através do processo de desnitrificação (PATRICK JR. & MAHAPATRA, 1968; PONNAMPERUMA, 1972; MORAES *et alii*, 1975), o qual tende a ser mais acentuado com a correção da acidez do solo (Bremner & Shaw, 1958, citados por BROADBENT & CLARK, 1965), ter-se-ia então, como uma primeira consequência da calagem nestes solos, uma potencialização das perdas de N via desnitrificação, quando da inundação do solo, principalmente naqueles com maiores teores de matéria orgânica (MACRAE *et alii*, 1968; PONNAMPERUMA, 1972; SHEARD & LEYSHON, 1976).

Verifica-se, por outro lado, que a calagem foi capaz de manter teores mais elevados de nitrato em solos inundados, principalmente nos mais ricos em matéria orgânica, pelo menos até a quarta semana de submersão (Quadro 1A). Isto pode, em parte, explicar o efeito favorável da calagem evitando a toxicidade de ferro em solos inundados, conforme constataram FREIRE *et*

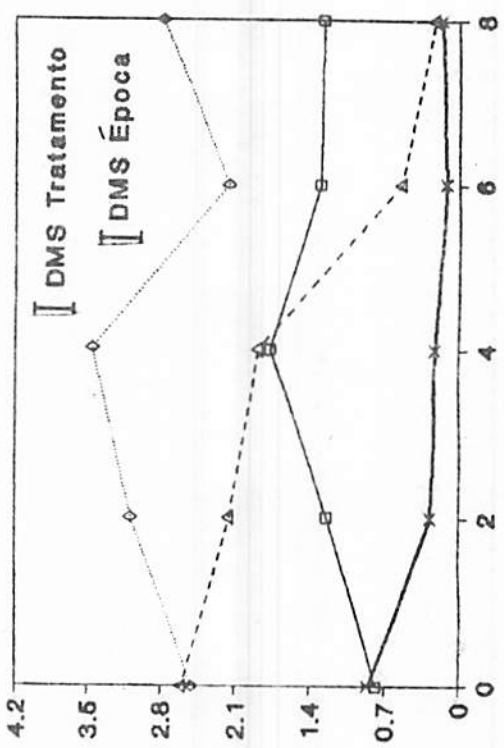
GLEI POUCO HÚMICO



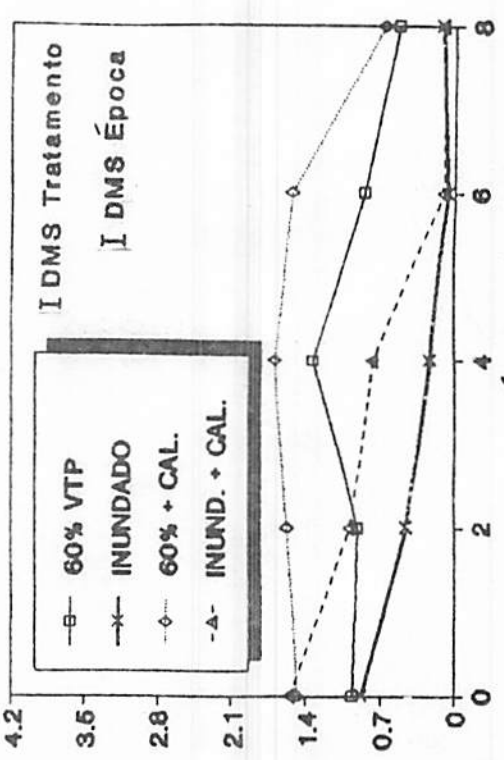
CAMBISSOLO



SOLO ORGÂNICO



GLEI HÚMICO



Época de Amostragem (semanas após o transplântio)

FIGURA 4. Variação nos teores de nitrato (N-NO₃) em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.

alii (1985), pois, pela seqüência termodinâmica das reações de redução em solos inundados (Quadro 1), espera-se que, enquanto houver suficiente nitrato para funcionar como receptor de elétrons provenientes da oxidação da matéria orgânica, as reações de redução do ferro vão ser retardadas, o que é corroborado por BEYE *et alii* (1979). Pode-se observar ainda, que a partir da sexta semana, com a queda mais acentuada dos teores de nitrato no solo, os valores de pH H_2O no tratamento "inundado + calagem" já se encontram em torno de 6,0 (Figura 3), permitindo a oxidação química do Fe (PAVAN & MIYAZAWA, 1983), com conseqüente redução dos problemas de toxidez deste elemento.

O fato das parcelas não inundadas não perderem nitrato por desnitrificação e ainda, a existência de condições mais propícias à nitrificação, fizeram com que os teores de $N-NO_3^-$, nestas se mantivessem bem mais elevados que os correspondentes tratamentos sob inundaçãõ (Figura 4 e Quadro 1A). Este comportamento foi ainda mais acentuado nas amostras que receberam calagem, com exceção apenas do solo HGP, onde o desenvolvimento de plantas em parcelas sem calagem foi quase nulo, resultando pois, numa baixa absorçãõ de N pelas plantas (Quadro 7) e no seu acúmulo no solo.

A hipótese de queda do pH associada ao processo de nitrificação conforme mencionado anteriormente (Figura 3), parece se confirmar, principalmente entre a segunda e a quarta semanas (Figura 4), ocasião em que os aumentos nos teores de nitrato foram significativos (Quadro 1A), em virtude, possivelmente,

QUADRO 7. Concentração de nitrogênio na parte aérea e quantidade de N absorvido pelo arroz cultivado em solos de várzea submetidos ou não à calagem e à inundação.

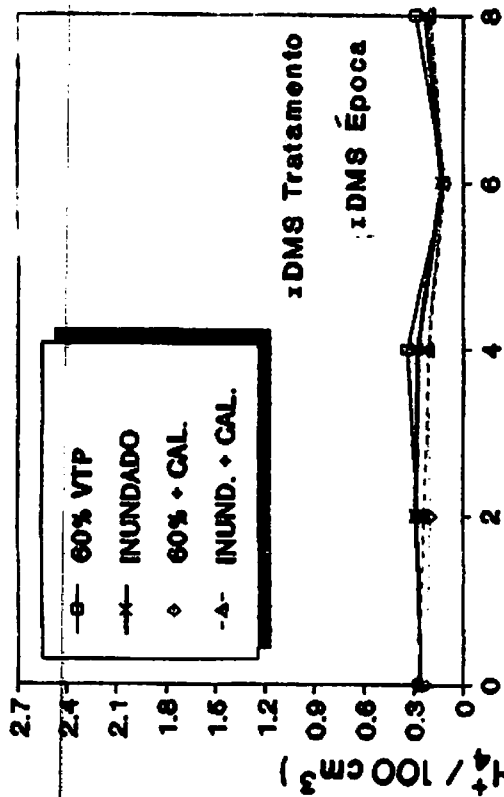
Tratamento	Concentração de N				N absorvido			
	C	HGP	HGH	HO	C	HGP	HGH	HO
	%				mg/vaso			
60% VTP	2,98	2,54	2,95	3,49	107,02	5,67	121,25	172,86
60%+Cal.	1,73	2,85	2,11	2,82	130,36	120,51	186,95	261,13
Inundado	2,93	2,69	2,94	2,69	91,91	94,34	129,86	101,95
Inundado+Cal.	1,66	1,81	1,71	2,15	124,39	125,13	162,84	201,03

da primeira adubação nitrogenada em cobertura.

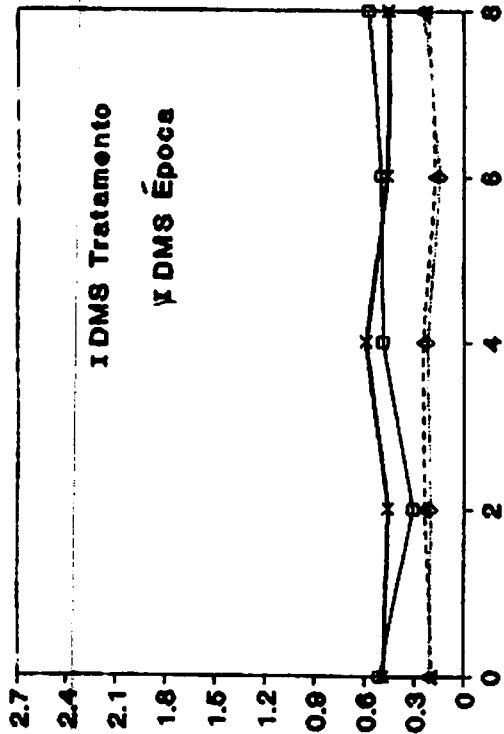
Além de beneficiar o processo de nitrificação, a calagem provocou, inicialmente, uma acentuada redução nos teores de amônio dos solos estudados, redução esta, mais pronunciada naqueles solos com teores mais elevados de matéria orgânica (Quadro 6 e Figura 5).

Conquanto os teores de amônio nos solos mais ricos em matéria orgânica e que não receberam calcário tenham se mantido mais elevados nas parcelas inundadas, quando comparadas àquelas com unidade em torno de 60% do VTP, por ocasião das amostragens intermediárias, pode-se verificar que, no presente estudo, a ocorrência de acúmulo de NH_4^+ com a inundação, conforme evidenciam alguns trabalhos (PONNAMPERUMA, 1972; 1978), não foi muito intensa, a não ser no tratamento "inundado", nos solos HGP e HGH, onde os teores de amônio por ocasião da quarta semana foram maiores que nas demais épocas (Quadro 2A). Mesmo nestes

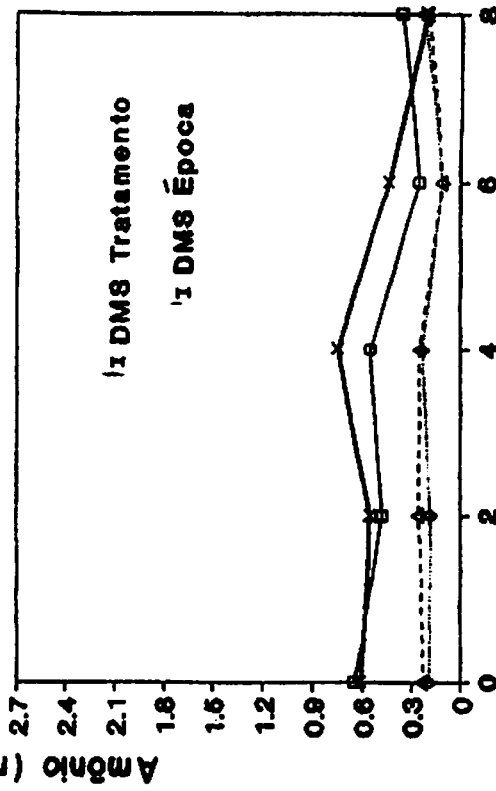
CAMBISSOLO



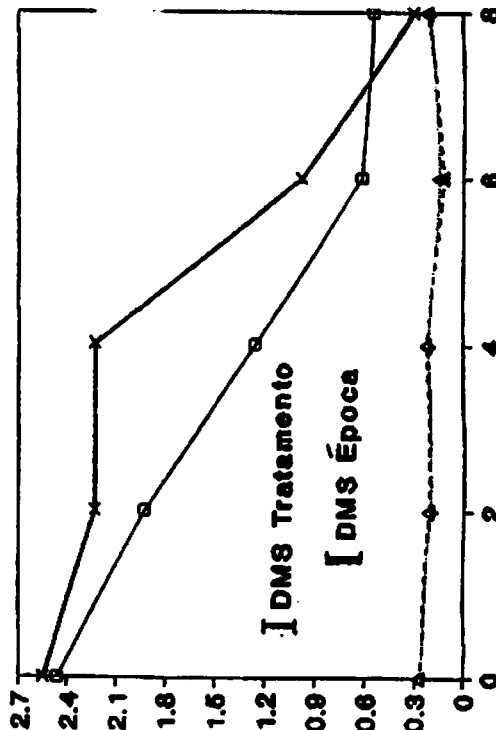
GLEI POUCO HÚMICO



GLEI HÚMICO



SOLO ORGÂNICO



Época de Amostragem (semanas após o transplante)

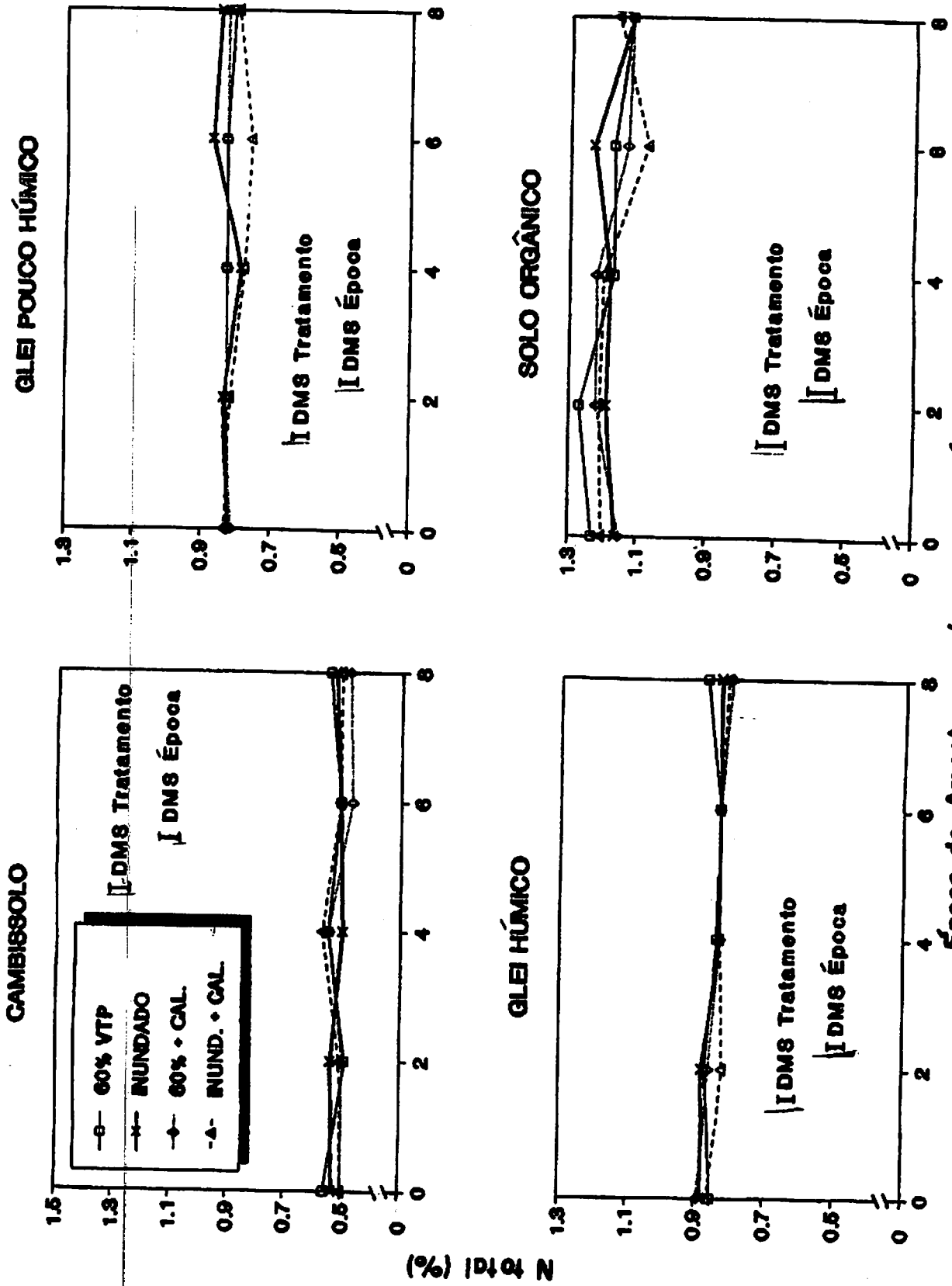
FIGURA 5. Variação nos teores de amônio ($N-NH_4^+$) em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.

solos, este comportamento pode ter sido resultado da adubação nitrogenada em cobertura por ocasião da segunda semana.

