

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**MORFOLOGIA E DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES DE ARROZ IRRIGADO
POR INUNDAÇÃO E SUA RELAÇÃO COM A ABSORÇÃO DE NUTRIENTES E
O RENDIMENTO DE GRÃOS**

**André Dabdab Abichequer
(Tese de Doutorado)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**MORFOLOGIA E DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES DE ARROZ IRRIGADO
POR INUNDAÇÃO E SUA RELAÇÃO COM A ABSORÇÃO DE NUTRIENTES
E O RENDIMENTO DE GRÃOS**

ANDRÉ DABDAB ABICHEQUER
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)

Tese apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Julho de 2004

Dedico este trabalho:

À família de onde vim:

Meus pais João e Dulce e minha irmã Aline.

À família que estou formando:

À Marí Ângela, que durante o meu Doutorado metamorfoseou-se de namorada em esposa.

Ao nosso filho, que vem chegando.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Humberto Bohnen, pela orientação e apoio desde o Mestrado, sempre objetivando o crescimento do orientado.

Aos professores Ibanor Anghinoni e Paulo Régis da Silva, da Comissão Orientadora, pelas sugestões ao trabalho.

Aos colegas Rogério Oliveira de Sousa e Sérgio Gindri Lopes, pelas sugestões na elaboração do projeto.

A todos os colegas do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), pela amizade, ajuda e troca de conhecimentos durante o curso.

Aos professores do PPGCS e de outros cursos, que auxiliaram a aumentar meus conhecimentos.

Aos funcionários do PPGCS e do Departamento de Solos da UFRGS, especialmente ao Jader Amaro, por todo o auxílio dispensado.

À Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), na qual ingressei durante o curso, pela disponibilidade de tempo para a continuidade do Doutorado e pela estrutura utilizada no desenvolvimento do trabalho. Aos colegas da FEPAGRO, especialmente aos do Laboratório de Química Agrícola e a seu Responsável Técnico Carlos Antônio Saraiva Osorio.

Ao Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), pela disponibilização da estrutura para a realização do experimento de campo. Aos Engenheiros Agrônomos do IRGA Vera Macedo, Élio Marcolin e Sílvio Genro Junior, pela colaboração imprescindível para o desenvolvimento do experimento. Aos demais funcionários do Setor de Solos e Águas do IRGA, pelo auxílio no trabalho realizado.

Ao PPGCS da Faculdade de Agronomia da UFRGS, pela oportunidade de realizar o Doutorado e pelas condições para o desenvolvimento da pesquisa.

À empresa RiceTec Ltda., pelo fornecimento das sementes do híbrido Avaxi.

À CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

À Marí Ângela e aos meus familiares, por todo o amor, fundamental para minha vida.

Aos meus amigos, que tornaram este período do curso mais agradável.

A Deus, pela vida e pela capacidade de pensar, que nos faz querer compreender o mundo.

**MORFOLOGIA E DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES DE ARROZ IRRIGADO
POR INUNDAÇÃO E SUA RELAÇÃO COM A ABSORÇÃO DE NUTRIENTES
E O RENDIMENTO DE GRÃOS ^{1/}**

^{1/} Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (56 p.) Julho, 2004.

Autor: André Dabdab Abichequer

Orientador: Professor Humberto Bohnen

RESUMO

O arroz irrigado por inundação (*Oryza sativa* L.) é uma das culturas mais importantes no Rio Grande do Sul, sendo necessário buscar o aumento do rendimento de grãos para haver viabilidade econômica e reduzir o impacto ambiental da cultura, pela menor necessidade de área. Uma das formas de se obter aumento de rendimento na cultura é o desenvolvimento de genótipos mais eficientes na absorção de nutrientes, o que pode estar relacionado com a morfologia e distribuição do sistema radicular no solo e com a cinética de absorção. Conduziram-se dois experimentos: um em solução nutritiva, comparando os genótipos IRGA 417 e IRGA 419 (modernos), EEA 406 (tradicional), Avaxi (híbrido, RiceTec) e Bluebelle (americano) quanto ao comprimento e arquitetura das raízes e absorção de nutrientes, no estágio V8 a V10; um experimento de campo, num Gleissolo, comparando os mesmos genótipos, com exceção da IRGA 419, quanto ao comprimento (densidade de raízes), área superficial e raio médio das raízes, distribuição das raízes (profundidades de 0 a 5, 5 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm), absorção de nutrientes (N, P e K) e rendimento de grãos. Os genótipos modernos (IRGA 417 e Avaxi) apresentaram maior rendimento de grãos e maior absorção de nutrientes, quando houve diferenças. A variedade IRGA 417 desenvolveu raízes mais compridas na solução nutritiva, enquanto a EEA 406 e o Avaxi apresentaram maior comprimento das raízes no solo, sendo a Bluebelle de menor comprimento em ambos os casos. O híbrido Avaxi desenvolveu raízes mais superficiais nos dois experimentos, enquanto a Bluebelle apresentou raízes mais profundas. Não foi observada relação de morfologia e distribuição das raízes no solo com absorção de nutrientes e rendimento de grãos no experimento de campo; porém, o estudo desta relação foi prejudicado pela obtenção de rendimentos abaixo do esperado, por causa de semeadura após a época recomendada, e a conseqüente redução da demanda nutricional. Na solução nutritiva a absorção foi diretamente relacionada ao comprimento das raízes.

ROOT MORPHOLOGY AND DISTRIBUTION OF PADDY RICE AND THEIR RELATIONSHIP WITH NUTRIENT UPTAKE AND GRAIN YIELD^{1/}

Author: André Dabdab Abichequer

Adviser: Professor Humberto Bohnen

ABSTRACT

^{1/} Doctoral Thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (56 p.) July, 2004.

Paddy rice (*Oriza sativa* L.) is one of the most important crops in Rio Grande do Sul, Brazil. It is necessary to look for higher grain yield to increase economic gain and to reduce environmental impact. Yield increases can be obtained with the development of more efficient genotypes in nutrient uptake, that can be related to root morphology and distribution in soil and to uptake kinetics. Two experiments were conducted: one in nutrient solution, to compare genotypes IRGA 417 and IRGA 419 (modern), EEA 406 (traditional), Avaxi (hybrid, RiceTec) and Bluebelle (american) in relation to root length and architecture and nutrient uptake, in V8 to V10 growth stage; and one field experiment, in a Gleissolo, to compare the same genotypes, except IRGA 419, in relation to root length (root density), root surface area and root radius, nutrient uptake (N, P and K), root distribution (depth 0 to 5, 5 to 20, 20 to 30 and 30 to 40 cm) and grain yield. Modern genotypes (IRGA 417 and Avaxi) had greater grain yield and greater nutrient uptake, when differences occurred. IRGA 417 developed shorter roots in nutrient solution, while EEA 406 and Avaxi had shorter roots in soil, with Bluebelle being the genotype of shorter roots in both experiments. Avaxi developed more superficial roots in both experiments, while Bluebelle developed deeper roots. There was no relationship between root morphology and distribution with nutrient uptake and grain yield in field experiment; nevertheless, the study of this relationship was complicated by the obtaining of lower grain yield than expected, due to late planting, that caused lower nutritional demand. In nutrient solution there was direct relationship between root length and nutrient uptake.

SUMÁRIO

| | Página |
|--|--------|
| 1. INTRODUÇÃO GERAL | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 2.1. Introdução | 4 |
| 2.2. Sistema radicular do arroz | 5 |
| 2.3. Morfologia e distribuição radicular e sua relação com a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos do arroz irrigado | 6 |
| 2.4. Cinética de absorção de nutrientes | 9 |
| 2.5. Crescimento radicular e resistência mecânica do solo | 10 |
| 2.6. Tipos de cultivares de arroz irrigado por inundação | 12 |
| 2.7. Hipótese | 13 |
| 3. ESTUDO 1 - Comprimento e arquitetura de raízes de genótipos de arroz em solução nutritiva e sua relação com absorção de nutrientes e produção de massa seca | 14 |

| | |
|---|----|
| 3.1. Introdução | 14 |
| 3.2. Material e métodos | 15 |
| 3.3. Resultados e discussão | 18 |
| 3.3.1. Morfologia e arquitetura das raízes | 18 |
| 3.3.2. Absorção de nutrientes | 22 |
| 3.3.3. Produção de massa seca | 23 |
| 3.3.4. Conclusões | 25 |
| 4. ESTUDO 2 - Morfologia e distribuição de raízes de arroz no solo e sua relação com absorção de nutrientes e rendimento de grãos | 26 |
| 4.1. Introdução | 26 |
| 4.2. Material e métodos | 27 |
| 4.3. Resultados e discussão | 34 |
| 4.3.1. Rendimento de grãos e produção de massa seca | 34 |
| 4.3.2. Morfologia das raízes | 35 |
| 4.3.3. Distribuição das raízes no solo | 38 |
| 4.3.4. Absorção de nutrientes | 41 |
| 4.3.5. Análise da solução do solo | 45 |
| 4.3.6. Conclusões | 47 |
| 5. CONCLUSÕES GERAIS | 48 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 49 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 50 |
| 8. APÊNDICES | 54 |
| 9. RESUMO BIOGRÁFICO | 56 |

RELAÇÃO DE TABELAS

| | Página |
|--|--------|
| 01. Comprimento, ângulo interno e aprofundamento das raízes de genótipos de arroz irrigado cultivados em solução nutritiva | 20 |
| 02. Conteúdo de P e K na parte aérea de genótipos de arroz irrigado cultivados em solução nutritiva | 22 |
| 03. Massa seca (MS) produzida e relação parte aérea/raiz de genótipos de arroz irrigado cultivados em solução nutritiva | 25 |
| 04. Rendimento de grãos de genótipos de arroz irrigado em experimento de campo | 34 |
| 05. Produção de massa seca da parte aérea (na floração e maturação) e das raízes (no enchimento de grãos) de genótipos de arroz irrigado em experimento de campo | 35 |
| 06. Densidade de raízes, raio médio e área superficial das raízes de genótipos de arroz irrigado, coletadas no enchimento de grãos, em experimento de campo | 37 |
| 07. Distribuição percentual do comprimento das raízes de genótipos de arroz irrigado em quatro camadas do solo, sendo as raízes coletadas no enchimento de grãos | 39 |

| | |
|--|----|
| 08. Densidade de raízes de genótipos de arroz irrigado em quatro camadas do solo, sendo as raízes coletadas no enchimento de grãos | 40 |
| 09. Correlações do rendimento de grãos dos genótipos de arroz com a densidade de raízes nas quatro camadas de solo estudadas | 40 |
| 10. Conteúdo de N, P e K na parte aérea de genótipos de arroz irrigado, na floração e maturação, em experimento de campo | 41 |
| 11. Correlações do conteúdo de N, P e K na parte aérea com densidade radicular, raio médio e área superficial de raízes | 42 |
| 12. Correlações do conteúdo de N, P e K na parte aérea com a densidade de raízes nas quatro camadas de solo estudadas | 43 |
| 13. Parâmetros químicos da solução do solo em quatro profundidades, com coletor instalado na entrelinha do arroz, no estádio de seis folhas (V 6), exceto a IRGA 417, que estava em V 7..... | 46 |
| 14. Parâmetros químicos da solução do solo em quatro profundidades, com coletor instalado na entrelinha do arroz, no estádio de emissão da panícula (R 3) | 47 |

RELAÇÃO DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| 01. Poliestireno granulado utilizado como suporte para as plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva | 17 |
| 02. Genótipos de arroz cultivados em solução nutritiva com suporte das plantas em poliestireno granulado, no dia da colheita do experimento (24 dias após a emergência) | 18 |
| 03. Arquitetura de raízes de genótipos de arroz irrigado cultivados em solução nutritiva: IRGA 417, IRGA 419, Avaxi, Bluebelle e EEA 406 | 21 |
| 04. Massa verde da parte aérea dos genótipos de arroz no dia da colheita do experimento (24 dias após a emergência). Da esquerda para a direita: IRGA 417, Avaxi, Bluebelle, IRGA 419 e EEA 406 | 24 |
| 05. Genótipos de arroz irrigado cultivados em experimento de campo, no estádio de floração: Avaxi (híbrido, RiceTec); Bluebelle (americano); IRGA 417 (moderno); EEA 406 (tradicional) | 30 |
| 06. Genótipos de arroz irrigado cultivados em experimento de campo, no estádio de seis folhas. Em destaque, um dos coletores de solução do solo instalados na entrelinha do arroz | 31 |
| 07. Dispositivo utilizado para a coleta da solução do solo na entrelinha do arroz, nas profundidades de 2,5; 12,5; 25 e 35 cm | 32 |
| 08. Coleta de monólitos para avaliação da morfologia e distribuição de raízes do arroz, no estádio de enchimento de grãos | 33 |

RELAÇÃO DE APÊNDICES

| | Página |
|--|--------|
| 01. Concentração de K e Ca trocável no solo dos monólitos coletados na amostragem das raízes, no estágio de enchimento de grãos, em quatro profundidades | 55 |

1. INTRODUÇÃO GERAL

O arroz é o grão mais importante na dieta de mais da metade da população mundial, representando mais de 50 % da ingestão diária de calorias de asiáticos, africanos e latino-americanos (Yoshida, 1981; Counce et al., 2000). A produção mundial de arroz duplicou de 257 milhões de toneladas, em 1965, para 520 milhões, em 1990, devido principalmente à adoção de cultivares semi-anãs (modernas) (Khush, 1995), com alto potencial de rendimento. No entanto, nos últimos anos os ganhos de rendimento na cultura diminuíram e a população mundial está aumentando em proporção maior do que os incrementos na produção do arroz, especialmente nos países consumidores do grão. Como a área cultivada com arroz tem se mantido estável mundialmente desde 1980 e há poucas perspectivas de sua expansão, o aumento do rendimento de arroz é necessário para atender a crescente demanda pelo grão (Khush, 1995).

