

Comissão 2.4 - Química do solo

IMPACTO DO MANEJO DA ÁGUA NA TOXIDEZ POR FERRO NO ARROZ IRRIGADO POR ALAGAMENTO⁽¹⁾

Fabiana Schmidt⁽²⁾, Magali de Ávila Fortes⁽³⁾, Jonas Wesz⁽⁴⁾, Gerson Lubke Buss⁽⁴⁾ & Rogério Oliveira de Sousa⁽⁵⁾

RESUMO

A toxidez por ferro é o distúrbio nutricional de maior ocorrência em arroz (*Oryza sativa* L.) cultivado em sistemas alagados, derivada da quantidade excessiva de íons ferrosos (Fe^{2+}) gerados pela redução de óxidos de ferro em solos alagados. Em experimento conduzido em casa de vegetação, foram avaliados os efeitos de manejos da água de irrigação na dinâmica de redução de um Planossolo e na manifestação da toxidez por ferro em arroz. Os tratamentos dispostos em blocos completos ao acaso com quatro repetições constaram de cinco manejos da água: T1- início do alagamento no estádio V2-V3 do arroz; T2- início do alagamento no estádio V6-V7; T3- T1 e drenagem no estádio V10-V11; T4- T2 e drenagem no estádio V10-V11; e T5- T1 e drenagens nos estádios V7-V8 e V10-V11. O atraso do início do alagamento para o estádio V6-V7 do arroz manteve os valores do Eh da solução do solo mais elevados, promovendo menor disponibilidade de Fe^{2+} na solução do solo e deslocando a máxima liberação de Fe^{2+} na solução do solo para estádios fenológicos mais avançados do arroz. A realização de drenagens ao longo do ciclo vegetativo do arroz promoveu a reoxidação do solo, que ocasionou o aumento dos valores de Eh e redução da concentração de Fe^{2+} na solução do solo. O uso de drenagens durante o período vegetativo do arroz foi eficiente no controle da toxidez por excesso de ferro, em arroz cultivado em solo alagado.

Termos de indexação: solos submersos, mudanças de pH, mudanças de Eh, redução do ferro, ferro no arroz irrigado.

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de Mestrado da primeira autora apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas - UFPEL. Recebido para publicação em 28 de março de 2012 e aprovado em 5 de junho de 2013.

⁽²⁾ Professora do Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Sertão. Rodovia RS 135, km 25, distrito Engenheiro Luiz Englert. CEP 99170-000 Sertão (RS). E-mail: fabianaschmidt@yahoo.com.br

⁽³⁾ Doutora em Agronomia, UFPEL. E-mail: magalifortes7@yahoo.com.br

⁽⁴⁾ Mestrandos em Agronomia, UFPEL. E-mail: jonaswesz@yahoo.com.br; gersonlubke@yahoo.com.br

⁽⁵⁾ Professor Associado da Universidade Federal de Pelotas- UFPEL. Bolsista CNPq. Campus Universitário, s/n. CEP 96010-900 Capão do Leão (RS). E-mail: rosousa@ufpel.tche.br

SUMMARY: THE IMPACT OF WATER MANAGEMENT ON IRON TOXICITY IN FLOODED RICE

*Iron toxicity is recognized as the most widely distributed nutritional disorder in flooded and irrigated rice (*Oryza sativa* L.), derived from the excessive amounts of ferrous ions (Fe^{2+}) generated by the reduction of iron oxides. The effects of water management on the redox potential of a flooded Albaqualf soil and on iron toxicity symptoms in rice were evaluated in a greenhouse experiment. Treatments were arranged in a randomized complete block design with four replications, and consisted of five water management: T1 - Beginning of flooding in the stage V2-V3; T2 - Beginning of flooding in the stage V6-V7; T3 - as T1 and drainage in the stage V10-V11; T4 - T2 and drainage in the stage V10-V11; and T5 - T1 and drainages in the stage V7-V8 and V10-V11. The delay of flooding until V6-V7 maintained a higher potential of the soil resulting in less available Fe and shifting the maximum Fe release in soil solution to later stages of rice growth. Draining throughout the rice vegetative growth promoted soil re-oxidation, which increase the redox potential and decrease Fe concentration in the soil solution. The use of repeated drainages during the vegetative growth was efficient to control Fe toxicity in rice grown in flooded soil.*

Index terms: submerged soils, pH changes, Eh changes, iron reduction, iron in flooded rice.

INTRODUÇÃO

As alterações biogeoquímicas que acompanham o alagamento do solo podem influenciar a produtividade da cultura do arroz (*Oryza sativa* L.). Mudanças eletroquímicas servem de partida para o desencadeamento do processo de redução resultante da diminuição do oxigênio, levando a alterações significativas no potencial de oxirredução (Eh) e no pH (Kögel-Knabner et al., 2010). Essas mudanças são muito importantes para a cultura do arroz, pois interferem na fertilidade do solo, determinando as formas estáveis dos elementos e sua disponibilidade para a planta. As reações de oxirredução nos solos são controladas principalmente pela atividade microbiana, que utiliza substâncias orgânicas como fontes de carbono para a doação de elétrons durante a respiração. Na ausência do oxigênio, as atividades microbianas passam de aeróbias (ou seja, condição óxica) para facultativas (ex., condição hipóxica) e anaeróbias (ex., condições anóxicas); os microrganismos anaeróbios facultativos e obrigatórios usam NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} , SO_4^{2-} etc, produtos da dissimilação da matéria orgânica (CO_2 , N_2) e até íons H^+ como eletroceptores em sua respiração e esses vão sendo transformados para formas reduzidas, conferindo ao solo características de redução (Bartlett & James, 1993). Em termos de quantidade, o Fe^{3+} é o mais importante oxidante nos solos com cultivo de arroz (Yao et al., 1999). Em condições anaeróbias, elevadas quantidades de Fe na forma reduzida (Fe^{2+}) são liberadas para a solução do solo e, conseqüentemente, aumentam a sua possibilidade de absorção pelas plantas, podendo, em casos de excesso, atingir níveis de toxidez prejudiciais à cultura do arroz irrigado.

A toxidez por Fe é a desordem nutricional de maior ocorrência nas áreas de cultivo do arroz irrigado em sistemas alagados (Becker & Asch, 2005). O principal sintoma da toxidez por excesso de Fe no arroz é o

bronzamento das folhas, que é caracterizado por pigmentos marrons que iniciam nas folhas mais velhas, podendo levar a retardo no crescimento, baixa produtividade, esterilidade das espiguetas e, em casos mais severos, morte da planta (Sahrawat, 2004). Perdas na produção de arroz decorrentes da toxidez por excesso de Fe podem levar a prejuízos de 15 a 20 %; perdas totais da produção já foram descritas na literatura (Winslow et al., 1989; Audebert & Sahrawat, 2000).