Os decréscimos nos teores de amônio do solo após a quarta semana, verificados não só nos solos HGP e HGH, mas, com maior intensidade ainda, no solo Orgânico (HO), podem estar relacionados tanto ao consumo de $N-NH_4^+$ pelas plantas, quanto à possível nitrificação, ocasionada pela atividade oxidativa das raízes do arroz, com subsequente desnitrificação, hipótese esta corroborada pelos estudos de PASRICHA & SINGH (1977), bem como por observações de diversos autores (YOSHIDA, 1978; SIQUEIRA & FRANCO, 1988; HASEBE *et alii*, 1990). Vale ressaltar, que por ocasião da sexta semana, o pH das parcelas submetidas ao tratamento "inundado" já não se apresentava tão ácido quanto no princípio do experimento (Figura 3), fato este que tende a favorecer o processo de desnitrificação (Bremner & Shaw, 1958, citados por BROADBENT & CLARK, 1965). Este fato, associado à tendência de maiores quedas nos teores de amônio nos solos mais ricos em matéria orgânica, característica esta que também exerce uma forte influência na taxa de desnitrificação (MACRAE *et alii*, 1968; PONNAMPERUMA, 1972; SHEARD & LEYSHON, 1976), sugerem o processo de nitrificação - desnitrificação como uma das principais causas da queda observada.

4.2.2. Alterações do N Total

As avaliações dos teores de N total do solo (Figura 6), revelaram pequenas variações decorrentes dos tratamentos apli-



Época de Amostragem (semanas após o transplante)

FIGURA 6. Variação nos teores de N total em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.

cados bem como em função das épocas de amostragem (Quadro 3A), variações estas que não apresentaram nenhuma tendência definida.

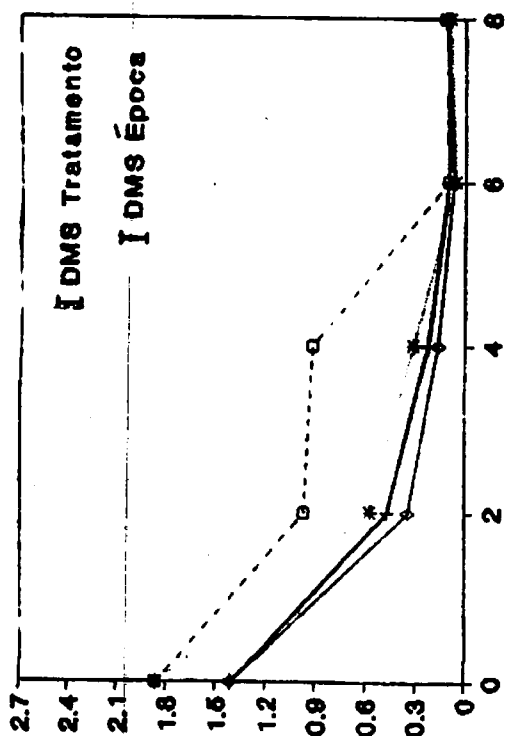
No caso das parcelas submetidas à inundação, a possibilidade de ocorrência do processo de fixação de nitrogênio nestes solos, com um conseqüente aumento no teor de N total destes, conforme registra a literatura (PONNAMPERUMA, 1978; WATANABE, 1978), parece não ter se concretizado, embora deva ser ressaltado que, nas condições do presente estudo, as perdas decorrentes da desnitrificação, bem como ainda, da volatilização de amônia, possam ter mascarado os aumentos supracitados, o que é corroborado por WATANABE (1978). Sugere-se diante disto, que a utilização do teor de N total como parâmetro de avaliação em experimentos com solos inundados seja efetuada atentando-se sempre para os pontos supracitados.

4.2.3. *Variações do N Inorgânico em Profundidade*

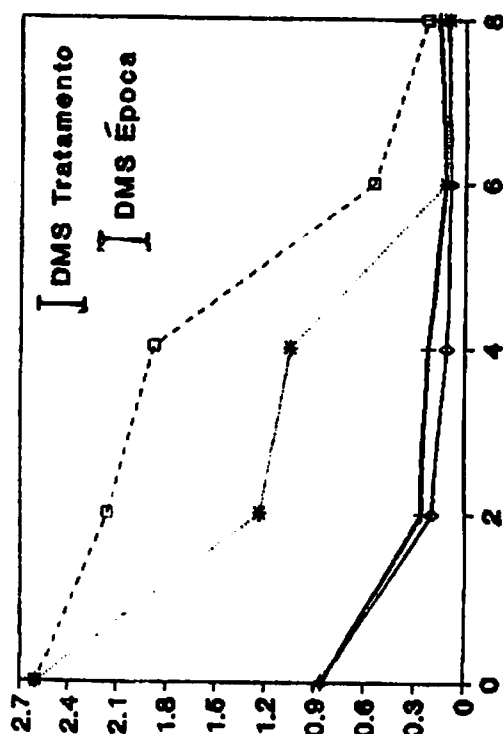
As variações nos teores de nitrato e amônio nas diferentes profundidades de amostragem nas parcelas inundadas está ilustrada nas figuras 7 e 8. A coincidência dos valores iniciais dentro dos tratamentos com e sem calagem está relacionada ao fato da primeira amostragem ter sido realizada antes da inundação, não havendo pois, diferenciação das profundidades.

Ao contrário do que seria esperado, a princípio, pelo maior potencial redox, bem como pela maior atividade de bactérias nitrificadoras na superfície do solo, conforme eviden-

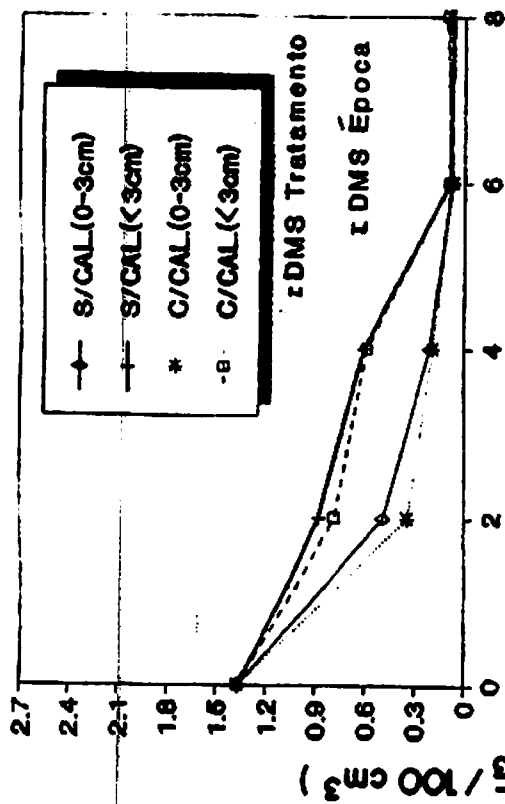
GLEI POUCO HÚMICO



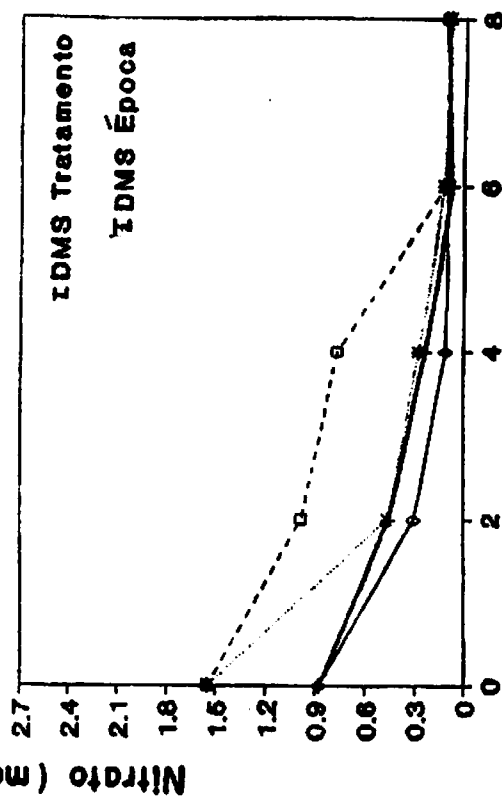
SOLO ORGÂNICO



CAMBISSOLO



GLEI HÚMICO



Época de Amostragem (semanas após o transplantio)

FIGURA 7. Variação, em profundidade, nos teores de N-NO₃ em solos de várzea cultivados com arroz sob inundação, na presença e ausência de calcário.

ciaram HASEBE *et alii* (1990), observa-se, no presente estudo, que o teor de nitrato abaixo de 3 cm tendeu a ser sempre superior ao da camada de 0 a 3 cm (Figura 7), e de maneira mais acentuada ainda, na segunda e quarta semanas (Quadro 4A), ocasião em que os teores de nitrato nas parcelas inundadas, principalmente onde se fez calagem, eram ainda bem elevados.

Embora o estudo de HASEBE *et alii* (1990) tenha se limitado à camada superficial do solo e não tenha envolvido planta, tendo em vista, segundo estes autores, a carência de estudos quantitativos sobre a significância da nitrificação - desnitrificação na rizosfera do arroz, os resultados do presente estudo sugerem uma expressiva contribuição do processo de oxidação da rizosfera, na manutenção de teores de nitrato mais elevados abaixo da camada superficial (< 3cm), região onde foi observado visualmente um maior volume de raízes. Isto parece concordar com as observações do trabalho de MOHANTY & MOSIER (1990), onde foi verificada uma maior perda de N_2 por nitrificação - desnitrificação, em parcelas cultivadas, quando comparadas a parcelas sem planta. Esta hipótese pode ser reforçada ainda, pelo fato deste comportamento ter sido verificado de maneira mais intensa nas parcelas que receberam calcário, o que certamente estimulou um maior desenvolvimento do sistema radicular nestas, principalmente no caso dos solos com maiores teores de matéria orgânica, os quais eram a princípio bastante ácidos (Quadro 3).

Além da alta capacidade oxidativa das raízes, uma outra hipótese sugerida para o menor teor de nitrato em superfície seria a maior facilidade de perda do N_2 ou N_2O para a atmosfera, na camada de 0 a 3 cm, decorrente da existência de um menor caminho de difusão do nitrogênio gasoso oriundo do processo de desnitrificação. Para isto, entretanto, a possibilidade de ocorrência de desnitrificação na camada superficial do solo não pode ser descartada, o que parece ser bem provável, tendo em vista que a redução do nitrato ocorre logo após a do O_2 (Quadro 1), podendo iniciar-se antes mesmo da completa remoção do O_2 do solo (PATRICK JR. & REDDY, 1978). Considerando-se esta hipótese como válida, o caminho a ser percorrido pelo N_2 oriundo da desnitrificação na camada superficial seria muito mais facilitado que aquele oriundo da desnitrificação na camada subjacente. Assim, tomando-se como base a existência de um possível equilíbrio entre o NO_3^- desnitrificado e o N_2 formado, tem-se que, mais N_2 sendo retirado da reação de desnitrificação, resultaria em mais nitrato sendo desnitrificado na camada superficial.

Embora esta última hipótese levantada esteja mais restrita a algumas reações de desnitrificação não mediadas por microrganismos, vale ressaltar que não há na literatura, qualquer evidência de que a presença de outras formas de óxidos de N intermediárias no processo de desnitrificação possam interferir na taxa de redução do NO_3^- (FIRESTONE, 1982), o que descartaria a possibilidade do acúmulo de N_2 (ou N_2O) na camada abaixo de 3

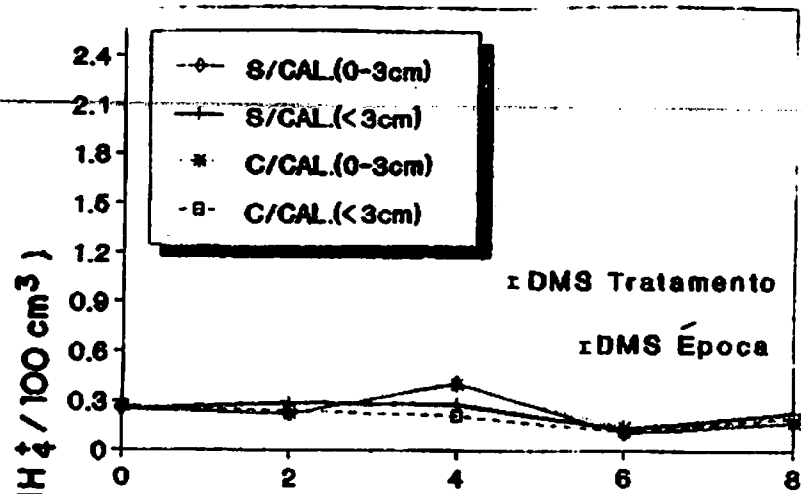
em inibir a desnitrificação, mantendo o teor de nitrato mais elevado nesta região.

Quanto ao amônio (Figura 8), observa-se também uma tendência de maiores teores na camada abaixo de 3 cm, com exceção apenas da quarta semana (Quadro 5A), fato este que pode estar relacionado à adubação nitrogenada em cobertura realizada logo após a segunda época de amostragem (2^a semana), sobre a superfície do solo, o que já não ocorreu por ocasião da segunda adubação de cobertura (logo após a 6^a semana), onde o N foi aplicado no fundo do vaso. Também neste caso, a maior facilidade de perda do N gasoso na superfície do solo, agora, na forma de volatilização de amônia (WATANABE, 1978; MOHANTY & MOSIER, 1990; ROLSTON *et alii*, 1990), pode ter sido uma das principais causas do menor teor de NH_4^+ verificado na camada superficial.

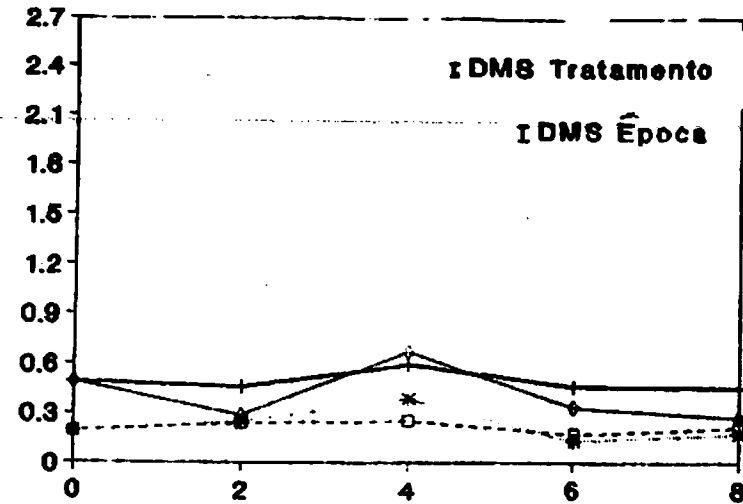
4.3. Fósforo

Antes de se iniciar a apresentação dos resultados e a discussão dos efeitos dos tratamentos e das épocas de amostragem sobre a disponibilidade do fósforo durante a condução do ensaio, vale ressaltar o efeito inicial da calagem sobre as diferentes formas de P no solo (Quadro 8). Assim sendo, verifica-se em princípio, que a calagem tendeu a elevar o teor de P-resina em todos os solos, e de maneira mais acentuada ainda, naqueles mais ácidos e com maior teor de matéria orgânica. Vale ressaltar que esta elevação, em termos percentuais (P c/cal. - P s/cal., %), esteve estreitamente associada aos valores da

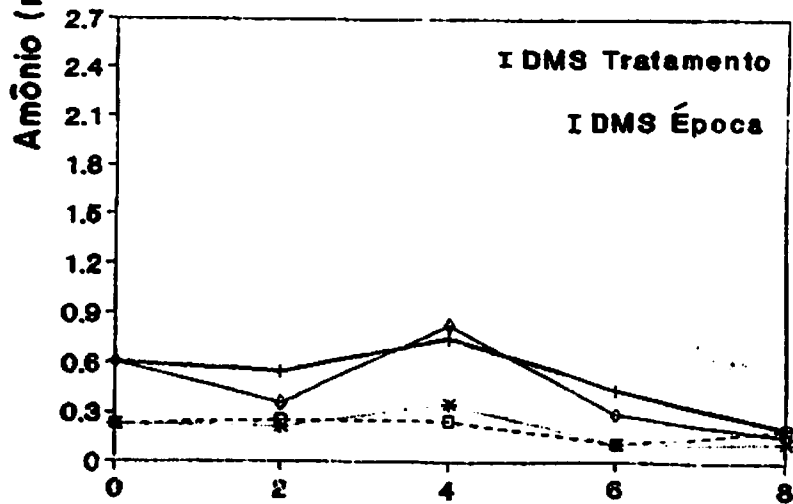
CAMBISSOLO



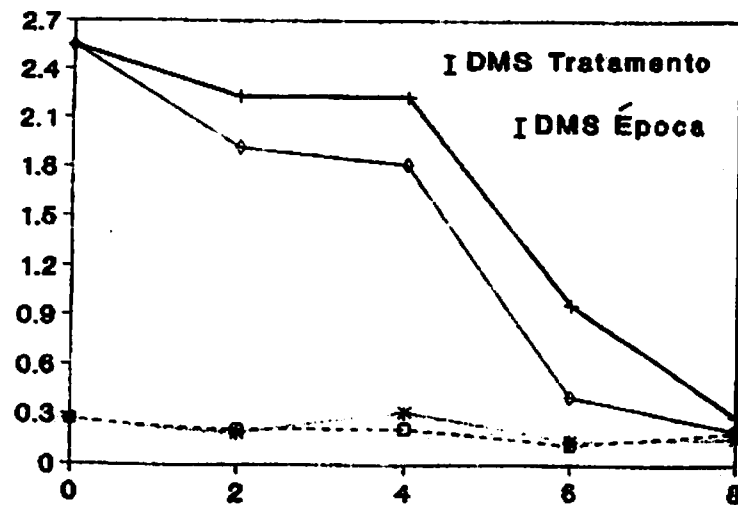
GLEI POUCO HÚMICO



GLEI HÚMICO



SOLO ORGÂNICO



Época de Amostragem (semanas após o transplântio)

FIGURA 8. Variação, em profundidade, nos teores de N-NH₄⁺ em solos de várzea cultivados com arroz sob inundaçãõ, na presença e ausência de calcário.

relação Fe_o/Fe_d nos diferentes solos ($\ln y = 1,28 + 2,36x$; $r = 0,97$; $p \leq 0,05$; onde $x = Fe_o/Fe_d$, e $y = P_c/cal. - P_s/cal., \%$), o que confirma a importância da reatividade das frações de ferro no processo de adsorção de fósforo nestes solos (ALVA *et alii*, 1980; WILLETT, 1990).