A cultura do arroz irrigado é uma das mais importantes no Rio Grande do Sul, abrangendo atualmente uma área de aproximadamente 1.000.000 ha, somente inferior à área ocupada pela soja e pelo milho. Em valor da produção, o arroz ocupa a segunda posição entre as culturas no Estado, superado apenas pela soja. São colhidos no Estado cerca de 50% da produção nacional de arroz, com rendimento médio em torno de 6.000 kg ha⁻¹.

Sendo uma cultura irrigada, com grande utilização de insumos e mecanização agrícola, o arroz apresenta alto custo de produção. Assim, é necessário que a pesquisa e os produtores busquem o aumento do rendimento de grãos, para haver uma relação custo-benefício positiva no empreendimento. Este objetivo foi conseguido no Estado, principalmente a partir dos anos 80, com a introdução das variedades modernas e a melhoria do manejo da cultura. Porém, o incremento do rendimento sofreu uma desaceleração nos últimos anos e ainda encontra-se bastante abaixo do potencial da cultura, que é de 12.000 kg ha⁻¹ (IRGA, 2004). É preciso, portanto, buscar progressos no tipo de planta e/ou no manejo da lavoura do arroz para voltar a obter ganhos mais significativos no rendimento.

Além dos aspectos econômico e alimentar, o aumento do rendimento do arroz também representa uma redução do impacto ambiental provocado pela cultura. O maior rendimento gera menor necessidade de área para o cultivo, fazendo com que o impacto da cultura ocorra em menor extensão territorial. Isto também resulta em menor captação de água do que se fosse aumentada a área de cultivo, o que afeta os ecossistemas onde ela é coletada. Além disso, há menor contaminação do ambiente pela água que sai da lavoura, carregando resíduos de herbicidas, adubos e outros insumos.

A obtenção de altos rendimentos de grãos de arroz irrigado depende de diversos fatores, como uso de genótipos produtivos, manejo de solo, adubação, manejo da irrigação, controle de plantas invasoras, pragas e moléstias e outros. Com relação à nutrição do arroz, aumentos de rendimento podem ser obtidos pelo manejo adequado da adubação (doses, épocas de aplicação etc.) e/ou pelo desenvolvimento de genótipos mais eficientes na absorção e utilização dos nutrientes. Também é importante adotar um manejo de solo que resulte em condições favoráveis para o crescimento e a atividade das raízes das plantas, já que elas são os órgãos mais determinantes da nutrição vegetal.

Quando se objetiva alcançar rendimentos de grãos mais altos em lavouras de arroz irrigado, um dos aspectos a ser procurado é o aumento da absorção de nutrientes, para satisfazer a maior demanda que será criada. Também é necessário que se busque o aumento da eficiência na utilização de nutrientes pelas plantas. O uso de altas densidades de semeadura também pode causar esgotamento de nutrientes pela competição entre raízes adjacentes, podendo ser vantajosa uma maior exploração de solo pelas raízes, atingindo camadas mais profundas. Plantas de arroz mais eficientes na absorção de nutrientes podem também reduzir perdas de nutrientes por percolação, volatilização (no caso do N) ou com a água de drenagem, ao absorvê-los em maior quantidade e mais rapidamente. Como conseqüência, há uma redução da contaminação da água de drenagem e melhor aproveitamento da adubação, refletindo-se em redução de custos.

Embora autores como Khush (1995) reconheçam a importância do melhoramento do sistema radicular para o incremento do potencial produtivo do arroz, o melhoramento de plantas não tem dedicado ao mesmo a atenção dada

à melhoria de características da parte aérea. Um dos motivos para essa menor ênfase é a dificuldade para retirada e avaliação das raízes, particularmente em solos alagados. No entanto, como estão disponíveis atualmente genótipos de alto potencial de rendimento, com baixa estatura, folhas eretas (alta capacidade de aproveitamento da radiação solar), colmos fortes e alta capacidade de perfilhamento, é necessário que se busque a maior eficiência do sistema radicular, para que o mesmo não seja limitante ao rendimento da planta.

No Rio Grande do Sul, e mesmo mundialmente (Teo et al., 1995 b), foram realizados poucos trabalhos estudando a relação entre a morfologia e a distribuição radicular do arroz irrigado e a absorção de nutrientes, com possíveis reflexos no rendimento de grãos. Caso o trabalho apresentado nesta tese verifique a existência de relação entre o crescimento das raízes de arroz e a absorção de nutrientes, oferecerá uma importante indicação para que os programas de melhoramento obtenham variedades mais produtivas.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi estudar a morfologia e a distribuição das raízes de arroz irrigado por inundação e sua relação com a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos.

A presente tese está estruturada em capítulos. O capítulo 2 compreende a Revisão Bibliográfica; o capítulo 3 o Estudo 1, realizado em solução nutritiva; o capítulo 4 o Estudo 2, realizado no campo; e os capítulos 5 e 6 compreendem as Conclusões Gerais e as Considerações Finais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução

Com o objetivo de aumentar o rendimento de grãos em uma cultura, uma das possibilidades é selecionar genótipos com maior eficiência nutricional. A eficiência nutricional compreende a eficiência de absorção, translocação e utilização de nutrientes, que estão associadas a características morfológicas e fisiológicas das plantas. Trabalhos com diversas culturas mostram a existência de variabilidade da eficiência nutricional entre espécies e entre cultivares de uma espécie, o que indica a ocorrência de controle genético da característica. Em alguns casos a variabilidade da eficiência nutricional é controlada por apenas um par de genes; na maioria das vezes, porém, sistemas genéticos mais complexos estão envolvidos (Gerloff & Gabelman, 1983).

Em uma cultura como o arroz irrigado por inundação, em que são utilizadas altas densidades de semeadura para a obtenção de maiores rendimentos de grãos, a demanda de nutrientes pode não ser atendida, pela competição entre raízes adjacentes. Além disto, o próprio aumento de rendimento resulta em maior demanda nutricional. Para que este fator não seja limitante ao aumento do rendimento, deve-se selecionar genótipos com maior eficiência na absorção de nutrientes, que pode estar relacionada com a morfologia das raízes, a distribuição das raízes no solo e a cinética de absorção de nutrientes.

Nesta revisão bibliográfica apresenta-se inicialmente as características do sistema radicular do arroz. Após discorre-se sobre a relação de morfologia e distribuição das raízes e cinética de absorção com a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos. Os itens restantes compreendem a relação da compactação do solo com o crescimento das raízes do arroz e a caracterização dos tipos de cultivares de arroz irrigado utilizadas no Rio Grande do Sul.

2.2. Sistema radicular do arroz

As raízes que a planta de arroz desenvolve são de três tipos: seminais (radícula), raízes do mesocótilo (que raramente se desenvolvem) e raízes nodais (adventícias). A radícula emerge após a germinação, atinge no máximo 15 cm e mantém-se ativa até o estágio da sétima folha (Yoshida, 1981).

O principal sistema radicular do arroz é formado pelas raízes adventícias. Cada entrenó da planta normalmente desenvolve de 5 a 25 raízes primárias, cujos diâmetros variam de 0,5 a mais de 1 mm. Uma folha e raízes finas surgem da parte superior do entrenó, enquanto um afilho e raízes grossas emergem da parte inferior. As raízes grossas tendem a crescer em profundidade, já as finas são mais superficiais. As raízes primárias, à medida que se desenvolvem, ramificam-se em secundárias, terciárias etc., até de sexta ordem, com diâmetro progressivamente menor, reduzindo de 1 até 0,04 mm. (Yoshida, 1981). Segundo Yoshida & Hasegawa (1982), geralmente as cultivares de arroz de sequeiro apresentam raízes longas e espessas, que se aprofundam mais no solo (atingindo até 140 cm de profundidade), enquanto as cultivares semi-anãs, de cultivo irrigado, desenvolvem raízes finas e fibrosas.

Uma característica interessante do arroz é a ocorrência de sincronia entre o crescimento das folhas, afilhos e raízes nodais. Quando a folha do nó "n" (por exemplo, do sétimo nó) se desenvolve, o afilho e as raízes do nó "n - 3" (quarto nó) também emergem (Yoshida, 1981). As raízes do arroz cultivado em solos inundados tornam-se bronzeadas, por causa da precipitação de compostos férricos em sua superfície, devido à oxidação do Fe^{2+} na rizosfera pelo oxigênio liberado pelas raízes (Ramos et al., 1981).

O crescimento radicular é diretamente relacionado ao crescimento da parte aérea do arroz (Yoshida, 1981; Lopes, 1991; Morita & Yamazaki, 1993). A taxa máxima de crescimento das raízes ocorre no estágio de diferenciação da panícula, havendo quase uma paralisação durante o enchimento de grãos. As taxas máximas de absorção de nutrientes ocorrem da diferenciação da panícula até a floração, período que coincide com o maior crescimento da parte aérea do arroz (Lopes, 1991).

2.3. Morfologia e distribuição radicular e sua relação com a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos do arroz irrigado

As diferenças entre espécies e variedades de plantas quanto à capacidade de absorver nutrientes são decorrentes da variação na magnitude e morfologia do sistema radicular e/ou na cinética de absorção de nutrientes (Anghinoni et al., 1989). No campo, além desses aspectos, a distribuição das raízes ao longo do perfil do solo também é muito importante para a determinação da quantidade de nutrientes absorvidos pelo arroz. A exploração de um maior volume de solo pelas raízes, que pode ser obtida com um maior aprofundamento, reduz a competição entre raízes adjacentes. Esta competição causa esgotamento dos nutrientes no cilindro de solo ao redor das raízes, de onde elas extraem os nutrientes, por sobreposição de cilindros adjacentes, podendo não ser atendida a demanda nutricional no caso de altos rendimentos. Teo et al. (1995 a), testando um modelo de absorção de nutrientes em arroz irrigado, observaram que a absorção de N e P foi mais sensível à meia distância entre raízes, que é um indicador da competição entre raízes adjacentes. A arquitetura das raízes, definida como o arranjo espacial das raízes, determina a tendência do sistema radicular atingir camadas mais profundas do solo ou localizar-se superficialmente. Segundo Morita & Yamazaki (1993), altos rendimentos de grãos de arroz estão relacionados com a dimensão e o padrão de distribuição do sistema radicular no solo, sendo vantajosa a distribuição das raízes em camadas mais profundas. Os mesmos autores citam que plantas de arroz de alto rendimento no Japão apresentam grande crescimento tanto das raízes superficiais, quanto a distribuição das raízes em camadas mais profundas do solo, além de possuírem grande

número, comprimento e diâmetro de raízes. Relacionando tipo de planta e distribuição de raízes, Yoshida et al. (1982) observaram que variedades de porte alto e com menor perfilhamento tendem a desenvolver raízes mais profundas.

No ambiente anaeróbico em que o arroz irrigado é cultivado, com impedimento à percolação da água, o aprofundamento das raízes e a formação de pêlos radiculares são prejudicados, sendo que raramente ocorrem raízes abaixo de 40 cm de profundidade (Yoshida, 1981). Um dos motivos para este menor aprofundamento é o fato do transporte do oxigênio da parte aérea para as raízes pelo aerênquima ser eficiente somente até cerca de 40 cm da base da raiz. O oxigênio, necessário para a respiração das raízes, é perdido lateralmente e consumido pelos tecidos no trajeto até as raízes, atingindo as mesmas em pressões muito baixas em distâncias maiores do que 40 cm (Yoshida, 1981). Em camadas profundas do solo pode ocorrer maior concentração de substâncias tóxicas (Fe , H_2S) que inibem a expansão das raízes, pois o ambiente é mais reduzido (Ottow et al., 1983; Kono, 1993). Em ambiente anaeróbico o Fe^{3+} e o sulfato são reduzidos, originando Fe^{2+} (que é muito mais solúvel e pode atingir concentrações tóxicas) e H_2S , que também prejudicam a absorção de nutrientes (Ponnanperuma, 1972; Sousa et al., 2000). Assim, sistemas de manejo de água que permitem percolação tendem a beneficiar o aprofundamento das raízes, por proporcionarem a eliminação parcial de substâncias tóxicas e maior aporte de oxigênio em camadas profundas (Kono, 1993), embora deva ser considerado o aumento de custos, em função da maior demanda de água. Por outro lado, em maior profundidade pode haver maior concentração de nutrientes, o que beneficia o crescimento das raízes e da própria planta. Lopes (1991), trabalhando com a variedade BR-IRGA 409 num Planossolo em Cachoeirinha (RS), observou que cerca de 55% do comprimento radicular encontrava-se na camada de 0 a 5 cm de profundidade e 87% na camada de 0 a 20 cm. Macedo et al. (1999) e Teo et al. (1995 b) também observaram um desenvolvimento de sistema radicular superficial no arroz irrigado. Cerca de 90% das raízes concentraram-se na profundidade de 0 a 20 cm do solo, no experimento de Teo et al. (1995 b). Segundo Ramos et al. (1981), a maior parte do sistema radicular do arroz

irrigado desenvolve-se na camada superficial do solo, podendo-se realizar o preparo do solo apenas até a profundidade de 10 cm.

