

Soja em solos de várzea do Sul do Brasil

André Luís Thomas & Cláudia Erna Lange
Organizadores



Soja em solos de várzea do Sul do Brasil

André Luís Thomas & Cláudia Erna Lange
Organizadores



Porto Alegre, 2014

Copyright dos autores
1ª edição: 2014

Foto da capa:
Anderson Vedelago

Produção Gráfica e Impressão:
Evangraf - (51) 3336.2466

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S683 Soja em solos de várzea do Sul do Brasil / Organizadores: André Luís Thomas e Cláudia Erna Lange – Porto Alegre : Evangraf, 2014.
128 p. : il.

ISBN 978-85-7727-638-7

1. Soja. 2. Adversidades químicas de solos. 3. Adaptações morfológicas. 4. Adaptações fisiológicas. 5. Potencial de rendimento de grãos. I. Thomas, André Luís.

CDU 631.4
CDD 633.3

(Bibliotecária responsável: Sabrina Leal Araujo – CRB 10/1507)

Todos os direitos reservados. A reprodução não autorizada dessa publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610)

Pedidos desta publicação para:
andrethomas20@hotmail.com
ou thomaspl@ufrgs.br

Sumário

Apresentação	5
1. Desenvolvimento da planta de soja <i>André Luís Thomas, José Antonio Costa & Cláudia Erna Lange</i>	7
2. Adversidades químicas de solos de várzea à soja <i>André Luís Thomas, Leandro Souza da Silva & Rogério Oliveira de Sousa.....</i>	21
3. Adaptações morfológicas da soja ao excesso de umidade no solo <i>André Luís Thomas & Sandra Maria Carmello-Guerreiro</i>	41
4. Adaptações fisiológicas da soja ao excesso de umidade no solo <i>André Luís Thomas & Ladaslav Sodek</i>	55
5. Potencial de rendimento de grãos de soja em solos de várzea do Rio Grande do Sul <i>Cláudia Erna Lange, Anderson Vedelago & André Luís Thomas.....</i>	83



Apresentação

O interesse no cultivo de soja em áreas de várzea, onde predomina a cultura do arroz irrigado, tem aumentado. Entretanto, esse ambiente difere da área tradicional de cultivo da espécie por apresentar solos hidromórficos, com baixa drenagem natural, propensos ao excesso de umidade em algum momento durante o desenvolvimento da soja. A falta temporária de O_2 no solo altera a disponibilidade de nutrientes e o metabolismo da planta de soja, prejudicando seu crescimento. Durante décadas, o espectro deste estresse limitou os esforços de cultivo de espécies de sequeiro, inclusive a soja, impondo o monocultivo do arroz irrigado a estas áreas.

A retomada dos esforços em torno do cultivo de soja em rotação com arroz irrigado ocorreu recentemente com o advento das variedades resistentes ao glifosato, o que viabilizou o controle eficiente de plantas daninhas e proporcionou a tão almejada redução do banco de sementes na lavoura subsequente de arroz. Na última década houve grandes avanços no entendimento do ambiente de várzea para o cultivo de soja e na definição do manejo integrado que mitiga os efeitos negativos dos estresses e potenciali-

za o rendimento de grãos da cultura. Com estes avanços ficou evidenciado que o cultivo de soja neste ambiente não somente pode ser realizado com segurança, como também permite ser direcionado para alcançar altos potenciais de rendimento de grãos.

Este livro reúne informações básicas que contribuirão para o entendimento do cultivo da soja em áreas de várzea no Rio Grande do Sul. Ele aborda o desenvolvimento da soja, os desafios de química dos solos de várzea à cultura, as adaptações morfológicas e fisiológicas da planta ao excesso de umidade no solo. Também indica as estratégias de manejo que podem ser aplicadas na mitigação das adversidades e indica as estratégias que podem ser adotadas na construção de lavouras de alto potencial de rendimento.



Desenvolvimento da planta de soja

André Luís Thomas¹,
José Antonio Costa² & Cláudia Erna Lange³

As estratégias de manejo para aumentar o rendimento de grãos de soja são mais eficientes quando se conhece os estádios de desenvolvimento nos quais o potencial de rendimento é determinado.

O potencial máximo está na semente de qualidade, pois ela é a síntese dos avanços tecnológicos alcançados para originar plantas de alto rendimento.

O desenvolvimento das plantas de soja é dividido em fase vegetativa (V) e reprodutiva (R). Os estádios vegetativos iniciam com a emergência das plântulas e vão até o início do florescimento, eles são importantes para a formação do aparato fotossintético e da estrutura da planta para suportar a carga reprodutiva. Os estádios reprodutivos iniciam no florescimento, incluem a formação do legume, o enchimento do grão e a maturação da planta.

1 Professor do Departamento de Plantas de Lavoura da Faculdade de Agronomia da UFRGS, Porto Alegre - RS. E-mail: thomaspl@ufrgs.br

2 Eng. Agr. Professor aposentado da UFRGS. E-mail: jamc@ufrgs.br

3 Eng^a. Agr^a., Dr^a, melhorista de soja. E-mail: claudia.e.lange@gmail.com

A semente

A semente de soja é composta de três partes principais: o tegumento, os cotilédones e o eixo embrionário (Figura 1). O tegumento controla a entrada da água na semente e protege o embrião contra patógenos, choques e abrasões. Os cotilédones chegam a representar 90% do peso da semente, são as reservas das mesmas e são constituídos de proteínas ($\pm 40\%$), carboidratos ($\pm 25\%$), óleos ($\pm 20\%$), fibras ($\pm 5\%$) e minerais ($\pm 5\%$) (Tesar, 1984). O eixo embrionário é constituído por duas folhas unifolioladas e tecidos meristemáticos apical (originará a parte aérea da planta) e radicular (originará as raízes da planta).

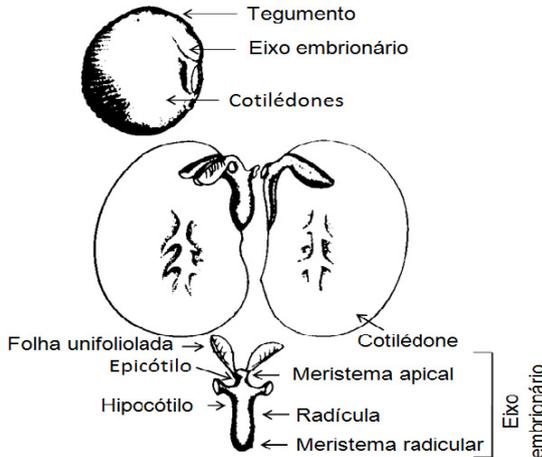


Figura 1. Partes da semente de soja.