QUADRO 8. Efeito da calagem no fósforo dos solos de várzea estudados, antes do cultivo com arroz. (Média de 6 repetições).

Parâmetro	SOLO							
	C		HGP		HGH		HO	
	s/cal.	c/cal.	s/cal.	c/cal.	s/cal.	c/cal.	s/cal.	c/cal.
P-resina ($\mu g/cm^3$)	23,3	24,4	22,8	25,4	32,5	39,8	33,2	40,2
P-orgânico (ppm)	571	551	1023	1253	1498	1442	1535	1434
P-resina / P-orgânico ^(*)	4,1	4,4	2,2	2,0	2,2	2,8	2,2	2,8

Observa-se ainda pelo quadro 8, que, em associação aos aumentos do P - resina, foram verificados pequenos decréscimos no teor de fósforo orgânico nos solos C, HGH e HO, e um conseqüente aumento da relação "P - resina/P - orgânico, (%)", nestes solos, o que parece sugerir também a ocorrência de uma pequena mineralização nestas condições, como responsável pelos aumentos nos teores de P - resina, principalmente nos solos mais ricos em matéria orgânica.

4.3.1. Alterações do P - resina

A figura 9 ilustra os efeitos dos tratamentos bem como das épocas de amostragem sobre os teores de fósforo extraído por resina aniônica, durante o período experimental.

Verifica-se por estes dados e pelo resultado da análise de variância no quadro 6A, que a inundação resultou numa queda nos teores de P - resina nos solos C e HGP, e numa pequena tendência de aumento seguida de queda, nos solos HGH e HO, comportamentos estes que assemelham-se àqueles verificados por MORAES & FREIRE (1974) e ALVA *et alii* (1980). Nestes estudos, a ocorrência de aumentos iniciais foram atribuídos à redução dos fosfatos férricos, a qual tende a ser estimulada por metabólitos produzidos por bactérias da rizosfera do arroz (ALVA *et alii*, 1980), e as quedas posteriores, associadas à readsorção dos fosfatos, readsorção esta também bastante influenciada pelo fato do poder oxidativo das raízes alterar a reatividade das formas de ferro.

Dentro deste contexto, e adotando-se como verdadeira, a hipótese levantada no item 4.1 desta discussão, qual seja, a de que o teor de ferro extraível pelo ditionito-citrato-bicarbonato bem como o Fe_2O_3 (ataque sulfúrico), apresentam-se como estimativas em potencial dos teores de ferro em solos de várzea passíveis de redução sob condições de inundação (vide quadro 5), espera-se então, que solos com maiores teores de Fe_2O_3 e/ou Fe_2O_3 venham a apresentar uma maior capacidade de readsorção de fósforo ocasionada pela reoxidação do ferro na rizosfera. Esta

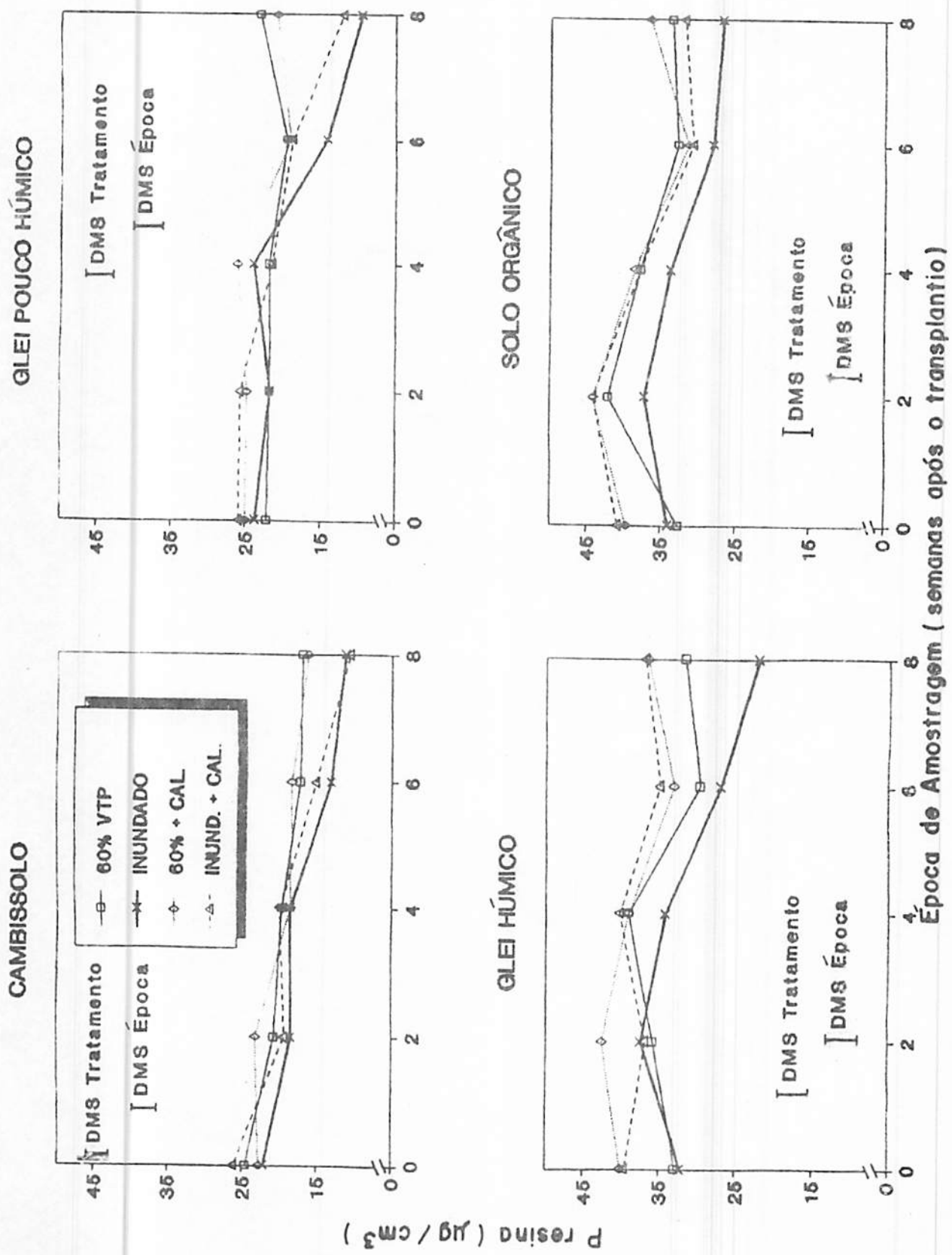


FIGURA 9. Variação nos teores de P - resina em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.

tendência pode ser uma das explicações para o ocorrido no presente estudo (Figura 9 e Quadro 6A).

Acrescendo-se, por exemplo, aos valores de P-resina no solo, apenas aquele fósforo que foi absorvido e translocado para a parte aérea do arroz - Quadro 9 (neste caso, para cada mg de P absorvido em um vaso contendo 2.000 cm³ de TFSA, deveria haver uma redução aproximada de 0,5 µg de P-resina/cm³ TFSA), pode-se verificar que nos solos C e HGP, os quais apresentam os maiores teores de Fe₂ e Fe₂O₃ (Quadro 3), a queda do teor de P - resina na oitava semana ainda persiste de forma bastante acentuada. Por outro lado, adotando-se o mesmo procedimento como comparação, no caso dos solos HGH e HO, as diferenças entre os teores de P - resina na primeira e na última amostragem já tendem a ser menores, chegando até mesmo, no caso do tratamento "inundado + calagem" no solo HGH, a ocorrer o inverso na última amostragem. Vale ressaltar com relação a este solo, entretanto, que embora tenha recebido a mesma adubação potássica de plantio dos demais, o seu teor inicial de potássio era o mais baixo entre os solos estudados (Quadro 3), o que resulta em menor poder de oxidação das raízes (TROLLDENIER, 1977) e, conseqüentemente, menor tendência à readsorção de fósforo neste caso.

É interessante observar ainda, que de uma maneira geral, a calagem parece reduzir o efeito desta possível readsorção, pois, conforme se verifica na figura 9 e quadro 6A, os teores de P - resina no tratamento "inundado + calagem" tenderam a ser

QUADRO 9. Concentração de fósforo na parte aérea e quantidade de P absorvido pelo arroz cultivado em solos de várzea submetidos ou não à inundação e à calagem.

Tratamento	Concentração de P				P absorvido			
	C	HGP	HGH	HO	C	HGP	HGH	HO
	%				mg/vaso			
60% VTP	0,18	0,06	0,15	0,11	6,45	0,13	6,02	5,28
60%+Cal.	0,16	0,14	0,18	0,15	12,08	5,91	15,66	14,20
Inundado	0,18	0,13	0,14	0,15	5,74	4,46	6,33	5,56
Inundado+Cal.	0,13	0,16	0,23	0,18	9,99	10,83	21,59	16,52

superiores aos do tratamento "inundado", principalmente nos solos com maiores teores de matéria orgânica e/ou menores teores de Fe_d e Fe_2O_3 , onde o valor do pH das parcelas apenas inundadas manteve-se se ainda bastante inferior ao das parcelas submetidas à inundação e calagem (Figura 3).

Deve-se ressaltar ainda, no presente estudo, que embora tenham sido observadas algumas alterações no teor de P - resina dos solos inundados, alterações estas atribuídas principalmente a processos de dessorção-adsorção do fosfato, não se pode descartar a importante contribuição do efeito da inundação aumentando a difusão do P no solo, conforme observaram TURNER & GILLIAM (1976a; 1976b). Neste contexto, verifica-se que, conquanto os valores de P - resina nos solos mantidos com umidade em torno de 60% do VTP se apresentassem, por ocasião da oitava semana, sempre superiores aos seus correspondentes tratamentos sob inundação (exceção apenas do solo HGH, com calagem - quadro 6A), as quantidades de P absorvido bem como as concentrações de P na parte aérea (Quadro 9), tenderam, de modo geral, a ser

superiores nos tratamentos inundados, quando comparados aos respectivos tratamentos com menor grau de umidade do solo (60% do VTP). Isto, certamente, está associado também ao aumento da difusão de P ocasionado pela inundação do solo.

4.3.2. Alterações do P Orgânico

O efeito dos diferentes tratamentos aplicados, bem como das épocas de amostragens sobre o teor de fósforo orgânico do solo está demonstrado na figura 10. Com relação aos tratamentos, observa-se uma diferenciação, sem tendência definida, durante as amostragens intermediárias, seguida de uma ausência de efeito significativo ao final do experimento (Quadro 7A).

Quanto às épocas de amostragens, nota-se, de uma maneira geral, uma tendência de queda nos teores de P - orgânico ao final do período experimental, conquanto, em alguns solos, tenham sido observados pequenos aumentos por ocasião da segunda e/ou quarta semanas. Esta tendência de queda foi mais acentuada nos solos com maiores teores de matéria orgânica - HGH e HO, e se mostrou independente do tratamento aplicado, o que sugere um efeito não significativo da inundação do solo sobre uma maior taxa de mineralização de P - orgânico nestas condições, quando em comparação a solos não inundados, conforme evidenciaram CAMPBELL & RACZ (1975), parecendo ainda concordar com as observações de PATRICK JR. & MAHAPATRA (1968), sobre a pequena contribuição do P - orgânico na nutrição de plantas crescendo em solos inundados.

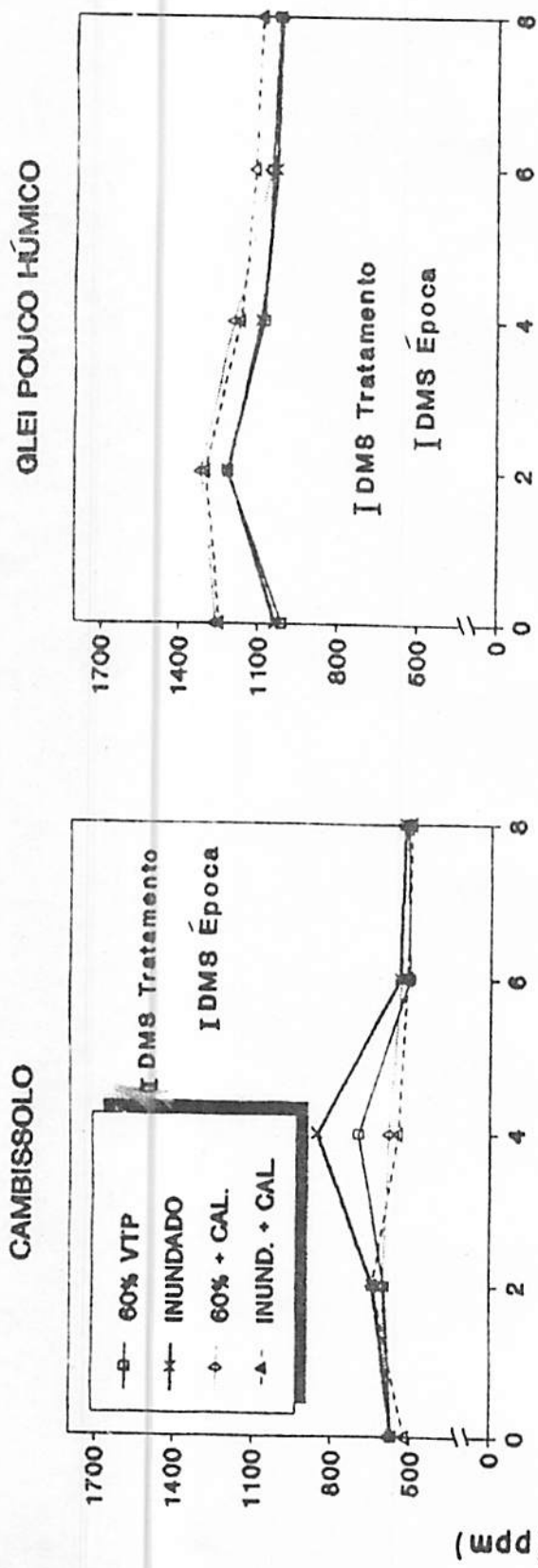


FIGURA 10. Variação nos teores de fósforo orgânico em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.

4.4. Enxofre

A exemplo do que ocorreu com os teores de P-resina, também os teores de enxofre na forma de sulfato ($S-SO_4^{2-}$) sofreram um acréscimo inicial em decorrência da calagem (Quadro 10), acréscimo este que pode estar relacionado, dentre outros fatores, à redução na adsorção do SO_4^{2-} com o aumento do pH, conforme evidenciaram NEPTUNE *et alii* (1975).

QUADRO 10. Efeito da calagem no enxofre dos solos de várzea estudados, antes do cultivo com arroz. (Média de 6 repetições).