O crescimento das raízes é determinado pelo patrimônio genético da planta e pelas condições do solo. Maior absorção de nutrientes pode ser obtida pela seleção de genótipos com maior comprimento e maior área superficial de raízes, pois há um maior acesso das raízes aos nutrientes e maior número de sítios de absorção no sistema radicular. O desenvolvimento de raízes de menor raio médio também é benéfico para a absorção de nutrientes, porque as raízes finas são mais novas e mais ativas na absorção, além de ser reduzido o trajeto dos íons do solo até o xilema. Existem poucos estudos relacionando morfologia de raízes e absorção de nutrientes em arroz irrigado. Segundo Teo & Beyrouly (1991), citados por Teo et al. (1995 b), a absorção de nutrientes distinguiu-se entre variedades de arroz irrigado devido à variação do comprimento das raízes das plantas, em casa de vegetação. Porém, no trabalho de Teo et al. (1995 b) não houve relação entre a morfologia radicular de três variedades de arroz e a absorção de N, P e K em experimento de campo. Os autores atribuíram a variação de absorção observada a diferenças nos parâmetros cinéticos de absorção, estudados em experimento anterior (Teo et al., 1992). Anghinoni et al. (1989) compararam quatro variedades de arroz, em solução nutritiva, quanto à morfologia radicular e à cinética de absorção. O arroz de sequeiro apresentou maior superfície radicular, seguido pelas variedades BR-IRGA 409 (moderna) e EEA 406 (tradicional, de porte alto), com área superficial semelhante, e Bluebelle (americana), com sistema radicular de menor dimensão. A variedade Bluebelle, no entanto, apresentou parâmetros cinéticos mais favoráveis para a absorção de nutrientes do que as demais, compensando o menor desenvolvimento radicular. No trabalho de França et al. (1999), também em solução nutritiva, a variedade de arroz IAC 4440, de cultivo irrigado, desenvolveu maior superfície radicular e raízes mais finas do que a Comum Branco, de sequeiro. Esta última, no entanto, apresentou maior influxo radicular de N, resultando em taxas similares de acumulação do nutriente nas duas cultivares. Eberhardt et al. (1999) compararam a eficiência de absorção e utilização de nitrogênio da variedade BR-IRGA 410 e de dois ecótipos de arroz vermelho, em solução nutritiva. No estágio de início de diferenciação da panícula, os ecótipos de arroz vermelho apresentaram maior superfície

radicular e maior I_{max} do que a BR-IRGA 410, mostrando maior eficiência na absorção e utilização de nitrogênio.

A morfologia e a distribuição do sistema radicular provavelmente são mais importantes para a absorção daqueles nutrientes presentes em menores concentrações na solução do solo em relação à demanda do arroz, os quais seriam os mais limitantes em lavouras de alto rendimento de grãos. Esses nutrientes são absorvidos da solução em quantidades maiores do que o solo pode repor, o que leva à formação de uma zona de depleção próximo às raízes, fazendo com que devam ser supridos por difusão. A taxa de difusão é proporcional à área superficial das raízes. Além disto, uma maior dimensão e exploração de solo das raízes diminui a distância que o nutriente deve ser transportado até as raízes, o que também aumenta a taxa de difusão (Barber, 1984). A difusão também é facilitada por um maior conteúdo de água no solo, que diminui a tortuosidade do trajeto do nutriente em direção à raiz, sendo assim estimulada em solos alagados (Vahl, 1982).

No entanto, deve-se ressaltar que nem sempre uma maior absorção de nutrientes vai resultar em maior rendimento de grãos da cultura, porque isto depende também da utilização do nutriente na planta. Pode haver consumo de luxo, em que a planta absorve o nutriente e isto não é traduzido em aumento de rendimento (Epstein, 1972).

2.4. Cinética de absorção de nutrientes

A cinética de absorção de nutrientes foi proposta por Epstein & Hagen (1952), baseada na similaridade entre a relação dos íons com seus carregadores na membrana plasmática e a relação das enzimas com seus substratos. Os carregadores são sítios específicos na membrana plasmática, geralmente de constituição proteica, que se ligam aos íons e transportam-nos através da membrana, conferindo seletividade à absorção. O transporte de íons é controlado por uma cinética de saturação, assumindo um número finito de carregadores que podem ser ocupados (Barber, 1984). Epstein & Hagen (1952) desenvolveram equações que descrevem a absorção de nutrientes por raízes destacadas das plantas, e não por plantas intactas.

A equação que descreve o influxo líquido de um nutriente absorvido pela raiz de plantas intactas é a seguinte (Barber, 1984):

$$I_n = \frac{I_{\max} (C - C_{\min})}{K_m + (C - C_{\min})}$$

Onde:

I_n = influxo líquido;

I_{\max} = taxa máxima de absorção, em que todos os carregadores estão ocupados;

K_m = constante de Michaelis Menten: concentração do nutriente na solução em que ocorre a metade do I_{\max} ; indica o grau de afinidade do íon com o carregador na membrana plasmática;

C = concentração do nutriente na solução no momento considerado;

C_{\min} = concentração em que o influxo líquido é zero; ou seja, acima desta concentração ocorre a absorção do nutriente.

Esta equação descreve corretamente a absorção de nutrientes em baixas concentrações na solução do solo (0 a 0,2 mmol L⁻¹), o que ocorre na maioria dos solos brasileiros.

Para ocorrer maior absorção, é desejável que a planta apresente alto I_{\max} , baixa K_m (maior afinidade entre íon e carregador) e baixa C_{\min} .

Os parâmetros cinéticos I_{\max} , K_m e C_{\min} são determinados a partir do exaurimento dos nutrientes da solução nutritiva no tempo (curva de depleção), causado pela absorção pela planta, conforme método de Claassen & Barber (1974). Estes parâmetros são influenciados por fatores genéticos da planta e por condições ambientais. Os parâmetros cinéticos variam conforme diversos fatores: concentração do nutriente na solução, idade da planta, idade da raiz, luminosidade, temperatura e outros (Barber, 1984).

2.5. Crescimento radicular e resistência mecânica do solo

As condições do solo podem afetar o crescimento e a distribuição das raízes do arroz. O aprofundamento das raízes é limitado por fatores como

existência de camadas de solo compactadas, textura argilosa, alta densidade de sementeira, altas concentrações de nutrientes próximo à superfície do solo (principalmente de N) e ocorrência de substâncias tóxicas em profundidade (Morita & Yamazaki, 1993). O sistema de cultivo também influencia a distribuição das raízes. No sistema convencional, com sementeira em solo seco, ocorre um maior aprofundamento inicial das raízes, em busca de água. Após a inundação do solo, é estimulado o desenvolvimento radicular próximo à superfície. No sistema pré-germinado, com sementeira em solo úmido, as raízes desenvolvem-se mais superficialmente desde o início do cultivo (Lopes, 1991).

Solos mais argilosos ou com camadas compactadas apresentam maior resistência mecânica ao crescimento das raízes, restringindo a extensão e o aprofundamento do sistema radicular. Kono (1993) observou menor crescimento e penetração em profundidade do sistema radicular em diversos solos, à medida que aumentou o teor de argila. As raízes de arroz pararam de crescer quando submetidas a uma resistência à penetração de cerca de 10 kg cm⁻². Os solos argilosos apresentam maior proporção de microporos e menor de macroporos, obrigando as raízes a alargarem os poros em seu alongamento. As partículas de argila apresentam maior coesão, resistindo a este alargamento (Kono, 1993). Em solos compactados, além da resistência mecânica, o crescimento radicular é também limitado por causa de redução da difusão de oxigênio necessário ao desenvolvimento das raízes e pelo pouco movimento de água em profundidade (Slaton et al., 1990).

Estudando o comportamento de uma cultivar de arroz em dois solos, Beyrouthy et al. (1988) observaram que o comprimento e a densidade das raízes foram menores no solo que possuía uma camada compactada (com densidade do solo de 1,5 kg dm⁻³) e mais argilosa. As raízes também desenvolveram-se em menor profundidade no solo compactado, com cerca de 80% do comprimento radicular restrito aos 20 cm superficiais na fase de iniciação da panícula, comparado com 50% no solo não compactado. Slaton et al. (1990), trabalhando com os mesmos solos, verificaram que a variedade de arroz Bond apresentou maior comprimento radicular e maior presença de raízes em profundidade no solo compactado, em relação à linha experimental RU 8701084. A variedade Bond tendeu a aprofundar mais as raízes nos dois solos.

Como no estudo de Beyrouy et al. (1988), as raízes desenvolveram-se mais superficialmente no solo compactado. Slaton et al. (1990) e Beyrouy et al. (1988) não avaliaram absorção de nutrientes e rendimento de grãos em seus trabalhos.

Silva et al. (2000a), comparando rendimento de grãos da variedade BR-IRGA 410 em solução nutritiva e em dois solos (Planossolo e Gleissolo), obtiveram um rendimento cinco vezes superior no cultivo em solução nutritiva. Uma das hipóteses levantadas pelos autores para explicar esta diferença seria a da resistência mecânica ao crescimento radicular nos solos.

No entanto, em solo inundado a resistência mecânica do solo é menor, em função da fluidez que ele adquire. Assim, provavelmente a compactação do solo não é fator preponderante de redução de rendimento em lavouras de arroz no Rio Grande do Sul. Embora seja interessante a investigação da influência deste fator no crescimento radicular, não se considerou prioritária neste trabalho.

2.6. Tipos de cultivares de arroz irrigado por inundação

Como cultivares (genótipos) de arroz foram os tratamentos utilizados neste trabalho, torna-se importante discorrer sobre suas características.

As cultivares de arroz irrigado utilizadas no Rio Grande do Sul normalmente são classificadas em três tipos: tradicional, intermediário (americano) e moderno.

As cultivares do tipo tradicional, que predominaram no Estado até meados da década de 70, apresentam porte alto, folhas longas e decumbentes, ciclo médio ou longo e baixa capacidade de perfilhamento. Respondem menos à adubação nitrogenada, pois sofrem acamamento quando se aplicam altas doses de N. São plantas menos exigentes em condições de cultivo e mais competitivas com plantas daninhas. Apresentam um menor potencial de rendimento de grãos (IRGA, 2001).

As cultivares do tipo intermediário possuem baixa capacidade de perfilhamento e baixo vigor inicial. São mais exigentes do que as cultivares do tipo tradicional e respondem a doses maiores de N, mas têm menor resposta do que as do tipo moderno. Desenvolvem um porte médio, com folhas curtas e

semi-eretas. Também possuem um potencial de rendimento inferior aos genótipos modernos (IRGA, 2001).

O tipo moderno de plantas abrange cultivares de porte baixo (semi-anão ou filipino), folhas curtas e eretas (melhor aproveitamento da radiação solar), colmos fortes e alta capacidade de perfilhamento. Respondem a doses mais altas de N, porque são resistentes ao acamamento. Estas características resultam em maior potencial de rendimento do que os outros tipos de cultivares. As cultivares modernas predominam nas lavouras do Rio Grande do Sul desde a década de 80 (IRGA, 2001).

2.7. Hipótese

Com o objetivo de estudar a relação da morfologia e da distribuição de raízes de arroz irrigado por inundação com a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos, e tendo como base a revisão bibliográfica realizada, elaborou-se a seguinte hipótese:

Genótipos de arroz irrigado por inundação que desenvolvem raízes com maior comprimento e área superficial e maior exploração de solo em profundidade apresentam maior absorção de nutrientes, considerando que não ocorram diferenças quanto à cinética de absorção. Como consequência da maior absorção de nutrientes, esses genótipos apresentam maior rendimento de grãos, desde que não ocorra consumo de luxo.

Para testar esta hipótese, foram realizados os dois estudos descritos nos capítulos a seguir.

3. ESTUDO 1

Comprimento e arquitetura de raízes de genótipos de arroz em solução nutritiva e sua relação com absorção de nutrientes e produção de massa seca

3.1. Introdução

A morfologia e a distribuição das raízes do arroz irrigado por inundação no solo podem condicionar a absorção de nutrientes, o que pode estar relacionado ao rendimento de grãos da cultura. A arquitetura das raízes determina a ocorrência de uma distribuição mais superficial ou mais profunda do sistema radicular. A arquitetura das raízes é característica genética do arroz, mas é afetada pelas condições do solo em que as raízes se desenvolvem.

Neste trabalho procurou-se avaliar a morfologia e a arquitetura das raízes de genótipos de arroz em solução nutritiva, em que não há restrições ao crescimento das raízes, como substâncias tóxicas ou compactação do solo, e há maior controle sobre as concentrações dos nutrientes disponíveis às plantas. Procurou-se, assim, estudar a expressão genética do desenvolvimento das raízes das cultivares testadas.

Os objetivos deste estudo foram:

- comparar genótipos de arroz quanto à morfologia e arquitetura de raízes em cultivo em solução nutritiva;

- verificar se existe relação de morfologia e arquitetura de raízes de arroz com absorção de nutrientes e produção de massa seca em solução nutritiva.

3.2. Material e métodos

Realizou-se um experimento em solução nutritiva comparando cinco genótipos de arroz, tendo como suporte das plantas poliestireno granulado. Foram utilizados os genótipos IRGA 417 e IRGA 419 (modernos), EEA 406 (tradicional), Avaxi (híbrido, RiceTec, com tipo de planta semelhante ao moderno) e Bluebelle (americano), procurando abranger os diferentes tipos de cultivares.