O maior ou menor estado de oxirredução do solo, que interfere na redução do Fe, é condicionado pela atividade de microrganismos anaeróbios, que, por sua vez, é influenciada pelo manejo da água (Kirk, 2004; Cheng et al., 2009). O alagamento contínuo aumenta as condições de anaerobiose, o que favorece a liberação de maior concentração de Fe para a solução do solo. A anoxia e redução do pH decorrentes do alagamento reduzem os óxidos férricos (Fe^{3+}) a óxidos ferrosos (Fe^{2+}), com conseqüente elevação da solubilidade e disponibilidade desse íon. A entrada da água muito precoce na lavoura antecipa os picos de liberação do Fe, fazendo com que, em muitos casos, esses coincidam com o final do perfilhamento, que é a fase de desenvolvimento da cultura do arroz mais sensível à toxidez por Fe (Sousa et al., 2004a). O manejo adequado da água pode diminuir a solubilidade do Fe e impedir que altas concentrações do elemento coincidam com as fases em que o arroz é mais sensível. Retardar o início do período de alagamento, drenar a lavoura antes dos estádios de desenvolvimento em que o arroz é mais sensível à toxidez e, ou, manejar a lavoura com irrigação intermitente são algumas práticas descritas na literatura como potencial para reduzir a toxidez por Fe às plantas (Ratering & Schnell, 2000; Jackel et al., 2001; Krüger et al., 2001; Sousa et al., 2004a).

O cultivo do arroz irrigado está presente em todas as regiões brasileiras e destaca-se na Região Sul, que

é responsável por 70 % da produção nacional desse cereal. O sistema de cultivo de arroz irrigado, tradicionalmente praticado nessa Região utiliza a irrigação por inundação contínua, com lâmina de água estática (IRGA, 2009). Segundo Sousa et al. (2004a), esse sistema pode favorecer o desenvolvimento da toxidez por excesso de Fe na cultura do arroz irrigado em solos sulfatados extremamente ácidos e mal-drenados, de baixa CTC e baixa fertilidade natural e em solos aluviais argilosos, ácidos ou moderadamente ácidos e com baixa CTC.

Desse modo, a condução de experimentos para avaliar os efeitos de manejos da água na dinâmica do Fe em solos alagados e no desenvolvimento da toxidez por Fe no arroz irrigado faz-se necessária, de maneira que se possam estabelecer manejos de água diferenciados para áreas suscetíveis ao aparecimento de toxidez por Fe às plantas de arroz. Neste estudo, o solo utilizado foi o Planossolo Háplico eutrófico solódico, encontrado nas regiões do Litoral Sul e Planície Costeira Externa e Interna do RS. Esse solo é típico de áreas baixas, onde o relevo condiciona o excesso de água permanente ou temporário, ocasionando fenômenos de redução que resultam no desenvolvimento de perfis com coloração acinzentada. As principais limitações à sua utilização são a má drenagem e os valores baixos de soma de bases, o que requer adubações frequentes (Pinto et al., 2004).

Nesse contexto, realizou-se um experimento para avaliar o efeito de manejos diferenciados da água de irrigação no potencial de oxirredução desse solo e na manifestação da toxidez por Fe em plantas de arroz irrigado.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em vasos em casa de vegetação da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Capão do Leão, RS. O solo utilizado para a condução do experimento foi um Planossolo Háplico eutrófico solódico (Embrapa, 2006), coletado na Estação Experimental de Terras Baixas (EETB) da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS, Brasil, sob coordenadas geográficas de 31° 48' S e 52° 24' O. A coleta da camada arável do solo (0-20 cm) foi realizada em área de cultivo de arroz irrigado com histórico de ocorrência de sintomas visuais de toxidez por Fe. Realizou-se a caracterização química da camada arável do solo (0-20 cm). O teor de matéria orgânica (MO) foi determinado pelo método Walkley-Black, conforme Alison (1965). Os cátions trocáveis (Ca, Mg, Na, Al, e Mn), o P e K extraíveis (método Mehlich-1) e o pH em água foram determinados, conforme descrito por Tedesco et al. (1995). Os óxidos de ferro ativo ou livre (Fe_d) foram extraídos pelo método CDB (citrato-ditionito-bicarbonato), desenvolvido por Mehra & Jackson (1960). As formas de ferro mal-cristalizadas (Fe_o) foram retiradas com oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹ a pH 3,0,

segundo Tedesco et al. (1995). As características químicas do solo na profundidade de 0-20 cm, por ocasião da instalação do experimento foram: pH (H_2O) 5,4; 15 g dm⁻³ de MO; 8,4 mg dm⁻³ de P; 65 mg dm⁻³ de K; 0,1 cmol_c dm⁻³ de Al; 2,4 cmol_c dm⁻³ de Ca; 1,8 cmol_c dm⁻³ de Mg; 29 mg dm⁻³ de Mn; saturação por bases de 62 %; argila 17 %; e 3,17 g kg⁻¹ de Fe_d e 1,21 g kg⁻¹ de Fe_o a pH 3,0.

O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso, com quatro repetições, sendo avaliados cinco manejos de água: T1: entrada da água 10 dias após a emergência das plantas - estágio V2-V3 do arroz, de acordo com a escala proposta por Counce et al. (2000), com inundação contínua durante todo o ciclo; T2: entrada da água 20 dias após a emergência do arroz - estágio V6-V7, com inundação contínua durante todo o ciclo; T3: T1 e drenagem aos 42 dias, após a emergência - estágio V10-V11, com retorno da irrigação contínua sete dias após a drenagem; T4: T2 e drenagem aos 42 dias após a emergência - estágio V10-V11, com retorno da irrigação contínua sete dias após a drenagem; T5: T1 e inundação intermitente na fase vegetativa - drenagens aos 32 e 42 dias após a emergência correspondente aos estádios V8-V9 e V10-V11, respectivamente, com retorno da irrigação contínua sete dias após cada drenagem. A condição de solo drenado estabelecida durante o período de sete dias proporcionou umidade gravimétrica próxima a 12 %, na camada de 0-10 cm do solo contido nos vasos.