Parâmetro	SOLO							
	C		HGP		HGH		HO	
	s/cal.	c/cal.	s/cal.	c/cal.	s/cal.	c/cal.	s/cal.	c/cal.
$S-SO_4^{2-}$ ($\mu g/cm^3$)	39,7	42,7	9,8	34,1	19,0	40,8	40,3	52,5
S"reserva" (ppm)	413	310	421	427	584	514	800	772
SO_4^{2-} / S reserva (%)	9,6	13,8	2,4	8,0	3,3	7,9	5,0	6,8

Pode-se verificar, neste contexto, que as maiores variações nos teores de $S-SO_4^{2-}$ com a calagem corresponderam também às maiores diferenças iniciais dos valores de pH entre parcelas com e sem calcário, por ocasião do início do experimento (Figura 3). Esta tendência sugere que o processo de dessorção de sulfato nestes solos está intimamente ligado à geração de cargas negativas com aumento do pH dos mesmos.

Além de promover um aumento nos teores de $S-SO_4^{2-}$ no solo, a calagem resultou também, de uma maneira geral, numa pequena queda nos teores de enxofre de reserva, com uma conseqüente elevação da relação " $S-SO_4^{2-}/S$ reserva", o que sugere, também neste caso, um estímulo à mineralização do enxofre em decorrência da calagem (Quadro 10), mineralização esta que pode ter contribuído também para o aumento do teor de $S-SO_4^{2-}$ nas parcelas que receberam calcário.

4.4.1. Alterações do S-sulfato

A variação nos teores de sulfato nos diferentes solos, em decorrência dos tratamentos aplicados e das épocas de amostragem está ilustrada na figura 11, sendo o resumo das análises de variância quanto a este parâmetro, apresentado no quadro 8A.

Nota-se, a princípio, que os tratamentos que receberam calagem tenderam a manter, de uma maneira geral, teores de $S-SO_4^{2-}$ sempre superiores aos seus respectivos tratamentos sem calcário.

Concordando com as observações de BEYE *et alii* (1978), também no presente estudo, a inundação resultou, independentemente do efeito da calagem, num aumento inicial do teor de sulfato no solo, seguido de um posterior decréscimo (exceção apenas do tratamento "inundado" no Cambissolo). Os aumentos iniciais, nestes casos, podem ser explicados, em parte, pela liberação do $S-SO_4^{2-}$ dos sítios de troca aniônica (BEYE *et alii*,

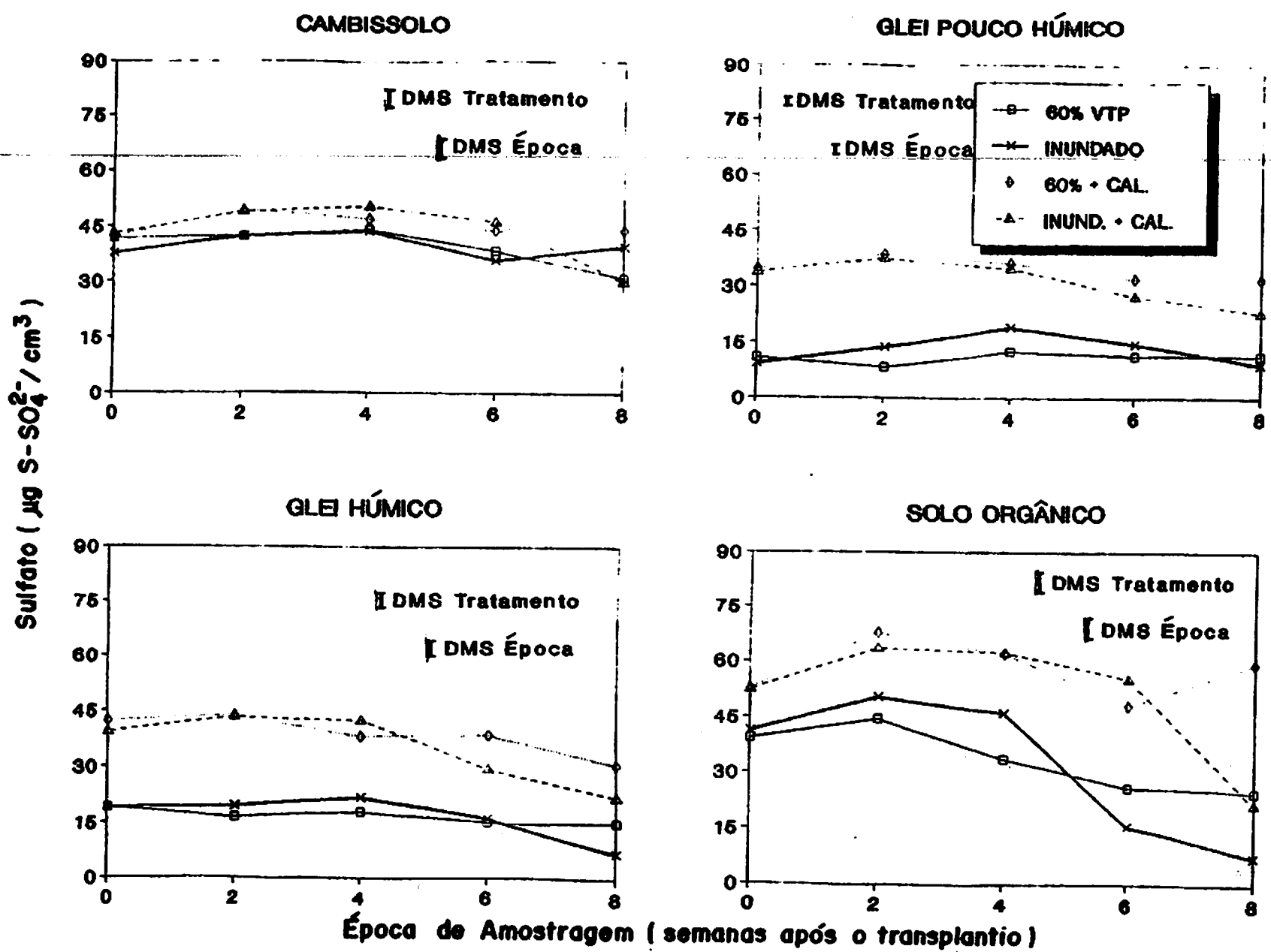


FIGURA 11. Variação nos teores de sulfato ($S-SO_4^{2-}$) em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.

1979), sendo que os posteriores decréscimos, podem ser atribuídos tanto à absorção do enxofre pela planta (quadro 11), quanto à conversão do sulfato a compostos reduzidos, e, até mesmo, a compostos orgânicos de enxofre.

QUADRO 11. Concentração de enxofre na parte aérea e quantidade de S absorvido pelo arroz cultivado em solos de várzea submetidos ou não à calagem e à inundação.

Tratamento	Concentração de S				S absorvido			
	C	HGP	HGH	HO	C	HGP	HGH	HO
	%				mg/vaso			
60% VTP	0,26	0,10	0,27	0,29	9,20	0,22	11,22	14,53
60%+Cal.	0,29	0,33	0,27	0,30	21,64	13,80	24,21	27,78
Inundado	0,24	0,24	0,31	0,31	7,62	8,57	13,55	11,75
Inundado+Cal.	0,24	0,27	0,18	0,33	17,73	18,67	16,83	30,55

Vale ressaltar neste contexto, que a hipótese de queda associada à processos de redução do sulfato, parece ser válida principalmente por ocasião da sexta e oitava semanas, visto que nestas épocas, os teores de nitrato no solo diminuíram sensivelmente (Figura 4), o que possibilitaria um continuidade na seqüência de redução dos demais compostos oxidados do solo (vide Quadro 1).

Verifica-se inclusive, que foi justamente por ocasião da sexta e oitava semanas que ocorrerem as maiores quedas nos teores de $S-SO_4^{2-}$ nos solos, principalmente naqueles com maiores teores de matéria orgânica.

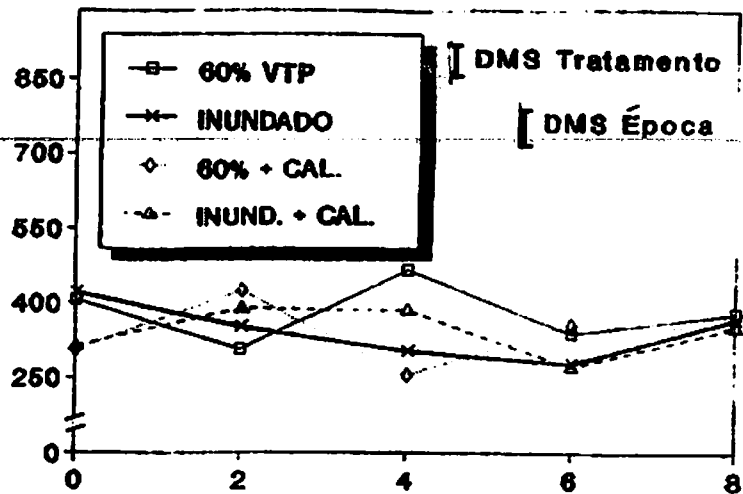
Considerando-se a possibilidade desta queda estar associada à redução do SO_4^{2-} a S^{2-} , e ainda, o fato de que os solos com maiores teores de matéria orgânica foram também os que apresentaram os menores teores de Fe (Quadro 3), então, nestes casos, a propabilidade de ocorrência de toxicidade de H_2S , conforme evidencia PONNAMPERUMA (1972), pode ser grande, pois deixará de haver a precipitação do sulfeto pelo ferro (ENGLER & PATRICK JR., 1975).

Sabendo-se, entretanto, que a existência de uma região oxidada na rizosfera do arroz permite à planta desenvolver-se bem em solos inundados com alta concentração de sulfeto (FRENEY & BOONJAWAT, 1983), então, plantas com um sistema radicular mais desenvolvido terão, conseqüentemente, uma maior capacidade de tolerar este problema. Neste contexto, embora não tenham sido obtidos dados quantitativos nas condições do presente estudo, vale ressaltar que a calagem, por permitir um melhor desenvolvimento do sistema radicular em solos ácidos, tende a assumir um papel de grande importância no processo de redução de toxidez de sulfeto através da oxidação da rizosfera.

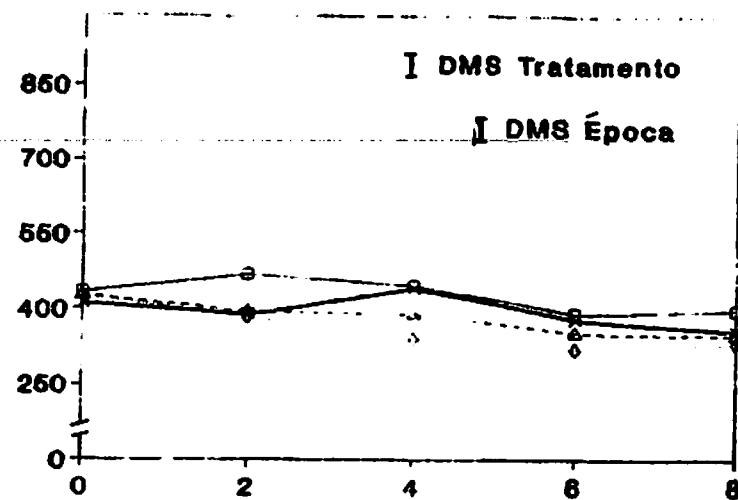
4.4.2. Alterações do S de "reserva"

As avaliações do enxofre de reserva, ou seja, o teor de enxofre dado pela diferença entre o S "total" e o S-SO_4^{2-} (TABATABAI & BREMNER, 1970), estão ilustradas na figura 12. No que diz respeito às épocas de amostragem, pode-se notar que, com o incremento do teor de matéria orgânica dos solos, há

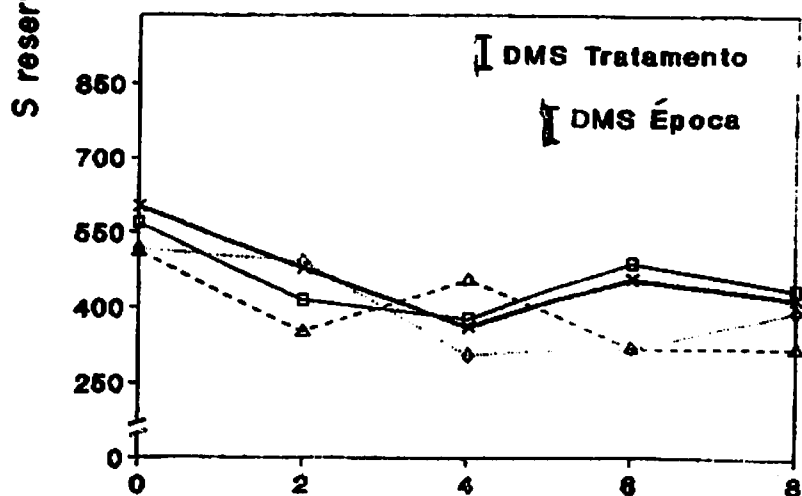
CAMBISSOLO



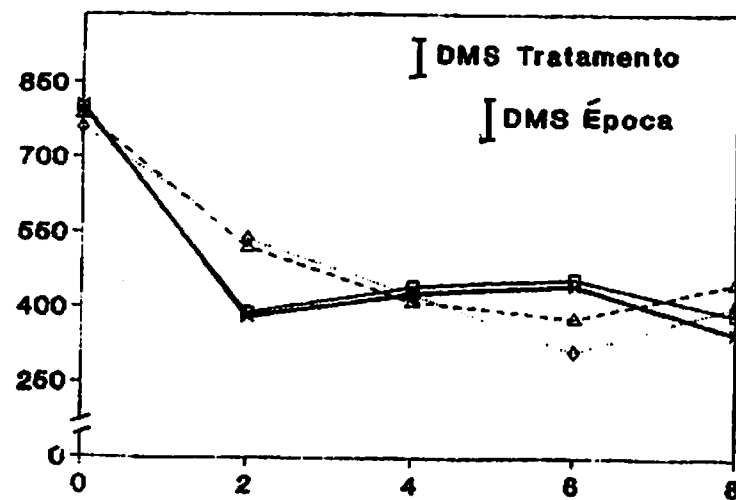
GLEI POUCO HÚMICO



GLEI HÚMICO



SOLO ORGÂNICO



Época de Amostragem (semanas após o transplântio)

FIGURA 12. Variação nos teores de enxofre de reserva em solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação.

também uma maior tendência de diminuição nos valores de S "reserva" entre a primeira e a última amostragens (Quadro 9A), o que sugere uma certa mineralização do enxofre durante este período, mineralização esta que pode também explicar alguns aumentos observados nos teores de $S-SO_4^{2-}$, principalmente nas primeiras semanas (Figura 11).

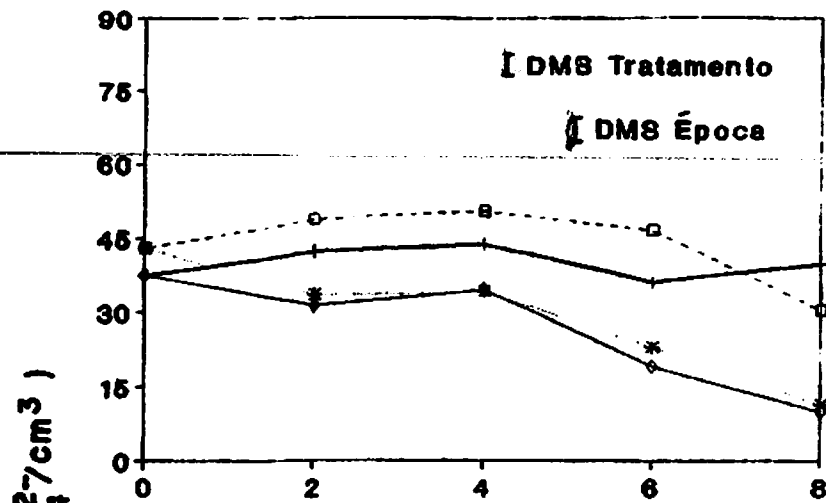
Por outro lado, esta tendência de diminuição parece não ter tido uma influência muito definida dos tratamentos aplicados, visto que as diferenças observadas, principalmente ao final do experimento, foram, em geral, não significativas (Quadro 9A). Vale ressaltar apenas um pequeno efeito da calagem, por ocasião da sexta semana de amostragem, no sentido de reduzir o teor de S "reserva" nos solos com maiores teores de matéria orgânica.