A semente de soja necessita absorver água no volume correspondente a 50% de seu peso para iniciar o processo de germinação. A embebição é o processo que inicia a ger-

minação. É o primeiro evento chave que modifica a semente, que se constituía de um organismo com pequena quantidade de umidade, quiescente e dormente, para começar o crescimento do eixo embrionário. Conseqüentemente, deve ocorrer uma transição ordenada do aumento da hidratação, da ativação de enzimas, do desdobramento de produtos de reserva e o início do desenvolvimento da plântula (Wilcox, 1987). A embebição não é um fenômeno meramente físico, incontrolável; a integridade da semente e a temperatura do solo apresentam grande influência sobre o processo.

Fase vegetativa

O estabelecimento da plântula de soja no solo ocorre pelo aumento de volume e diferenciação celular do eixo embrionário. As reservas cotiledonares (proteínas, carboidratos e óleos) são transformadas em compostos mais simples (aminoácidos e açúcares) e energia, utilizados no desenvolvimento da plântula.

A germinação é epígea, ou seja, os cotilédones são levantados pelo hipocótilo para cima da superfície do solo. A emergência ocorre de 7 a 10 dias após a semeadura, dependendo do vigor da semente, profundidade de semeadura, umidade, textura e temperatura do solo. As reservas e os nutrientes dos cotilédones suprem as necessidades metabólicas da plântula por 7-10 dias após a emergência. Durante esse período, os cotilédones perdem 70% de seu peso e a supressão de um cotilédone tem pouco efeito sobre a taxa de crescimento da plântula, mas poderá afetar o rendimento de grãos se o período de crescimento vegetativo não permitir a recuperação da planta. Durante a emergência da plântula

ocorre o desenvolvimento do sistema radicular seminal, o desenrolamento das folhas primárias (seminais, com disposição oposta no caule) e o desenvolvimento do meristema apical que dará origem à parte aérea. A partir desse ponto, então, a planta passa a absorver nutrientes do solo através das raízes e a produzir fotoassimilados pelas folhas.

A fase de estabelecimento das plantas na lavoura é importante para a obtenção de rendimentos elevados de grãos, pois determinará o número de plantas e a sua distribuição na área, o que influenciará na estatura da planta, no desenvolvimento de ramos, no manejo de plantas daninhas e de doenças. A uniformidade da população de plantas evitará o aparecimento de plantas dominadas que desequilibram a competição intraespecífica e contribuem para diminuição do rendimento da lavoura (Pires, 2002).

A Figura 2 mostra a semente colocada no solo, absorvendo água, emitindo a radícula e iniciando a emergência. O aparecimento dos cotilédones à superfície do solo caracteriza a emergência (VE); é o início do período vegetativo. O estágio cotiledonar das plântulas é identificado por VC. Todos os estádios do período vegetativo são antecedidos pela letra “V” (Tabela 1). O número do estágio vegetativo é determinado pela contagem do número de nós do caule, começando com o nó das folhas unifolioladas até o nó que tem ou teve folha desenvolvida (Figura 3). O nó da folha trifoliolada é contado quando as margens dos folíolos da folha do nó imediatamente superior não mais estão se tocando, o que caracteriza uma folha desenvolvida. Por esse critério pode-se fazer leituras simultâneas de estádios vegetativos e reprodutivos. Quando cessa o acréscimo de nós no caule, não implica, necessariamente,

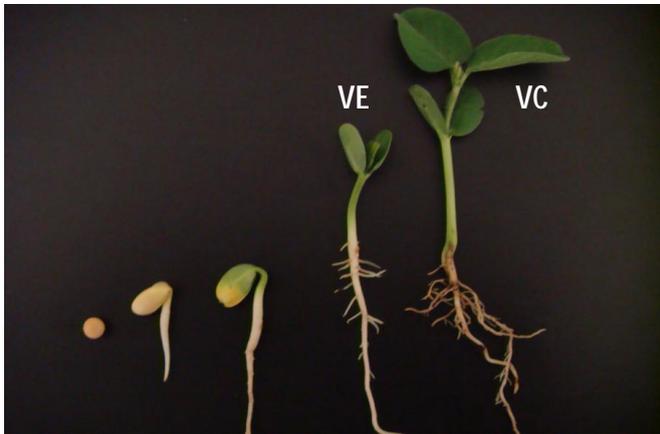


Figura 2. Germinação-emergência da soja, com caracterização dos estádios de emergência (VE) e cotiledonar (VC) das plântulas.

Thomas & Costa, 2010.

o término do período vegetativo da planta. Apenas não há mais aumento em estatura, continuando ainda, por algum tempo, o incremento de massa seca no caule e nos ramos.

Tabela 1. Descrição dos estádios vegetativos da soja.

Estádio	Subtítulo	Descrição
VE	Emergência	Cotilédones acima da superfície do solo (Figura 2).
VC	Estádio cotiledonar	Folhas unifolioladas com as margens não mais se tocando (Figura 2).
V1	Primeiro nó	Folhas unifolioladas desenvolvidas.
V2	Segundo nó	Folha trifoliolada desenvolvida no nó acima das folhas unifolioladas (Figura 3).
V3	Terceiro nó	Três nós do caule com folhas desenvolvidas começando com o nó das folhas unifolioladas.
Vn	“n” nó	“n” número nós do caule com folhas desenvolvidas começando com o nó das folhas unifolioladas.

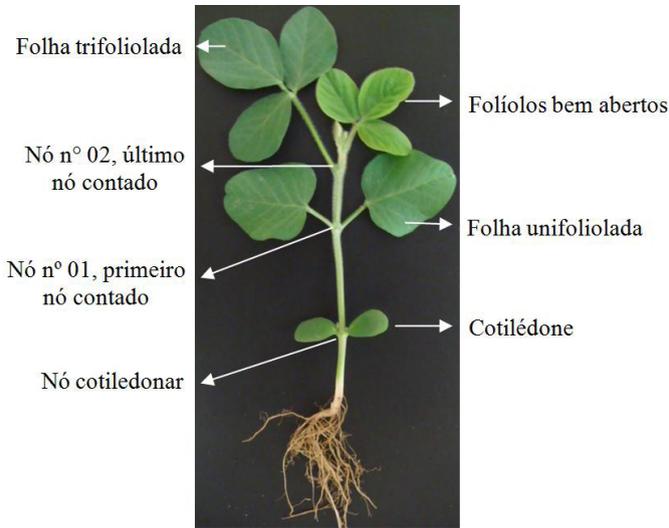


Figura 3. Planta de soja no estágio V2 com a identificação de suas estruturas anatômicas.
Thomas & Costa, 2010.