As amostras de solo coletadas no campo utilizadas na condução do experimento foram secas, destorroadas e peneiradas em malha de 4 mm. Após o preparo, o solo foi colocado em vasos plásticos com capacidade de 10 L, na quantidade de 9 kg de solo seco por vaso. Em cada vaso, foram aplicadas adubações de base nas doses equivalentes a 20 kg ha⁻¹ de N (0,09 g de N ou 0,20 g de $(NH_2)_2CO$), 100 kg ha⁻¹ de P_2O_5 (0,45 g de P_2O_5 ou 1,09 g de SFT) e 120 kg ha⁻¹ de K_2O (0,54 g de K_2O ou 0,93 g de KCl). As aplicações de N, P e K pelas fontes ureia ($(NH_2)_2CO$), superfosfato triplo (SFT) e cloreto de potássio (KCl), respectivamente, seguiram as recomendações definidas com base nos resultados das análises do solo e da interpretação das tabelas de recomendação de adubação da Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFSRS/SC, 2004). Os adubos foram aplicados individualmente nas amostras de solo de cada vaso, sendo misturados uniformemente aos 9 kg de solo, em uma lona plástica. Para facilitar a aplicação dos adubos ao solo sobre a lona, em razão das pequenas quantidades, diluiu-se a ureia, o cloreto de potássio e o superfosfato triplo em água destilada, aplicando a solução com uma seringa calibrada. Aos 25 e 52 dias após a emergência das plântulas, aplicaram-se em cobertura doses equivalentes a 100 kg ha⁻¹ de N (0,45 g de N ou 1,02 g $(NH_2)_2CO$). As doses de N, P e K aplicadas nos vasos corresponderam ao dobro da recomendação de adubação no campo.

À medida que as amostras de solo adubado foram colocadas nos vasos, instalaram-se os dispositivos de

coleta da solução do solo e adicionaram-se 600 mL de água por vaso, de modo que a umidade gravimétrica (U_g) no solo fosse igual a 18 % (U_g próxima à capacidade de campo). Os vasos foram cobertos com um plástico transparente e ficaram incubados por um período de 10 dias. Após o período de incubação, foi realizada a semeadura da variedade de arroz BRS Pelota, sensível à toxidez por Fe. O desbaste das plântulas de arroz foi realizado 10 dias após a emergência (DAE), no estágio V2-V3, deixando-se quatro plantas por vaso. Nessa fase, aplicou-se uma lâmina de água de 5 cm nos tratamentos T1, T3 e T5. A manutenção da lâmina de água constante até o final do experimento foi feita por irrigações diárias com água destilada.

O sistema utilizado para coletar a solução do solo foi semelhante ao desenvolvido por Sousa et al. (2002), instalado na profundidade de 15 cm da superfície do solo. As coletas da solução do solo foram realizadas aos 17, 24, 31, 41, 48, 55, 63 e 70 DAE das plântulas de arroz. As análises do pH e Eh da solução do solo foram efetuadas com eletrodos específicos ligados a um potenciômetro e previamente instalados em uma célula eletrométrica construída em vidro, semelhante à utilizada por Sousa et al. (2002). A célula possui pequeno tubo de entrada na parte inferior, que na amostragem foi conectado diretamente na extremidade do sifão de coleta da solução. Como a célula permaneceu cheia de solução durante as leituras, foi possível minimizar o contato dessa com o oxigênio (O_2), diminuindo os riscos de alteração das suas características eletroquímicas.

Os valores do potencial de oxirredução medidos foram corrigidos para o potencial padrão do eletrodo de referência (AgCl), como recomendam Rowel (1994) e Zausig (1995), segundo a equação: $Eh = E \text{ medido} + 220 \text{ mV}$. Após as determinações do pH e Eh, as amostras foram passadas por uma seringa através de um filtro de membrana de 0,45 mm (Millipore), para a remoção de partículas que pudessem interferir na preparação e análise das amostras. Foram transferidos aproximadamente 30 mL de solução para frascos de vidro, contendo 1 mL de HCl 3,0 mol L⁻¹, para que a concentração final de HCl da amostra ficasse em torno de 0,1 mol L⁻¹, possibilitando a análise da composição química das amostras em laboratório. Na solução do solo, foram avaliadas as concentrações de Fe, conforme descrito em Sousa et al. (2002).

O arroz foi cultivado por 70 dias, após a emergência das plântulas, que coincidiu com o estágio R3 da fase reprodutiva. As coletas da parte aérea das plantas de arroz foram realizadas com o corte rente ao solo em duas épocas de amostragens. A primeira amostragem foi efetuada aos 42 DAE (estádio V10- V11), sendo coletadas duas plantas por vaso. A segunda amostragem ocorreu aos 70 DAE, coletando-se as duas plantas restantes no vaso. O material vegetal colhido foi colocado para secar em estufa de circulação forçada de ar a 65 °C, até atingir massa constante, com

posterior pesagem em balança de precisão para obtenção da produção de massa de matéria seca da parte aérea das plantas. Posteriormente, as amostras vegetais foram fracionadas em moinho do tipo Willey para a determinação dos teores de Fe na matéria seca, segundo Tedesco et al. (1995). Realizaram-se as contagens do número total de folhas e perfilhos aos 70 DAE das plantas. Os sintomas visuais de toxidez por excesso de Fe na parte aérea do arroz caracterizados pelo bronzeamento das folhas, em razão da formação de pigmentos marrons, foram avaliados aos 50, 60 e 70 DAE. A intensidade da presença de sintomas nas plantas foi mensurada pela contagem do número de folhas com sintomas, calculando-se a porcentagem de folhas com sintomas: (n° folhas com sintomas/ n° total de folhas) x 100.

Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando significativa ($p < 0,05$), as médias dos tratamentos foram comparadas pelo Teste de Duncan a 5 %, utilizando-se o programa estatístico *Winstat* (Machado & Conceição, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O alagamento contínuo (T1 e T2) ocasionou decréscimo nos valores do Eh da solução do solo por causa da intensificação das condições de redução do solo (Figura 1a). Quando o início do alagamento ocorreu no estágio V2-V3 do arroz (T1), os valores do Eh decresceram de 270 mV na primeira semana de alagamento para 170 mV na segunda semana, se estabilizando em valores próximos a 150 mV, a partir da terceira semana, que coincidiu ao estágio vegetativo V8-V9 do arroz (31 DAE). Segundo Schulze et al. (2005), valores de Eh próximos a 150 mV são requeridos para que ocorra a redução do Fe³⁺ para Fe²⁺. Portanto, no sistema de alagamento contínuo iniciado no estágio V2-V3 do arroz, as condições de oxirredução propícias à redução do Fe e liberação desse para a solução do solo coincidiram com o estágio de diferenciação do primórdio da panícula do arroz - estágio V9, considerado crítico para toxidez por Fe, conforme escala de desenvolvimento proposta por Counce et al. (2000).

O atraso do início do alagamento para o estágio V6-V7 do arroz (T2) proporcionou valores de Eh mais positivos na solução do solo do que o alagamento no estágio V2-V3 do arroz (T1), até a fase reprodutiva do arroz (63 DAE). Aos 31 DAE, o valor do Eh da solução do solo no tratamento T2 estava em 250 mV e somente aos 55 DAE os valores do Eh se aproximaram de 150 mV. Logo, o atraso de 20 dias no início do alagamento evidenciou-se eficiente para a manutenção de condições menos reduzidas, pelo menos até 48 DAE do arroz.

