

ALTERAÇÕES NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICO-QUÍMICAS DE UM SOLO GLEY POUCO HÚMICO SOB INUNDAÇÃO E APÓS A DRENAGEM¹

JOSÉ FRANCISCO VALENTE MORAES² e JOSÉ FLÁVIO DYNIA³

RESUMO - Foram estudadas algumas alterações químicas e físico-químicas de um solo Gley Pouco Húmico induzidas pela inundação, e sua reversão após a drenagem. O pH da solução do solo aumentou com a inundação (de 6,0 para 7,0) e diminuiu após o início da drenagem, mostrando resultados inconsistentes após a drenagem completa do solo. HCO_3^- na solução aumentou durante a inundação (de 1 ppm para cerca de 8 ppm), e diminuiu até próximo de 0 ppm após a drenagem. A condutividade elétrica da solução mostrou resultados inconsistentes ao longo do experimento. Fe, Mn e Zn tiveram sua solubilidade aumentada com a inundação, e a do Cu diminuiu. Após a drenagem, Fe e Mn "disponíveis" e na solução e Zn "disponível" diminuíram, atingindo valores próximos dos iniciais, e Cu "disponível" aumentou para além dos valores iniciais. P "disponível", Mg do solo, e Ca e Mg na solução aumentaram com a inundação e diminuíram após a drenagem, e Ca e K do solo e K na solução diminuíram com a inundação e aumentaram após a drenagem.

Termos para indexação: solo de várzea, redução de nutrientes, solução do solo, solubilidade de nutrientes.

MODIFICATIONS IN CHEMICAL AND PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF A LOW HUMIC GLEY SOIL UNDER FLOODING AND AFTER DRAINAGE

ABSTRACT - The alterations in the chemical and physico-chemical characteristics of a Low Humic Gley soil induced by flooding and after drainage were studied. The pH of the soil solution increased with flooding from 6.0 to 7.0 but decreased with drainage of the soil and presented inconsistent values when drainage was completed. The concentration of HCO_3^- in the soil solution increased with flooding, from 1 ppm to 8 ppm, but decreased to nearly 0 ppm with drainage. The electrical conductivity of the soil solution showed an inconsistent trend throughout the experiment. The solubility of Fe, Mn and Zn increased with flooding whereas that of the Cu diminished. After drainage the extractable Fe, Mn and Zn as well as the concentration of Fe and Mn in the soil solution decreased nearly to the initial values and the extractable Cu increased beyond the initial levels. The available P, soil Mg and soluble Ca and Mg increased with flooding but decreased with drainage, whereas soil Ca and K, and soluble K decreased with flooding and increased after drainage.

Index terms: lowland soil, nutrient reduction, soil solution, nutrient solubility.

INTRODUÇÃO

Existem, no País, cerca de 30 milhões de hectares de várzeas (solos aluviais e hidromórficos), dos quais cerca de 12 milhões estão localizadas na região dos cerrados. Destes, somente cerca de 54.000 ha são usados com fins

agrícolas (Lamster, 19--), pois a maior parte é ainda mantida sob mata ou pastagem nativa.

O aproveitamento das várzeas tem sido limitado quase exclusivamente ao cultivo do arroz irrigado por inundação contínua. A topografia favorável à irrigação e a disponibilidade de água abrem perspectivas para a produção de duas colheitas por ano. No período chuvoso, o excesso de água e as dificuldades de drenagem apontam o arroz como a principal opção. No período da seca, espécies como feijoeiro, trigo, ervilha e outros poderão ser cultivadas com vantagem.

¹ Aceito para publicação em 4 de julho de 1991

² Eng. - Agr., Ph.D., EMBRAPA/Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (CNPAF), Caixa Postal 179, CEP 74000 Goiânia, GO.

³ Eng. - Agr., M.Sc., EMBRAPA/CNPAF.

O cultivo do arroz irrigado por inundação contínua destrói os agregados do solo e diminui sua porosidade total. A macroporosidade é a mais afetada e, em consequência, o arejamento é diminuído. A desagregação é mais intensa se o preparo do solo é efetuado em condições de inundação ("puddling") (Mikkelsen & Patrick Junior 1968, Prihar et al. 1985, Sharma & De Datta 1985). O arejamento deficiente provoca no solo alterações que afetam o crescimento das plantas. As mais importantes são a redução de substâncias minerais, como o NO_3^- , o Mn^{2+} , o Fe^{3+} , o SO_4^{2-} , e o acúmulo de CO_2 e de ácidos orgânicos (Ponnamperuma 1972, Moraes 1973a, 1973b, Moraes & Freire 1974, Ponnamperuma 1977).

A redução do Mn^{2+} e do Fe^{3+} às formas mais solúveis de Mn^{2+} e Fe^{2+} pode levar a concentrações tóxicas destes elementos na solução do solo. As leguminosas são, em geral, sensíveis a toxidez de manganês, especialmente o feijoeiro, que não tolera mais que 100 ppm de Mn na parte aérea (Malavolta & Kliemann 1985). Por outro lado, sabe-se que o arroz cresce e produz bem, mesmo com teor de Mn nas folhas tão alto como 2.500-3.000 ppm (Tanaka & Navasero 1966), mas é sensível a níveis altos de Fe. A toxidez de Fe em arroz irrigado por inundação contínua tem sido constatada em várias regiões do País, principalmente nas cultivares de tipo moderno (Gomes et al. 1988).

O aumento da concentração de Mn^{2+} e Fe^{2+} solúveis causa o deslocamento dos cátions trocáveis Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ para a solução do solo e aumenta as perdas dos mesmos por lixiviação, principalmente nos solos arenosos (Ponnamperuma 1972, Moraes & Freire 1974).

Com a drenagem, os processos de redução são revertidos, e os compostos reduzidos NH_4^+ , Mn^{2+} , Fe^{2+} , S^{2-} são reoxidados a NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} e SO_4^{2-} , respectivamente (Patrick Junior & Henderson 1981). Os compostos intermediários da decomposição da matéria orgânica, que se acumulam nos solos inundados, são oxidados a CO_2 e H_2O (Ponnamperuma 1972). A intensidade e a velocidade da reoxidação do solo após a drenagem poderão não ser sufi-

cientemente altas para amenizar a toxicidade de alguns elementos. Merece atenção especial o manganês, cujo potencial de oxido-redução é maior do que o do Fe (Ponnamperuma 1972, Sposito 1982) e por isso está sujeito a oscilações, em decorrência de variações periódicas no teor de água no solo e no arejamento.