O crescimento vegetativo da planta ocorre com a emissão de folhas trifolioladas, com disposição alternada ao longo do caule, perfazendo em torno de 16 a 20 nós com folhas trifolioladas, sob condições edafo-climáticas adequadas ao crescimento. Na inserção (axila) do pecíolo de cada folha com o caule há uma gema axilar meristemática. Sua presença também ocorre nas axilas dos cotilédones e das folhas primárias com o caule. A gema axilar pode ficar dormente ou originar estruturas vegetativas (ramos) ou reprodutivas (flores → legumes → grãos), dotando a planta de soja de grande plasticidade morfológica. O número de ramos aumenta com a diminuição da população de plantas e com o aumento do espaçamento entre filas. Os ramos possuem as mesmas estruturas vegetativas e reprodutivas que o caule (Mundstock & Thomas, 2005).

As gemas axilares, das folhas uni e trifolioladas e dos cotilédones, proporcionam à planta de soja grande capacidade de regeneração. Se o ápice do caule for danificado ou quebrado, as gemas axilares remanescentes não terão mais o efeito inibitório da dominância apical e poderão produzir ramos. Caso o dano ou quebra da planta ocorra abaixo do nó cotiledonar, ela morrerá, pois não há gemas axilares capazes de regenerar a planta abaixo desse nó. O meristema apical do caule apresenta dominância sobre as gemas axilares durante a fase vegetativa de crescimento (Mundstock & Thomas, 2005).

O desenvolvimento vegetativo da planta de soja é muito importante para o rendimento de grãos, sendo necessário um período de 50 a 55 dias para que a planta esteja morfológicamente preparada, em número de nós no caule e de ramos, para produzir alto rendimento. Durante a fase vegetativa, além da formação do aparato fotossintético, é determinado o número potencial de locais com gemas meristemáticas onde poderá ocorrer o desenvolvimento de estruturas reprodutivas (Costa & Marchezan, 1982), ou seja, o número de nós da planta, que é o somatório dos nós do caule e dos ramos. Portanto, é essencial que se faça o controle adequado de plantas daninhas, insetos pragas e moléstias para o rendimento de grãos não ser afetado pela diminuição do desenvolvimento vegetativo das plantas.

Fase reprodutiva

A indução ao florescimento da soja ocorre pela interação entre fotoperíodo e temperatura em algumas cultivares e somente temperatura em outras. O florescimento determina o início do período reprodutivo. Nas cultivares

de tipo determinado o florescimento ocorre do ápice para a base do caule, praticamente cessa a emissão de nós no caule e acelera o desenvolvimento dos ramos, que aumentam em número e tamanho. Já nas cultivares de tipo indeterminado o florescimento ocorre da base para o ápice do caule, elas continuam a formar nós no caule por mais tempo e desenvolvem poucos ramos (Costa, 1996).

A determinação dos estádios reprodutivos é feita utilizando-se a identificação das estruturas reprodutivas (flores, legumes e grãos) dos nós do caule. A designação do estágio é indicada pela letra “R”, acompanhada de um número. O período reprodutivo compreende florescimento, desenvolvimento dos legumes, enchimento de grãos e maturação (Tabela 2 e Figura 4).

Em um genótipo com tipo de crescimento determinado as fases de desenvolvimento da planta são mais definidas, enquanto num com tipo de crescimento indeterminado elas se sobrepõem (Figura 5). O maior período de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo (Tabela 3) possibilitam aos genótipos com tipo indeterminado tolerarem mais os estresses ambientais como seca e excesso de água no solo.

A formação, fixação e desenvolvimento de legumes apresentam papel primordial no incremento do rendimento de grãos, pois determinam o número total de legumes por área, sendo esse o componente mais maleável na composição do rendimento. Nesse período ocorre rápido crescimento do legume, que atinge cerca de 80% de seu tamanho final, e marca o início do enchimento de grão. No enchimento de grãos inicia o período de rápido acúmulo de matéria seca e nutrientes nos mesmos em função da planta atingir o máximo índice de área foliar, desenvol-

vimento de raízes e fixação de nitrogênio. No final desse estágio, acelera-se a redistribuição de nutrientes, carboidratos e compostos nitrogenados provenientes da remobilização das folhas, ramos e caule para os grãos.

Tabela 2. Descrição dos estádios reprodutivos da soja.

Estádio	Subtítulo	Descrição
R1	Início do florescimento	Uma flor aberta em qualquer nó do caule (Figura 4a).
R2	Florescimento pleno*	Uma flor aberta em um dos dois últimos nós do caule com folha desenvolvida.
	Florescimento**	Flores nos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida (Figura 4b).
R3	Início da formação de legumes	Um legume com 5 mm num dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida (Figura 4c).
R4	Formação de legumes	Um legume com 2 cm num dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida (Figura 4d).
R5	Início do enchimento de grãos	Grãos com 3 mm num legume dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida (Figura 4e).
R6	Máximo volume de grãos	Legume contendo ao menos um grão verde que ocupa toda a cavidade, num dos quatro últimos nós do caule com folha desenvolvida (Figura 4f).
R7	Maturação fisiológica	Um legume normal, no caule, que atingiu a cor de legume maduro (Figura 4g).
R8	Maturação	95% dos legumes atingiram a cor de legume maduro (perda total da clorofila) (Figura 4h).

* Definição original de Fehr & Caviness, 1977.

** Adaptação sugerida por Costa & Marchezan, 1982.

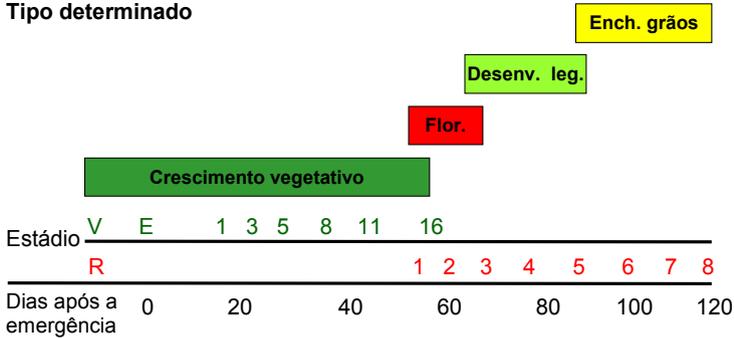


Figura 4. Estádios reprodutivos da soja. a) R1 - Início do florescimento; b) R2 - Florescimento; c) R3 - Início da formação de legumes; d) R4 - Formação de legumes; e) R5 - Início do enchimento de grãos; f) R6 - Máximo volume de grãos; g) R7 - Maturação fisiológica; e h) R8 - Maturação.