4.4.3. *Variações no Sulfato em Profundidade*

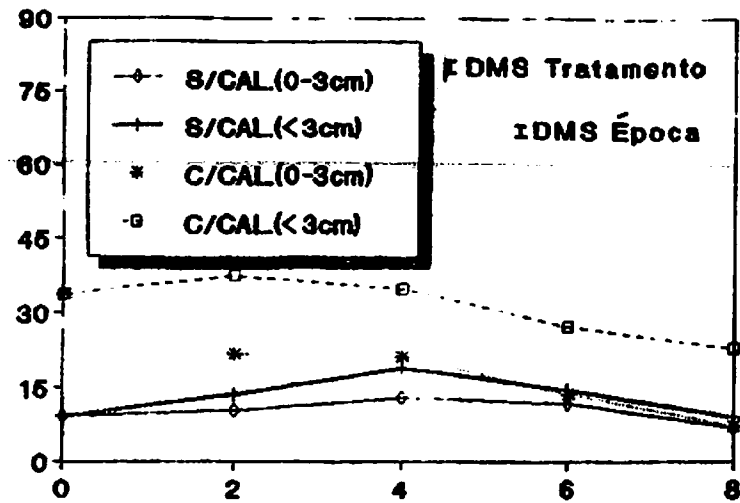
As análises do teor de sulfato em diferentes profundidades de amostragem (0 a 3 cm e abaixo de 3 cm), revelaram, de modo geral, e de maneira mais definida nas parcelas que receberam calcário, valores da camada abaixo de 3 cm superiores àqueles da camada de 0 a 3 cm (Figura 13 e Quadro 10A).

De modo análogo ao que já foi discutido para o nitrato (Figura 7), também neste caso, a manutenção de maiores teores de SO_4^{2-} abaixo da camada superficial pode estar relacionado ao alto poder oxidativo das raízes nesta região, onde foi observado, visualmente, um maior volume de sistema radicular. Como

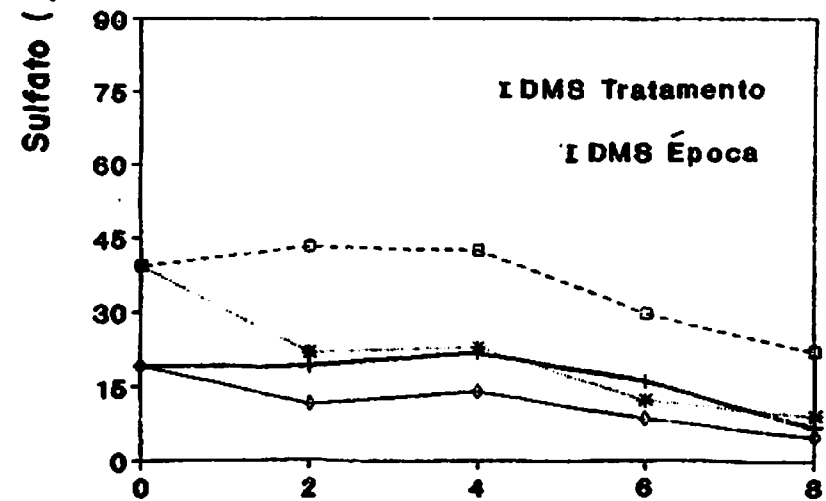
CAMBISSOLO



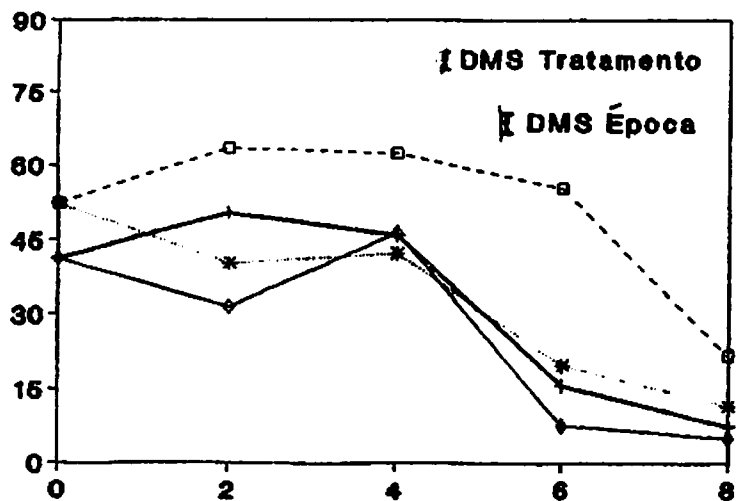
GLEI POUCO HUMICO



GLEI HÚMICO



SOLO ORGÂNICO



Época de Amostragem (semanas após o transplântio)

FIGURA 13. Variação, em profundidade, nos teores de S-SO_4^{2-} em solos de várzea cultivados com arroz sob inundação, na presença e ausência de calcário.

este comportamento ocorreu de forma mais pronunciada nas parcelas que receberam calagem, as quais certamente apresentavam um ambiente mais favorável a um adequado desenvolvimento do sistema radicular. então a hipótese supracitada parece ser bastante provável. O poder oxidativo das raízes, neste caso, poderia ainda estar exercendo o mesmo efeito da camada superficial oxidada dos solos submersos sobre o desenvolvimento de bactérias autotróficas do gênero Thiobacillus, que oxidariam o sulfeto que viesse a se formar, a enxofre na forma de sulfato, conforme YOSHIDA (1978).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como extrato dos resultados obtidos no presente estudo, ressaltá-se o seguinte:

1. A inundação resultou na elevação do pH dos solos estudados, sendo esta mais expressiva em parcelas que não receberam uma calagem prévia. Nestas parcelas, o valor do pH aos 56 dias de submersão mostrou-se diretamente relacionado aos teores de ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_d) e Fe_2O_3 (ataque sulfúrico) e inversamente relacionado ao teor de matéria orgânica (M.O.) do solo. O pH CaCl_2 0,01M mostrou-se menos variável em função dos tratamentos aplicados, revelando ainda, na oitava semana de submersão, que em solos mais ricos em M.O. a simples inundação do solo não substitui a calagem em termos de correção da acidez.

2. O estímulo à nitrificação decorrente da calagem dos solos ácidos e com maiores teores de M.O. resultou, nas parcelas inundadas, na manutenção de teores mais elevados de N-NO_3^- no solo até a sexta semana de submersão. Embora sem apresentar acúmulo durante o período experimental, os teores de N-NH_4^+ em parcelas inundadas e que não receberam calagem mantiveram-se, em geral, superiores aos das respectivas parcelas com unidade em torno de 60% do VTP, principalmente em solos mais ricos em M.O.

Não foram constatadas alterações significativas nos teores de N total dos diferentes solos, tanto em função dos tratamentos quanto nas diferentes épocas de avaliação.

3. O aumento inicial no teor de P-resina ocasionado pela calagem apresentou-se estreitamente associado aos valores da relação Fe_o/Fe_d dos solos de várzea em estudo. Conquanto os teores foliares e as quantidades de fósforo absorvido tendessem a ser maiores nos tratamentos sob inundação, foi verificado que a submersão resultou, em geral, na diminuição mais acentuada dos teores de P-resina nos solos, sobretudo naqueles com maiores teores de Fe_d e Fe_2O_3 , diminuição esta que tendeu a ser atenuada pelo efeito da calagem, principalmente nos solos mais ricos em M.O. Apesar de apresentarem pequenos decréscimos durante o período experimental, principalmente em solos com maiores teores de M.O., não foi constatado, sobre os teores de P orgânico, nenhum efeito significativo dos tratamentos, ao final do experimento.

4. A calagem resultou em aumentos iniciais dos teores de $S-SO_4^{2-}$ nos solos, aumentos estes estreitamente associados àqueles verificados para os valores de pH no início do experimento. Independentemente do nível de água aplicado, foram observados, durante o período experimental, teores de sulfato mais elevados em parcelas que receberam calagem. Conquanto tenham ocorrido pequenos aumentos no teor de $S-SO_4^{2-}$ nas parcelas submetidas à inundação, nas primeiras semanas do experimento, estes foram seguidos de quedas tanto maiores quanto maiores eram os teores

de M.O. dos solos. O teor de S de reserva em solos mais ricos em M.O. apresentou uma redução ao final do experimento, ocasião em que foi notada pouca influência dos tratamentos aplicados, sobre este parâmetro.

5. Nas parcelas inundadas, as avaliações na profundidade de 0 a 3 cm revelaram, à exceção da quarta semana, teores de $N-NH_4^+$ sempre menores que na camada subjacente. Para o $N-NO_3^-$ e o $S-SO_4^{2-}$, verificou-se também um maior teor na camada abaixo de 3cm, comportamento este bem mais pronunciado nas parcelas onde foi feita a calagem.

6. CONCLUSÕES

1. Para solos de várzea ricos em matéria orgânica e com baixos teores de ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_d) e Fe_2O_3 (ataque sulfúrico), a simples inundação do solo não substitui a calagem em termos de correção da acidez.

2. O estímulo à nitrificação e a manutenção de teores mais elevados de nitrato no solo apresentam-se como importantes mecanismos para retardar os processos de redução decorrentes da inundação, em solos ácidos de várzea corrigidos com calcário.

3. Em sistemas onde os processos de perdas e ganhos de nitrogênio tendem a se sobrepor, como acontece em solos de várzea cultivados sob inundação, a utilização do teor de N total como parâmetro de avaliação deve ser feita com precaução.

4. Além de resultar no aumento dos teores de fósforo sob condições de sequeiro, a calagem dos solos ácidos de várzea atua positivamente, sob condições de inundação, como instrumento minimizador da queda do teor de fósforo em solos com altos teores de ferro.

5. A estreita associação entre os aumentos nos teores de sulfato nos solos e os aumentos de pH com a calagem, e a manutenção, nas parcelas inundadas, de maiores teores de sulfato naquelas submetidas à calagem prévia, revelam a grande

importância da correção da acidez não somente como prática de manejo visando o fornecimento de enxofre às plantas cultivadas em solos ácidos de várzea, mas também como um importante mecanismo para retardar a redução do sulfato em solos inundados.

6. A existência de teores significativamente mais elevados de amônio e, até mesmo, de nitrato e sulfato, na profundidade abaixo de 3 cm em comparação à de 0 a 3 cm, nos solos estudados sob condições de inundação revela a importância de uma avaliação em camadas distintas, associada a estudos aprofundados sobre o poder de oxidação da rizosfera nestas, visando compreender melhor as transformações dos nutrientes em campos cultivados com arroz sob inundação.

7. RESUMO

As áreas de várzeas no Brasil constituem-se num potencial ainda pouco explorado, principalmente aquelas regiões de localização mais privilegiada. Em muitas destas regiões, grandes investimentos com infra-estrutura foram realizados, embora pouca atenção tenha sido dada com relação à geração de conhecimentos científicos nestes sistemas, notadamente na área de manejo do solo. Por serem originados, geralmente, de sedimentos com grande heterogeneidade, os solos de várzea apresentam uma diversidade muito grande de características, as quais são alteradas sobremaneira quando do cultivo destes sob condições de inundação. Dentre estas, destacam-se a reação do solo, as condições de oxidação-redução e a disponibilidade de nutrientes, quer sejam nativos ou adicionados.

Diante das poucas informações disponíveis sobre os solos de várzea no Brasil, procurou-se desenvolver o presente estudo com o objetivo de avaliar as alterações em pH, nitrogênio, fósforo e enxofre em diferentes solos de várzea cultivados com arroz e submetidos ou não à calagem e à inundação. Amostras da camada superficial (0 a 20 cm) de quatro classes de solos de várzea (C, HGP, HGH, HO) dos "Polders" Careaçú e Bela Vista, localizados no Vale do Rio Sapucaí, Sul de Minas Gerais, foram

caracterizadas química e fisicamente, acondicionadas em vasos plásticos (2 dm³) e cultivadas com arroz, sob os seguintes tratamentos: i) nível de água em torno de 60% do VTP; ii) inundação completa, do transplante ao final do experimento; iii) incubação com calcário seguida de manutenção da umidade em torno de 60% do VTP; e iv) incubação com calcário seguida de inundação completa. Após o transplante e durante um período de 56 dias foram avaliados, a cada duas semanas, os teores, no solo, de N-NO₃⁻, N-NH₄⁺, N total, P-resina, P orgânico, S-SO₄²⁻ e S de reserva, bem como o pH H₂O e o pH CaCl₂ 0,01M. Avaliações de N-NO₃⁻, N-NH₄⁺ e S-SO₄²⁻ nas parcelas submetidas à inundação foram feitas distintamente nas profundidades de 0 a 3 cm e abaixo de 3 cm.

Os resultados obtidos revelam que, para solos de várzea ricos em matéria orgânica e com baixos teores de ferro, a simples inundação do solo não substitui a calagem em termos de correção da acidez. O estímulo à nitrificação e a manutenção de teores mais elevados de nitrato no solo apresentam-se como importantes mecanismos para retardar os processos de redução decorrentes da inundação, em solos ácidos de várzea corrigidos com calcário.

Além de resultar no aumento dos teores de fósforo e de sulfato sob condições de sequeiro, a calagem dos solos ácidos de várzea atua positivamente, sob condições de inundação, não só no sentido de minimizar a queda do teor de fósforo em solos com alto teor de ferro mas também para retardar a redução do

sulfato.

A existência de teores significativamente mais elevados de amônio e, até mesmo, de nitrato e sulfato, na profundidade abaixo de 3 cm, nos solos estudados sob condições de inundação, revela a importância de uma avaliação em camadas distintas, associada a estudos aprofundados sobre o poder de oxidação da rizosfera nestas, visando compreender melhor as transformações dos nutrientes em campos cultivados com arroz sob inundação.

8. SUMMARY

LIMING AND WATERLOGGING IN LOWLAND SOILS CULTIVATED WITH RICE: ALTERATIONS IN pH, NITROGEN, PHOSPHORUS AND SULFUR.

The lowland areas in Brazil constitute a potential still little explored, mainly those of better geographic situation. In many of these regions, great investments with infrastructure were performed although little attention had been given in relation to scientific knowledge generation in these systems, mainly in the area of soil management. Due to the fact that these soils are, in general, originated from very heterogeneous sediments, they present a very high diversity of characteristics, which are very much altered when these soils are cultivated under waterlogging conditions. Among these deserve to be mentioned the soil reaction, the oxidation-reduction conditions, and the availability of native or added nutrients.

Keeping in mind the few available informations about the lowland soils of Brazil, it was developed the present study with the objective of evaluating the alterations in pH, nitrogen, phosphorus and sulfur in different lowland soils cultivated with rice and submitted or not to liming and waterlogging. Samples from the surficial layer (0 to 20 cm) of

four lowland soil classes (Cambisol-C; Low Humic Gley-HGP; Humic Gley-HGH; and Organic-HO) of Careaçu and Bela Vista polders, located at Sapucaí river, South of Minas Gerais State, Brazil, were chemically and physically characterized, conditioned in plastic pots (2 dm^3), and cultivated with rice, under the following treatments: *i*) moisture level around 60% of the total volume of pores; *ii*) complete waterlogging from transplant to the end of the experiment; *iii*) incubation with lime, followed by maintenance of the moisture level around 60% of the total volume of pores; and *iv*) incubation with lime, followed by complete waterlogging. After the transplant and during a period of 56 days were evaluated, at each two weeks, the soil amounts of NO_3^- - N, NH_4^+ - N, total N, resin-P, organic P, SO_4^{2-} - S, and reserve S, as well as the $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ and $\text{pH}_{0,01\text{M CaCl}_2}$. Evaluation of NO_3^- - N, NH_4^+ - N, and SO_4^{2-} - S in the plots submitted to waterlogging were made distinctly in the depths of 0 -3 cm, and below 3 cm.

The obtained data showed that for lowland soils with high organic matter content and low iron content waterlogging itself does not substitute liming in terms of neutralizing soil acidity. The stimulus to the nitrification process and the maintenance of higher soil nitrate levels represent important mechanisms to retard the reduction process due to waterlogging, in lowland soils amended with lime.

Besides the increase in soil phosphorus and sulfate levels under aerated conditions, liming of acid lowland soils

acts positively, under waterlogging conditions, not only in terms of minimizing the decrease of phosphorus content in soils with high iron levels but also retarding the sulfate reduction.