Para amenizar a toxicidade do Fe no cultivo do arroz em solos inundados, tem sido recomendada a calagem (Barbosa Filho et al. 1983, Freire et al. 1984, Silveira et al. 1987). A calagem tem sido recomendada, também, para diminuir a toxicidade do manganês no cultivo do feijoeiro (Souto & Döbereiner 1969, Franco & Döbereiner 1971).

A calagem, pelo aumento do pH, poderá auxiliar na diminuição da concentração do Fe e de Mn durante o cultivo do arroz, quando o solo permanece inundado (Patrick Junior & Henderson 1981) e após a drenagem, criando, assim, condições adequadas ao crescimento de espécies de sequeiro. A reoxidação dos compostos do solo e o aumento do pH pela calagem poderão, também, alterar a disponibilidade de outros micronutrientes.

Neste trabalho são apresentadas e discutidas as alterações químicas e físico-químicas de um solo Gley Pouco Húmico (GPH) induzidas pela inundação, e a sua reversão após a drenagem, dentro de um ciclo de cultivo com arroz irrigado seguido de feijoeiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados relatados neste trabalho foram coletados em parcelas de um experimento de calagem e adubação com micronutriente em arroz irrigado e feijoeiro, em cultivos sucessivos. O experimento foi conduzido em um solo Gley Pouco Húmico (GPH) da Fazenda Palmital, do Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (CNPAP), em Goianira, GO. Algumas características do solo são mostradas na Tabela 1.

Durante 40 semanas, que abrangeram um cultivo de arroz irrigado por inundação, e um cultivo de feijoeiro, foram feitas análises semanais de solo e de solução do solo, em uma parcela testemunha (sem calagem) e em uma parcela que havia recebido calcá-

TABELA 1. Algumas características físicas e químicas do solo GPH na área do experimento.

Profundidade (cm)	Granulometria ¹ (%)			pH água (1:2,5)	Ca+Mg (me/100 ml) ²	Al	P	K	Cu	Zn	Fe	Mn
	Areia	Silte	Argila									
0 - 20	36,9	34,5	28,6	5,62	11,7	0,1	14,4	44	1,7	1,1	269	32
20 - 40	43,6	22,7	33,7	6,25	9,3	0,1	2,8	14	2,0	0,4	332	9
40 - 60	41,6	17,2	41,2	6,50	9,7	0,1	1,8	20	2,4	0,4	324	12

¹ Método da pipeta² Extrator: solução KCl 1,0N³ Extrator: solução HCl 0,05N + H₂SO₄ 0,025N

rio em dose correspondente a 5,2 t/ha (PRNT = 100%). Ambas as parcelas receberam, antes do primeiro plantio, 60 kg de P₂O₅/ha como superfosfato triplo, e 40 kg de K₂O/ha como cloreto de potássio, aplicados a lanço e incorporados até cerca de 10 cm de profundidade. O arroz (cv. CICA 8), plantado em 16.10.86 e colhido em 23.03.87, foi adubado com 300 kg/ha da fórmula 4-24-12 na linha de plantio, tendo recebido, ainda, duas aplicações de N em cobertura (60 kg/ha, como uréia, 60 dias após o plantio e 30 kg/ha, como sulfato de amônio, 80 dias após o plantio). O feijoeiro (cv. Carioca), plantado a seguir, em 02.06.87, e colhido em 09.09.87, também foi adubado em linha, com 200 kg/ha, da mesma fórmula.

Durante o cultivo do arroz, quando o solo permaneceu inundado, amostras de solo foram coletadas na profundidade de 10-15 cm utilizando-se um cilindro de plástico aberto em uma das extremidades e munido de orifícios na outra, para permitir a drenagem do excesso de água e eliminar bolhas de ar. O amostrador de solo estava unido a uma haste também de plástico, o que lhe dava forma semelhante a um cachimbo. O excesso de solo era eliminado com uma espátula. Duas medidas de solo (20 ml) eram transferidas imediatamente para frascos erlenmeyer contendo 200 ml de solução de KCl 1N para a determinação de Ca e Mg, ou de HCl 0,05N + H₂SO₄ 0,025N para a determinação de P, K, Cu, Zn, Mn e Fe, e agitadas. Para reduzir a atividade biológica, colocavam-se três gotas de tolueno na suspensão solo-solução extratora, e o ar dos frascos era substituído por gás de cozinha.

Após a drenagem, as amostras de solo eram coletadas com trado, na profundidade de 0-20 cm, e colocadas em frascos erlenmeyer contendo as mesmas soluções extratoras usadas para a análise dos solos inundados.

A solução do solo era coletada com cápsulas de porcelana porosa de 62,0 mm de comprimento e 43,5 mm de diâmetro interno, adaptadas a extremi-

dades de tubos de PVC. Dez cápsulas foram instaladas entre as linhas de arroz (primeiro cultivo) e de feijão (segundo cultivo) em cada parcela amostrada, a 15 cm de profundidade.

As amostras de solução do solo de cada parcela eram coletadas em uma cápsula a cada semana, para que, entre duas amostragens em uma mesma cápsula, decorresse tempo suficiente para o restabelecimento do equilíbrio do solo ao redor da mesma.

Um dia antes da coleta das soluções, as cápsulas eram submetidas a vácuo de aproximadamente -400 mbar com o auxílio de uma bomba de vácuo manual. No dia seguinte, as amostras de solução do solo das cápsulas eram transferidas, sob vácuo, para os frascos erlenmeyers, que continham três gotas de tolueno para diminuir a atividade biológica e prevenir a precipitação dos compostos reduzidos. Imediatamente o ar dos frascos que continham as amostras de solução do solo era substituído por gás de cozinha.

Após a colheita do arroz, as cápsulas de porcelana foram retiradas do solo e lavadas para remover a argila depositada na superfície externa, e os óxidos/hidróxidos, depositados na parte interna. Imediatamente as cápsulas foram reinstaladas nas mesmas parcelas, continuando-se as amostragens da solução do solo. As cápsulas foram retiradas novamente para o preparo do solo e plantio do feijão, tendo sido reinstaladas logo após a semeadura.