Thomas & Costa, 2010.

Desenvolvimento da planta de soja

Tipo determinado



Tipo indeterminado

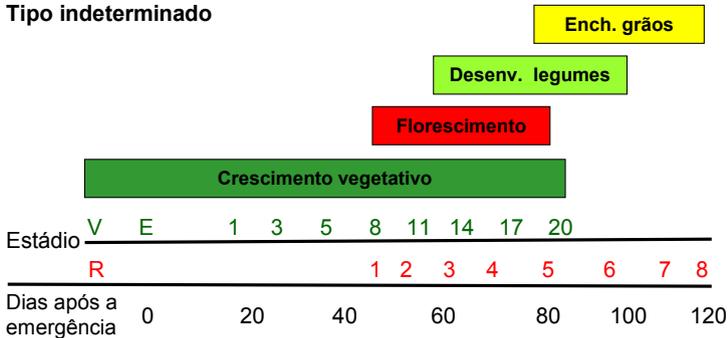


Figura 5. Caracterização do desenvolvimento vegetativo (V) e reprodutivo (R) em genótipos de soja com tipo de crescimento determinado e indeterminado.

A maturação fisiológica ocorre quando termina o acúmulo de matéria seca no grão, estabelecendo o rendimento. Neste estágio o grão perde a coloração verde, apresenta em torno de 40 a 50% de umidade e contém todas as estruturas para originar uma nova planta. A partir daí todas as folhas caem, o caule, os ramos, os legumes e os grãos perdem umidade, atingem a coloração característica de estrutura madura de cada cultivar.

Tabela 3. Altura da planta, período de florescimento (PF) e número de nós no caule de uma cultivar de soja com tipo de crescimento determinado (GM* V) e outra com tipo indeterminado (GM IV).

Tipo de crescimento	PF no caule	Altura da planta			Nós no caule		
		R1	FF	Dif.	R1	FF	Dif.
	dias	.....	cm	.....	.....	n°	.....
Determinado	25	45	68	23	9	12	3
Indeterminado	45	19	84	65	6	17	11

*Grupo de maturação.

R1 = início do florescimento, FF = final do florescimento e Dif. = diferença (FF-R1).

Heatherly & Smith, 2004.

A maturação de colheita ocorre quando os grãos apresentam menos de 15% de umidade. A soja, quando colhida com teor de umidade entre 13% e 15%, tem minimizados os problemas de danos mecânicos e perdas na colheita. Sementes colhidas com teor de umidade superior a 15% estão sujeitas a maior incidência de danos mecânicos latentes e, quando colhidas com teor abaixo de 12%, estão suscetíveis ao dano mecânico imediato.

Referências bibliográficas

COSTA, J.A. 1996. **Cultura da soja**. Porto Alegre: Ed. do Autor. 233 p.

COSTA, J.A.; MARCHEZAN, E. 1982. **Características dos estádios de desenvolvimento da soja**. Campinas: Fundação Cargill. 30p.

FEHR, W.R.; CAVINESS, C.E. 1977. **Stages of soybean development**. Ames, Iowa State University of Science and Technology. 11p.

HEATHERLY, L.G.; SMITH, J.R., 2004 . Effect of soybean stem growth habit on height and node number after beginning bloom in the midsouthern USA. **Crop Science**, v. 44, p. 1855-1858, 2004.

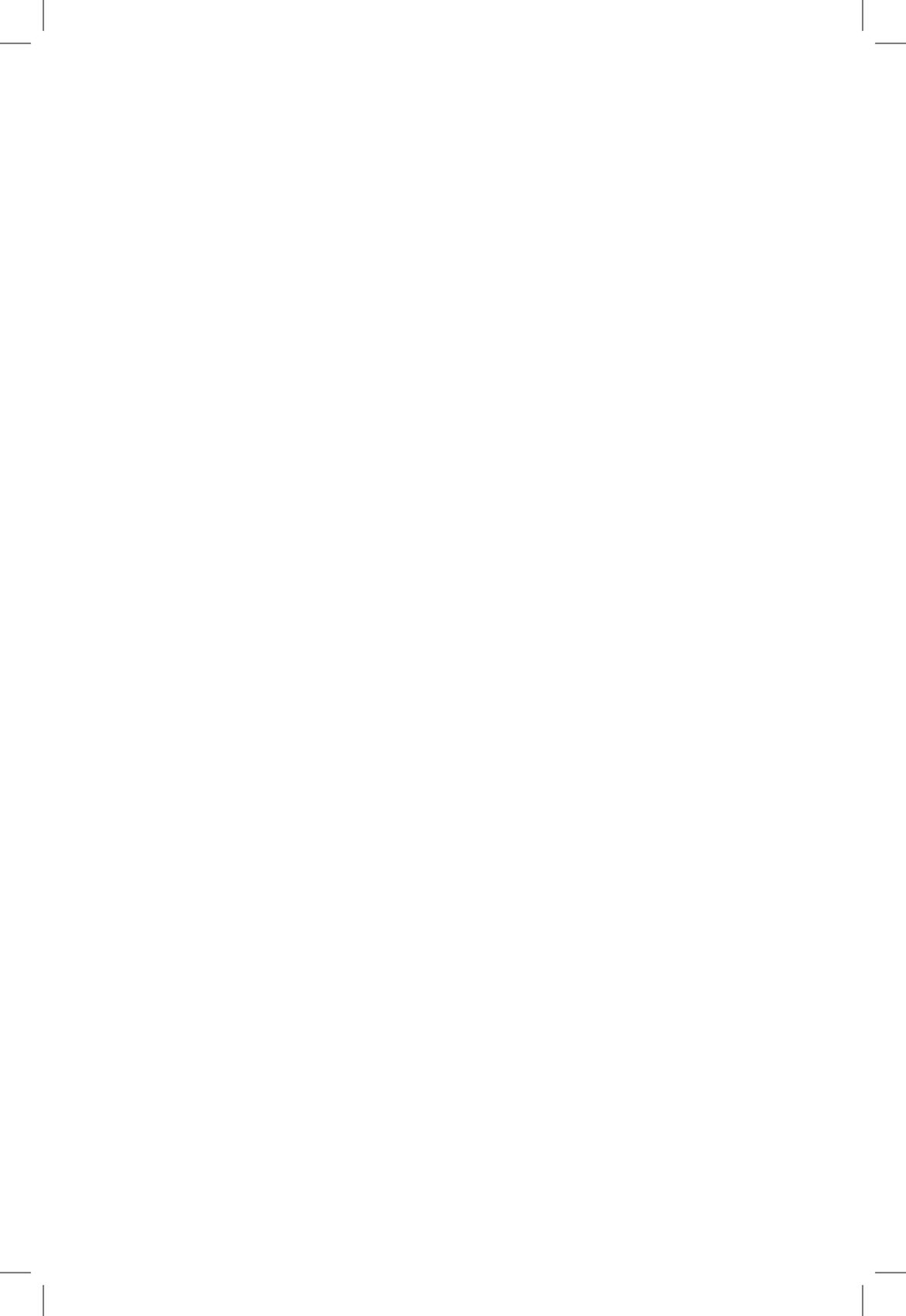
MUNDSTOCK, C.M.; THOMAS, A.L. 2005. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 31 p.