The higher levels of ammonium and also nitrate and sulfate observed below 3 cm soil depth in soils under waterlogging conditions revealed the importance of making evaluation in different soil layers, associated with specific studies about rizosphere oxidation power in these layers, aiming a better understanding of nutrient transformations in paddy soils.

9. LITERATURA CITADA

ALEXANDER, M. Nitrification. In: BARTHOLOMEW, W. V. & CLARK, F.E., ed. Soil nitrogen. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.307-43. (Agronomy, 10).

ALVA, A.K.; LARSEN, S. & BILLE, S.W. The influence of rhizosphere in rice crop on resin-extractable phosphate in flooded soils at various levels of phosphate applications. Plant and Soil, The Hague, 56(1):17-25, 1980.

AVELAR, B.C. & SOUZA, J.J. de. Levantamento de reconhecimento detalhado dos solos dos polders "Careçu e Bela Vista", Vale do Sapucaí, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 15, Campinas, 1975. Anais... Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1976. p.337-444.

AYOTADE, K.A. Kinetics and reactions of hidrogen sulphide in solution of flooded rice soils. Plant and Soil, The Hague, 46(2):381-9, Feb. 1977.

BARBOSA FILHO, M.P. Nutrição e adubação do arroz: sequeiro e irrigado. Piracicaba, POTAFOS, 1987. 128 p. (Boletim Técnico, 9).

BASU, S.N. Effect of organic matter and initial pH value on phosphorus availability of submerged soil. Fertilizer Technology, Sindri, 14(4):376-8, 1977.

BEYE, G. Etude de l'action de doses croissantes d'azote en presence ou en absence de paille de riz enfouie sur le development et le rendements du riz en Basse-Casamance. Agronomie Tropicale, Paris, 32(1):41-50, Jan./Mars 1977a.

----- Influence de la longueur de la submersion avant repiquage et de l'enfouissement de paille sur les proprietes physico-chimiques de deux sols de rizieres et sur le development et les rendements du riz. Agronomie Tropicale, Paris, 32(1):31-40, Jan./Mars 1977b.

-----; TOURE, M. & ARIAL, G. Etude de la chimie des principaux sols submerge de Basse-Casamance, en relation avec le development et la nutrition minerale de riz. Agronomie Tropicale, Paris, 34(3):271-300, Jui./Sep. 1979.

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).

BLOOMFIELD, C. & COULTER, J.K. Genesis and management of acid sulphate soils. Advances in agronomy, New York, 25:265-326, 1973.

BRANDON, D.M. & MIKKELSEN, D.S. Flooding and draining rice soils influences P availability to crops. Better Crops with Plant Food, Atlanta, 67:28-9, Summer 1983.

----- & ----- Phosphorus transformations in alternately flooded California soils: I. Cause of plant phosphorus deficiency in rice rotation crops and correctional methods. Soil Science Society of America Journal, Madison, 43(5): 989-94, Sep./Oct. 1979.

- BRASIL. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Produção Agropecuária. Provárzeas Nacional; 1 hectare vale por 10. Brasília, s.d. 252 p. (Informação Técnica, 1).
- BRASIL. Ministério do Interior - Ministério da Educação e Cultura. Aproveitamento hidro-agrícola Vale do Sapucaí. Dados básicos. Volume I. DNOS/ESAL, Lavras, 1974. 314 p.
- BREMNER, J.M. & MULVANEY, C.S. Nitrogen-Total. In: PAGE, A.L., ed. Methods of soil analysis; chemical and microbiological properties. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1982. pt. 2, cap. 31, pt. 595-624. (Agronomy, 9).
- BROADBENT, F.E. & NAKASHIMA, T. Nitrogen immobilization in flooded soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 34(2):218-21, Mar./Apr. 1970.
- & REYES, O.C. Uptake of soil and fertilizer nitrogen by rice in some philippine soils. Soil Science, Madison, 112(3):200-5, Sep. 1971.
- & CLARK, F. E. Denitrification. In: BARTHOLOMEW, W.V. & CLARK, F.E., eds. Soil nitrogen. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p. 344-59. (Agronomy, 10).
- CAMPBELL, C.A. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. In: SCHNITZER, M. & KHAN, S.V., eds. Soil organic matter. New York, Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. cap. 5, p. 173-271. (Developments in Soil Science, 8).
- CAMPBELL, L.B. & RACZ, G.J. Organic and inorganic P content, movement and mineralization of P in soil beneath a feedlot. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, 55:457-66, Nov. 1975.

- COLEMAN, N.T. & THOMAS, G.W. The basic chemistry of soil acidity. In: PEARSON, R.W. & ADAMS, F., eds. Soil acidity and liming. Madison, American Society of Agronomy, 1967. p.1-41. (Agronomy, 12).
- CONNELL, 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, Sep./Oct. 1969.
- CURI, N.; RESENDE, M. & SANTANA, D.P. Solos de várzea de Minas Gerais. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, 13(152):3-10, 1988.
- DALAL, R.C. Soil organic phosphorus. Advances in Agronomy, New York, 29:83-117, 1977.
- 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. 545-67. (Agronomy, 9).
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Manual de métodos de análise do solo. Rio de Janeiro, 1979. n.p.
- 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.
- FAGERIA, N.K. Adubação e nutrição mineral da cultura do arroz. Goiânia, EMBRAPA/CNPAF, 1984. 341 p.

- FAGERIA, N.K. Química de solos de várzea. In: DECHEN, A.R.; CARMELLO, Q.A. de C. & FLOSS, E.L. (coord.). Simpósio avançado de solos e nutrição de plantas, 2, Piracicaba, 1989. Anais... Campinas, Fundação Cargill, 1989. p. 93-114.
- ; ZIMMERMANN, F.J.P. & LOPES, A.M. Respostas do arroz irrigado à aplicação de fósforo, zinco e calcário. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 1(2):72-6, maio/ago. 1977.
- FIRESTONE, M.K. Biological denitrification. In: STEVENSON, F.J., ed. Nitrogen in agricultural soils. Madison, American Society of Agronomy/Crop Science Society of America/Soil Science Society of America, 1982. p. 289-326. (Agronomy, 22).
- FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F. de; SOARES, P.C.; COSTA, L.M. da & 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.
- FREIRE, J.C.; RIBEIRO, M.A.V.; BAHIA, V.G.; LOPES, A.S. & AQUINO, L.H. de. Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras-MG. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 4(1):5-8, jan./abr. 1980.
- FRENEY, J.R. & BOONJAWAT, J. Sulfur transformations in wetland soils. In: BLAIR, G.J. & TILL, A.R., eds. Sulfur in South East Asian and South Pacific agriculture. Armidale, University of New England, 1983. p. 28-38.
- GHOSH, S.N.; KAR, A.K. & DHUS, S.P. Influence of growing rice plant on redox potencial and pH changes in flooded soil. Technology, Sindri, 11(4):425-8, 1974.

- GRANDE, M.A.; CURI, N. & QUAGGIO, J.A. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich e resina, em solos cultivados com arroz irrigado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 10(1):45-50, jan./abr. 1986.
- GUILHERME, L.R.G.; CURI, N. & GUEDES, G.A.A. Calagem e disponibilidade de fósforo para o arroz irrigado cultivado em casa de vegetação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 13(3):341-7, set./dez. 1989.
- ; VALE, F.R do; GUEDES, G.A.A. & CURI, N. Avaliação de métodos e parâmetros analíticos para recomendação de calagem em solos de várzea. In: REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 18, Guarapari, 1988. Resumos... Vitória, SEAG-ES/EMCAPA/EMATER-ES/SBCS, 1988. p.21-2.
- GUPTA, R.K. & SINGH, T.A. Interrelationships among labile phosphorus kinetics, phosphate potentials and fertilizer response of rice in subhimalayan soil. Agrochimica, Pisa, 21(1/2):123-33, Gen./Mar. 1977.
- HASEBE, A.; ITO, J.; IIMURA, K. & SEKYIA, S. Dynamic aspects of nitrification and subsequent denitrification in lowland rice fields. In: INTERNACIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 14, Kioto, 1990. Transactions: Vol. IV. Kioto, International Society of Soil Science, 1990. p. 332-6.
- HOWLER, R.H. & BOULDIN, D.R. The difusion and consumption of oxigen in submerged soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 35(2):202-8, Mar./Apr. 1971.
- HOEFT, R.G.; WALSH, L.M. & KEENEY, D.R. Evaluation of various extractants for available soil surfur. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 37(3):401-4, May/June. 1973.

- HUNTER, A.H. Método de análise foliar. Raleigh, N.C.S.U., s.d. 28 p. (mimeo.).
- JACKSON, W.A. Physiological effects of soil acidity. In: PEARSON, R.W. & ADAMS, F., eds. Soil acidity and liming. Madison, American Society of Agronomy, 1967. p.43-124. (Agronomy, 12).
- JUGSUJINDA, A. & PATRICK JR., W.H. Growth and nutrient uptake by rice in a flooded soil under controlled aerobic-anaerobic and pH conditions. Agronomy Journal, Madison, 69(4):705-10, July/Aug. 1977.
- KABEERATHUMA, S. & PATNAIK, S. Effect of submergence on the availability of toxic and deficient nutrients in acid sulphate soils of Kerala. Agricultural Research Journal of Kerala, Trichur, 16(2):181-7, 1979.
- KAGAWA, H. The significance of organic N compounds as the submerged paddy soils. Plant and Soil, The Hague, 47(1):81-8, May 1977.
- KEENEY, D.R. & NELSON, D.W. Nitrogen - Inorganic Forms. In: PAGE, A.L., ed. Methods of soil analysis; chemical and microbiological properties. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1982. pt. 2, cap. 33, p. 643-98. (Agronomy, 9).
- LEITE, N.; GARGANTINI, H.; HUNGRIA, L.S. & IGUE, T. Efeitos do nitrogênio, fósforo, calcário e micronutrientes em cultura de arroz irrigada no Vale do Paraíba. Bragantia, Campinas, 29(25):273-85, ago. 1970.
- MACRAE, I.C.; ANCAJAS, R.R. & SALANDANAN, D. The fate of nitrate nitrogen in some tropical soils following submergence. Soil Science. Madison, 105(5):327-34, May 1988.

- MANDAL, L.N. Effect of time, starch, and lime on the transformation of inorganic phosphorus in a water-logged rice soil. Soil Science, Madison, 97:127-32, 1964.
- & KHAN, S.K. Influence of soil moisture regimes on transformation of inorganic phosphorus in rice soils. Journal of the Indian Society of Soil Science, New Delhi, 23(1):31-7, 1975.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate. Clays and Clay Minerals, Clarkson, 7:317-27, 1960.
- MENGEL, K. & KIRKBY, E.A. Principles of plant nutrition. 3 ed. Bern, International Potash Institute, 1982. 655p.
- MOHANTY, S.K. & MOSIER, A.R. Nitrification-denitrification in flooded rice soils. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 14, Kioto, 1990. Transactions: Vol. IV. Kioto, International Society of Soil Science, 1990. p. 326-31.
- MORAES, J.F.V. 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, Brasília, 8(7):93-101, 1973a.
- . Efeitos da inundação do solo. II. Influência sobre a absorção de nutrientes e o crescimento do arroz (*Oryza sativa*). Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 8(7):103-8, 1973b.
- & FREIRE, C.J. Variação do pH, da condutividade elétrica e da disponibilidade dos nutrientes nitrogenado, fósforo, potássio, cálcio e magnésio em quatro solos submetidos à inundação. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 9(9): 35-43, 1974.

- MORAES, J.F.V; FREIRE, C.J. & SILVA, E.C. Transformações do nitrogênio em dois solos submetidos à inundação. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 10(11):25-30, 1975.
- NEPTUNE, A.L.M.; TABATABAI, M.A. & HANWAY, J.J. Sulfur fractions and carbon-nitrogen-phosphorus-sulfur relationships in some Brazilian and Iowa Soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 39(1), Jan./Feb. 1975.
- 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, Sep./Oct. 1974.
- OLIVEIRA, C.; LEAL, J.R. & VELLOSO, A.C.X. Influência do crescimento do arroz alagado no estado de redução do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 22, Recife, 1989. Programa e Resumos... Recife, SBCS, 1989. p. 91.
- OLSEN, S.R. & SOMMERS, L.E. Phosphorus. In: PAGE, A.L., ed. Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1982. pt. 2, cap. 24, p. 403-30. (Agronomy, 9).
- PASRICHA, N.S. & SINGH, T. Ammonium exchange equilibria in the submerged soils and forms of ammonium which are not water-soluble but are available to lowland rice. Soil Science, Madison, 124(2):90-4, Aug. 1977.
- PATELLA, J.F. Arroz em solo inundado: uso adequado de fertilizantes. São Paulo, Nobel, 1976. 76 p.

PATRICK JR., W.H. Nitrogen transformations in submerged soils. In: STEVENSON, F.J., ed. Nitrogen in agricultural soils. Madison, American Society of Agronomy/Crop Science Society of America/Soil Science Society of America, 1982. p.449-65. (Agronomy, 22).

----- & MAHAPATRA, I.C. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. Advances in Agronomy, New York, 20:323-58, 1968.

----- & REDDY, C.N. Chemical changes in rice soils. In: BRADY, N.C. Soils and rice. Los Baños, International Rice Research Institute, 1978. p. 361-79.

PAVAN, M.A. & MIYAZAWA, M. Química de solos inundados. Londrina, IAPAR, 1983. Separata de Treinamento em arroz irrigado e alternativas agrícolas em várzeas. Londrina, IAPAR, 1983. p. 5-20.

PEREIRA, L.F. Efeitos da aplicação de calcário, fósforo e zinco no crescimento e nutrição do trigo (*Triticum aestivum* L.) e arroz (*Oryza sativa*, L.) em dois solos de várzeas do Estado de Minas Gerais. Lavras, ESAL, 1985. 135p. (Tese MS).

PONNAMPERUMA, F.N. Electrochemical changes in submerged soils and the growth of rice. In: BRADY, N.C. Soils and rice. Los Baños, International Rice Research Institute, 1978. p. 421-41.

----- The chemistry of submerged soils. Advances in Agronomy, New York, 24:29-96, 1972.

PORANANOND, K. & SEARLE, P.G.E. The effect of time of fertilizer-soil contact, distance of phosphate movement and fertilizer solubility on phosphate availability to early growth of lowland rice. Plant and Soil. The Hague, 46(2):391-404, Feb. 1977.

- O PROGRAMA NACIONAL DE IRRIGAÇÃO - PRONI, em pleno processo de desenvolvimento. Item, Brasília, (29):17-8, jun. 1987.
- QIGUO, Z. Soil and water management in farming systems with flooded rice. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 14, Kioto, 1990. Transactions: Plenary papers, contents and author index. Kioto, International Society of Soil Science, 1990. p.13-29.
- RAHMATULLAH ; CHAUDRY, F. M. & RASHID, A. Micronutrient availability to cereals from calcareous soils. II. Effect of flooding on electrochemical properties of soils. Plant and Soil, The Hague, 45(2):411-20, 1976.
- 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.
- RAO, D.N. & MIKKELSEN, D.S. Effect of acetic, propionic and butyric acids on young rice seedling's growth. Agronomy Journal. Madison, 69(6):923-8, Nov./Dec. 1977.
- REIS, A.E.G. dos & RASSINI, J.B. Aproveitamento de várzeas. In: GOEDERT, W.J. (ed.). Solos dos cerrados: tecnologia e estratégias de manejo. São Paulo/Brasília., Nobel/EMBRAPA-CPAC, 1985. p. 353-84.
- ROLSTON, D.E.; AMALI, S.; JAYAWEERA, G.R.; RAO, P.S.C.; JESSUP, R.E.; MIKKELSEN, D.S. & REDDY, K.R. Simulation of nitrogen transport processes in flooded rice soils. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 14, Kioto, 1990. Transactions: Vol. IV. Kioto, International Society of Soil Science, 1990. p.314-9.
- SACHDEV, M.S. & CHHABRA, P. Transformations of ³⁵S-labelled sulfate in aerobic and flooded conditions. Plant and Soil, The Hague, 41(2):335-41, 1974.