Foram utilizados vasos de plástico com sete litros de capacidade, que foram preenchidos com poliestireno cristal granulado (Styron polystyrene, produzido por EDN Poliestireno do Sul Ltda.), material inerte e de densidade maior do que a da água, para criar um meio poroso de suporte para as raízes (Figura 1). Assim, assumiu-se que as raízes desenvolveram-se com uma arquitetura mais próxima da que ocorre no solo. As sementes foram germinadas em papel absorvente. Foi transplantada uma plântula com seis dias de idade para cada um dos 20 vasos utilizados, sendo a mesma fixada no próprio poliestireno. A composição da solução nutritiva foi idêntica à utilizada por Vahl et al. (1993), com as seguintes concentrações, em $\mu\text{mol L}^{-1}$: N-NH₄, 700; N-NO₃, 750; P, 96; K, 768; Ca, 1.000; Mg, 615; S, 993; Fe, 28; Mn, 1,2; Cu, 0,6; Zn, 0,5; Mo, 0,08; B, 29, e Cl, 1.922. A solução apresentou pH em torno de 5,3. Durante o cultivo, o volume de água perdido por transpiração foi repostado com água destilada e a solução foi renovada semanalmente. Foi mantida uma lâmina de solução nutritiva de 1,5 a 3 centímetros acima do nível do poliestireno. Utilizou-se o delineamento completamente casualizado, com quatro repetições. O experimento foi conduzido em casa de vegetação da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre – RS), nos meses de fevereiro e março de 2002 (Figura 2).

As plantas foram cultivadas por 18 dias após o transplante. No momento da colheita, os genótipos IRGA 417 e Avaxi estavam no estágio de 10 folhas (V 10, segundo Counce et al., 2000) e os demais no estágio de 8

folhas (V 8). Na colheita retirou-se a parte aérea e os vasos com as raízes foram colocados em uma estufa a 60° C, com o objetivo de que as raízes secas mantivessem a arquitetura com que se desenvolveram. A seguir separou-se o poliestireno das raízes, que foram então fotografadas. As imagens obtidas foram usadas para a medição dos ângulos internos formados pelas raízes, para avaliação da arquitetura radicular. A arquitetura também foi avaliada pela medição da distância entre o ponto de inserção das raízes mais superficiais e a extremidade da raiz mais profunda, na posição em que se encontrava no vaso, como forma de avaliar o aprofundamento no vaso. A parte aérea e as raízes foram secadas em estufa a 60°C até peso constante, para a determinação da massa seca. As raízes foram coloridas com corante rosa bengala e o seu comprimento foi avaliado pelo método de Tennant (1975). Foram determinados os teores de P e K na parte aérea, conforme Tedesco et al. (1995), como índices da capacidade das raízes em absorver estes nutrientes, que apresentam menor mobilidade no solo e são transportados por difusão (Barber, 1984).

Os resultados foram submetidos a análise da variância ($P < 0,05$), com a comparação entre médias dos tratamentos pelo teste de Duncan ($P < 0,05$). Também foram determinados os coeficientes de correlação entre o comprimento das raízes e a absorção de nutrientes e a produção de massa seca.



Figura 1. Poliestireno granulado utilizado como suporte para as plantas de arroz cultivadas em solução nutritiva.



Figura 2. Genótipos de arroz cultivados em solução nutritiva com suporte das plantas em poliestireno granulado, no dia da colheita do experimento (24 dias após a emergência).

3.3. Resultados e discussão

3.3.1. Morfologia e arquitetura das raízes

A variedade IRGA 417 apresentou maior comprimento das raízes do que a IRGA 419 e a Bluebelle. O híbrido Avaxi e a variedade EEA 406 apresentaram comportamento intermediário, não se diferenciando estatisticamente da IRGA 417, mas não desenvolvendo raízes mais compridas do que a IRGA 419 e a Bluebelle (Tabela 1 e Figura 3). No trabalho de Anghinoni et al. (1989) foram obtidos resultados semelhantes, em que a variedade moderna BR-IRGA 409 e a EEA 406 apresentaram maior comprimento das raízes do que a Bluebelle, não se diferenciando entre si. A Bluebelle foi a variedade de sistema radicular de menor dimensão, das quatro testadas. A morfologia das raízes foi avaliada apenas pela determinação do

comprimento das mesmas. A avaliação da área superficial e do raio médio das raízes foi prejudicada pela secagem das raízes antes de sua retirada dos vasos, o que inviabilizou a determinação do peso fresco, necessário para o cálculo desses parâmetros. Há casos em que um diferente raio médio pode fazer com que a relação de grandeza entre a área superficial das raízes das variedades não seja a mesma do comprimento das raízes, como ocorrido no trabalho de Teo et al. (1995 b), com variedades de arroz.

Todos os genótipos diferenciaram-se quanto à avaliação da arquitetura das raízes (Tabela 1 e Figura 3). O ângulo interno formado pelas raízes decresceu na seguinte ordem: Avaxi, IRGA 417, EEA 406, IRGA 419 e Bluebelle. Um maior ângulo interno indica a tendência da planta desenvolver raízes mais superficiais. Desta forma, analisando os extremos, o híbrido Avaxi apresentou a característica de desenvolver um sistema radicular mais superficial, enquanto a Bluebelle tende a aprofundar mais as raízes no solo. A distância da inserção das raízes até a extremidade da raiz mais profunda (aprofundamento) confirma, em termos gerais, os resultados da avaliação do ângulo interno. O híbrido Avaxi desenvolveu raízes mais superficiais, enquanto a EEA 406 e a Bluebelle aprofundaram mais as raízes no vaso. Isto concorda com a observação de Yoshida et al. (1982), de que variedades de porte alto e com menor perfilhamento, como a EEA 406, tendem a desenvolver raízes mais profundas. O ângulo interno e o aprofundamento correlacionaram-se negativamente ($r = -0,696$, significativo a 1%), mostrando que o ângulo interno foi bom indicador da profundidade das raízes no vaso.

Tabela 1. Comprimento, ângulo interno e aprofundamento das raízes de genótipos de arroz irrigado cultivados em solução nutritiva.

| Genótipos | Comprimento (cm planta ⁻¹) | Ângulo (°) | Aprofundamento (cm) |
|-----------|---|---------------|------------------------|
| IRGA 417 | 4436 a | 67 b | 17,1 c |
| Avaxi | 4142 ab | 90 a | 12,7 e |
| EEA 406 | 4126 ab | 61 c | 21,4 a |
| IRGA 419 | 3173 b | 58 d | 16,7 d |
| Bluebelle | 3144 b | 56 e | 20,4 b |

Médias de genótipos seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Duncan (P<0,05).

Obs.: Aprofundamento das raízes = distância entre o ponto de inserção das raízes mais superficiais e a extremidade da raiz mais profunda.



Figura 3. Arquitetura de raízes de genótipos de arroz irrigado cultivados em solução nutritiva: IRGA 417 (a), IRGA 419 (b), Avaxi (c), Bluebelle (d) e EEA 406 (e).

3.3.2. Absorção de nutrientes

A absorção de nutrientes foi avaliada pelo conteúdo de P e K presente na parte aérea das plantas (Tabela 2). Para ambos os nutrientes, o híbrido Avaxi apresentou maior conteúdo do que as outras variedades, que não se distinguiram entre si. O Avaxi apresentou o segundo maior comprimento das raízes em valores absolutos, não se diferenciando estatisticamente da IRGA 417 (Tabela 1), o que pode indicar uma relação entre comprimento das raízes e conteúdo de nutrientes na parte aérea. Isto é confirmado pela análise da correlação entre comprimento das raízes e conteúdo na parte aérea, cujos coeficientes foram $r = 0,676$ para o P e $r = 0,634$ para o K, ambos significativos a 1%. Teo & Beyrouy (1991), citados por Teo et al. (1995 b), também explicaram diferenças de absorção de nutrientes entre variedades de arroz irrigado pela variação do comprimento das raízes das plantas, em casa de vegetação. No entanto, Teo et al. (1995 b) não encontraram relação entre a morfologia radicular de três variedades de arroz e a absorção de N, P e K, avaliada pelo conteúdo dos nutrientes na parte aérea, em experimento de campo.

Tabela 2. Conteúdo de P e K na parte aérea de genótipos de arroz irrigado cultivados em solução nutritiva.

| Genótipos | P (mg planta ⁻¹) | K (mg planta ⁻¹) |
|-----------|------------------------------|------------------------------|
| Avaxi | 6,14 a | 35,6 a |
| EEA 406 | 4,60 b | 25,0 b |
| IRGA 417 | 4,50 b | 25,1 b |
| IRGA 419 | 4,30 b | 24,9 b |
| Bluebelle | 4,08 b | 18,9 b |

Médias de genótipos seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Duncan ($P < 0,05$).

A avaliação da absorção de nutrientes nas condições deste trabalho é mais próxima da situação que ocorre no campo. As partículas de poliestireno, embora não interagindo com os íons presentes na solução, proporcionam um trajeto mais tortuoso para o movimento de água e íons em direção às raízes, semelhante ao que ocorre nos poros do solo. Além disto, como o arroz

transporta oxigênio da parte aérea para as raízes através do aerênquima, não foi necessário utilizar aeração da solução nutritiva. A agitação da solução provocada pela aeração transporta os nutrientes até a superfície das raízes, diminuindo a importância da difusão (Gerloff & Gabelman, 1983). Contudo, é importante realizar a avaliação da absorção de nutrientes pelos genótipos de arroz em experimento em solo. No solo diversos fatores podem alterar a resposta dos genótipos quanto à absorção de nutrientes. Um deles é a interação dos íons com os colóides do solo (argila e matéria orgânica), que podem atuar tanto dificultando o suprimento dos nutrientes, pela retenção dos mesmos, como sendo fonte de nutrientes e originando o poder tampão do solo, repondo os íons absorvidos à solução do solo. A possível presença de substâncias tóxicas (como Fe e H₂S) no solo anaeróbico prejudica a absorção de nutrientes e o desenvolvimento radicular. Outros fatores são a atividade de microrganismos, que participam da decomposição da matéria orgânica e de reações de oxirredução de nutrientes, e impedimentos ao crescimento radicular (por exemplo, a existência de camadas compactadas). Além disto, no cultivo em solo ocorre exsudação de compostos orgânicos pela raízes, como resposta à resistência à penetração oferecida pelo solo (Marschner, 1986). Essa exsudação estimula a atividade microbiológica, que, por sua vez, afeta a disponibilidade dos nutrientes.

3.3.3. Produção de massa seca

Os genótipos diferenciaram-se quanto à produção de massa seca da parte aérea e massa seca total, não havendo diferenças na produção de massa seca das raízes (Tabela 3). O híbrido Avaxi apresentou maior produção de massa seca da parte aérea e a variedade Bluebelle menor produção, com as demais em posição intermediária. Quanto à massa seca total, o Avaxi produziu maior quantidade, com os demais genótipos não se diferenciando estatisticamente. O Avaxi, com um sistema radicular de maior comprimento (similar ao da IRGA 417), produziu maior quantidade de massa seca. Já a Bluebelle desenvolveu raízes de menor comprimento em valores absolutos, inferior estatisticamente ao da IRGA 417, e apresentou a menor produção de massa seca da parte aérea, sendo também inferior ao Avaxi quanto à produção

de massa seca total. A análise da correlação confirma a existência de relação entre comprimento das raízes e massa seca da parte aérea ($r = 0,697$, significativo a 1%) e entre comprimento das raízes e massa seca total ($r = 0,725$, significativo a 1%). Teo et al. (1995 b) não observaram diferenças quanto ao comprimento das raízes de três variedades de arroz e também não encontraram diferenças na produção de massa seca da parte aérea e total. A Figura 4 apresenta a massa verde da parte aérea dos genótipos no dia da colheita do experimento.



Figura 4. Massa verde da parte aérea dos genótipos de arroz no dia da colheita do experimento (24 dias após a emergência). Da esquerda para a direita: IRGA 417, Avaxi, Bluebelle, IRGA 419 e EEA 406.

Os genótipos Avaxi e IRGA 419 apresentaram maior relação parte aérea/raiz (Tabela 3). A EEA 406 e a Bluebelle tiveram os menores valores dessa relação, mostrando a maior alocação de recursos da planta para o crescimento radicular por estas variedades. Segundo Morita & Yamazaki (1993), ocorre correlação positiva entre o desenvolvimento das raízes e da parte aérea do arroz.

Tabela 3. Massa seca (MS) produzida e relação parte aérea/raiz de genótipos de arroz irrigado cultivados em solução nutritiva.

| Genótipos | M S parte aérea (g planta ⁻¹) | M S raízes (g planta ⁻¹) | M S total (g planta ⁻¹) | Parte aérea/raiz |
|-----------|--|---|--|---------------------|
| Avaxi | 0,95 a | 0,22 a | 1,16 a | 4,44 a |
| IRGA 417 | 0,73 b | 0,19 a | 0,92 b | 3,84 ab |
| EEA 406 | 0,67 b | 0,20 a | 0,87 b | 3,41 b |
| IRGA 419 | 0,67 b | 0,16 a | 0,83 b | 4,23 a |
| Bluebelle | 0,49 c | 0,21 a | 0,70 b | 2,49 c |

Médias de genótipos seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Duncan (P<0,05).