PIRES, J.L.F. 2002. **Estimativa do potencial produtivo da soja e variabilidade espacial de área de produção**. Tese (Doutorado - Plantas de Lavoura) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto Alegre. 136p.

TESAR, M.B. 1984. **Physiological basis of crop growth and development**. Madison: American Society of Agronomy. 341 p.

THOMAS, A.L.; COSTA, J.A. 2010. **Soja - Manejo para alta produtividade de grãos**. Porto Alegre: Evangraf, 248p.

WILCOX, J.R. 1987. **Soybeans: improvement, production, and uses**. 2nd ed. Agronomy Monograph no. 16. Madison: American Society of Agronomy. 888p.



Adversidades químicas de solos de várzea à soja

André Luís Thomas¹, Leandro Souza da Silva²
& Rogério Oliveira de Sousa³

Solos de várzea

Os solos de várzea compreendem solos que apresentam uma característica comum, que é a formação em condições de hidromorfismo. A principal característica desses solos é a drenagem natural deficiente, normalmente motivada pelo relevo predominantemente plano, em posições baixas na paisagem e associado a um perfil cuja camada superficial é pouco profunda e a subsuperficial é praticamente impermeável (Pauletto et al., 1998).

Em solo com drenagem deficiente, quando há excesso hídrico por precipitação ou irrigação, os espaços porosos

1 Professor do Departamento de Plantas de Lavoura da Faculdade de Agronomia da UFRGS, Porto Alegre - RS. E-mail: thomaspl@ufrgs.br

2 Professor do Departamento de Solos do Centro de Ciências Rurais da UFSM, Santa Maria - RS. E-mail: leandrosolos@ufsm.br

3 Professor do Departamento de Solos da UFPEL, Pelotas-RS. E-mail: rosousa@ufpel.tche.br

são preenchidos pela água, que dificulta a difusão do oxigênio na fase gasosa do mesmo. Como a difusão do O_2 na água é lenta e há grande demanda por O_2 para atender a demanda biológica do solo, somente a camada superficial de milímetros do solo permanece parcialmente oxidada pela maior proximidade com a atmosfera. Em camadas mais abaixo, estima-se que, em 24 horas após o alagamento de um solo com temperatura ambiente superior a $20^\circ C$, pode haver o esgotamento total do O_2 (Tabela 1) pelo consumo por microrganismos, fauna e raízes (Marschner, 1995; Liesack et al., 2000; Sousa et al., 2010).

Tabela 1. Alterações no pH e concentrações de oxigênio (O_2), nitrato (NO_3^-), amônio (NH_4^+), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), sódio (Na), ferro (Fe) total e manganês (Mn) total na solução de um solo de várzea (Gleissolo) alagado durante 31 dias.

Alagamento (dias)	pH	O_2	NO_3^-	NH_4^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	K^+	Na^+	Fe total	Mn total
0	5,0	5,8	3,3	2,3	16,5	4,6	11,8	10,8	0,1	0,5
2	5,6	0,3	1,4	1,9	17,6	4,9	12,6	11,4	1,3	0,5
5	5,4	<0,1	<0,2	2,3	18,8	5,6	14,1	11,8	8,3	0,6
7	5,6	<0,1	<0,2	3,6	22,4	6,4	16,6	13,0	12,7	0,8
10	5,8	<0,1	<0,2	6,5	43,5	12,2	21,2	16,6	29,6	1,9
15	5,9	<0,1	<0,2	10,0	60,7	17,0	22,7	22,8	61,7	2,7
17	6,0	<0,1	<0,2	13,7	46,8	12,8	23,9	16,8	96,9	2,0
22	6,0	<0,1	<0,2	16,8	60,5	16,9	25,2	21,6	100,0	2,6
29	6,0	<0,1	<0,2	20,4	60,1	16,1	25,2	20,4	101,6	2,7
31	6,0	<0,1	<0,2	19,5	54,1	14,6	21,6	19,0	95,1	2,3

Bohnen, H., comunicação pessoal.

Este ambiente adverso ao crescimento das plantas é propício para o cultivo de arroz irrigado por alagamento, já que esta espécie possui estruturas (aerênquimas) bem

desenvolvidas que permitem a difusão do O_2 da atmosfera até o sistema radicular por dentro da própria planta. Como consequência, a região próxima das raízes (rizosfera) também pode encontrar-se parcialmente oxidada pela difusão do O_2 de dentro da planta para o solo. Nessas condições, o arroz irrigado por alagamento é a principal cultura de grãos economicamente explorada em áreas de várzea, sendo cultivado em monocultivo (arroz seguido de arroz nos anos subsequentes) durante longo período. Uma das principais consequências do monocultivo é o aumento da incidência de plantas invasoras, especialmente de arroz vermelho, de difícil controle por meios convencionais (SOSBAI, 2012). Nesse contexto, a rotação de culturas seria uma opção promissora para o controle dessa invasora e a cultura da soja seria uma das que apresenta maior potencial, tanto por razões técnicas como econômicas.

Entretanto, outras espécies de produção de grãos diferentes do arroz não se adaptam facilmente ao excesso hídrico, sendo a restrição ao O_2 no solo uma das principais limitações ao cultivo da soja nos solos de várzea. A adequação da área de várzea com um apropriado sistema de drenagem pode permitir condições satisfatórias para o crescimento e desenvolvimento da soja, mas outras restrições podem surgir além da falta de O_2 no solo, elas também podem ser prejudiciais ao metabolismo das plantas, especialmente em condições de alagamento temporário, e devem ser consideradas.

Acidez

No Rio Grande do Sul, a maioria dos solos de várzea são ácidos quando não estão alagados, com pH em água entre 4,5 e 5,4 (Boeni et al., 2010; Vedelago et al., 2012). Nessa faixa de pH, a disponibilidade da maioria dos nutrientes é

reduzida (Figura 1), com exceção dos micronutrientes Fe, Cu, Mn e Zn. Por outro lado, é alta a disponibilidade de Al, que diminui o desenvolvimento das raízes, resultando em menor absorção de água e nutrientes pelas plantas. O Al também prejudica a simbiose para fixação biológica de nitrogênio na soja (Amado et al., 2010). Nessas condições, pode ser recomendada a prática da calagem, que é a aplicação do calcário agrícola como corretivo da acidez do solo, proporcionando um ambiente mais adequado ao desenvolvimento das plantas.