As drenagens realizadas nos tratamentos T3, T4 e T5 foram eficientes para aumentar os valores do Eh aos 55 e 63 DAE, atingindo valores próximos a 240 e 185 mV, respectivamente (Figura 1a). Aos 70 DAE

não houve diferença do Eh da solução do solo entre os cinco tratamentos de manejo de água, que atingiram valores em torno de 120 mV. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que aos 42 dias foram deixadas no solo as raízes de 50 % da população das plantas, com significativas quantidades de C-decomponível, o que pode ter influenciado a atividade microbiana e uniformizado o potencial redox aos 70 DAE. A oxidação da matéria orgânica do solo fornece energia para os processos vitais dos microrganismos, sendo fonte de elétrons para a redução (Sousa et al., 2004b). No entanto, considerando-se uma situação prática de lavoura, onde não seria feita a retirada da parte aérea das plantas, o aporte adicional de carbono orgânico pelas raízes não ocorreria e os aumentos nos valores

de Eh pelo efeito da drenagem provavelmente seriam mais pronunciados.

A expressividade e o comportamento do pH e Eh dos tratamentos foram dependentes dos dias após a emergência (Figura 1a,b). Com o avançar dos dias de alagamento ocorreu gradativamente o aumento do pH e a diminuição dos valores do Eh. Os valores de Eh mais reduzidos coincidiram com o aumento dos valores do pH (Figura 1a,b), em razão da atividade dos microrganismos anaeróbios, que ao promoverem a redução dos compostos oxidados consomem íons H^+ , o que diminui a acidez do solo (Sahrawat, 2004). Entretanto, as drenagens realizadas nos tratamentos T3, T4 e T5 promoveram a reoxidação do solo, ou seja, a inversão das reações de redução (Figura 1a,b). Os compostos que foram reduzidos passaram a se oxidar, liberando H^+ para a solução do solo, o que ocasionou a diminuição do pH dessa solução. Tal comportamento foi verificado nos tratamentos T3 e T4, em que os valores do pH diminuíram de 6,20 e 5,96 (41 DAE) para 5,55 e 5,36 (55 DAE), respectivamente. No tratamento T5, com a realização antecipada da drenagem (31 DAE), o pH de 6,15 diminuiu para 5,12 (41 DAE).

As alterações no Eh da solução do solo promovidas pelos manejos da água também alteraram a concentração de Fe^{2+} na solução do solo alagado (Figura 1a,c). Em condições de baixo Eh ocorreu a redução dos óxidos de Fe e o consequente aumento da concentração de Fe^{2+} na solução do solo. As taxas de liberação de Fe^{2+} para a solução do solo são controladas pela evolução das condições redox dos solos alagados. Nierop et al. (2002), Kirk (2004) e Thompson et al. (2006) observaram em seus estudos que as transformações que ocorrem no solo alagado são profundamente influenciadas pela química do Fe, em razão da grande quantidade de óxidos e hidróxidos de Fe que podem sofrer redução, e da reatividade do Fe com outros compostos no solo.

Nas semanas iniciais do alagamento, as taxas de liberação do Fe^{2+} não diferiram significativamente entre as épocas da entrada da água, sugerindo que a ação microbiana foi razoavelmente uniforme nesse período. No entanto, os níveis de Fe^{2+} na solução do solo posteriormente aumentaram com o tempo de alagamento (Figura 1c). As concentrações mais altas de Fe^{2+} na solução do solo ocorreram aos 31 DAE e foram observadas nos tratamentos com alagamento inicial no estádio V2-V3 (T1, T3 e T5). Retardando-se o início do alagamento para o estádio V6-V7 do arroz (T2 e T4), houve o deslocamento do período de maior ocorrência de Fe^{2+} na solução do solo para 63 DAE (Figura 1c). Nesse caso, o retardamento do início do período de alagamento foi eficiente em deslocar o pico de liberação do Fe para períodos em que o arroz é menos sensível à toxidez por Fe. A concentração de Fe^{2+} na solução do solo no T1 diminuiu naturalmente logo após atingir o seu pico de liberação na terceira semana de alagamento; aos 48 DAE, as concentrações de Fe^{2+} na solução do solo no T1 e T2 não diferiram estatisticamente.

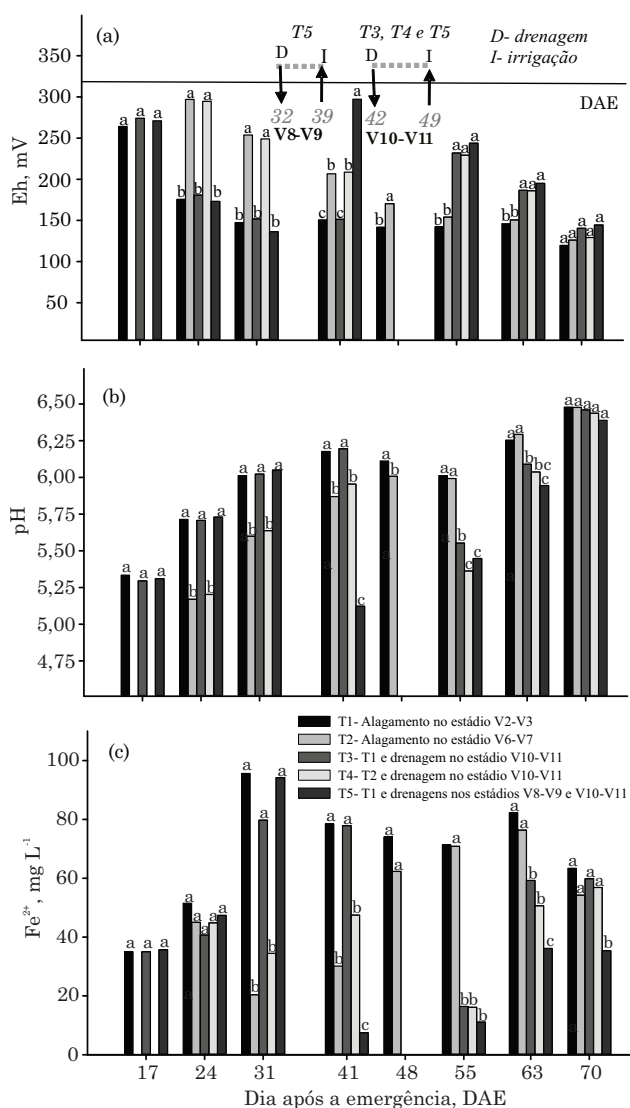


Figura 1. Eh (a), pH (b) e concentração de Fe^{2+} (c) na solução do solo dos 17 até 70 DAE do arroz cultivado com manejos diferenciados da água. Letras minúsculas diferem entre si pelo teste de Duncan a 5 %, dentro de cada época de amostragem (DAE).