- SAHRAWAT, K.L. Mineralization of soil organic nitrogen under waterlogged conditions in relation to other properties of tropical rice soils. Australian Journal of Soil Research, East Melbourne, 21(2):133-8, 1983.
- SAVANT, N.K. & DE DATTA, S.K. Nitrogen transformations in wetland rice soils. Advances in Agronomy, New York, 35: 241-302, 1982.
- SCHMIDT, N.C. & GARGANTINI, H. Efeito da aplicação de calcário, matéria orgânica e adubos minerais em cultura de arroz em solo de várzea irrigada. Bragantia, Campinas, 29(27): 293-9, set. 1970.
- SCHOFIELD, R.K. & TAYLOR, A.N. The measurement of soil pH. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 19: 164-7, 1955.
- SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. Z. Pflanzenernähr., Bodenk., 105:194-202, 1964.
- SHEARD, R.W. & LEYSHON, A.J. Short-term flooding of soil: its effect on the composition of the gas and water phases of soil and on phosphorus uptake of corn. Canadian Journal of Soil Science, Ottawa, 56(1):9-20, Feb. 1978.
- SINGH, M. & SINGH, S.P. Effects of nitrogen and zinc on the yield of submerged rice and uptake of N and Zn on unlimed and limed soils. Plant and Soil. The Hague, 62(2):183-92, 1981.
- & ----- . Yield of submerged paddy and uptake of Zn, P and N as affected by liming and Zn fertilizers. Plant and Soil, The Hague, 56(1):81-92, 1980a.

- SINGH, M. & SINGH, S.P. Zinc and phosphorus interaction in submerged paddy Soil Science, Madison, 129(5):282-9, May 1980b
- SILVA, C.A., PORTO, D.; VALE, F.R. do & MUNIZ, J.A. Efeito da calagem e gessagem sobre a nitrificação em Latossolo Vermelho-Escuro do Sul de Minas Gerais. In: REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 19, Santa Maria, 1990, Resumos... Santa Maria, UFSM-Centro de Ciências Rurais/SBCS, 1990. p.99.
- SIQUEIRA, J. O. Microbiologia e bioquímica de solos sob inundação. Lavras, MEC/ESAL/DCS, 1983. 16 p. (mimeo.)
- & FRANCO, A.A. Biotechnology do solo: fundamentos e perspectivas. Brasília/Lavras, MEC/ESAL/FAEPE/ABEAS, 1988. 236 p.
- TABATABAI, M. A. Sulfur. In: PAGE, A.L. ed. Methods of soil analysis; chemical and microbiological properties. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1982. pt. 2, cap. 28, p. 501-38. (Agronomy, 9).
- & BREMNER, J.M. An alkaline oxidation method for determination of total sulfur in soils. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, 34(1):62-5, Jan./Feb. 1970.
- TROLLENIER, G. Mineral nutrition and reduction processes in the rhizosphere of rice. Plant and Soil, The Hague, 47(1):193-202, May 1977.
- TURNER, F.T. & GILLIAN, J.W. Effect of moisture and oxidation status of alkaline rice soils on the adsorption of soil phosphorus by an anion resin. Plant and Soil, The Hague, 45(2):353-63, 1976a.

- TURNER, F T & GILLIAN, J.W. Increased P diffusion as an explanation of increased P availability in flooded rice soils Plant and Soil, The Hague, 45(2):365-77, 1976b.
- VAHL, L.C Solos e adubação do arroz no Rio Grande do Sul. Pelotas, EMBRAPA, 1979. 48 p. (Circular Técnica, 2).
- VETTORI, L. Métodos de análise do solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7).
- VOMOCIL, J A. Porosity. 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. 21, p. 299-314. (Agronomy, 9)
- WATANABE, I Biological nitrogen fixation in rice soils. In: BRADY, N.C. Soils and rice. Los Baños, International Rice Research Institute, 1978. p. 465-78.
- WILLETT, I.R An overview of redox reactions in relation to the surface chemistry of soils. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 14, Kioto, 1990. Transactions: Vol. II. Kioto, International Society of Soil Science, 1990. p. 38-43.
- The effects of flooding for rice culture on soil chemical properties and subsequent maize growth. Plant and Soil, The Hague, 52(3):373-83, Aug. 1979.
- & HIGGINS, M.L. Phosphate sorption and extractable iron in soils during irrigated rice-upland crop rotations. Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry, East Melbourne, 20(104):346-53, June 1980.
- YOSHIDA, T. Microbial metabolism in rice soils. In: BRADY, N.C. Soils and rice. Los Baños, International Rice Research Institute, 1978. p. 445-63.

APÊNDICE

QUADRO 1A. Resumo das análises de variância e teste de médias para dados de nitrato (NO_3^- - meq/100 c.c.) nos solos estudados. 1/

Causas da Variação	G.L.	Cambissolo		Glei Pouco Húmico		Glei Húmico		Solo Orgânico		
		Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	
Tratamentos (A)	3	2,2795	0,001	6,0460	0,001	2,7942	0,001	15,6499	0,001	
Épocas (B)	4	1,7460	0,001	1,4037	0,001	1,3588	0,001	1,6304	0,001	
Interação A x B	12	0,2992	0,001	0,5771	0,001	0,2734	0,001	0,9994	0,001	
Resíduo	40	0,0088		0,0146		0,0081		0,0299		
C.V. (%)		10,10		10,38		10,76		11,76		
Tratamentos	época de amostragem (semanas após o transplante)									
		C		2		4		6		8
		Cambissolo								
60% VTP		1,29 a B		1,12 a B		1,71 b A		1,23 a B		0,62 b C
60% + calagen		1,35 a B		1,19 a B		1,96 a A		1,23 a B		0,91 a C
Inundado		1,37 a A		0,88 b B		0,61 c C		0,09 b D		0,08 c D
Inund. + calagen		1,35 a A		0,78 b B		0,59 c B		0,09 b C		0,10 c C
		Glei Pouco Húmico								
60% VTP		1,45 b C		1,48 a BC		1,96 b A		1,91 a A		1,74 a AB
60% + calagen		1,86 a B		1,66 a BC		2,29 a A		1,40 b CD		1,29 b D
Inundado		1,41 b A		0,48 c B		0,22 d BC		0,10 c C		0,11 c C
Inund. + calagen		1,86 a A		0,97 b B		0,91 c B		0,10 c C		0,12 c C
		Glei Húmico								
60% VTP		0,96 b B		0,90 b B		1,32 b A		0,86 b B		0,53 a C
60% + calagen		1,48 a A		1,57 a A		1,68 a A		1,53 a A		0,67 a B
Inundado		0,88 b A		0,45 c B		0,23 d C		0,08 c C		0,13 b C
Inund. + calagen		1,55 a A		0,98 b B		0,76 c C		0,11 c D		0,11 b D
		Solo Orgânico								
60% VTP		0,78 b C		1,25 c B		1,77 b A		1,30 b B		1,28 b B
60% + calagen		2,50 a CD		3,09 a AB		3,46 a A		2,16 a D		2,79 a BC
Inundado		0,85 b A		0,27 d B		0,22 c B		0,12 d B		0,15 c B
Inund. + calagen		2,60 a A		2,16 b B		1,88 b B		0,55 c C		0,23 c C

1/ Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Letras minúsculas e maiúsculas distinguem, respectivamente, tratamentos e épocas.

QUADRO 2A. Resumo das análises de variância e teste de médias para os dados de amônio (NH_4^+ - meq/100 c.c.) nos solos estudados. 1/

Causas da Variação	G.L.	Cambissolo		Glei Pouco Húmico		Glei Húmico		Solo Orgânico	
		Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)
Tratamentos (A)	3	0,0101	0,001	0,3826	0,001	0,4353	0,001	8,6898	0,001
Épocas (B)	4	0,0415	0,001	0,0145	0,008	0,1234	0,001	2,4865	0,001
Interação A x B	12	0,0027	0,037	0,0104	0,002	0,0338	0,001	0,8133	0,001
Resíduo	40	0,0006		0,0016		0,0009		0,0077	
C.V. (%)		10,93		11,47		8,59		10,27	

Tratamentos	época de amostragem (semanas após o transplante)				
	0	2	4	6	8
	<u>Cambissolo</u>				
60% VTP	0,27 a B	0,28 a B	0,34 a A	0,12 a C	0,29 a AB
60% + calagen	0,23 a A	0,20 b A	0,22 c A	0,12 a B	0,24 ab A
Inundado	0,25 a A	0,29 a A	0,28 b A	0,13 a B	0,23 b A
Inund. + calagen	0,27 a A	0,25 ab AB	0,21 c B	0,12 a C	0,20 b B
	<u>Glei Pouco Húmico</u>				
60% VTP	0,51 a A	0,31 b B	0,49 b A	0,50 a A	0,57 a A
60% + calagen	0,21 b AB	0,20 c AB	0,22 c AB	0,14 b B	0,24 c A
Inundado	0,49 a B	0,46 a B	0,59 a B	0,46 a B	0,45 b B
Inund. + calagen	0,19 b A	0,24 bc A	0,25 c A	0,17 b A	0,21 c A
	<u>Glei Húmico</u>				
60% VTP	0,65 a A	0,47 b C	0,55 b B	0,25 b E	0,36 a D
60% + calagen	0,19 b A	0,18 d A	0,23 c A	0,11 c B	0,23 b A
Inundado	0,67 a B	0,54 a C	0,75 a A	0,44 a D	0,21 b E
Inund. + calagen	0,23 b A	0,25 c A	0,25 c A	0,11 c B	0,20 b A
	<u>Solo Orgânico</u>				
60% VTP	2,46 a A	1,93 b B	1,25 b C	0,61 b B	0,54 a D
60% + calagen	0,27 b A	0,20 c A	0,21 c A	0,14 c A	0,20 b A
Inundado	2,55 a A	2,23 a B	2,23 a B	0,97 a C	0,30 b D
Inund. + calagen	0,27 b A	0,21 c A	0,22 c A	0,12 c A	0,22 b A

1/ Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Letras minúsculas e maiúsculas distinguem, respectivamente, tratamentos e épocas.

QUADRO 3A. Resumo das análises de variância e teste de médias para os dados de nitrogênio total (%) nos solos estudados. 1/

Causas da Variação	G.L.	Cambissolo		Glei Pouco Húmico		Glei Húmico		Solo Orgânico		
		G.M.	N.S.(%)	G.M.	N.S.(%)	G.M.	N.S.(%)	G.M.	N.S.(%)	
Tratamentos (A)	3	0,0025	6,501	0,0034	0,289	0,0016	6,812	0,0018	58,479	
Épocas (B)	4	0,0031	2,392	0,0007	31,889	0,0042	0,058	0,0163	0,012	
Interação A x B	12	0,0020	4,880	0,0017	0,763	0,0019	6,952	0,0053	0,668	
Resíduo	40	0,0010		0,0006		0,0006		0,0019		
C.V. (%)		6,04		3,02		2,99		3,67		
Tratamentos	época de amostragem (semanas após o transplântio)									
	0	2	4	6	8					
	<u>Cambissolo</u>									
60% VTP	0,56 a A	0,49 a A	0,55 ab A	0,51 a A	0,55 a A					
60% + calagen	0,50 a AB	0,50 b AB	0,55 ab A	0,47 a B	0,48 b AB					
Inundado	0,53 a A	0,54 a A	0,50 b A	0,51 a A	0,53 ab A					
Inund. + calagen	0,50 a B	0,51 a AB	0,57 a A	0,51 a AB	0,51ab AB					
	<u>Glei Pouco Húmico</u>									
60% VTP	0,82 a A	0,83 a A	0,83 a A	0,83 a A	0,81 a A					
60% + calagen	0,81 a A	0,83 a A	0,83 a A	0,83 a A	0,83 a A					
Inundado	0,82 a AB	0,84 a AB	0,79 a B	0,87 a A	0,85 a A					
Inund. + calagen	0,83 a A	0,82 a AB	0,78 a AB	0,76 b B	0,80 a AB					
	<u>Glei Húmico</u>									
60% VTP	0,85 a A	0,87 ab A	0,84 a A	0,83 a A	0,87 a A					
60% + calagen	0,89 a A	0,86 ab AB	0,83 a BC	0,83 a BC	0,80 b C					
Inundado	0,88 a A	0,88 a A	0,83 a A	0,83 a A	0,83 ab A					
Inund. + calagen	0,86 a A	0,82 b A	0,83 a A	0,83 a A	0,81 b A					
	<u>Solo Orgânico</u>									
60% VTP	1,23 a AB	1,27 a A	1,17 a BC	1,17 ab BC	1,12 a C					
60% + calagen	1,15 a A	1,22 a A	1,22 a A	1,13 bc A	1,12 a A					
Inundado	1,16 a AB	1,19 a AB	1,18 a AB	1,23 a A	1,12 a B					
Inund. + calagen	1,20 a A	1,21 a A	1,20 a A	1,07 c B	1,16 a AB					

1/ Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Letras minúsculas e maiúsculas distinguem, respectivamente, tratamentos e épocas.

QUADRO 4A. Resumo das análises de variância e teste de médias para os dados de nitrato (meq/100 c.c.) em profundidade nos solos estudados.¹

Causas da Variação	G.L.	Cambissolo		Glei Pouco Húmico		Glei Húmico		Solo Orgânico		
		Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	
Tratamentos (A)	3	0,1392	0,001	0,4198	0,001	0,4839	0,001	5,1109	0,001	
Épocas (B)	4	3,3099	0,001	4,8240	0,001	2,5179	0,001	4,9357	0,001	
Interação A x B	12	0,0525	0,001	0,0920	0,001	0,1196	0,001	0,6790	0,001	
Resíduo	40	0,0014		0,0045		0,0013		0,0156		
C.V. (%)		7,36		11,86		7,87		16,11		
Tratamentos	época de amostragem (semanas após o transplante)									
	0	2	4	6	8					
<u>Cambissolo</u>										
s/cal-0 a 3cm	1,37 a A	0,49 c B	0,21 b C	0,08 a D	0,11 a D					
s/cal-abaixo de 3cm	1,37 a A	0,88 a B	0,61 a C	0,08 a D	0,08 a D					
c/cal-0 a 3cm	1,35 a A	0,34 d B	0,19 b C	0,07 a D	0,09 a D					
c/cal-abaixo de 3cm	1,35 a A	0,78 b B	0,59 a C	0,09 a D	0,10 a D					
<u>Glei Pouco Húmico</u>										
s/cal-0 a 3cm	1,41 b A	0,34 c B	0,16 c C	0,07 a C	0,11 a C					
s/cal-abaixo de 3cm	1,41 b A	0,48 bc B	0,22 bc C	0,10 a C	0,11 a C					
c/cal-0 a 3cm	1,86 a A	0,57 b B	0,31 b C	0,06 a D	0,09 a D					
c/cal-abaixo de 3cm	1,86 a A	0,97 a B	0,91 a B	0,10 a C	0,12 a C					
<u>Glei Húmico</u>										
s/cal-0 a 3cm	0,88 b A	0,31 c B	0,11 c C	0,10 a C	0,11 a C					
s/cal-abaixo de 3cm	0,88 b A	0,45 b B	0,23 b C	0,08 a D	0,13 a D					
c/cal-0 a 3cm	1,55 a A	0,46 b B	0,27 b C	0,12 a D	0,09 a D					
c/cal-abaixo de 3cm	1,55 a A	0,98 a B	0,76 a C	0,11 a D	0,11 a D					
<u>Solo Orgânico</u>										
s/cal-0 a 3cm	0,85 b A	0,20 c B	0,11 c B	0,09 b B	0,11 a B					
s/cal-abaixo de 3cm	0,85 b A	0,27 c B	0,22 c B	0,12 b B	0,15 a B					
c/cal-0 a 3cm	2,60 a A	1,24 b B	1,05 b B	0,12 b C	0,10 a C					
c/cal-abaixo de 3cm	2,60 a A	2,16 a B	1,88 a B	0,55 a C	0,23 a D					

1/ Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Letras minúsculas e maiúsculas distinguem, respectivamente, tratamentos e épocas.