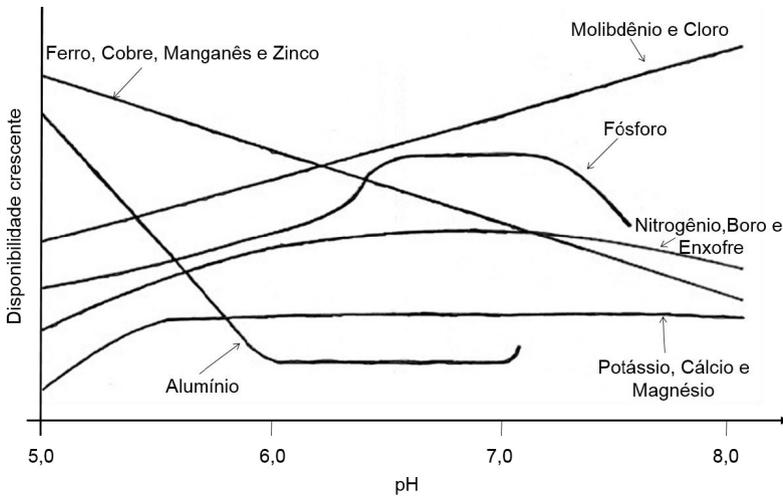


Figura 1. Disponibilidade de nutrientes de acordo com o pH do solo. Adaptado de Malavolta, 1981.

Este cenário de solos ácidos não é tão restritivo para o cultivo de arroz irrigado por alagamento tendo em vista que ocorrem várias reações envolvendo transferência de elétrons desencadeadas pela ausência de O_2 no solo. Os microrganismos anaeróbicos utilizam os compostos oxidados do solo como receptores de elétrons no seu metabo-

mo (Sousa et al., 2010), obedecendo a uma sequência, em função da afinidade dos compostos em receber elétrons: $\text{NO}_3^- > \text{MnO}_2 > \text{Fe}(\text{OH})_3 > \text{SO}_4^{2-} > \text{matéria orgânica}$.

Assim, mesmo em solos ácidos, com o alagamento, as reações de redução de NO_3^- a N_2 , MnO_2 a Mn^{+2} , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ a Fe^{+2} e SO_4^{2-} a H_2S consomem H^+ e o pH do solo aumenta naturalmente, tendendo a se estabilizar entre 6 e 7 após 10 a 20 dias de alagamento (Tabela 1), fenômeno conhecido por “autocalagem”. Nesta situação, ocorre a precipitação do Al tóxico, bem como um aumento do P na solução do solo devido a dissolução de óxidos de Fe (Bissani et al., 2008; Sousa et al., 2010), o que favorece a nutrição do arroz irrigado. Dessa forma, a calagem do solo pode até ser descartada, caso o sistema de cultivo do arroz irrigado for o pré-germinado, já que neste sistema o alagamento do solo ocorre antes da semeadura da cultura (SOSBAI, 2012).

Entretanto, essas condições de maior pH causada pelo alagamento somente perduram enquanto o solo estiver saturado com água, o que não é um ambiente adequado para o cultivo da soja. Baseado nessas considerações, especial atenção deve ser dada a avaliação da acidez em solos de várzea destinados ao cultivo da soja em rotação com arroz irrigado, e se necessária, a prática da calagem para o bom desenvolvimento da cultura.

Os critérios de decisão quanto a necessidade de aplicação de calcário são baseados na análise do solo (pH em água e saturação por bases e por alumínio) e as indicações de doses de corretivo para a cultura da soja em sistemas de manejo (convencional e plantio direto) podem ser encontradas no Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2004) ou em outros documentos específicos para recomendações indicadas para esta cultura quando cultivada em outros Estados.

Disponibilidade de fósforo

Conforme abordado anteriormente, o arroz irrigado por alagamento é beneficiado pelas reações de redução do ferro que liberam fósforo (P) para a solução do solo. Nestas condições, a interpretação da análise química para a interpretação da classe de disponibilidade de P (P extraído pelo método Mehlich-1) dos solos de várzea destinados ao cultivo de arroz irrigado não leva em consideração a textura do solo (teor de argila) (SOSBAI, 2012), como ocorre para cultivos em solos não alagados (CQFS-RS/SC, 2004).

Assim, solos arenosos com baixos teores de P (ex. teor de P = 6,5 mg/dm³ e teor de argila de 19%) podem ser interpretados em relação a disponibilidade de P como “Alto” se a área for destinada para o cultivo de arroz irrigado, mas estes mesmos solos serão interpretados como “Muito Baixo” em relação a disponibilidade de P se a área for destinada para o cultivo da soja (Tabelas 2 e 3). Conseqüentemente serão necessárias maiores quantidades de fertilizante fosfatado para o cultivo de soja do que seria recomendado para o cultivo do arroz na mesma área do exemplo acima.

Por outro lado, quando o arroz é utilizado em rotação de culturas, é beneficiado pelo residual da adubação efetuada nas culturas de sequeiro, pois o arroz é menos exigente em adubação. Considerando-se o exemplo dado acima para teores de fósforo de 6,5 mg/dm³, a interpretação desses teores corresponderia a uma recomendação de adubação de 40 kg/ha de P₂O₅ para o arroz e de 125 kg/ha de P₂O₅ para a soja (expectativa de 3 t/ha). Estimando-se que o efeito residual da adubação fosfatado da soja fosse de 50%, corresponderia a uma quantidade de 62,5 kg/ha de P₂O₅ para o arroz subsequente, que é um valor maior que a dose

recomendada para a cultura nesse caso (40 kg/ha de P_2O_5). O raciocínio inverso, ou seja, de aproveitamento do residual da adubação do arroz para a soja não deve ser levado em consideração, pois a quantidade de fósforo disponível após o alagamento é pequena. Mesmo que sobrasse também 50% da adubação realizada no arroz (20 kg/ha de P_2O_5), esta quantidade seria muito aquém das necessidades da soja. Nesse caso, a soja na sequência do arroz deve ser tratada como primeiro cultivo, desconsiderando o efeito residual do fósforo aplicado no arroz.

Tabela 2. Interpretação da análise de fósforo para fins de recomendação de adubação fosfatada para o arroz irrigado.

Interpretação do teor de P no solo	P extraído por Mehlich-1
	mg/dm ³
Baixo	≤3,0
Médio	3,1 a 6,0
Alto	6,1 a 12,0
Muito Alto	>12,0

Adaptado de SOSBAL, 2012.