Segundo Doran et al. (2006), durante o alagamento, a concentração de Fe^{2+} na solução do solo aumenta até atingir um máximo, diminuindo em seguida. Esse comportamento varia em razão do pH, da temperatura, do teor e da degradabilidade da matéria orgânica, do tamanho e da diversidade da população microbiana e da composição do solo, principalmente da concentração e reatividade dos óxidos de Fe (Kögel-Knabner et al., 2010). Quanto maior for a quantidade de material orgânico facilmente decomponível, maior será a atividade dos microrganismos e mais intensa será a redução do solo. Esse aspecto tem particular importância quando o arroz é utilizado em rotação de culturas, pois a adição de resíduos culturais de mais fácil decomposição e ricos em nitrogênio pode retardar a redução dos óxidos de Fe; entretanto, são capazes de produzir substâncias ou elementos tóxicos, como os ácidos orgânicos e H_2S (Sousa et al., 2004a).

Sousa et al. (2009) relataram que solos ácidos com altos teores de matéria orgânica e óxidos de Fe podem atingir concentrações de 300 mg L^{-1} de Fe na solução do solo em quatro semanas de alagamento, decrescendo até concentrações de 50 a 100 mg L^{-1} . Solos medianamente ácidos apresentam pico de liberação de Fe mais baixo; os levemente ácidos evidenciam concentrações máximas de 50 a 100 mg L^{-1} de Fe na solução do solo; e os alcalinos normalmente não demonstram picos maiores do que 30 mg L^{-1} . Esses resultados estão de acordo com o observado para o Planossolo Háplico eutrófico solódico (pH em água baixo e baixo teor de MOS), que atingiu concentrações máximas de 80 a 100 mg L^{-1} de Fe na solução do solo aos 31 DAE (terceira semana de alagamento), nos tratamentos T1, T3 e T5.

Nos estádios V10-V11 (41 DAE), que correspondem às fases finais do período vegetativo do arroz, a concentração de Fe^{2+} na solução do solo foi 62 % inferior quando o início do alagamento foi atrasado para o estágio V6-V7 (20 DAE) (Figura 1c), comparativamente ao alagamento no estágio V2-V3. Gomes et al. (1990) também constataram a eficiência do retardamento no início do período de alagamento de 20 para 40 DAE como prática para a diminuição do Fe na solução do solo e deslocamento dos picos de liberação de Fe. No entanto, Vahl (1991) comentou que esses manejos da água não são eficientes para solos que mantêm altos teores de Fe em solução por várias semanas. Neste estudo, verificou-se que, embora o atraso no início do alagamento tenha sido eficiente em reduzir as concentrações de Fe na solução do solo e nas plantas de arroz na fase vegetativa (até o estágio V10-V11), o manejo quando adotado isoladamente não foi capaz de proteger as plantas da toxidez por Fe em estádios mais avançados da cultura e não promoveu incrementos na produção de matéria seca, comparativamente às plantas submetidas ao alagamento a partir de 10 DAE (Figuras 4 e 5).

A drenagem do solo realizada nos tratamentos T3 e T4 diminuiu as concentrações de Fe^{2+} na solução do

solo de 78 e 47 mg L^{-1} (41 DAE), respectivamente, para 16 mg L^{-1} aos 55 DAE. Nessa data, as concentrações de Fe^{2+} na solução do solo nos tratamentos com drenagem (T3 e T4) foram 77 % menores do que nos tratamentos de alagamento contínuo (T1 e T2). De modo semelhante, a realização de duas drenagens (T5) foi o manejo mais efetivo na redução das concentrações de Fe^{2+} na solução do solo desde os 41 até 70 DAE do arroz. Na primeira semana após a realização de cada drenagem (41 DAE e 55 DAE), as concentrações de Fe^{2+} na solução do solo foram próximas a 10 mg L^{-1} . Na segunda e terceira semanas de alagamento (63 e 70 DAE), após a realização da última drenagem, as concentrações de Fe^{2+} na solução do solo em T5 voltaram a subir, atingindo a concentração máxima de 38 mg L^{-1} aos 70 DAE. No entanto, esses valores mantiveram-se significativamente inferiores quando comparados com tratamentos com apenas uma drenagem - T3 e T4 (60 mg L^{-1}), aos 70 DAE. Gomes et al. (1990) também constataram reduções significativas nos teores de Fe na solução do solo com a drenagem, chegando a valores de 80 % inferiores ao alagamento contínuo, o que se deve à reoxidação dos óxidos de Fe pela entrada de oxigênio no interior do solo.

As plantas cultivadas com a entrada da água 10 DAE na condição de alagamento contínuo (T1) apresentaram as concentrações mais altas de Fe na parte aérea do arroz aos 42 (240 mg kg^{-1}) e 70 (153 mg kg^{-1}) DAE e o surgimento de sintomas visuais de toxidez por Fe (Figura 2a). As altas concentrações de Fe na solução do solo promovidas por esse manejo também interferiram no desenvolvimento do arroz, diminuindo o perfilhamento, o número de folhas e, conseqüentemente, a produção de matéria seca aos 70 DAE (Figuras 3 e 4). De acordo com Abu et al. (1989) e Cheema et al. (1990), a ocorrência de concentrações excessivas por Fe durante a fase vegetativa do arroz ocasiona a redução da altura e do acúmulo de matéria seca da planta e a formação de perfilhos; o número de perfilhos produtivos pode ser severamente reduzido. Em adição, o excesso de Fe na planta nas fases vegetativas tardias pode estar associado à formação de poucas panículas (Singh et al., 1992), ao aumento da esterilidade das espiguetas (Virmani, 1977) e ao florescimento atrasado. Audebert & Sahrawat (2000) observaram fortes correlações entre a severidade de sintomas da toxidez por Fe e o rendimento do arroz, verificando o efeito dessa sobre o crescimento e desenvolvimento do arroz que ocasionou reduções na massa de matéria seca e no número de perfilhos e panículas.

O alagamento tardio (T2) diminuiu as concentrações de Fe na parte aérea do arroz no estágio V10-V11 (42 DAE), considerada uma das fases mais críticas do arroz para a toxidez por Fe, pois corresponde a fases precedentes à diferenciação da panícula (Figura 2a). Aos 70 DAE, as plantas cultivadas com alagamento tardio associado à drenagem (T4) apresentaram concentrações de Fe na

parte aérea 35 % inferiores às obtidas com alagamento contínuo e entrada de água no estágio V2-V3 (Figura 2b). No entanto, em ambos os casos, as concentrações de Fe ainda causaram o surgimento de sintomas visuais de toxidez por Fe nas plantas (Figura 5).

A realização de duas drenagens na fase vegetativa do arroz (T5) reduziu os teores de Fe na parte aérea do arroz em 20 % aos 42 DAE e 28 % aos 70 DAE, quando comparados aos das plantas crescidas em T1. Além disso, as duas drenagens nesse período promoveram maior perfilhamento e número de folhas, seguido do alagamento tardio, com e sem drenagem (Figura 3a,b). A diminuição na concentração de Fe na solução do solo pela utilização dessas drenagens (Figura 1c) foi eficiente no controle do aparecimento dos sintomas de toxidez por excesso de Fe, favorecendo a obtenção da maior produção de massa de matéria seca aos 70 DAE (Figura 4b).