3.3.4. Conclusões

1. Os genótipos de arroz irrigado diferenciaram-se quanto à morfologia e à arquitetura das raízes. Em termos gerais, os genótipos modernos (Avaxi, IRGA 417 e IRGA 419) apresentaram arquitetura das raízes mais superficial e os antigos (EEA 406 e Bluebelle) arquitetura mais profunda. Quanto à morfologia das raízes, não foi observada relação do comprimento das raízes com o tipo de cultivar.
2. O trabalho indicou a existência de relação da morfologia das raízes com a absorção de nutrientes e a produção de massa seca pelos genótipos de arroz irrigado. Os resultados indicam que plantas com sistema radicular de maior comprimento podem absorver maior quantidade de nutrientes e produzir maior quantidade de matéria seca.

4. ESTUDO 2

Morfologia e distribuição de raízes de arroz no solo e sua relação com absorção de nutrientes e rendimento de grãos

4.1. Introdução

O estudo 1, realizado em solução nutritiva, identificou diferenças entre os genótipos de arroz quanto à morfologia e à arquitetura das raízes e a ocorrência de relação entre o comprimento das raízes e a absorção de nutrientes e a produção de massa seca. No entanto, estes resultados precisam ser averiguados em trabalho de campo, onde fatores que ocorrem no solo (substâncias tóxicas, compactação, microrganismos e outros) podem afetar o crescimento radicular, a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos e a relação entre os mesmos. Além disto, em experimento de campo é possível avaliar a distribuição das raízes no solo e comparar com a arquitetura das raízes avaliada em solução nutritiva.

Neste experimento avaliou-se a campo a morfologia e a distribuição das raízes no solo dos mesmos genótipos estudados em solução nutritiva no estudo 1, com exceção da variedade IRGA 419. Também foi determinado o rendimento de grãos e sua relação com morfologia e distribuição das raízes e absorção de nutrientes.

Os objetivos deste estudo foram:

- comparar genótipos de arroz quanto à morfologia e à distribuição de raízes no solo;
- estudar se existe relação de morfologia e distribuição de raízes de genótipos de arroz com absorção de nutrientes e rendimento de grãos.

4.2. Material e métodos

Foi realizado um experimento de campo, comparando quatro genótipos: IRGA 417 (moderno), EEA 406 (tradicional), Avaxi (híbrido, RiceTec) e Bluebelle (americano), procurando abranger os diferentes tipos de cultivares (Figura 5). O cultivo foi conduzido em um Gleissolo Háptico distrófico na Estação Experimental do Arroz (EEA) do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), em Cachoeirinha (RS).

As plantas foram cultivadas no sistema convencional, sendo utilizadas uma aração e duas gradagens no preparo do solo. Foi realizada a amostragem e a análise química do solo, segundo Tedesco et al. (1995), obtendo-se os seguintes resultados: argila 170 g dm^{-3} ; pH 5,2; índice SMP 6,0; P $11,4 \text{ mg dm}^{-3}$; K 21 mg dm^{-3} ; matéria orgânica 9 g dm^{-3} ; Al $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Ca $1,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg $0,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, CTC efetiva $2,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e CTC a pH 7 de $3,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. A adubação do solo foi feita conforme as recomendações da Comissão... (1995), com a aplicação de 10 kg ha^{-1} de N, 20 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 60 kg ha^{-1} de K_2O no dia da semeadura. A adubação foi realizada a lanço, sem incorporação. Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. As dimensões das parcelas foram de $1,8 \times 8 \text{ m}$ (Figura 6). A semeadura foi realizada em 13/12/2002, cerca de um mês após o período recomendado, em função do excesso de chuvas ocorrido. Os genótipos foram semeados na densidade de 500 sementes aptas por m^2 , em linhas espaçadas de 20 cm. A emergência ocorreu em 20/12/2002. O solo foi inundado 17 dias após a emergência, quando as plantas estavam no estágio de 3 folhas (V3, segundo Counce et al., 2000). Foi mantida uma lâmina de água de 10 a 15 cm até 15 dias após a plena floração. Para o controle de plantas daninhas, foram utilizados os herbicidas propanil, na dose de 2,16 kg de ingrediente ativo por hectare, e quinclorac, na dose de 375 g de ingrediente ativo por hectare. A

adubação nitrogenada em cobertura foi aplicada em duas vezes, no início do perfilhamento (V4 a V5) e na diferenciação da panícula (R1); as doses foram diferenciadas por genótipo, conforme recomendado pela Comissão... (1995): 70 kg ha⁻¹ de N para IRGA 417 e Avaxi, 55 kg ha⁻¹ para Bluebelle e 40 kg ha⁻¹ para EEA 406.

Antes da inundação do experimento, foi instalado na entrelinha de duas parcelas de cada genótipo um dispositivo semelhante ao descrito em Silva et al. (2000 b), que permite a coleta da solução do solo em diversas profundidades. O dispositivo consiste de um cano de PVC, com tubos menores horizontais acoplados que ficaram posicionados no centro das profundidades citadas na divisão da amostra das raízes, descrita a seguir (2,5; 12,5; 25 e 35 cm). Os tubos horizontais foram conectados a mangueiras de plástico que proporcionam a coleta da solução do solo (Figura 7) . Assim, foi acompanhada a variação da concentração dos nutrientes N, K e Ca em diferentes profundidades. A solução foi coletada 18 dias após a inundação do solo (plantas em V6, exceto a IRGA 417, que estava em V7) e na emissão da panícula (R3). Foram realizadas as seguintes determinações na solução: pH, condutividade elétrica, N, K e Ca, conforme Tedesco et al. (1995).

As raízes foram amostradas no estágio de enchimento de grãos (R6 a R7, segundo Counce et al., 2000). A amostragem das raízes foi realizada pelo método do monólito (Bohm, 1979), retirando-se uma porção de solo com raízes de 20 cm de largura, 5 cm de espessura e 40 cm de profundidade (Figura 8). O bloco de terra com raízes foi dividido em quatro camadas, nas profundidades de 0 a 5, 5 a 20, 20 a 30 e 30 a 40 cm. Cada camada foi lavada isoladamente com jatos de água em um conjunto de duas peneiras para separar as raízes, sendo a superior com malhas de 2,0 mm e a inferior com malhas de 1,19 mm, conforme realizado por Lopes et al. (1994). Foi determinado o peso fresco das raízes e medido o comprimento das raízes presentes em cada camada pelo método de Tennant (1975). A área superficial e o raio médio das raízes foram calculados conforme Shenk & Barber (1979). A densidade de raízes (comprimento das raízes / volume de solo) nas diferentes profundidades foi calculada conforme Yoshida (1981). A percentagem de raízes presentes em cada camada foi calculada da seguinte forma: (comprimento das raízes na camada / comprimento das raízes em todo o monólito) x 100. A

massa seca das raízes foi determinada após secagem a 60°C até peso constante. Também foram analisados os teores de K e Ca trocáveis no solo dos monólitos, nas mesmas duas parcelas por genótipo em que foi analisada a solução do solo. Foi coletada uma amostra de 20 g no centro do monólito, em cada camada.

A parte aérea foi coletada na floração (IRGA 417 em R5, outros genótipos em R4) e na maturação (R9), sendo amostrada uma área de 0,25 m², escolhida ao acaso na parcela. As amostras foram secas em estufa a 60°C até peso constante, para a determinação da massa seca. Na amostragem na maturação a massa seca dos grãos foi considerada na massa seca da parte aérea. Foram analisados os teores dos nutrientes N, P e K na parte aérea, segundo Tedesco et al. (1995). O P e o K são nutrientes transportados por difusão, sendo sua absorção mais influenciada pela morfologia e distribuição radicular. O N é o nutriente mais limitante para o arroz e também é, em parte, suprido por difusão, embora o seja majoritariamente por fluxo de massa (Barber, 1984). O rendimento de grãos foi avaliado em área de 2 m², sendo a colheita realizada com cerca de 115 dias após a emergência.

Os resultados foram submetidos a análise da variância ($P < 0,05$), com a comparação entre médias dos tratamentos pelo teste de Duncan ($P < 0,05$). Além disso, foram analisadas as correlações dos parâmetros morfológicos das raízes e da densidade radicular em diferentes profundidades com a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5. Genótipos de arroz irrigado cultivados em experimento de campo, no estágio de floração: a) Avaxi (híbrido, RiceTec); b) Bluebelle (americano); c) IRGA 417 (moderno); d) EEA 406 (tradicional).



Figura 6. Genótipos de arroz irrigado cultivados em experimento de campo, no estágio de seis folhas. Em destaque, um dos coletores de solução do solo instalados na entrelinha do arroz.

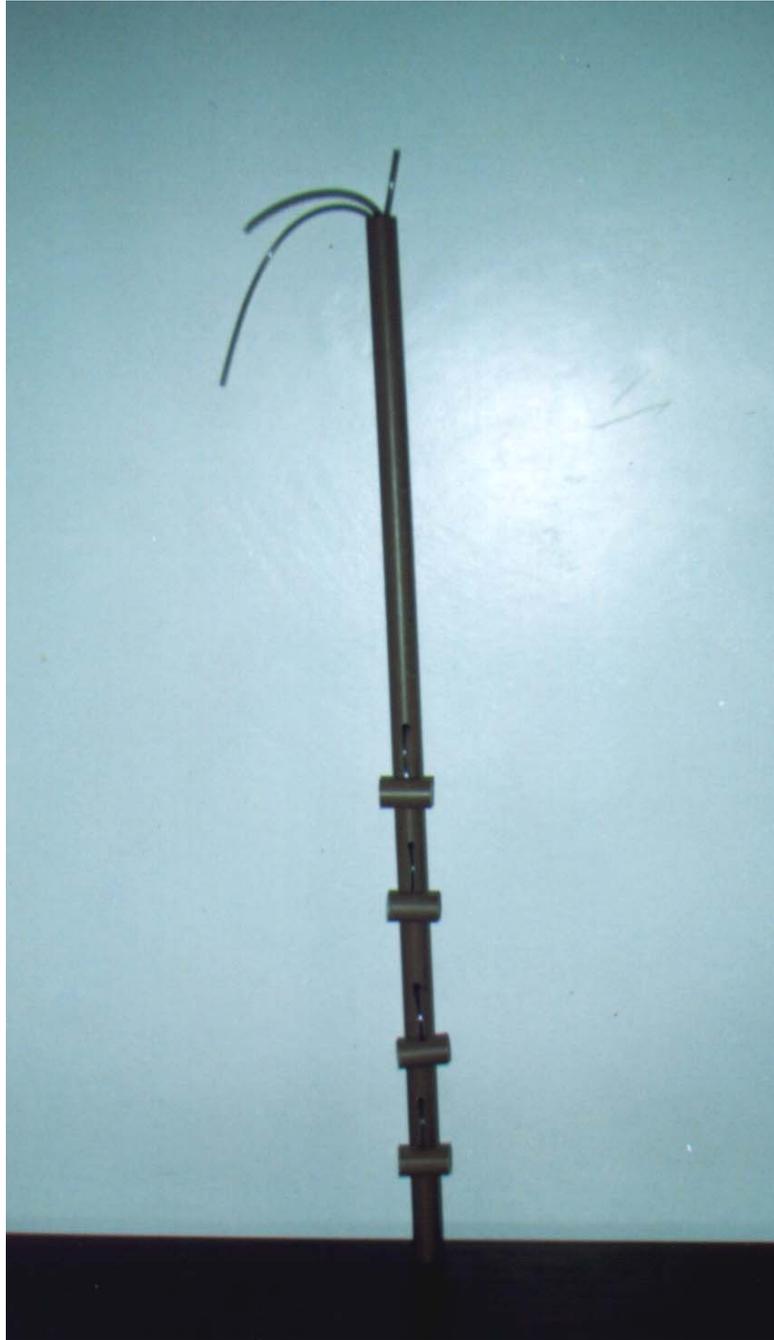


Figura 7. Dispositivo utilizado para a coleta da solução do solo na entrelinha do arroz, nas profundidades de 2,5; 12,5; 25 e 35 cm.



Figura 8. Coleta de monólitos para avaliação da morfologia e distribuição de raízes do arroz, no estágio de enchimento de grãos.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Rendimento de grãos e produção de massa seca

A variedade IRGA 417 e o híbrido Avaxi apresentaram maior rendimento de grãos (Tabela 4). Este resultado já era esperado, porque estes genótipos possuem um potencial de rendimento muito superior à Bluebelle e à EEA 406. Os genótipos do tipo moderno, dentro do qual enquadram-se a IRGA 417 e o Avaxi, apresentam porte baixo, folhas curtas e eretas (melhor aproveitamento da radiação solar), colmos fortes (resistentes ao acamamento) e alta capacidade de perfilhamento, respondendo a maiores doses de N e atingindo maiores rendimentos (IRGA, 2001). O rendimento de grãos obtido ficou abaixo do esperado para parcelas experimentais, provavelmente por causa da semeadura em período posterior ao recomendado. A semeadura após o período recomendado implica em limitações climáticas ao rendimento, como menor disponibilidade de radiação solar e possibilidade de baixas temperaturas na floração (IRGA, 2001). No caso deste experimento, o principal fator limitante deve ter sido a menor disponibilidade de radiação solar. Como comparativo, Lopes (2004, informação verbal), em experimento na mesma EEA-IRGA em Cachoeirinha, semeado na época recomendada (em 11/11/2003), obteve rendimentos de 8.151 kg ha⁻¹ com a IRGA 417, 6.557 kg ha⁻¹ com a EEA 406 e 6.462 kg ha⁻¹ com a Bluebelle. O potencial de rendimento da IRGA 417 situa-se entre 8.000 e 10.000 kg ha⁻¹ (IRGA, 2004) e o do Avaxi chega a 12.000 kg ha⁻¹ (RiceTec, 2004).