Tabela 3. Interpretação da análise de fósforo para fins de recomendação de adubação fosfatada para cultura de grãos (exceto o arroz irrigado) em função do teor de argila do solo.

Interpretação do teor de P no solo	P extraído por Mehlich-1 (interpretado em função do teor de argila do solo)			
	≤20%	21-40%	41-60%	> 60%
	mg/dm ³			
Muito Baixo	≤7,0	≤4,0	≤3,0	≤2,0
Baixo	7,1 - 14,0	4,1 - 8,0	3,1 - 6,0	2,1 - 4,0
Médio	14,1 a 21,0	8,1 a 12,0	6,1 a 9,0	4,1 a 6,0
Alto	21,1 a 42,0	12,1 a 24,0	9,1 a 18,0	6,1 a 12,0
Muito Alto	>42,0	>24,0	>18,0	>12,0

Adaptado de CQFS-RS/SC, 2004.

Baseado nestas considerações, o manejo adequado da adubação fosfatada em solos de várzea deve ser programado para que o cultivo da soja atinja produtividades satisfatórias e as indicações de adubação também podem ser encontradas no Manual de Adubação e Calagem para os Estados do RS e SC (CQFS-RS/SC, 2004) ou em outros documentos específicos para recomendações indicadas para esta cultura quando cultivada em outros Estados.

Alterações provocadas por alagamentos temporários

Mesmo com um adequado preparo da área e um sistema de drenagem eficiente para proporcionar condições aeróbicas no solo, é possível que o cultivo da soja em solos de várzea ocorra com períodos de alagamento do solo, devido à possibilidade de elevadas precipitações em curto espaço de tempo e a natureza da baixa condutividade hidráulica desses solos. Esta situação é particularmente importante em áreas não sistematizadas que oportunizam a presença de depressões na superfície do solo, em que a presença da lâmina de água pode perdurar por mais tempo.

Com a inundação, mesmo que temporária, ocorre elevação no pH da solução do solo, bem como o aumento nas concentrações de amônio, ferro e manganês (Tabela 1), devido às transformações de N orgânico em amônio (NH_4^+) e a ausência de oxigênio para a nitrificação, dos óxidos férricos em ferro solúvel (Fe^{+2}) e dos óxidos de manganês em manganês solúvel (Mn^{+2}), respectivamente (Reddy & Patrick, 1984; Marschner, 1995; Liesack et al., 2000; Sousa et al., 2010).

Devido aos aumentos nas concentrações de Fe^{+2} , principalmente, e de Mn^{+2} na solução do solo, esses elementos ocupam uma proporção considerável dos sítios de troca, deslocando outros cátions para a solução. Assim, após o alagamento há uma tendência de aumentar os teores de NH_4^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ e Na^+ na solução do solo (Tabela 1), os quais ficam mais disponíveis às plantas (Bissani et al., 2008). É importante ressaltar que nas áreas de várzea cultivadas com soja as alterações químicas provocadas pelo alagamento temporário não serão tão drásticas como as que ocorrem com a cultura do arroz em alagamento contínuo, pois com o retorno das condições de aeração do solo, as reações de oxirredução e seus efeitos sobre o pH do solo e disponibilidade de nutrientes são revertidas.

a) amônio

Em muitos solos aeróbicos, o nitrato (NO_3^-) e o amônio (NH_4^+) são as fontes predominantes de N disponíveis às plantas. Entretanto, com o alagamento predomina o NH_4^+ (Tabela 1), devido a redução do NO_3^- (desnitrificação) e ausência de condições para a nitrificação do NH_4^+ , conforme já abordado anteriormente. A inundação de um solo de várzea (Gleissolo) demonstra que, após 7 dias de inundação, a concentração de NH_4^+ na solução do solo atinge 3,6 mg/L e 6,5 mg/L com 10 dias de inundação, perfazendo entre 3,2 e 5,8 mM de N (Tabela 1).

Normalmente, a maioria das espécies apresenta melhor desenvolvimento quando supridas com NH_4^+ e NO_3^- . Porém, poucas espécies (o arroz é um exemplo) apresentam desenvolvimento satisfatório quando o NH_4^+ é a única ou a fonte predominante de N. As demais desenvolvem sintomas de toxidez quando crescem em níveis de NH_4^+

moderados para altos (Howitt & Udvardi, 2000; Wirén et al., 2000; Britto et al., 2001). Em plantas de soja com sistema radicular inundado, altas concentrações de N supridas exclusivamente com NH_4^+ reduzem o desenvolvimento da planta de soja com 5 dias de inundação do sistema radicular, afetando a estatura, a área foliar, a matéria seca das raízes e da parte aérea, quando comparada com planta com sistema radicular inundado com solução nutritiva contendo NO_3^- ou com planta não inundada fixando N_2 (Thomas, 2004; Thomas & Sodek, 2005).

A alternância das condições aeróbicas e anaeróbicas também é indesejável sob o ponto de vista das perdas de N por desnitrificação. Isso ocorre porque quando o solo não está saturado com água a decomposição microbiana produz NH_4^+ e o ambiente permite a nitrificação até NO_3^- , que é o primeiro composto utilizado como aceptor de elétrons caso o solo seja saturado, produzindo predominantemente N_2 e N_2O , este último um gás de efeito estufa. Assim, parte do N resultante da mineralização da matéria orgânica do solo pode ser perdida, reduzindo a disponibilidade deste elemento às plantas.

b) ferro

A redução do Fe^{+3} dos óxidos a Fe^{+2} (solúvel), com consequente aumento da disponibilidade do ferro na solução do solo, é a alteração química mais importante que ocorre em solos inundados, tornando a concentração desse nutriente, muitas vezes, tóxica ao desenvolvimento das plantas, mesmo para o arroz irrigado por alagamento.

As alterações que ocorrem em solo inundado são marcadamente afetadas pela química do ferro, em função da grande quantidade de óxidos e hidróxidos de ferro que

podem sofrer redução e da reatividade do ferro com outros compostos do solo. A concentração de Fe^{+2} na solução de um solo inundado pode atingir 300 mg/L (Sousa et al., 2010) ou mais, dependendo da composição do solo e do curso da redução após o alagamento. Entretanto, em torno de até 5,5 mg/L de Fe na solução do solo é a quantidade do nutriente requerida para o ótimo desenvolvimento das plantas, que apresentam concentração entre 50 e 100 mg/kg de Fe na matéria seca de folhas (Guerinot & Yi, 1994).