A manifestação dos sintomas visuais de toxidez por Fe no arroz ocorreu aos 40 DAE (estádio V10-V11),

em plantas com alagamento iniciado no estágio V2-V3. O excesso de Fe nas plantas promoveu a manifestação de sintomas denominados de bronzeamento, que se trata de várias manchas bronzeadas, de coloração castanho-escura originada da acumulação de polifenóis oxidados na folha (Yamauchi & Peng, 1993). Essas manchas ocorreram tanto nas folhas como nos colmos e nas bainhas das plantas, com predominância nas folhas mais velhas. Com o avanço dos dias de submersão, esses sintomas evoluíram para as folhas mais velhas, atingindo toda a sua extensão. Porém, nas folhas, esses sintomas ocorreram na forma de pontos circulares e isolados de coloração castanho-escura, enquanto na bainha das folhas os sintomas foram compreendidos por manchas dessa mesma coloração.

O Fe, quando livre e em excesso dentro da célula, é capaz de gerar radicais livres, como o radical hidroxila, por meio da reação de Fenton (Becana et al., 1998). Esse radical é extremamente tóxico para o metabolismo celular, sendo responsável pela oxidação

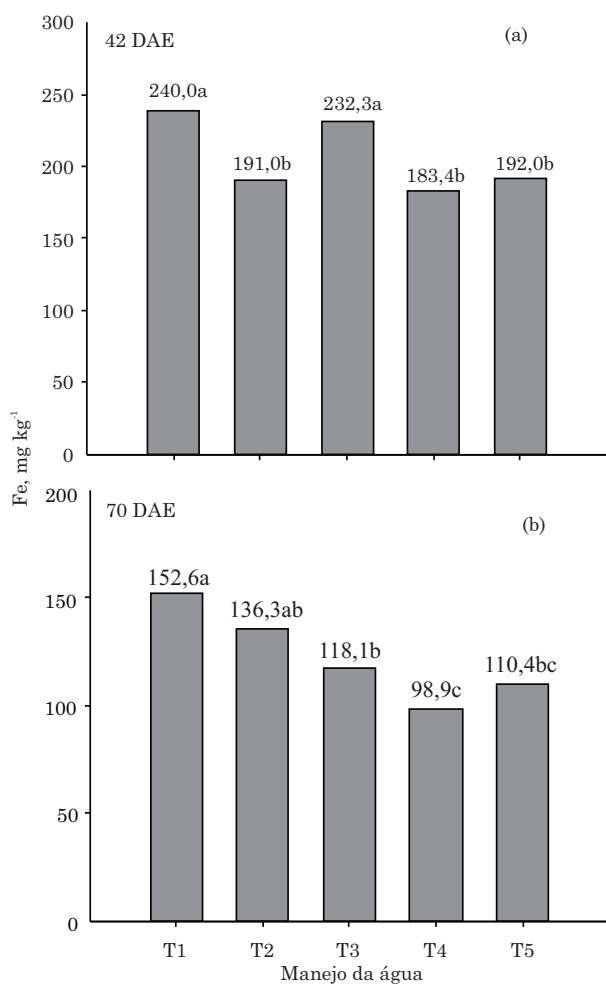


Figura 2. Concentração de ferro na parte aérea do arroz aos 42 (a) e 70 (b) dias, após a emergência (DAE).

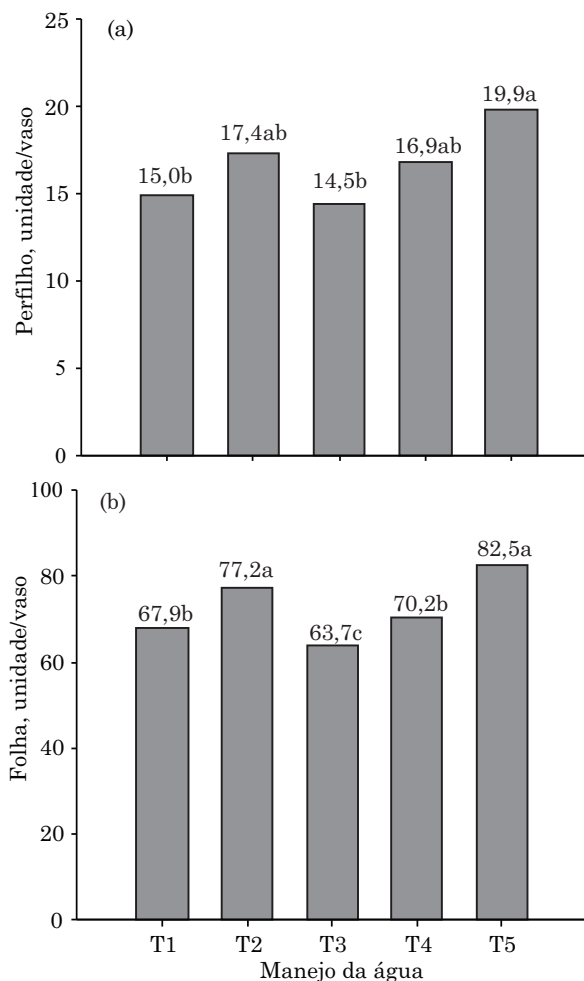


Figura 3. Número de perfilhos (a) e folhas (b) de plantas de arroz aos 70 dias, após a emergência (DAE).

de macromoléculas biológicas como proteínas, ácidos nucleicos e lipídios de membrana (Halliwell & Gutteridge, 1984). A regeneração do átomo de íon ferroso pode ocorrer pela reação de Haber-Weiss, com a redução do íon férrico a partir do ânion superóxido, tornando a produção de radicais hidroxilas um processo cíclico (Floyd, 1983). Em folhas destacadas de arroz submetidas a níveis tóxicos de Fe, altos níveis de peroxidação lipídica foram detectados, indicando oxidação de lipídeos causada por radicais livres, gerados pelo acúmulo celular de Fe (Fang et al., 2001), bem como pelo aumento na atividade de peroxidases, envolvidas na detoxificação de peróxido de hidrogênio (Fang & Kao, 2000).

O percentual de folhas com sintomas de bronzeamento aos 50, 60 e 70 DAE demonstraram que os tratamentos em que a entrada da água ocorreu no estágio V2-V3 (T1 e T3) foram os que apresentaram os maiores níveis de dano, principalmente aos 50 e 60 DAE. O maior percentual de folhas atingidas com sintomas de toxidez por Fe no T1 ocorreu aos 50 DAE do arroz, enquanto para os demais manejos ocorreu aos 70 DAE (Figura 5).