Após a drenagem do solo, foi necessário aumentar o vácuo nas cápsulas de porcelana para aproximadamente -600 mbar para conseguir quantidade suficiente de solução do solo para análise. O tempo de vácuo foi aumentado para dois dias.

Nas amostras de solo, o P, K, Ca e Mg foram determinados seguindo-se os métodos descritos por EMBRAPA (1979). Os micronutrientes foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Nas amostras de solução do solo foram feitas as mesmas determinações e usados os mesmos métodos referidos acima, exceto para o Ca e Mg, que fo-

ram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Foram determinados também os teores de HCO_3^- (Jackson 1958), o pH e a condutividade elétrica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

pH

O pH da solução do solo aumentou com o tempo de inundação até valores próximos a 7,0 (Fig. 1). Após o início da drenagem na 14^a semana, o pH da solução apresentou tendência de queda, o que está de acordo com a reversibilidade dos processos de redução que ocorrem nos solos inundados (Ponnamperuma 1972, Moraes 1973a). A diminuição do pH da solução do solo entre a 14^a e a 22^a semanas foi lenta, possivelmente porque nesse período o solo permaneceu saturado, retardando sua aeração.

No período compreendido entre a 23^a e a 36^a semanas, durante o qual o solo manteve-se em condições aeróbicas, ocorreu acentuada oscilação do pH da solução (Fig. 1). Segundo Suarez (1987), o pH da solução de um solo extraído sob vácuo é mais elevado que o pH da solução *in situ*, devido à perda de CO_2 que ocorre pelo uso do vácuo na extração. Ainda segundo o mesmo autor, o aumento de pH que se verifica pela extração sob vácuo mantém re-

lação inversa com o volume de solução coletado. Significa dizer que quanto menor o volume extraído sob o mesmo vácuo e no mesmo intervalo de tempo, maior a perda de CO_2 e maior o pH da solução. No presente caso, em decorrência de variações da umidade do solo no período referido acima, observou-se considerável variação nos volumes de solução coletados, o que poderia explicar o comportamento do pH da solução do solo no período, à luz das constatações do citado autor.

A distribuição dos pontos referentes ao tratamento sem calcário e a do tratamento com calcário foram semelhantes (Fig. 1), indicando, à primeira vista, ausência de efeito da calagem sobre o pH da solução do solo. No entanto, a possível variação do pH das amostras em virtude da perda de CO_2 durante a coleta, e a falta de repetições nas amostragens, não permitiram uma avaliação segura do efeito da calagem.

Condutividade elétrica

A condutividade elétrica (CE) da solução do solo nos dois tratamentos mostrou resultados inconsistentes. Até a 8^a semana após a inundação do solo a condutividade elétrica diminuiu (Fig. 2), possivelmente devido à diluição da solução pelo excesso de água e à percolação, pois nesse período o lençol freático estava muito baixo e foi difícil manter o so-

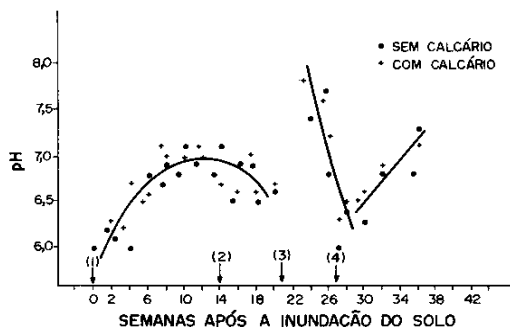


FIG. 1. Variação do pH da solução do solo. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

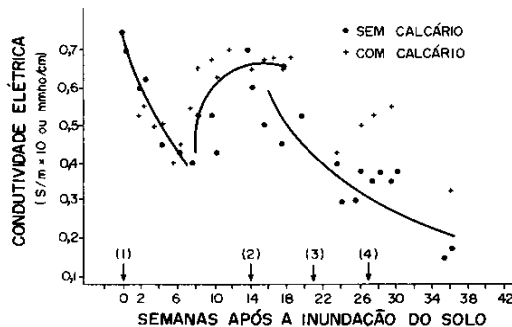


FIG. 2. Variação da condutividade elétrica da solução do solo. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

lo inundado. Entre a 8ª e a 18ª semanas a condutividade elétrica aumentou, devido ao aumento da concentração dos compostos reduzidos como o Fe (II) e o Mn (II), e, possivelmente, ao deslocamento dos cátions trocáveis para a solução do solo, como será discutido a seguir. Depois da 18ª semana a condutividade elétrica voltou a diminuir, como consequência da reoxidação dos compostos reduzidos, e da volta dos cátions trocáveis ao complexo sorvivo. A estes processos devem ser somadas as prováveis perdas por lixiviação, devido à intensificação da drenagem e à absorção dos nutrientes pelas plantas.

Depois da 22ª semana, os valores da condutividade elétrica do tratamento com calcário apresentaram-se variáveis, sem que se pudesse determinar as causas da variação.

Ferro

A concentração de Fe no solo aumentou até cerca de 3.200 ppm na parcela sem calcário, e 2.800 ppm na parcela com calcário (Fig. 3). Os teores máximos foram determinados a partir da 6ª semana após a inundação, e mantiveram-se aproximadamente estáveis até a 16ª semana. A persistência de teores altos de Fe no solo por cerca de quatro semanas depois de iniciada a drenagem (14ª semana) deve ser atribuída ao encharcamento do solo pela

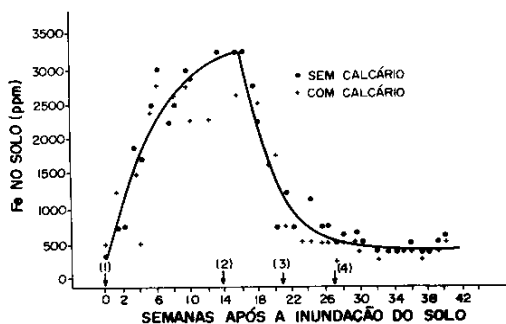


FIG. 3. Concentração de ferro extraído com solução de HCl 0,050N + H₂SO₄ 0,025N. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

ocorrência de chuvas e às dificuldades de drenagem.