Tabela 4. Rendimento de grãos de genótipos de arroz irrigado em experimento de campo.

| Genótipos | Rendimento (kg ha ⁻¹) |
|-----------|-----------------------------------|
| IRGA 417 | 6238 a |
| Avaxi | 5981 a |
| Bluebelle | 3860 b |
| EEA 406 | 3278 b |

Médias de genótipos seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Duncan (P<0,05).

A IRGA 417 e o Avaxi também produziram maior quantidade de massa seca da parte aérea na floração, não havendo diferenças significativas na maturação (Tabela 5). Com relação à massa seca das raízes, que foram coletadas no enchimento de grãos, não ocorreram diferenças entre os genótipos.

Tabela 5. Produção de massa seca da parte aérea (na floração e maturação) e das raízes (no enchimento de grãos) de genótipos de arroz irrigado em experimento de campo.

| Genótipos | Massa seca da parte aérea (g m ⁻²) | |
|-----------|--|-----------|
| | Floração | Maturação |
| IRGA 417 | 1325 a | 1550 a |
| Avaxi | 1315 a | 1485 a |
| Bluebelle | 1020 b | 1375 a |
| EEA 406 | 990 b | 1265 a |
| Genótipos | Massa seca das raízes (g m ⁻²) | |
| | Enchimento de grãos | |
| EEA 406 | 852 a | |
| Avaxi | 730 a | |
| Bluebelle | 649 a | |
| IRGA 417 | 586 a | |

Médias de genótipos seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Duncan (P<0,05).

4.3.2. Morfologia das raízes

Os resultados da avaliação das características morfológicas das raízes em todo o monólito (de 0 a 40 cm de profundidade) encontram-se na Tabela 6. O comprimento das raízes, expresso pela densidade de raízes, distinguiu os genótipos em dois grupos, com a variedade EEA 406 e o híbrido Avaxi apresentando maior densidade do que as variedades Bluebelle e IRGA 417. No estudo 1, em que foram avaliadas plantas em V8 a V10 cultivadas em solução nutritiva, a IRGA 417 apresentou o maior comprimento das raízes e a Bluebelle o menor, com Avaxi e EEA 406 em posição intermediária. Os resultados do trabalho em discussão concordam parcialmente com os obtidos por Anghinoni et al. (1989), em solução nutritiva, em que a variedade EEA 406

apresentou maior comprimento das raízes do que a Bluebelle. Porém, no trabalho de Anghinoni et al. (1989) a variedade moderna BR-IRGA 409 desenvolveu raízes mais compridas do que a Bluebelle, o que não aconteceu com a IRGA 417.

Com relação ao raio médio das raízes, não houve diferenças entre os genótipos testados (Tabela 6). As variedades EEA 406 e Bluebelle também não se diferenciaram quanto ao raio médio das raízes no trabalho de Anghinoni et al. (1989).

A variedade EEA 406 apresentou maior área superficial das raízes do que a Bluebelle e a IRGA 417, com o híbrido Avaxi não se diferenciando destes dois grupos (Tabela 6). De forma semelhante ao comprimento das raízes, nos resultados de Anghinoni et al. (1989) a EEA 406 também desenvolveu raízes de maior área superficial do que a Bluebelle. No entanto, a variedade moderna utilizada (BR-IRGA 409) apresentou raízes com maior área superficial do que a Bluebelle, o que não ocorreu com a IRGA 417 neste trabalho.

As avaliações da morfologia das raízes em solo e em solução nutritiva podem apresentar resultados diferentes. No solo podem ocorrer fatores como compactação e presença de substâncias tóxicas, que prejudicam o desenvolvimento das raízes. No Gleissolo onde foi realizado o experimento é possível a ocorrência de concentrações tóxicas de Fe, mas é improvável a toxidez de H₂S. A toxidez de H₂S pode ocorrer em solos com baixas concentrações de Fe, como solos arenosos ou degradados (o que não é o caso deste experimento), pois o sulfeto originado da redução do sulfato tende a precipitar como FeS em solos com Fe solúvel (Ponnamperuma, 1972; Sousa et al., 2000). Assim, genótipos mais tolerantes a estas condições adversas seriam beneficiados, apresentando maior desenvolvimento radicular.

Tabela 6. Densidade de raízes, raio médio e área superficial das raízes de genótipos de arroz irrigado, coletadas no enchimento de grãos, em experimento de campo.

| Genótipos | Densidade (cm cm ⁻³) | Raio médio (mm) | Área (m ² raiz m ⁻² área lavoura) |
|-----------|-------------------------------------|--------------------|---|
| EEA 406 | 29,2 a | 0,134 a | 97,9 a |
| Avaxi | 27,3 a | 0,134 a | 82,3 ab |
| Bluebelle | 20,5 b | 0,134 a | 69,0 b |
| IRGA 417 | 19,9 b | 0,124 a | 66,8 b |

Médias de genótipos seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Duncan (P<0,05).

As características contrastantes da IRGA 417 e do Avaxi, genótipos de maior rendimento de grãos, quanto à morfologia das raízes, indicam não haver relação entre estas características e o rendimento de grãos. O Avaxi enquadrou-se no grupo de genótipos com maior densidade de raízes e a IRGA 417 no de menor densidade. Outro exemplo é o comportamento da EEA 406, que apresentou maior densidade de raízes e maior área superficial das raízes, e possuiu menor rendimento de grãos do que a IRGA 417 e o Avaxi. A análise da correlação entre o rendimento de grãos e a densidade de raízes em todo o monólito confirma esta tendência: $r = -0,294$, não significativo a 5 % de probabilidade. No entanto, a obtenção de rendimentos de grãos abaixo do esperado prejudicou a análise da relação dos mesmos com a morfologia das raízes. Caso os rendimentos fossem maiores, haveria maior demanda nutricional e maior competição por nutrientes por raízes adjacentes. Nesta situação um sistema radicular de maior extensão poderia ser uma vantagem competitiva e proporcionar maiores rendimentos.

A massa seca da parte aérea também não se mostrou dependente da morfologia das raízes. Não houve correlação significativa entre a massa seca da parte aérea e a densidade de raízes em todo o monólito, ocorrendo $r = -0,256$ na amostragem na floração e $r = -0,235$ na maturação, ambos não significativos a 5 % de probabilidade.

4.3.3. Distribuição das raízes no solo

Os genótipos apresentaram uma arquitetura de raízes superficial, como pode-se observar pela percentagem do comprimento das raízes presente em cada camada (Tabela 7). No entanto, o híbrido Avaxi e a variedade EEA 406 desenvolveram raízes mais superficiais do que a IRGA 417 e a Bluebelle, com 92,8 % (Avaxi) e 91,3 % (EEA 406) do comprimento das raízes presente na profundidade de 0 a 20 cm, contra 86,6 % da IRGA 417 e 84,2 % da Bluebelle. O Avaxi apresentou a maior percentagem de raízes de 0 a 5 cm de profundidade e a menor percentagem de 20 a 40 cm, caracterizando-se como o genótipo de arquitetura de raízes mais superficial. O Avaxi também foi o genótipo de raízes mais superficiais no experimento em solução nutritiva (estudo 1), enquanto a Bluebelle e a EEA 406 apresentaram raízes com maior aprofundamento no vaso. Como no caso da morfologia, a distribuição das raízes também pode ser diferente no solo em relação à solução nutritiva, em função de fatores como compactação e ocorrência de substâncias tóxicas. As percentagens obtidas são semelhantes às encontradas por Lopes et al. (1994) e Macedo et al. (1999), em experimento de campo no mesmo solo da EEA – IRGA. Lopes et al. (1994) observaram que cerca de 55 % do comprimento das raízes da variedade moderna BR-IRGA 409 encontravam-se de 0 a 5 cm de profundidade e 87 % de 0 a 20 cm. Estes resultados quase coincidem com o comportamento da variedade moderna IRGA 417, com 42,6 % do comprimento das raízes de 0 a 5 cm e 86,6 % de 0 a 20 cm. Em trabalho em solo, com avaliação das raízes até 40 cm de profundidade, Teo et al. (1995 b) obtiveram resultado semelhante, com cerca de 90 % do comprimento das raízes de três variedades de arroz irrigado situados na camada de 0 a 20 cm. A variedade tradicional EEA 406, de porte alto e baixa capacidade de perfilhamento, não desenvolveu raízes mais profundas, discordando da tendência observada por Yoshida et al. (1982) para este tipo de planta.

Tabela 7. Distribuição percentual do comprimento das raízes de genótipos de arroz irrigado em quatro camadas do solo, sendo as raízes coletadas no enchimento de grãos.

| Camada do solo cm | Genótipo | | | |
|----------------------|----------|---------|-----------|----------|
| | Avaxi | EEA 406 | Bluebelle | IRGA 417 |
| 0 - 5 | 60,1 | 46,3 | 29,9 | 42,6 |
| 5 - 20 | 32,8 | 45,0 | 54,3 | 44,0 |
| 20 - 30 | 5,0 | 6,7 | 12,0 | 8,1 |
| 30 - 40 | 2,1 | 2,0 | 3,8 | 5,3 |

Obs.: Raízes acima do solo foram incluídas na camada de 0 a 5 cm de profundidade.

A densidade de raízes em cada camada encontra-se na Tabela 8. Os valores de densidade de raízes obtidos estão próximos dos observados por Lopes et al. (1994), que avaliaram a distribuição das raízes da variedade BR-IRGA 409 no solo até a profundidade de 30 cm. Os valores também são semelhantes aos referidos por Yoshida (1981) e aos obtidos por Teo et al. (1995 b), em que a densidade de raízes variou de 93 cm cm^{-3} na camada de 0 a 5 cm de profundidade para 2 cm cm^{-3} na camada de 35 a 40 cm. A densidade de raízes decresceu com o aumento da profundidade, havendo uma concentração de raízes na superfície. Entre os genótipos, houve diferenças significativas estatisticamente apenas na camada de 0 a 5 cm, em que Avaxi e EEA 406 apresentaram maior densidade de raízes, concordando com sua arquitetura mais superficial. Nas demais camadas, em valores absolutos a Bluebelle desenvolveu raízes mais compridas e o Avaxi as de menor comprimento, mas estas diferenças não foram significativas estatisticamente. Isto é explicado pela variabilidade entre as repetições do mesmo tratamento, expressa pelo elevado coeficiente de variação (42,9 %), ao contrário da densidade de raízes em todo o monólito, que apresentou coeficiente de variação de 15,7 %. Para se conseguir uma maior discriminação dos tratamentos, seria necessário aumentar o número de monólitos por parcela ou o tamanho do monólito.

Tabela 8. Densidade de raízes de genótipos de arroz irrigado em quatro camadas do solo, sendo as raízes coletadas no enchimento de grãos.

| Camada do solo cm | Genótipo | | | |
|----------------------|----------|---------|-----------|----------|
| | Avaxi | EEA 406 | Bluebelle | IRGA 417 |
| 0 - 5 | 137,6 a | 108,9 a | 48,8 b | 68,5 b |
| 5 - 20 | 22,1 a | 34,9 a | 29,7 a | 23,5 a |
| 20 - 30 | 5,1 a | 7,6 a | 10,0 a | 6,2 a |
| 30 - 40 | 2,1 a | 2,3 a | 3,1 a | 3,9 a |

Médias de genótipos seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem pelo teste de Duncan ($P < 0,05$).

O rendimento de grãos não foi determinado pela distribuição das raízes no solo. Os genótipos de maior rendimento tiveram comportamento contrastante: o Avaxi apresentou distribuição das raízes mais superficial e a IRGA 417 distribuição mais profunda; da mesma forma, os genótipos de menor rendimento, Bluebelle e EEA 406, também desenvolveram raízes de distribuição contrastante. A correlação do rendimento de grãos com a densidade de raízes nas camadas estudadas não foi significativa nas camadas de 0 a 5 cm e 30 a 40 cm, enquanto foi negativa e significativa nas demais camadas (Tabela 9). Porém, como no caso da morfologia das raízes, deve-se ressaltar que a obtenção de rendimentos abaixo do esperado reduziu a competição por nutrientes. Numa situação de maior competição, genótipos com maior aprofundamento das raízes poderiam ser beneficiados, atingindo maior rendimento de grãos.

Tabela 9. Correlações do rendimento de grãos dos genótipos de arroz com a densidade de raízes nas quatro camadas de solo estudadas.

| | Camada do solo | | | |
|------------|----------------|-----------|----------|----------|
| | 0-5 cm | 5-20 cm | 20-30 cm | 30-40 cm |
| Rendimento | 0,083 NS | -0,711 ** | -0,544 * | 0,195 NS |

NS = r não significativo

* = r significativo a 5 % de probabilidade

** = r significativo a 1 % de probabilidade

4.3.4. Absorção de nutrientes

A absorção de nutrientes foi avaliada através do conteúdo de N, P e K na parte aérea, nos estádios de floração e maturação (Tabela 10). Ocorreram poucas diferenças significativas estatisticamente entre os genótipos. Na floração, a IRGA 417 e o Avaxi apresentaram maior conteúdo de N do que a Bluebelle, sendo que a IRGA 417 também superou a EEA 406. A outra diferença observada foi com relação ao conteúdo de K na maturação, em que a IRGA 417 e o Avaxi absorveram maior quantidade do que a EEA 406, com a Bluebelle em posição intermediária. Em ambos os casos, os genótipos do tipo moderno (IRGA 417 e Avaxi) apresentaram maior conteúdo de nutrientes. No estudo 1, em solução nutritiva, o híbrido Avaxi também absorveu maior quantidade de P e K, não havendo diferenças entre os demais genótipos.