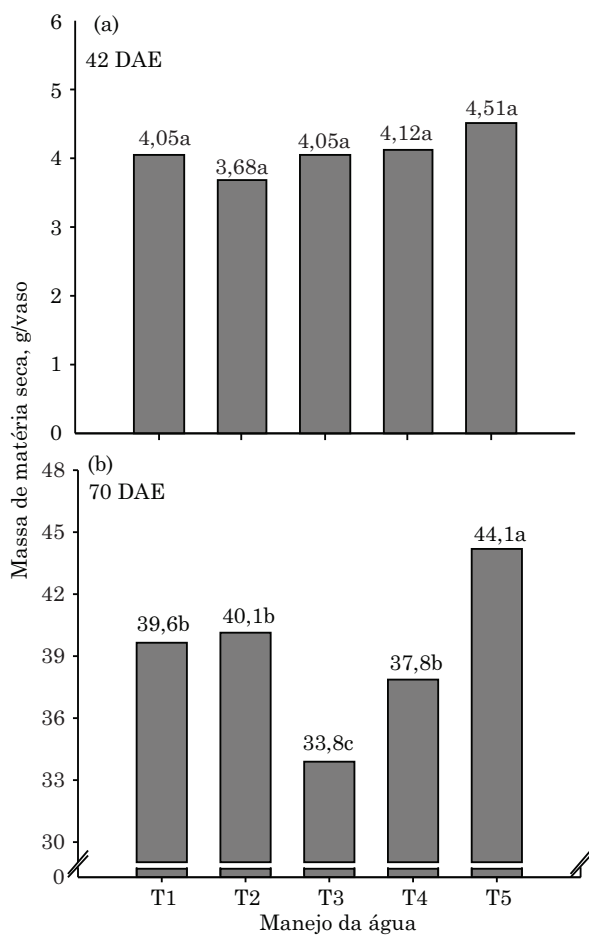


Figura 4. Produção de matéria seca da parte aérea de duas plantas de arroz coletadas aos 42 dias (a) e das duas plantas restantes, aos 70 (b) dias, após a emergência (DAE).

A concentração elevada de Fe^{2+} na solução do solo no T1 nas semanas antecedentes à contagem de sintomas (31 e 41 DAE) pode estar relacionada à intensa manifestação dos sintomas de toxidez por Fe aos 50 DAE. Nos tratamentos T2 e T4, o aparecimento do maior percentual de folhas com sintomas de toxidez ocorreu mais tardiamente por causa do manejo diferenciado da água, que promoveu o aparecimento desses sintomas em fases mais tardias da cultura, diminuindo os riscos de perdas (Figura 5). Quando a entrada da água ocorreu no estágio V2-V3, houve intensa manifestação de sintomas nas folhas, que foi minimizado com a realização da drenagem no T3, o que conferiu um grau intermediário de manifestação de sintomas, enquanto no T1 a presença de sintomas foi intensa. As plantas de arroz cultivadas no T5 não apresentaram a presença de sintomas de toxidez por Fe (Figura 5).

Este trabalho de base se propôs a estudar o efeito do manejo da água de irrigação em ambiente controlado e solo representativo da região produtora de arroz do RS, visando reduzir a toxidez por Fe nas plantas. Este estudo servirá de base para a elaboração de novos estudos de campo, aplicando os tratamentos que demonstraram resultados expressivos. O estudo demonstrou que determinados tratamentos de manejo de irrigação reduzem a concentração de Fe na solução do solo, diminuem a toxidez por Fe nas plantas e, conseqüentemente, limitam os efeitos deletérios do excesso de Fe nos parâmetros de planta (perfilhos,

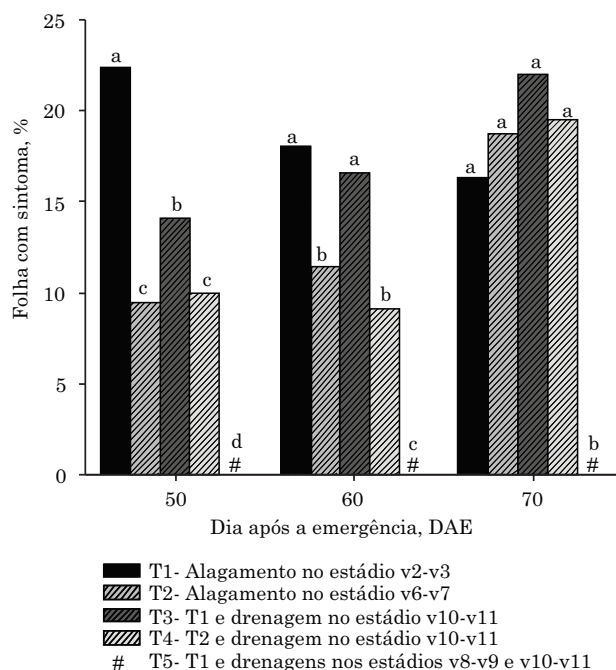


Figura 5. Percentual de folhas com sintomas de toxidez por ferro aos 50, 60 e 70 dias, após a emergência (DAE) do arroz cultivado em diferenciados manejos da água. # Não apresentou sintomas visuais de toxidez.

folhas, produção de matéria seca), que definem a produção final da cultura. Futuros estudos de campo, visando validar o experimento de casa de vegetação, são necessários para a avaliação de parâmetros produtivos como o rendimento de grãos.

CONCLUSÕES

1. A realização de drenagens ao longo do ciclo vegetativo do arroz aumentou os valores do potencial de oxirredução e reduziu a concentração de Fe^{2+} na solução do solo, enquanto o alagamento tardio deslocou a máxima liberação do Fe^{2+} para estádios fenológicos mais avançados do arroz.

2. O uso de drenagens durante o período vegetativo do arroz foi eficiente no controle da toxidez por excesso de ferro no arroz cultivado em solo alagado.