O teor de Fe extraído diminuiu rapidamente a partir da 18ª semana, quando a drenagem foi completada e o solo se tornou mais arejado. Após três a quatro semanas a sua concentração era semelhante à determinada antes da inundação do solo.

A concentração de Fe na solução do solo aumentou rapidamente, alcançou um máximo e voltou a diminuir até próximo a zero (Fig. 4), seguindo a mesma tendência do Fe extraído com a solução ácida. Observa-se, contudo, que o aumento da concentração do Fe na solução aconteceu seis a sete semanas depois, e a sua diminuição duas a três semanas antes da do Fe extraído com a solução ácida (Fig. 3). Além disso, a diminuição da concentração de Fe na solução foi mais rápida. Isto decorreu possivelmente da drenagem elevada e da dificuldade em manter o solo inundado no início da irrigação.

O aumento da concentração do Fe na solução e do Fe extraído é causado pela redução do Fe (III), pela forma solúvel de Fe (II) na ausência do oxigênio, e por bactérias anaeróbicas que usam componentes oxidados do solo como receptores de elétrons na sua respiração (Kamura et al. 1963). De acordo com Ponnampuruma (1972) e Kamura et al. (1963),

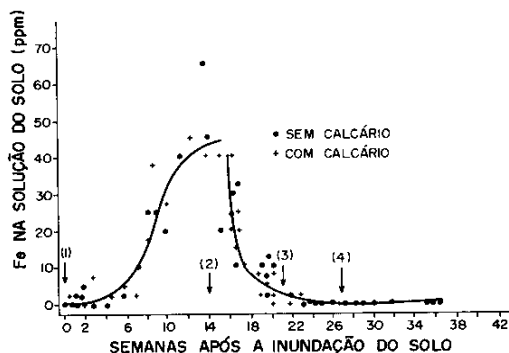


FIG. 4. Concentração de ferro na solução do solo. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da inundação, (4) plantio do feijão.

a cinética do Fe (II) solúvel segue uma curva assintótica que, depois de alcançar um máximo uma a três semanas após a submergência, decresce exponencialmente, até valores que se mantêm constantes por várias semanas. A diminuição da concentração do Fe (II) solúvel ainda durante a inundação pode ser devida, em parte, à precipitação na forma de óxidos e hidróxidos de Fe, induzida pelo aumento do pH. Neste trabalho, as concentrações de Fe extraído com solução ácida permaneceram elevadas até a 18ª semana após a inundação, quando o solo começou a ser efetivamente drenado. O teor de Fe em solução também manteve-se elevado, mas por menos tempo, pois diminuiu rapidamente entre a 16ª e 17ª semanas, e mostrou sensibilidade à presença de O_2 , mesmo quando o arejamento é deficiente, pois o solo manteve-se saturado até a 20ª semana.

Manganês

O teor de Mn extraído com a solução ácida também aumentou com a inundação do solo (Fig. 5). O aumento do Mn extraído, entretanto, foi mais lento, e as quantidades determinadas foram menores e variaram mais do que as do Fe extraído com a mesma solução (Fig. 3).

A diminuição da concentração de Mn somente iniciou depois da 24ª semana, quando a drenagem do solo era mais completa, e continuou até a 34ª semana.

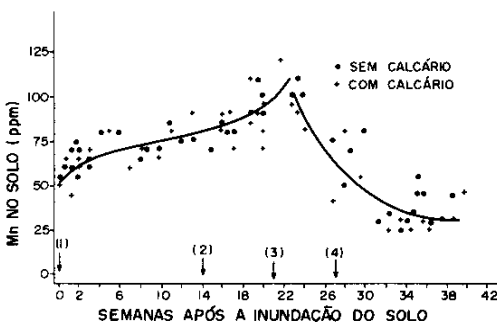


FIG. 5. Concentração de manganês extraído com solução de HCl 0,050N + H_2SO_4 0,025N. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

A maior oscilação no teor de Mn do solo e a diminuição mais lenta durante o período de drenagem está de acordo com o seu potencial de óxido-redução mais elevado do que o do Fe. Pela mesma razão, o Mn na solução do solo (Fig. 6) aumentou mais rapidamente do que o Fe em solução (Fig. 4), tendo alcançado valores máximos entre a 14ª e 16ª semanas. A partir daí, a concentração do Mn na solução diminuiu (mais lentamente que a do Fe) até valores próximos a zero, na 30ª semana.

A reoxidação e precipitação do Mn na solução foi, portanto, mais lenta do que a do Fe, o que está de acordo com as observações de Patrick Junior & Henderson (1981). Isto poderá trazer problemas de toxidez para espécies que não toleram concentrações altas de Mn, quando cultivadas em solos de várzea, logo após o cultivo de arroz.

Bicarbonatos

A concentração de HCO_3^- na solução do solo durante a submergência (Fig. 7) aumentou desde valores próximos a 1,0 ppm até cerca de 8,0 ppm. Com a drenagem, a concentração de HCO_3^- diminuiu rapidamente até próximo a zero ppm.

O acúmulo de CO_2 e a formação de HCO_3^- influencia o pH dos solos inundados. O período de maior concentração de HCO_3^- coincide com a diminuição dos valores de pH da so-

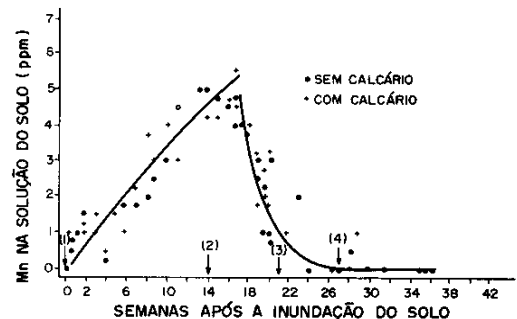


FIG. 6. Concentração de manganês na solução do solo. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

lução apresentados na Fig. 1. Além da influência sobre o pH dos solos, o acúmulo de CO_2 afeta a concentração de vários elementos,

como Fe, Mn e Zn, por favorecer sua precipitação como carbonatos.