Tabela 10. Conteúdo de N, P e K na parte aérea de genótipos de arroz irrigado, na floração e maturação, em experimento de campo.

| Genótipos | Floração | | |
|-----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | N (g m ⁻²) | P (g m ⁻²) | K (g m ⁻²) |
| IRGA 417 | 10,9 a | 3,1 a | 20,9 a |
| Avaxi | 10,2 ab | 3,5 a | 18,0 a |
| EEA 406 | 8,3 bc | 2,7 a | 16,7 a |
| Bluebelle | 7,6 c | 2,6 a | 16,1 a |
| Genótipos | Maturação | | |
| | N (g m ⁻²) | P (g m ⁻²) | K (g m ⁻²) |
| IRGA 417 | 11,4 a | 2,9 a | 16,1 a |
| Avaxi | 10,3 a | 3,2 a | 15,6 a |
| Bluebelle | 9,0 a | 2,9 a | 14,7 ab |
| EEA 406 | 8,9 a | 2,6 a | 11,6 b |

Médias de genótipos seguidas de mesma letra minúscula não diferem pelo teste de Duncan (P<0,05).

As características dos genótipos de maior absorção de N e K, quando ocorreram diferenças, indicam não haver relação de morfologia e distribuição das raízes com a absorção, pois os mesmos tiveram

comportamento contrastante. O Avaxi apresentou maior densidade radicular em todo o monólito (de 0 a 40 cm de profundidade) e arquitetura das raízes mais superficial, enquanto a IRGA 417 apresentou menor densidade radicular e aprofundou mais as raízes. Raciocinando inversamente, na maioria dos casos não houve diferença no conteúdo de nutrientes, mas os genótipos diferenciaram-se quanto à morfologia e distribuição das raízes. Outra indicação é o comportamento da EEA 406, que possuiu maior densidade radicular e maior área superficial das raízes, o que possibilitaria maior acesso aos nutrientes e maior número de sítios de absorção. No entanto, não absorveu maior quantidade de P e K, nutrientes supridos por difusão e mais afetados pela morfologia das raízes, sendo inclusive superada por IRGA 417 e Avaxi na absorção de K na maturação. A análise das correlações confirma, em termos gerais, a não ocorrência da relação de morfologia e distribuição das raízes com a absorção de nutrientes. As correlações do conteúdo de N, P e K com os parâmetros morfológicos densidade radicular, raio médio e área superficial de raízes foram todas não significativas (Tabela 11).

Tabela 11. Correlações do conteúdo de N, P e K na parte aérea com densidade radicular, raio médio e área superficial de raízes.

| Floração | | | |
|-----------|-----------|------------|-----------|
| Nutriente | Densidade | Raio médio | Área |
| N | -0,188 NS | 0,297 NS | -0,133 NS |
| P | -0,075 NS | 0,196 NS | -0,054 NS |
| K | -0,333 NS | 0,365 NS | -0,279 NS |
| Maturação | | | |
| Nutriente | Densidade | Raio médio | Área |
| N | -0,077 NS | 0,236 NS | 0,002 NS |
| P | -0,037 NS | 0,066 NS | -0,026 NS |
| K | -0,496 NS | 0,301 NS | -0,463 NS |

NS = r não significativo

No estudo 1, realizado em solução nutritiva, houve correlação significativa entre absorção de P e K e comprimento das raízes dos genótipos de arroz. Porém, na solução nutritiva não existem fatores importantes no solo, como interação dos íons com os colóides do solo, presença de substâncias

tóxicas, atividade de microrganismos e impedimentos ao crescimento radicular, que podem alterar a resposta dos genótipos quanto à absorção de nutrientes. Além disto, no trabalho em solução nutritiva as plantas foram avaliadas em estágio anterior, quando estavam em V8 a V10 (24 dias após a germinação). Teo & Beyrouthy (1991), citados por Teo et al. (1995 b), explicaram as diferenças de absorção de nutrientes em variedades de arroz irrigado pela variação do comprimento das raízes das plantas, em casa de vegetação. Porém, os resultados de Teo et al. (1995 b) concordam com os obtidos neste trabalho, pois os autores não observaram relação entre a morfologia radicular de três variedades de arroz e a absorção de N, P e K em experimento de campo.

Para avaliar a relação entre conteúdo de N, P e K e a distribuição das raízes no solo realizou-se a análise da correlação do conteúdo destes nutrientes com a densidade de raízes nas quatro camadas estudadas (Tabela 12). Não houve nenhuma correlação significativa, com exceção daquela do conteúdo dos nutrientes na floração com a densidade de raízes de 5 a 20 cm de profundidade (que foi negativa, significativa a 5 %). Assim, a distribuição das raízes no solo não foi determinante da absorção de N, P e K.

Tabela 12. Correlações do conteúdo de N, P e K na parte aérea com a densidade de raízes nas quatro camadas de solo estudadas.

| Floração | | | | |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Camada do solo | | | | |
| Nutriente | 0-5 cm | 5-20 cm | 20-30 cm | 30-40 cm |
| N | 0,087 NS | -0,505 * | -0,412 NS | 0,060 NS |
| P | 0,217 NS | -0,525 * | -0,360 NS | -0,171 NS |
| K | -0,071 NS | -0,531 * | -0,272 NS | 0,249 NS |
| Maturação | | | | |
| Camada do solo | | | | |
| Nutriente | 0-5 cm | 5-20 cm | 20-30 cm | 30-40 cm |
| N | -0,095 NS | 0,078 NS | -0,260 NS | 0,140 NS |
| P | 0,007 NS | -0,021 NS | -0,273 NS | -0,133 NS |
| K | -0,327 NS | -0,330 NS | -0,264 NS | 0,128 NS |

NS = r não significativo

* = r significativo a 5 % de probabilidade

Possivelmente, a absorção de N, P e K pelos genótipos testados esteja associada a características fisiológicas das raízes relativas à afinidade da membrana plasmática com os nutrientes, que são avaliadas pelos parâmetros cinéticos de absorção (Barber, 1984). Genótipos que apresentam maior I_{max} , menor K_m e menor C_{min} conseguem absorver maior quantidade de nutrientes. O parâmetro I_{max} é mais importante em concentrações maiores do nutriente na solução do solo, enquanto K_m e C_{min} influenciam a absorção em concentrações menores (Barber, 1984). Teo et al. (1995 b) não encontraram relação entre a morfologia radicular de três variedades de arroz e a absorção de N, P e K em experimento de campo e relacionaram a variação de absorção observada a diferenças nos parâmetros cinéticos de absorção, determinados em experimento anterior (Teo et al., 1992). Anghinoni et al. (1989) compararam quatro variedades de arroz, em solução nutritiva, quanto à cinética de absorção de P, K, Ca e Mg. A variedade Bluebelle apresentou parâmetros cinéticos mais favoráveis para a absorção de nutrientes do que as demais, compensando o menor desenvolvimento radicular apresentado.

Outro fator que pode mascarar diferenças de absorção é a capacidade de translocação dos nutrientes das raízes para a parte aérea que possuem os genótipos. Um genótipo pode absorver maior quantidade de nutrientes e estes ficarem retidos nas raízes, sendo que neste trabalho foi analisado apenas o teor de nutrientes na parte aérea. Por exemplo, Abichequer & Bohnen (1998) observaram diferente eficiência de translocação de P em variedades de trigo cultivadas em solução nutritiva.

Houve correlação significativa entre rendimento de grãos e conteúdo de nutrientes ($r = 0,667$ para N, $r = 0,594$ para P e $r = 0,599$ para K, todos significativos a 5 %). Assim, o aumento do rendimento implicou em maior demanda de nutrientes, mas a absorção não foi determinada pela morfologia e distribuição de raízes.

No entanto, o estudo da relação entre a morfologia e a distribuição de raízes e a absorção de nutrientes foi prejudicado pela obtenção de rendimentos abaixo do esperado, por causa de semeadura após a época recomendada, e a conseqüente redução da demanda nutricional. Caso houvesse maior competição por nutrientes, poderia haver deficiência na

camada superficial do solo, e genótipos com raízes mais compridas e com maior aprofundamento poderiam absorver maior quantidade de nutrientes.

4.3.5. Análise da solução do solo

Os resultados das análises da solução do solo no estádio de 6 folhas (V6) e de emissão da panícula (R3) constam nas Tabelas 13 e 14, respectivamente. Com exceção do Ca na amostragem a 35 cm de profundidade (e na parcela com o Avaxi a 25 cm), ocorreu uma redução da concentração de nutrientes do estádio de 6 folhas para a emissão da panícula, provocada pelo consumo pelas plantas, que aumenta com o crescimento. No caso do N, as plantas praticamente já tinham esgotado o nutriente na emissão da panícula, embora também ocorram perdas por desnitrificação (Sousa et al., 2000). Observou-se um aumento da concentração de nutrientes com o incremento da profundidade nas duas épocas de amostragem, o que pode representar vantagem para plantas com raízes mais profundas. Este aumento da concentração em profundidade foi mais notável no caso do K e do Ca. Provavelmente esta maior concentração de nutrientes em camadas mais profundas do solo seja devida à menor presença de raízes, embora possa haver também contribuição de percolação de nutrientes para estas camadas. Observa-se que, nas parcelas cultivadas com o Avaxi, que desenvolve raízes mais superficiais, ocorre maior concentração de K nas profundidades de 25 e 35 cm, em relação aos demais genótipos, na amostragem na emissão da panícula. Outro fator que contribui para a maior concentração de K e Ca em camadas mais profundas é o maior grau de anaerobiose. Isto resulta na redução e solubilização de Fe e Mn, que deslocam K e Ca dos pontos de troca para a solução (Sousa et al., 2000). A condutividade elétrica também aumentou com a profundidade, confirmando a tendência exibida pelos nutrientes. Os valores de pH aumentaram com a inundação do solo (o pH do solo não alagado era de 5,2), por causa das reações de redução originadas pela inundação e conseqüente anaerobiose, que se processam com consumo de H^+ (Ponnanperuma, 1972; Sousa et al., 2000). Também foi analisada a água do canal de irrigação que abasteceu o experimento. Foi determinado que a

água de irrigação continha cerca de 3 mg L⁻¹ de K, 4 mg L⁻¹ de N e 2,7 mg L⁻¹ de Ca, o que contribuiu para o fornecimento destes nutrientes ao arroz.

Os resultados da análise dos teores de K e Ca trocáveis no solo dos monólitos nas mesmas parcelas em que foi analisada a solução do solo encontram-se no Apêndice 1.

Tabela 13. Parâmetros químicos da solução do solo em quatro profundidades, com coletor instalado na entrelinha do arroz, no estágio de seis folhas (V 6), exceto a IRGA 417, que estava em V 7.

| Genótipo | Profundi- dade (cm) | pH | CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$) | K (mg L ⁻¹) | Ca (mg L ⁻¹) | N (mg L ⁻¹) |
|-----------|---------------------------|-----|---------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| EEA 406 | 2,5 | 6,5 | 45 | 2,8 | 2,7 | 5,1 |
| | 12,5 | 6,0 | 88 | 2,8 | 4,6 | 6,7 |
| | 25 | 6,1 | 126 | 5,6 | 9,0 | 13,2 |
| | 35 | 6,2 | 106 | 6,8 | 6,0 | 13,2 |
| IRGA 417 | 2,5 | 6,5 | 46 | 2,4 | 2,7 | 14,1 |
| | 12,5 | 6,5 | 54 | 3,2 | 3,3 | 12,2 |
| | 25 | 5,9 | 95 | 5,4 | 5,4 | 17,7 |
| | 35 | 5,9 | 97 | 5,8 | 5,0 | 16,7 |
| Bluebelle | 2,5 | 6,4 | 45 | 3,0 | 2,0 | 18,0 |
| | 12,5 | 6,4 | 144 | 3,0 | 12,7 | 15,7 |
| | 25 | 6,4 | 218 | 9,8 | 11,6 | nr |
| | 35 | 6,0 | 184 | 7,0 | 12,7 | 17,0 |
| Avaxi | 2,5 | 6,7 | 45 | 2,0 | 2,7 | 13,8 |
| | 12,5 | 6,4 | 61 | 3,4 | 2,7 | 17,7 |
| | 25 | 6,4 | 143 | 7,6 | 3,3 | 16,1 |
| | 35 | 6,4 | 221 | 10,8 | 14,9 | 4,2 |

Observação: amostras coletadas 35 dias após a emergência e 18 dias após o início da irrigação do experimento.

nr = análise não realizada

Tabela 14. Parâmetros químicos da solução do solo em quatro profundidades, com coletor instalado na entrelinha do arroz, no estágio de emissão da panícula (R 3).

| Genótipo | Profundidade (cm) | pH | CE ($\mu\text{S cm}^{-1}$) | K (mg L^{-1}) | Ca (mg L^{-1}) | N (mg L^{-1}) |
|-----------|-------------------|-----|------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|
| EEA 406 | 2,5 | 5,2 | 24 | 0,5 | 0,4 | 0,6 |
| | 12,5 | 4,8 | 24 | 1,0 | 1,2 | 0,3 |
| | 25 | 5,0 | 54 | 2,2 | 2,1 | 0,6 |
| | 35 | 5,1 | 196 | 5,0 | 12,9 | 1,3 |
| IRGA 417 | 2,5 | 5,8 | 38 | 0,5 | 2,2 | nd |
| | 12,5 | 5,3 | 42 | 0,6 | 1,0 | 0,3 |
| | 25 | 5,2 | 49 | 2,2 | 3,2 | 0,6 |
| | 35 | 5,6 | 138 | 4,4 | 10,3 | nr |
| Bluebelle | 2,5 | 5,5 | 35 | 0,8 | 1,2 | 0,3 |
| | 12,5 | 5,3 | 48 | 0,7 | 1,2 | nd |
| | 25 | 5,7 | 112 | 2,4 | 7,9 | nd |
| | 35 | 5,3 | 285 | 4,6 | 23,0 | 0,6 |
| Avaxi | 2,5 | 5,7 | 38 | 0,6 | 1,7 | 0,3 |
| | 12,5 | 5,2 | 54 | 1,0 | 0,7 | 1,0 |
| | 25 | 5,3 | 158 | 4,7 | 7,1 | 0,6 |
| | 35 | 5,0 | 302 | 8,5 | 18,4 | nd |

Observação: amostras coletadas 70 dias (Avaxi) e 76 dias (demais genótipos) após a emergência.

nr = análise não realizada

nd = não detectado (abaixo do limite de detecção do método)

4.3.6. Conclusões

1. Os genótipos diferenciaram-se quanto à morfologia e distribuição das raízes no solo. Não houve relação entre o tipo do genótipo (moderno ou antigo) e a morfologia e a distribuição das raízes.
2. Não foi observada relação de morfologia e distribuição das raízes no solo com absorção de nutrientes e rendimento de grãos. Porém, o estudo desta relação foi prejudicado pela obtenção de rendimentos abaixo do esperado, por causa de semeadura após a época recomendada, e a conseqüente redução da demanda nutricional.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Os dois estudos realizados apresentaram resultados concordantes, em sua maioria, e algumas discordâncias. O experimento de campo está mais relacionado com a realidade das lavouras de arroz irrigado por inundação.