LITERATURA CITADA

- ABU, M.B.; TUCKER, E.S.; HARDING, S.S. & SESAY, J.S. Cultural practices to reduce iron toxicity in rice. *Rice Res. News.*, 14:19-19, 1989.
- ALISON, L.E. Organic carbon. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.1367-1379.
- AUDEBERT, A. & SAHRAWAT, K.L. Mechanisms for iron toxicity tolerance in lowland rice. *J. Plant Nutr.*, 23:1877-1885, 2000.
- BARTLETT, R.R. & JAMES B.R. Redox chemistry of soils. In: SPARKS, D.A., ed. *Advances in agronomy*. San Diego, Academic Press, 1993. p.151-208.
- BECANA, M.; MORAN, J.F. & ITURBE-ORMAETXE, I. Iron-dependent oxygen free radical generation in plants subjected to environmental stress: toxicity and antioxidant protection. *Plant Soil*, 201:137-147, 1998.
- BECKER, M. & ASCH, F. Iron toxicity - Conditions and management concepts. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 168:558-573, 2005.
- CHEEMA, S.S.; CHAUDHARY, U.; TAKKAR, P.N. & SHARMA, B.D. Effect of dates of transplanting on uptake of micronutrients by rice cultivars of different growth stages. *J. Res. Punjab Agri. Univ.*, 27:199-206, 1990.
- CHENG, Y.-Q.; YANG, L.-Z.; CAO, Z.-H. & YIN, S. Cronosequential changes of selected pedogenic properties in paddy soils as compared with non-paddy soils. *Geoderma*, 151:31-41, 2009.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFSRS/SC. *Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. 10.ed. Porto Alegre, SBSC - Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2004. 400p.
- COUNCE, P.A.; KEISLING, T.C. & MITCHELL, A.J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. *Crop Sci.*, 40:436-443, 2000.
- DORAN, G.; EBERBACH, P. & HELLIWELL, S. The impact of rice plant roots on the reducing conditions in flooded rice soils. *Chemosphere*, 63:1892-1902, 2006.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. *Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação do solo*. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- FANG, W.C. & KAO, C.H. Enhanced peroxidase activity in rice leaves in response to excess iron, copper and zinc. *Plant Sci.*, 158:71-76, 2000.
- FANG, W.C.; WANG, J.W.; LIN, C.C. & KAO, C.H. Iron induction of lipid peroxidation and effects on antioxidative enzyme activities in rice leaves. *Plant Growth Regul.*, 35:75-80, 2001.
- FLOYD, R.A. Direct demonstration that ferrous iron complexes of di- and triphosphate nucleotides catalyze hydroxyl free radical formation from hydrogen peroxide. *Arch. Biochem. Biophys.*, 225:263-270, 1983.
- GOMES, A.S.; SOUSA, R.O.; DIAS, A.D.; MACHADO, M.O. & PAULETTO, E.A. A problemática da toxicidade do Fe em arroz irrigado no RS. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 1990, Goiânia. *Anais... Goiânia, CNPAF/Embrapa*, 1990. p.116.
- HALLIWELL, B. & GUTTERIDGE, J.M.C. Oxygen toxicity, oxygen radicals, transition metals and disease. *Biochem. J.*, 219:1-14, 1984.
- INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ - IRGA. *Dados de safra*. Porto Alegre. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/index.php?action=dados_safra>. Acesso em: 20 out. 2009.
- JACKEL, U.; SCHNELL, S. & CONRAD, R. Effect of moisture, texture and aggregate size of paddy soil on production and consumption of CH_4 . *Soil Biol. Biochem.*, 33:965-971, 2001.
- KIRK, G.J.D. *The biogeochemistry of submerged soils*. Los Banos, Research Institute, 2004. 291p.
- KÖGEL-KNABNER, I.; AMELUNG, W.; CAO, Z.; FIEDLER, S.; FRENZEL, P.; JAHN, R.; KALBITZ, K.; KÖLBL, A. & SCHLOTER, M. Biogeochemistry of paddy soils. *Geoderma*, 157:1-14, 2010.
- KRÜGER, M.; FRENZEL, V. & CONRAD, R. Microbial processes influencing methane emission from rice fields. *Global Change Biol.*, 7:49-63, 2001.
- MACHADO, A. & CONCEIÇÃO, A.R. *Programa estatístico WinStat: Sistema de análise estatístico para Windows, versão 2.0*. Pelotas, 2002.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soil and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Miner.*, 5:317-327, 1960.
- NIEROP, K.G.J.; JANSEN, B. & VERSTRATEN, J.A. Dissolved organic matter, aluminium and iron interactions: precipitation induced by metal/carbon ratio, pH and competition. *Sci. Total Environ.*, 300:201-211, 2002.

- PINTO, L.F.S.; LAUS NETO, J.A. & PAULETTO, E.A. Solos de várzea do sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A.S. & MAGALHÃES JÚNIOR, A.M., eds. Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.75-95.
- RATERING, S. & SCHNELL, S. Localization of iron-reducing activity in paddy soil by profile studies. *Biogeochemistry*, 48:341-365, 2000.
- ROWELL, D.L. Soil science. Methods and applications. Harlow, Longman Scientific Technical, 1994. p.695-742.
- SAHRAWAT, K.L. Elemental composition of rice plant as affected by iron toxicity under field conditions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 31:2819-2827, 2004.
- SCHULZE, E.D.; BECK, E. & MÜLLER-HOHENSTEIN, K. *Plant ecology*. Heidelberg, Springer, 2005. 702p.
- SINGH, B.P.; DAS, M.; PRASAD, R.N. & RAM, M. Characteristics of Fe-toxic soils and affected plants and their correction in acid Haplants of Meghalaya. *Rice Res. News*, 17:18-19, 1992.
- SOUSA, R.O.; BOHNEN, H. & MEURER, E.J. Composição da solução de um solo alagado conforme a profundidade e o tempo de alagamento, utilizando novo método de coleta. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:343-348, 2002.
- SOUSA, R.O.; CAMARGO, F.A.O. & VAHL, L.C. Solos alagados (Reações de redox). In: MEURER, E.J., ed. Fundamentos de química do solo. 2.ed. Porto Alegre, Genesis, 2004b. p.207-236.
- SOUSA, R.O.; GOMES, A.S. & VAHL, L.C. Toxidez por ferro em arroz irrigado. In: GOMES, A.S. & MAGALHÃES JÚNIOR, A., eds. Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília, Embrapa Informação Tecnológica, 2004a. p.305-337.
- SOUSA, R.O.; VAHL, L.C. & OTERO, X.L. Química de solos alagados. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. Química e mineralogia do solo. Parte II - Aplicações. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p.485-528.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)
- THOMPSON, A.; CHADWICK, O.A.; RANCOURT, D.G. & CHOROVER, J. Iron-oxide crystallinity increases during redox oscillations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70:1710-1727, 2006.
- VAHL, L.C. Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1991. 173 p. (Tese de Doutorado)
- VIRMANI, S.S. Varietal tolerance of rice to iron toxicity in Liberia. *Rice Res. News.*, 2:4-5, 1977.
- ZAUSIG, J. Redox potential measurement. In: ALEF, K. & NANNIPIERI, P., eds. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. San Diego, Academic Press, 1995. p.274-276.
- WINSLOW, M.D.; YAMAUCHI, M.; ALLURI, K. & MASAJO, T.M. Reducing iron toxicity in rice with resistant genotype and ridge planting. *Agron. J.*, 81:458-460, 1989.
- YAMAUCHI, M. & PENG, X.X. Ethylene production in rice bronzing leaves induced by ferrous iron. *Plant Soil*, 149:227-234, 1993.
- YAO, H.; CONRAD, R.; WASSMANN, R. & NEUE, H.U. Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines, and Italy. *Biogeochemistry*, 47:269-295, 1999.