Cálcio

A comparação das Fig. 8 e 9, que contém a variação da concentração do Ca extraído com solução de KCl 1N e do Ca em solução, com as Fig. 4 e 5, que mostram os dados correspondentes de Fe, permite observar a dependência da dinâmica do Ca com a cinética da redução do Fe. Durante a inundação do solo, enquanto a concentração de Fe extraível e em solução aumentava (Fig. 4 e 5), o Ca do solo (Fig. 8) diminuía drasticamente ao mesmo tempo que aumentava a sua concentração na solução (Fig. 9).

Após a drenagem, a concentração do Ca do solo aumentou até valores próximos aos originais, enquanto diminuía o Ca na solução.

O Fe e o Mn reduzidos durante a inundação deslocam o Ca do solo (principalmente o Ca^{2+}

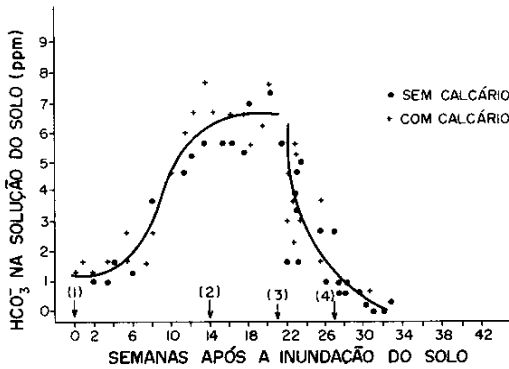


FIG. 7. Concentração de HCO_3^- na solução do solo. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

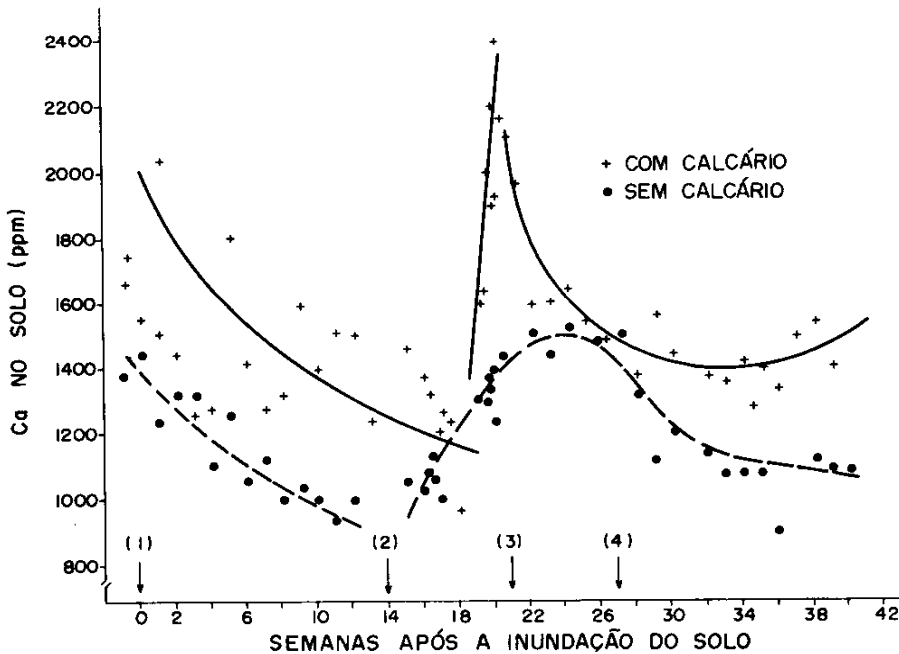


FIG. 8. Concentração de cálcio extraído com solução de KCl 1.0N. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

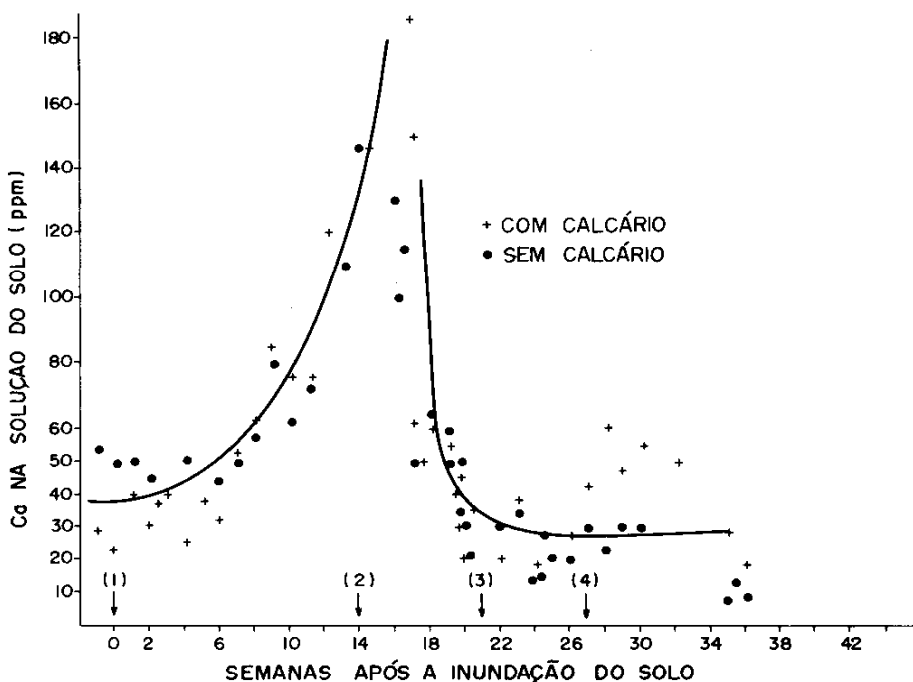


FIG. 9. Concentração de cálcio na solução do solo. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

intercambiável) para a solução, aumentando a sua concentração (Fig. 9), ao mesmo tempo que diminui a quantidade de Ca extraído com a solução de KCl 1N (Fig. 8). Com a reoxidação do solo após a drenagem, o processo reverte, ou seja, diminui a quantidade de Ca solúvel e aumenta a do Ca do solo. Este mesmo processo explica a variação do Mg e do K extraídos do solo e em solução.