QUADRO 5A. Resumo das análises de variância e teste de médias para os dados de amônio (meq/100 c.c.) em profundidade nos solos estudados.¹

Causas da Variação	G.L.	Cambissolo		Glei Pouco Húmico		Glei Húmico		Solo Orgânico	
		Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)
Tratamentos (A)	3	0,0022	2,752	0,2881	0,001	0,4173	0,001	8,7273	0,001
épocas (B)	4	0,0719	0,001	0,0816	0,001	0,2774	0,001	3,2173	0,001
Interação A x B	12	0,0080	0,001	0,0158	0,001	0,0428	0,001	0,9224	0,001
Resíduo	40	0,0006		0,0014		0,0014		0,0024	
C.V. (%)		11,17		11,07		10,83		5,72	
Tratamentos	época de amostragem (semanas após o transplante)								
	0	2	4	6	B				
<u>Cambissolo</u>									
s/cal-0 a 3cm	0,25 a B	0,22 b BC	0,41 a A	0,11 a D	0,17 b CD				
s/cal-abaixo de 3cm	0,25 a A	0,29 a A	0,28 b A	0,13 a B	0,23 a A				
c/cal-0 a 3cm	0,27 a B	0,22 b BC	0,40 a A	0,11 D	0,17 b C				
c/cal-abaixo de 3cm	0,27 a A	0,25 ab AB	0,21 c B	0,12 a C	0,20 ab B				
<u>Glei Pouco Húmico</u>									
s/cal-0 a 3cm	0,49 a B	0,29 b C	0,67 a A	0,33 b C	0,27 b C				
s/cal-abaixo de 3cm	0,49 a B	0,46 a B	0,59 b A	0,46 a B	0,45 a B				
c/cal-0 a 3cm	0,19 b BC	0,25 b B	0,38 c A	0,13 c C	0,17 c BC				
c/cal-abaixo de 3cm	0,19 b A	0,24 b A	0,25 d A	0,17 c A	0,21 bc A				
<u>Glei Húmico</u>									
s/cal-0 a 3cm	0,67 a B	0,36 b C	0,83 a A	0,29 b C	0,16 ab D				
s/cal-abaixo de 3cm	0,67 a A	0,54 a B	0,75 a A	0,44 a C	0,21 a D				
c/cal-0 a 3cm	0,23 b B	0,21 c B	0,35 b A	0,11 c C	0,12 ab C				
c/cal-abaixo de 3cm	0,23 b A	0,25 c A	0,25 c A	0,11 c B	0,20 ab A				
<u>Solo Orgânico</u>									
s/cal-0 a 3cm	2,55 a A	1,92 b B	1,82 b B	0,41 b C	0,21 ab D				
s/cal-abaixo de 3cm	2,55 a A	2,23 a B	2,23 a B	0,97 a C	0,30 a D				
c/cal-0 a 3cm	0,27 b AB	0,19 c BC	0,32 c A	0,14 c C	0,16 b BC				
c/cal-abaixo de 3cm	0,27 b A	0,21 c AB	0,22 c AB	0,12 c B	0,22 abAB				

1/ Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Letras minúsculas e maiúsculas distinguem, respectivamente, tratamentos e épocas.

QUADRO 6A. Resumo das análises de variância e teste de médias para os dados de fósforo-resina ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$) nos solos estudados. 1/

Causas da Variação	G.L.	Cambissolo		Glei Pouco Húmico		Glei Húmico		Solo Orgânico							
		Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)						
Tratamentos (A)	3	34,2048	0,001	54,0515	0,001	193,3930	0,001	107,4243	0,001						
Épocas (B)	4	186,8411	0,001	158,8777	0,001	134,1334	0,001	234,4111	0,001						
Interação A x B	12	10,0822	0,013	32,5613	0,001	22,5417	0,001	12,7789	0,058						
Resíduo	40	1,9975		2,9134		3,6364		3,1474							
C.V. (%)		7,58		8,13		5,45		4,98							
Tratamentos	época de amostragem (semanas após o transplante)														
	0		2		4		6		8						
		<u>Cambissolo</u>													
60% VTP	24,5	ab	A	20,8	ab	B	19,6	a	BC	17,3	ab	C	17,0	a	C
60% + calagem	22,7	b	A	23,2	a	A	18,5	a	B	18,4	a	B	16,2	a	B
Inundado	22,1	b	A	18,5	b	B	18,5	a	B	13,1	c	C	11,2	b	C
Inund. + calagem	26,1	a	A	19,4	b	B	19,9	a	B	15,2	bc	C	10,5	b	D
		<u>Glei Pouco Húmico</u>													
60% VTP	22,1	a	A	21,7	b	A	21,8	b	A	19,6	a	A	23,0	a	A
60% + calagem	24,9	a	A	24,8	ab	A	26,1	a	A	19,0	a	B	20,8	a	B
Inundado	23,6	a	A	21,7	b	A	23,9	ab	A	14,1	b	B	9,5	b	C
Inund. + calagem	25,8	a	A	25,8	a	A	21,4	b	B	18,7	a	B	11,9	b	C
		<u>Glei Húmico</u>													
60% VTP	32,8	b	BC	35,7	b	AB	38,9	a	A	29,7	bc	C	31,5	b	BC
60% + calagem	40,0	a	AB	42,4	ab	AB	38,9	a	AB	33,1	ab	C	36,4	a	BC
Inundado	32,1	b	B	37,3	a	A	34,0	b	AB	27,0	c	C	21,9	c	D
Inund. + calagem	39,5	a	A	36,5	a	AB	40,1	a	A	34,9	a	B	36,8	a	AB
		<u>Solo Orgânico</u>													
60% VTP	32,4	b	C	42,0	a	A	37,7	a	B	32,7	a	C	33,5	ab	C
60% + calagem	39,6	a	B	44,1	a	A	38,5	a	B	31,3	ab	C	36,4	a	B
Inundado	33,9	b	A	37,2	b	A	33,6	b	A	28,0	b	B	26,7	c	B
Inund. + calagem	40,7	a	AB	44,1	a	A	37,7	a	B	30,7	ab	C	31,8	b	C

1/ Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Letras minúsculas e maiúsculas distinguem, respectivamente, tratamentos e épocas.

QUADRO 7A. Resumo das análises de variância e teste de médias para os dados de fósforo orgânico (ppm) nos solos estudados. 1/

Causas da Variação	G.L.	Cambissolo		Glei Pouco Húmico		Glei Húmico		Solo Orgânico			
		Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)		
Tratamentos (A)	3	18837,8000	0,001	50140,4611	0,001	8535,7944	6,711	20687,8889	1,069		
Épocas (B)	4	54407,1917	0,001	93368,4417	0,001	139669,5167	0,001	336282,2750	0,001		
Interação A x B	12	11382,5361	0,001	7554,9750	0,151	15214,1278	0,025	18137,7638	0,106		
Resíduo	40	942,3000		2131,9833		3329,2500		4864,6000			
C.V. (%)		5,30		4,10		4,20		5,08			
Tratamentos	Época de amostragem (semanas após o transplante)										
	0		2		4		6		8		
		<u>Cambissolo</u>									
60% VTP	570	a BC	603	a B	701	b A	504	a C	511	a C	
60% + calagem	581	a AB	607	a A	583	c AB	534	a B	532	a B	
Inundado	571	a C	645	a B	856	a A	541	a C	526	a C	
Inund. + calagem	560	a B	647	a A	546	c B	511	a B	497	a B	
		<u>Glei Pouco Húmico</u>									
60% VTP	1010	b B	1217	ab A	1076	b B	1048	a B	1022	a B	
60% + calagem	1261	a AB	1317	a A	1193	a B	1055	a C	1012	a C	
Inundado	1035	b B	1216	b A	1086	b B	1033	a B	1018	a B	
Inund. + calagem	1245	a AB	1301	ab A	1167	ab BC	1114	a C	1089	a C	
		<u>Glei Húmico</u>									
60% VTP	1490	a B	1626	a A	1380	a BC	1298	b CD	1242	a D	
60% + calagem	1444	a A	1395	b A	1401	a A	1354	ab A	1181	a B	
Inundado	1505	a A	1475	b A	1385	a AB	1317	b BC	1185	a C	
Inund. + calagem	1439	a A	1385	b AB	1281	a BC	1468	a A	1221	a C	
		<u>Solo Orgânico</u>									
60% VTP	1536	a A	1542	bc A	1116	a C	1352	a B	1290	a B	
60% + calagem	1414	a B	1677	ab A	1229	a C	1318	a BC	1168	a C	
Inundado	1534	a B	1756	a A	1263	a C	1278	a C	1303	a C	
Inund. + calagem	1454	a A	1456	c A	1247	a B	1325	a AB	1221	a B	

1/ Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Letras minúsculas e maiúsculas distinguem, respectivamente, tratamentos e épocas.

QUADRO 8A. Resumo das análises de variância e teste de médias para os dados de sulfato (SO_4^{2-} - $\mu\text{g}/\text{cm}^3$) nos solos estudados. 1/

Causas da Variação	G.L.	Cambissolo		Glei Pouco Húmico		Glei Húmico		Solo Orgânico							
		Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)						
Tratamentos (A)	3	123,0008	0,001	2267,1134	0,001	2089,0379	0,001	2454,7630	0,001						
épocas (B)	4	199,7984	0,001	88,1497	0,001	311,7621	0,001	1537,2719	0,001						
Interação A x B	12	43,4086	0,037	34,6643	0,001	42,0368	0,001	278,9110	0,001						
Resíduo	40	5,5926		1,2505		3,4831		6,6132							
C.V. (%)		5,61		5,00		6,97		5,38							
Tratamentos	época de amostragem (semanas após o transplante)														
	0		2		4		6		8						
		<u>Cambissolo</u>													
60% VTP	41,8	ab	AB	42,3	a	AB	44,2	b	A	38,6	b	B	31,1	b	C
60% + calagem	42,2	ab	B	49,4	a	A	47,1	ab	AB	44,0	a	AB	44,0	a	AB
Inundado	37,6	b	BC	42,3	b	AB	43,7	b	A	36,1	b	C	39,7	a	ABC
Inund. + calagem	43,1	a	B	48,9	a	A	50,5	a	A	46,5	a	AB	30,2	b	C
		<u>Glei Pouco Húmico</u>													
60% VTP	10,6	b	AB	8,2	c	B	12,3	c	A	11,2	d	A	11,2	c	A
60% + calagem	34,5	a	BC	38,7	a	A	36,3	a	AB	32,0	a	CD	31,8	a	D
Inundado	9,1	b	C	13,5	b	B	18,6	b	B	14,5	c	B	8,9	c	C
Inund. + calagem	33,7	a	B	37,5	a	B	34,8	a	B	27,3	b	C	22,7	b	D
		<u>Glei Húmico</u>													
60% VTP	19,0	b	A	16,5	b	a	17,8	c	A	15,0	c	A	15,2	c	A
60% + calagem	42,2	a	AB	43,7	a	A	37,8	b	C	38,8	a	B	30,5	a	D
Inundado	19,0	b	AB	19,3	b	AB	21,6	c	A	16,1	c	B	6,9	d	C
Inund. + calagem	34,4	a	A	43,2	a	A	42,2	a	A	29,8	b	B	21,9	b	C
		<u>Solo Orgânico</u>													
60% VTP	39,4	b	AB	44,5	c	A	33,7	c	B	26,4	c	C	24,9	b	C
60% + calagem	52,7	a	C	67,7	a	A	62,1	a	AB	48,2	b	C	59,4	a	B
Inundado	41,2	b	B	50,3	b	A	46,0	b	AB	15,7	d	C	7,5	c	D
Inund. + calagem	52,2	a	B	63,5	a	A	62,5	a	A	55,4	a	B	21,6	b	C

1/ Médias seguidas por letras distintas diferem si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Letras minúsculas e maiúsculas distinguem, respectivamente, tratamentos e épocas.

QUADRO 9A. Resumo das análises de variância e teste de médias para os dados de enxofre de reserva (ppm) nos solos estudados. 1/

Causas da Variação	G.L.	Cambissolo		Glei Pouco Húmico		Glei Húmico		Solo Orgânico	
		Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)
Tratamentos (A)	3	8185,3556	0,164	11732,7333	0,001	19777,8000	0,001	1958,6000	38,170
épocas (B)	4	6902,3917	0,188	11108,9583	0,001	59592,8583	0,001	330273,4417	0,001
Interação A x B	12	9437,0917	0,001	1558,8583	1,068	10396,3694	0,001	9309,9194	0,014
Resíduo	40	1298,4500		590,6000		1270,5333		1864,3500	
C.V. (%)		10,19		6,22		8,32		8,76	

Tratamentos	época de amostragem (semanas após o transplântio)				
	0	2	4	6	8
	<u>Cambissolo</u>				
60% VTP	406 a AB	353 ab B	464 a A	339 a B	380 a B
60% + calagem	306 b BC	424 a A	253 c C	357 a AB	352 a AB
Inundado	420 a A	320 b BC	342 ab C	278 ab C	368 a AB
Inund. + calagem	314 b AB	390 ab A	384 b A	271 b B	351 a AB
	<u>Glei Pouco Húmico</u>				
60% VTP	432 a AB	469 a A	447 a AB	390 a B	396 a B
60% + calagem	426 a A	384 b AB	339 c BC	319 b C	331 a BC
Inundado	409 a AB	390 b AB	441 ab A	379 a B	354 abB
Inund. + calagem	427 a A	396 b AB	390 bc AB	351 ab B	347 abB
	<u>Glei Húmico</u>				
60% VTP	567 ab A	413 ab BC	376 ab C	490 a AB	435 a BC
60% + calagem	516 b A	490 a A	304 b C	320 b BC	392 abB
Inundado	601 a A	477 a B	361 b C	461 a B	415 a BC
Inund. + calagem	511 b A	350 b B	453 a A	321 b B	320 b B
	<u>Solo Orgânico</u>				
60% VTP	797 a A	389 b B	440 a B	455 a B	386 abB
60% + calagem	758 a A	536 a B	423 a C	314 b D	403 abCD
Inundado	803 a A	389 b B	427 a B	444 a B	348 b B
Inund. + calagem	786 a A	520 a B	410 a C	378 abC	449 a BC

1/ Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Letras minúsculas e maiúsculas distinguem, respectivamente, tratamentos e épocas.

QUADRO 10A Resumo das análises de variância e teste de médias para os dados de sulfato ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$) em profundidade nos solos estudados. 1/

Causas da Variação	G.L.	Cambissolo		Glei Pouco Húmico		Glei Húmico		Solo Orgânico	
		Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)	Q.M.	N.S.(%)
Tratamentos (A)	3	1057,1307	0,001	1314,2899	0,001	1557,8091	0,001	1702,2586	0,001
Épocas (B)	4	724,0679	0,001	233,2260	0,001	655,6100	0,001	3390,2335	0,001
Interação A x B	12	118,8824	0,001	80,1460	0,001	67,7152	0,001	180,4508	0,001
Resíduo	40	4,2380		1,5601		1,9396		2,9522	
C.V. (%)		5,92		6,78		6,59		4,81	

Tratamentos	época de amostragem (semanas após o transplante)				
	0	2	4	6	8
	<u>Cambissolo</u>				
s/cal-0 a 3cm	37,59 b A	31,29 c B	34,42 c AB	19,09 c C	9,83 c D
s/cal-abaixo de 3cm	37,59 b BC	42,32 b AB	43,67 b A	36,11 b C	39,69 a ABC
c/cal-0 a 3cm	43,11 a A	33,42 c B	34,11 c B	22,87 c C	11,25 c D
c/cal-abaixo de 3cm	43,11 a B	48,89 a A	50,47 a A	46,47 a AB	30,24 b C
	<u>Glei Pouco Húmico</u>				
s/cal-0 a 3cm	9,10 b BC	10,16 d AB	12,88 c A	11,67 c AB	6,86 b C
s/cal-abaixo de 3cm	9,10 b C	13,51 c B	18,63 b A	14,51 b B	8,92 b C
c/cal-0 a 3cm	33,68 a A	21,62 b B	20,97 b B	13,55 bc C	7,09 b D
c/cal-abaixo de 3cm	33,68 a B	37,53 a A	34,19 a AB	27,25 a C	22,72 a D
	<u>Glei Húmico</u>				
s/cal-0 a 3cm	19,05 b A	11,68 c BC	13,95 c B	8,51 d C	4,88 c D
s/cal-abaixo de 3cm	19,05 b AB	19,27 b AB	21,56 b A	16,13 b B	6,86 bc C
c/cal-0 a 3cm	39,40 a A	21,92 b B	22,77 b B	12,15 c C	9,13 b C
c/cal-abaixo de 3cm	39,40 a B	43,16 a A	42,15 a AB	29,76 a C	21,93 a D
	<u>Solo Orgânico</u>				
s/cal-0 a 3cm	41,23 b B	31,64 d C	46,40 b A	7,63 d D	5,10 c D
s/cal-abaixo de 3cm	41,23 b C	50,30 b A	46,00 b B	15,74 c D	7,53 c E
c/cal-0 a 3cm	52,15 a A	40,30 c B	42,15 c B	19,86 b C	11,48 b D
c/cal-abaixo de 3cm	52,15 a B	63,48 a A	62,46 a A	55,43 a B	21,64 a C

1/ Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 5%. Letras minúsculas e maiúsculas distinguem, respectivamente, tratamentos e épocas.