As conclusões que se originam da análise dos resultados obtidos nos dois estudos são as seguintes :

1. Os genótipos diferenciaram-se quanto à morfologia, arquitetura e distribuição das raízes no solo. No trabalho em solução nutritiva, os genótipos modernos (Avaxi, IRGA 417 e IRGA 419) apresentaram, em termos gerais, uma arquitetura mais superficial. No experimento de campo não foi observada relação entre o tipo do genótipo e a morfologia e a distribuição das raízes no solo.
2. Não houve relação de morfologia e distribuição de raízes no solo com absorção de nutrientes e rendimento de grãos no experimento de campo. Contudo, a semeadura em período posterior ao recomendado provocou uma redução do rendimento de grãos e, conseqüentemente, da demanda nutricional do arroz. Isto prejudicou o estudo desta relação, que pode ocorrer em situações de maior demanda nutricional e maior competição por nutrientes. Na solução nutritiva a absorção de nutrientes relacionou-se com o comprimento das raízes, com vantagem para plantas de raízes mais compridas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o prosseguimento desta pesquisa, sugere-se a realização dos seguintes trabalhos:

- estudo da relação da morfologia e distribuição de raízes com absorção de nutrientes e rendimento de grãos em experimento de campo com semeadura na época recomendada, para ocorrer maior rendimento e maior demanda nutricional;
- estudo da relação da morfologia e distribuição de raízes com absorção de nutrientes e rendimento de grãos com a utilização apenas de genótipos modernos, com alto potencial de rendimento, e que possuam o mesmo ciclo de crescimento (para que as avaliações ocorram no mesmo estágio);
- determinação dos parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes, que podem ser causa das diferenças de absorção encontradas entre os genótipos de arroz;
- avaliação da eficiência de translocação dos nutrientes das raízes para a parte aérea dos genótipos, que pode originar diferenças de conteúdo dos nutrientes na parte aérea;
- investigação das causas da ocorrência de maior concentração de nutrientes em camadas mais profundas do solo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H. Eficiência de absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.1, p.21-26, 1998.
- ANGHINONI, I.; VOLKART, C.R.; FATTORE, N.; ERNANI, P.R. Morfologia de raízes e cinética de absorção de nutrientes em diversas espécies e genótipos de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, n.3, p.355-361, 1989.
- BEYROUTY, C.A.; WELLS, B.R.; NORMAN, R.J.; MARVEL, J.N.; PILLOW, J.A. Root growth dynamics of a rice cultivar grown at two locations. **Agronomy Journal**, Madison, v.80, n.6, p.1001-1004, 1988.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability**. New York: J. Wiley, 1984. 398 p.
- BOHM, W. **Methods of studying root systems**. New York: Springer-Verlag, 1979. 189 p.
- CLAASSEN, N.; BARBER, S. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. **Plant Physiology**, Lancaster, v.54, n.4, p.564-568, 1974.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: SBCS/NRS; EMBRAPA-CNPT, 1995. 223 p.
- COUNCE, P.A.; KEISLING, T.C.; MITCHELL, A.J. A uniform, objective, and adaptative system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v.40, n.2, p.436-443, 2000.
- EBERHARDT, D.S.; SILVA, P.R.F.; RIEFFEL NETO, S.R. Eficiência de absorção e utilização de nitrogênio por plantas de arroz e dois ecótipos de

- arroz vermelho. **Planta Daninha**, Rio de Janeiro, v.17, n.2, p.309-323, 1999.
- EPSTEIN, E. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. New York: J. Wiley, 1972. 412 p.
- EPSTEIN, E.; HAGEN, C.E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. **Plant Physiology**, Lancaster, v.27, n.3, p.457-474, 1952.
- FRANÇA, M.G.C.; ROSSIELLO, R.O.P.; ZONTA, E.; ARAÚJO, A.P.; RAMOS, F.T. Desenvolvimento radicular e influxo de nitrogênio em duas cultivares de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.10, p.1845-1853, 1999.
- GERLOFF, G.C.; GABELMAN, W.H. Genetic basis of inorganic plant nutrition. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R.L. **Inorganic plant nutrition**. New York: Springer-Verlag, 1983. p. 453-480.
- INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Porto Alegre: IRGA, 2001. 128 p.
- INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. Porto Alegre. **Contém informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços**. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br>. Acesso em: 1 jun. 2004.
- KHUSH, G.S. Aumento do potencial genético de rendimento do arroz: perspectivas e métodos. In: EMBRAPA-CNPAF. **Arroz na América Latina: perspectivas para o incremento da produção e do potencial produtivo**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAF-APA, 1995. v.1. p.13-29.
- KONO, Y. Soil factors and root morphology. In: MATSUO, T.; HOSHIKAWA, K. (Eds.) **Science of the rice plant**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1993. V.1: Morphology. p. 507-525.
- LOPES, S.I.G. **Eficiência da adubação potássica e distribuição radicular no arroz irrigado**. 1991. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- LOPES, S.I.G. **Rendimento de grãos de variedades de arroz irrigado**. Cachoeirinha, IRGA, 1 jun. 2004. Telefonema.
- LOPES, S.I.G.; VOLKWEISS, S.J.; TEDESCO, M.J. Desenvolvimento do sistema radicular do arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, n.2, p.273-278, 1994.
- MACEDO, V.R.M.; LOPES, M. S.; CORRÊA, N. I. ; KLEPKER, D. Avaliação de sistemas de cultivo de arroz irrigado: Sistema radicular. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO; REUNIÃO DA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO, 23., 1999, Pelotas. **Anais ...** Pelotas: EMBRAPA Clima Temperado, 1999. p.274-276.

- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1986. 674 p.
- MORITA, S.; YAMAZAKI, K. Root system. In: MATSUO, T.; HOSHIKAWA, K. (Eds.) **Science of the rice plant**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1993. V.1: Morphology. p. 161-186.
- OTTOW, J.C.G.; BENCKISER, G.; WATANABE, I.; SANTIAGO, S. Multiple nutritional stress as the prerequisite for iron toxicity of wetland rice (*Oriza sativa* L.). **Tropical Agriculture**, Surrey, v.60, n.2, p.102-106, 1983.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 24, p. 29-96, 1972.
- RAMOS, M.G. et al. **Manual de produção do arroz irrigado**. Florianópolis: EMPASC/ACARESC, 1981. 225 p.
- RICETEC. Porto Alegre. **Contém informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços**. Disponível em: <http://www.ricetec.com.br>. Acesso em: 1 jun. 2004.
- SHENK, M.K.; BARBER, S.A. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v.71, n.6, p.921-924. 1979.
- SILVA, L.S.; SOUSA, R.O.; BOHNEN, H. Produtividade e absorção de nutrientes pelo arroz (*Oriza sativa*) em solo alagado e solução nutritiva. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25., 2000, Santa Maria. **Resumos ...** Santa Maria: SBSCS, 2000a. 1 CD-ROM.
- SILVA, L.S.; SOUSA, R.O.; BOHNEN, H. 2000b. Dinâmica de ferro e potássio na solução de solo alagado em diferentes profundidades, na presença e ausência de plantas de arroz. In: REUNIÃO SULBRASILEIRA DA CIÊNCIA DO SOLO, 3., Pelotas, 2000. **Resumos ...** Pelotas: SBSCS/NRS, 2000b. 1 CD-ROM.
- SLATON, N.A.; BEYROUTY, C.A.; WELLS, B.R.; NORMAN, R.J.; GBUR, E.E. Root growth and distribution of two short-season rice genotypes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.121, n.2, p.269-278, 1990.
- SOUSA, R.O.; CAMARGO, F.A.O.; VAHL, L.C. Solos alagados. In: MEURER, E.J. (Ed.) **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2000. p.128-149.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análises de solo, planta e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim técnico, 5)

- TEO, Y.H.; BEYROUTY, C.A.; GBUR, E.E. Nitrogen, phosphorus and potassium influx kinetic parameters of three rice cultivars. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.15, n.4, p.435-444, 1992.
- TEO, Y.H.; BEYROUTY, C.A.; GBUR, E.E. Evaluation of a model to predict nutrient uptake by field-grown rice. **Agronomy Journal**, Madison, v.87, n.1, p. 7-12, 1995a.
- TEO, Y.H.; BEYROUTY, C.A.; NORMAN, R.J.; GBUR, E.E. Nutrient uptake relationship to root characteristics of rice. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.171, n.2, p.297-302, 1995b.
- TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, Oxford, v.63, p.995-1000, 1975.
- VAHL, L.C. **Disponibilidade de nutrientes para o arroz irrigado por alagamento em solos do Rio Grande do Sul**. 1982. 140 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1982.
- VAHL, L.C.; ANGHINONI, I.; VOLKWEISS, S.J. Cinética de absorção de potássio afetada por ferro, cálcio e magnésio em genótipos de arroz de diferentes sensibilidades à toxicidade de ferro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.2, p. 269-273, 1993.
- YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Manila: The International Rice Research Institute, 1981. 289p.
- YOSHIDA, S.; HASEGAWA, S. The rice root system: its development and function. In: IRRI. **Drought resistance in crops with emphasis on rice**. Los Baños, 1982. p. 97-114.
- YOSHIDA, Y.; BHATTARHACHARJEE, D.P.; CABUSLAY, G.S. Relationship between plant type and root growth in rice. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v.28, n.4, p.473-482, 1982.

8. APÊNDICES

Apêndice 1. Concentração de K e Ca trocável no solo dos monólitos coletados na amostragem das raízes, no estágio de enchimento de grãos, em quatro profundidades.

| Genótipo | Profundidade (cm) | K (mg L ⁻¹) | Ca (cmol _c dm ⁻³) |
|-----------|-------------------|-------------------------|--|
| EEA 406 | 0-5 | 36,0 | 0,8 |
| | 5-20 | 28,0 | 1,2 |
| | 20-30 | 20,0 | 1,1 |
| | 30-40 | 18,0 | 0,7 |
| IRGA 417 | 0-5 | 27,0 | 0,9 |
| | 5-20 | 27,5 | 1,1 |
| | 20-30 | 28,0 | 0,8 |
| | 30-40 | 21,0 | 0,5 |
| Bluebelle | 0-5 | 32,0 | 0,9 |
| | 5-20 | 27,0 | 1,2 |
| | 20-30 | 20,5 | 1,1 |
| | 30-40 | 18,0 | 0,6 |
| Avaxi | 0-5 | 34,0 | 1,0 |
| | 5-20 | 29,5 | 1,2 |
| | 20-30 | 18,0 | 0,9 |
| | 30-40 | 18,5 | 0,6 |

9. RESUMO BIOGRÁFICO

André Dabdab Abichequer, filho de João e Dulce Abichequer, nasceu em 8 de novembro de 1967, em Lajeado, Rio Grande do Sul. Realizou seus estudos de primeiro grau no Grupo Escolar Fernandes Vieira e no Colégio Evangélico Alberto Torres, ambos de Lajeado, e o segundo grau neste segundo colégio. Em 1986 ingressou na Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, graduando-se como Engenheiro Agrônomo em 1991. Em 1993 ingressou no Mestrado em Ciência do Solo do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, tornando-se Mestre em Ciência do Solo em 1995. De março de 1997 a março de 2000 trabalhou como extensionista rural na EMATER-RS, nos municípios de São José do Herval, Constantina e Liberato Salzano. Em março de 2000 iniciou seus estudos de Doutorado em Ciência do Solo no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Em julho de 2002 ingressou na Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), como Pesquisador em Ciência do Solo, estando lotado no Laboratório de Química Agrícola, em Porto Alegre. Casou-se com Marí Ângela Predebon em novembro de 2003. É membro da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.