Magnésio

No tratamento sem calcário, o teor de Mg do solo permaneceu relativamente constante no período em que o solo estava inundado, ao passo que no tratamento com calcário observou-se tendência de aumentar a concentração de Mg extraído com solução de KCl 1N (Fig. 10). Com a drenagem, o Mg do solo diminuiu continuamente até o fim da amostragem. O teor de Mg do solo no tratamento com calcário foi maior do que no sem calcário.

A concentração de Mg solúvel (Fig. 11) aumentou com a inundação, indicando que, à semelhança do Ca, houve deslocamento do Mg do solo para a solução pelo Fe, o que era esperado.

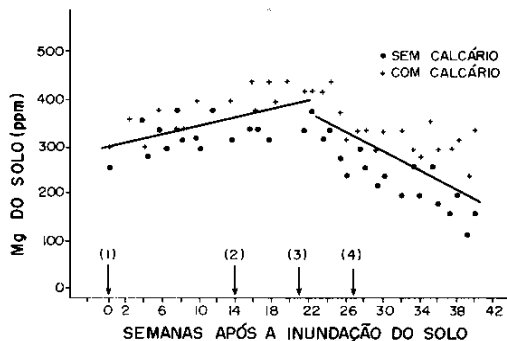


FIG. 10. Concentração de magnésio extraído com solução de KCl 1.0N. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

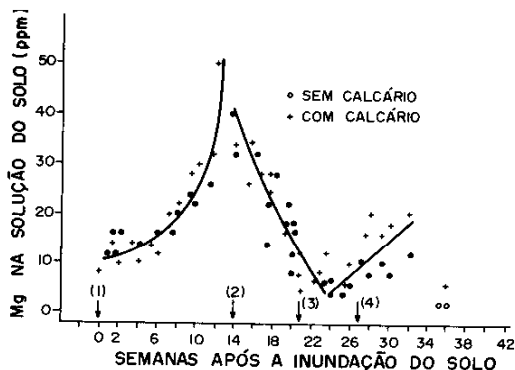


FIG. 11. Concentração de magnésio na solução do solo. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

A Fig. 10 poderia sugerir que a relativa estabilidade da concentração de Mg do solo foi devida à solubilização do calcário. Na parcela sem calcário, entretanto, o Mg em solução também aumentou com a inundação, e não havia outra fonte de Mg que não a do solo. Portanto, o aumento do Mg na solução do solo só poderia ter ocorrido pelo seu deslocamento pelo Fe e Mn.

Potássio

O comportamento do K extraído do solo com a solução HCl 0.05N + H₂SO₄ 0.025N (Fig. 12) foi semelhante ao do Ca, e indica que durante a inundação do solo este cátion foi substituído pelo Fe e deslocado para a solução. Em dez semanas de inundação, o K do solo diminuiu até valores correspondentes a 10-15% dos níveis iniciais, mantendo-se mais ou menos estável durante a drenagem, no período em que o solo permaneceu saturado. Com a drenagem completada, o K extraído do solo aumentou, como aconteceu com o Ca (Fig. 8), acompanhando a diminuição do Fe extraível (Fig. 3) e do solúvel (Fig. 4). Após a drenagem, quando o solo estava sendo cultivado com feijão, a concentração do K extraído voltou a diminuir acentuadamente e no final da amostragem não era maior do que 40% da concentração inicial.

O deslocamento do K do solo pelo Fe não foi acompanhado de aumento da concentração do K em solução (Fig. 13), a qual manteve-se praticamente constante durante todo o período em que o solo permaneceu alagado.

A partir da 26ª semana, houve um pequeno aumento do K na solução, cuja origem pode ter sido a adubação do feijoeiro. Nas últimas três semanas, o K na solução voltou a diminuir.

A diminuição da concentração do Ca, Mg e K no final do experimento deve ser creditada à absorção dos nutrientes pelo feijoeiro e à per-

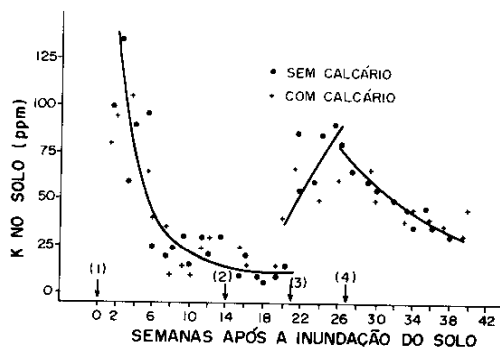


FIG. 12. Concentração de potássio extraído com solução de HCl 0.050N + H₂SO₄ 0.025N. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

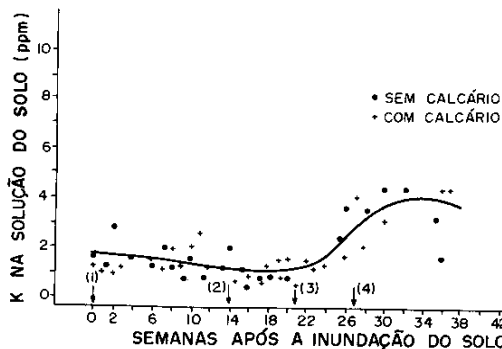


FIG. 13. Concentração de potássio na solução do solo. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

colação, pois durante o período seco o solo foi irrigado por aspersão.

A diminuição do Ca, Mg e K na solução do solo durante a drenagem, e o aumento das formas extraídas, caracterizam a reversibilidade dos processos de oxidação-redução. Com a precipitação do Fe e do Mn, os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ voltaram às posições de troca.

Cobre e Zinco

As concentrações do Cu e do Zn na solução do solo ficaram sempre abaixo dos limites de detecção do laboratório. O Cu e o Zn extraídos do solo com a solução de HCl 0,050N + H_2SO_4 0,025N durante e após o período de inundação mostraram comportamentos diferentes. Durante o período de inundação do solo, a concentração de Cu diminuiu desde cerca de 1,0 ppm até valores não detectáveis a partir da 14ª semana (Fig. 14). Com a drenagem, o Cu aumentou, tendo alcançado 2,5 a 3,0 ppm entre a 20ª e a 30ª semanas, quando diminuiu novamente até níveis próximos a 1,5 ppm. Nas últimas oito semanas de amostragem o Cu voltou a aumentar.

O Zn extraído aumentou com a inundação, tendo alcançado níveis de até 15 ppm, entre a 10ª e a 12ª semanas (Fig. 15). Após a drenagem a concentração de Zn diminuiu rapidamente até valores próximos a 1,0 ppm, man-

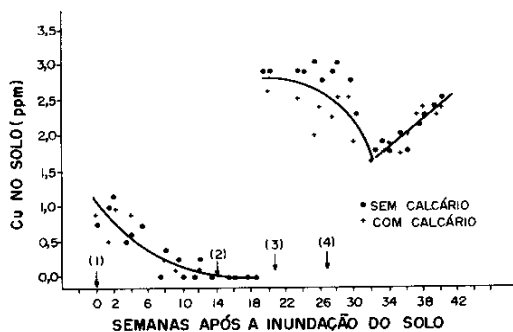


FIG. 14. Concentração de cobre extraído com solução de HCl 0,050N + H_2SO_4 0,025N. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

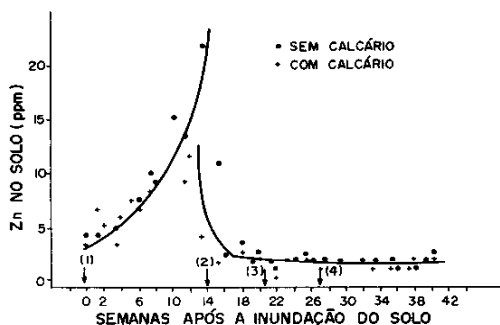


FIG. 15. Zinco extraído com solução de HCl 0,050N + H_2SO_4 0,025N. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

tendo-se nesse nível até o final do experimento.

A diminuição da disponibilidade do Cu após a inundação do solo parece ser causada pela sua complexação por compostos orgânicos oriundos da decomposição anaeróbica da matéria orgânica. É reconhecido que o cobre liga-se preferentemente a complexos orgânicos (Lindsay 1981). Com a aeração do solo, após a drenagem, a decomposição da matéria orgânica é acelerada e procede até a formação de compostos de menor peso molecular, aumentando a disponibilidade do Cu.

O aumento da disponibilidade do zinco com a inundação está associado à redução do Fe. Mesmo o Zn ocluído nos sesquióxidos cristalinos e amorfos é liberado quando ocorre a redução do Fe.

Com a aeração do solo, o Fe (II) é reoxidado e precipita. Na primeira fase, formam-se óxidos e hidróxidos de Fe amorfos (Moraes 1982), com alta reatividade, que retém grande quantidade de Zn, diminuindo, assim, a sua disponibilidade. Parte do Zn é co-precipitado com o Fe e permanece ocluído. Os ciclos de redução e oxidação do solo podem, assim, causar deficiência de Zn.

Fósforo

Com a redução do Fe, aumenta a disponibilidade do P (Moraes 1971). Os dados da

Fig. 16 mostram que o P extraído aumentou até concentrações de 60 ppm nas 12 semanas que se seguiram à inundação do solo. Após a drenagem, os teores de P diminuíram rapidamente, estabilizando-se a partir da 20ª semana após a inundação (8ª semana após o início da drenagem). Como pode ser observado na Fig. 16, não ocorreu uma distinção clara entre os teores de P disponível na presença e na ausência de calagem.

Na solução do solo, a concentração de P variou entre 0,01 e 0,05 ppm durante todo o período de amostragem. Os dados se mostraram erráticos não permitindo uma análise gráfica de sua tendência.

Produção de arroz e feijão

As mudanças verificadas com a inundação do solo não influenciaram a produtividade do arroz, que se manteve elevada e não foi afetada significativamente pela calagem ou pela adubação com micronutrientes (Tabela 2). No caso do feijoeiro, notou-se uma clara tendência de resposta aos micronutrientes. Pode-se admitir, entre outras hipóteses, a de que a inundação do solo anteriormente ao cultivo do feijoeiro tenha afetado a disponibilidade de um ou mais micronutrientes.

As alterações químicas e físico-químicas aqui discutidas, cujos princípios são aplicáveis a qualquer solo, podem ter implicações impor-

TABELA 2. Produção (kg/ha) de arroz irrigado e feijão no solo GPH, no período de amostragens (tratamentos 1 e 6) de solo e solução do solo (médias de quatro repetições).

Nr	Tratamentos ¹	Arroz	Feijão
1	Testemunha	9400 a ²	925 b
2	1/4 Ca + micronutrientes	9240 a	1215 ab
3	1/2 Ca + micronutrientes	9800 a	1230 ab
4	3/4 Ca + micronutrientes	9550 a	1195 ab
5	1 Ca + micronutrientes	9680 a	1345 a
6	3/4 Ca	10060 a	975 b

¹ Ca = 6,9 t/ha de calcário (PRNT 100%).

² Médias seguidas da mesma letra são iguais pelo teste de Tukey (P < 0,05).

tantes na utilização intensiva de solos de várzea, dentro do sistema arroz irrigado - culturas de sequeiro. Assim: 1) após a drenagem, o Mn poderia permanecer disponível em níveis tóxicos à cultura subsequente ao arroz, em solos com altos teores desse elemento; 2) a reoxidação do Fe e do Mn a óxidos-hidróxidos de alta reatividade poderia aumentar a fixação de alguns nutrientes, como P e Zn, diminuindo sua disponibilidade; 3) nos solos com boa drenagem, poderiam ocorrer perdas consideráveis de nutrientes, devido ao seu deslocamento para a solução do solo e à percolação (o K seria o cátion mais facilmente perdido).

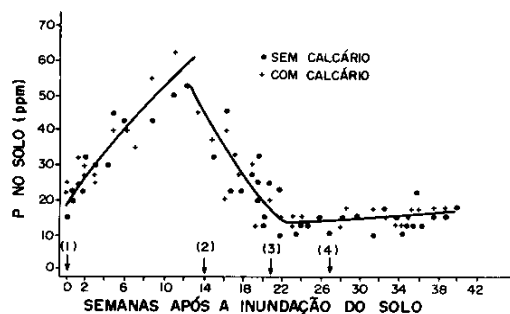


FIG. 16. Concentração de fósforo no solo extraído com solução de HCl 0,050N + H₂SO₄ 0,025N. (1) Início da inundação, (2) início da drenagem, (3) fim da drenagem, (4) plantio do feijão.

CONCLUSÕES

1. A inundação provocou aumentos na concentração de HCO₃⁻ e no pH da solução do solo, e ambos voltaram a diminuir após a drenagem.

2. A quantidade de Fe, Mn e Zn extraída do solo aumentou com a inundação do solo, enquanto que a de Cu diminuiu. Também aumentou a concentração de Fe e Mn na solução do solo. Entre os macronutrientes, o P e o Mg do solo aumentaram, mas diminuiu a quantidade de Ca e K extraídos. Foi expressivo, entretanto, o aumento da concentração de Ca, Mg e K na solução do solo após a inundação.

3. Após a drenagem e completa reoxidação do solo (final do período de amostragens), os teores de Ca, Mg, K, P, Mn e Zn extrafrais ficaram em níveis ligeiramente inferiores aos níveis iniciais. Os teores de Fe extrafrais praticamente não se modificaram, e os teores de Cu extrafrais foram superiores aos registrados no início do experimento.

4. Tanto no período de inundação quanto após a drenagem, os teores de Ca e Mg do solo foram maiores na parcela com calagem.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA FILHO, M.P.; FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. Manejo d'água e calagem em relação à produtividade e toxicidade de Fe em arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.18, n.8, p.903-910, 1983.
- EMBRAPA. SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979. 1v.
- FRANCO, A.A.; DÖBEREINER, J. Toxicidade de manganês de um solo ácido na simbiose soja-Rhizobium. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Série Agronomia**, Rio de Janeiro, v.6, p.57-66, 1971.
- FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; SOARES, P.C.; DA COSTA, L.M. Toxicidade do ferro e seu controle em arroz irrigado. **Informe Agropecuário**, v.10, n.114, p.45-51, 1984.
- GOMES, A. da S.; SOUZA, R.O. de; ALQUATI, P.H.; MACHADO, M.O.; PAULETTO, E.A. Resultados obtidos em estudos com Fe no CPATB. Estudos preliminares sobre a dinâmica do Fe (II) em três solos utilizados com arroz irrigado no RS. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1., 1987. Goiânia, GO. **Anais**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF, 1988, p.180-188. (EMBRAPA-CNPAF. Documentos, 22).
- JACKSON, M.J. **Soil chemical analysis**. New York: Prentice-Hall, 1958. 498p.
- KAMURA, T.; TAKAI, Y.; ISHIKAWA, K. Microbial reduction mechanism of ferric iron in paddy soils. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.2, p.171-175, 1963.
- LAMSTER, E.C. Programa Nacional de Aproveitamento Racional de Várzeas - PROVÁRZEAS NACIONAL. In: Brasil. Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Produção Agropecuária. **Provárzeas Nacional**: 1 hectare vale por 10. [S.l., 19..]. p.7-11. (Informação Técnica, 1).
- LINDSAY, W.L. Solid phase-solution equilibria in soils. In: BAKER, D.E. **Chemistry in the soil environment**. Madison: American Society of Agronomy, 1981. p.183-202. (ASA Special Publication, 40).
- MALAVOLTA, E.; KLIEMANN, H.J. **Desordens nutricionais no cerrado**. Piracicaba: POTAFOS, 1985. 136p.
- MIKKELSEN, D.S.; PATRICK JUNIOR, W.H. Fertilizer use on rice. In: CHANGIG Patterns in Fertilizer Use. Madison: Soil science Society of América, 1968. p.403-432.
- 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, Série Agronomia**, Rio de Janeiro, v.8, p.93-101, 1973a.
- MORAES, J.F.V. Efeitos da inundação do solo. II. Influência sobre a absorção de nutrientes e o crescimento do arroz (*Oryza sativa* L.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Série Agronomia**, Rio de Janeiro, v.8, p.103-108, 1973b.
- MORAES, J.F.V. **Effect of phosphate on zinc adsorption on aluminum and iron hydrous oxides and in soils**. Riverside: University of California, 1982. 168p. Tese de Doutorado.
- MORAES, J.F.V. **El uso de la resina de intercambio aniónico (Amberlita IRA-400) para evaluar el fósforo en suelos inundados**. Chapingo: Escuela Nacional de Agricultura, 1971. 78p. Tese de Mestrado.
- MORAES, J.F.V.; FREIRE, C.J.S. Variação do pH, da condutividade elétrica e da disponibilidade dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio em quatro solos submetidos a inundação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Série Agronomia**, Rio de Janeiro, v.9, p.35-43, 1974.
- PATRICK JUNIOR, W.H.; HENDERSON, R.E. Reduction and reoxidation cycles of manganese

- and iron in flooded soil and in water solution. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, n.5, p.855-859, 1981.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, v.24, p.29-96, 1972.
- PONNAMPERUMA, F.N. **Physicochemical properties of submerged soils in relation to fertility**. Los Baños: IRRI, 1977. 32p. (IRRI Research Paper Series, 5).
- PRIHAR, S.S.; GHILDYAL, B.P.; PAINULI, D.K.; SUR, H.S. Physical properties of mineral soils affecting rice-based cropping systems. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Soil physics and rice**. Los Baños, 1985. p.57-70.
- SHARMA, P.K.; DE DATTA, S.K. Effects of puddling on soil physical properties and processes. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Soil physics and rice**. Los Baños, 1985. p.217-234.
- SILVEIRA, P.M. da; RIBEIRO, A.C.; DA COSTA, L.M. da. Disponibilidade de ferro em solo submerso em relação à calagem e ao manejo da água. **Revista Ceres**, v.34, n.194, p.400-406, 1987.
- SOUTO, S.M.; DÖBEREINER, J. Toxidez de manganês em leguminosas forrageiras tropicais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v.4, p.129-138, 1969.
- SPOSITO, G. The chemical forms of trace elements in soils. In: THORNTON, I. **Applied environmental geochemistry**. London: Academic Press, 1982. p.123-167.
- SUAREZ, D.L. Prediction of pH errors in soil: water extractors due to degassing. **Soil Science Society America Journal**, v.51, p.64-67, 1987.
- TANAKA, A.; NAVASERO, S.A. Manganese content of the rice plant under water culture conditions. **Soil Science Plant Nutrition**, v.12, p.67-72, 1966.