Assim, sintomas de toxidez por ferro podem ser comuns em lavouras de arroz irrigado por alagamento (SOSBAI, 2012) e este elemento pode também se tornar restritivo ao desenvolvimento da soja caso os ciclos de alagamento temporário forem frequentes durante seu cultivo.

c) manganês

O aumento na concentração Mn na solução do solo com a inundação também pode provocar toxidez às plantas de soja, de modo análogo ao abordado para o ferro. A probabilidade de isso acontecer aumenta em solos ácidos, com altos teores de Mn e matéria orgânica, tendo em vista que nessas condições a concentração de Mn na solução do solo pode atingir 90 mg/L após uma ou duas semanas de inundação, diminuindo rapidamente para valores estáveis abaixo de 10 mg/L (Ponnamperuma, 1972; Sousa et al., 2010).

d) sódio

Os solos de várzea do Rio Grande do Sul, de uma maneira geral, estão pouco sujeitos à salinização por sódio (Na^+). Entretanto, problemas de Na^+ podem ocorrer em solos da Planície Costeira devido à irrigação e a gênese dos

solos, que são formados por sedimentos de origem marinha e flúvio-lacustre (Carmona, 2011).

Existe variabilidade dos genótipos de soja quanto à tolerância ao Na^+ em condições de hipoxia no solo. O encharcamento do solo por 5 dias, com concentração de 3 mM de Na^+ na solução (não considerada salina - Colmer & Greenway, 2011) já proporciona a morte de plantas de genótipos de soja (Thomas, 2009).

Baseado nessas considerações, o cultivo de soja na várzea requer atenção para o aumento da disponibilidade de NH_4^+ , Fe^{+2} , Mn^{+2} e Na^+ na solução do solo, tendo em vista que esses cátions podem atingir níveis tóxicos à cultura. No Capítulo 4 são discutidos os efeitos desses cátions no metabolismo da planta de soja. Neste contexto, estratégias voltadas para o manejo da drenagem do solo são fundamentais para o sucesso do cultivo desta espécie em solo de várzea.

e) toxidez por ácidos orgânicos

Alagamentos temporários ou o excesso de umidade a que os solos de várzeas são submetidos podem ocasionar a formação de sítios anaeróbios e proporcionar a fermentação dos resíduos vegetais produzindo compostos tóxicos às plantas. Dentre esses compostos destacam-se os ácidos orgânicos alifáticos de cadeia curta como os ácidos acético, propiônico e butírico, que podem ser produzidos no solo com poucos dias de alagamento (Sousa et al., 2002). A redução do crescimento radicular é um dos principais efeitos desses ácidos às plantas (Figura 2), o que pode acarretar também menor absorção de nutrientes (Tabela 4).

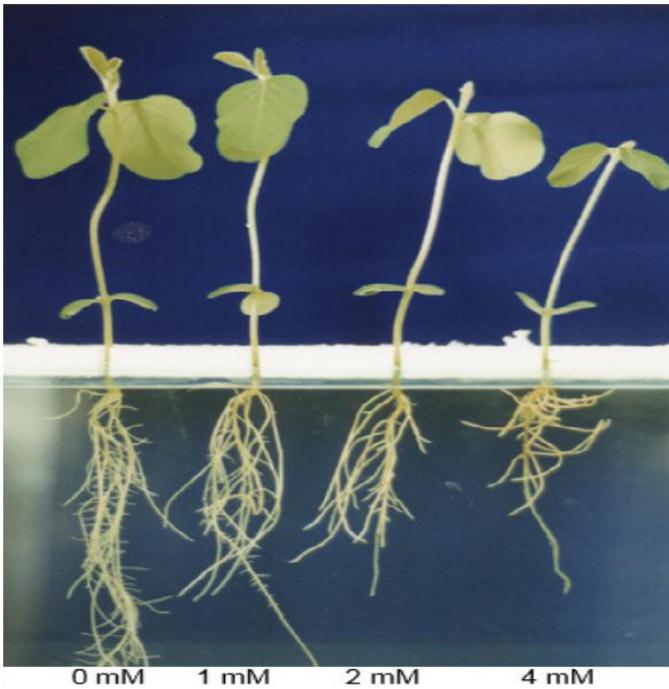
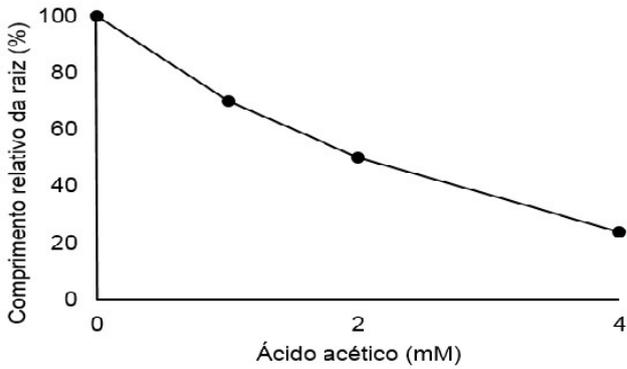


Figura 2. Comprimento relativo do sistema radicular da soja sob diferentes doses de ácido acético.

Adaptado de Schmidt et al., 2010.

Tabela 4. Peso de matéria seca (PMS) e concentração de nutrientes na parte aérea de plantas de soja submetidas a diferentes doses de ácido acético.

Doses (mM)	PMS (mg)	P	K	Ca	Mg
		..... g/kg			
0	111	9,7	37,1	9,2	5,9
1	111	8,7	34,5	10,2	5,5
2	85	9,2	38,8	3,2	5,8
4	76	6,9	27,7	3,5	5,0

Adaptado de Schmidt et al., 2010.

Os efeitos fisiológicos da toxidez pelos ácidos orgânicos estão relacionados com a inibição da divisão celular no sistema radicular que está diretamente em contato com os ácidos, sendo esta a provável razão principal para o menor crescimento radicular. Aeração interna, transporte vascular, fotossíntese e respiração, além da degradação das membranas celulares e consequente perda do conteúdo celular para o meio, são, também, processos fisiológicos afetados pelos ácidos orgânicos (Armstrong & Armstrong, 2001).

As chances de ocorrência de problemas de toxidez por ácidos orgânicos são maiores quando resíduos vegetais são manejados (incorporados ou dessecados) imediatamente antes da semeadura da soja, se esta for seguida de período com elevada precipitação, que provoque saturação ou alagamento temporário do solo. Deve ser evitada a semeadura da soja em áreas de plantio direto com elevada umidade, pois o disco da semeadora pode empurrar resíduos vegetais para o fundo do sulco de semeadura junto à semente. O excesso de material orgânico aliado à saturação do solo é propício para a produção de ácidos orgânicos que podem prejudicar as plântulas de soja no início de seu desenvolvimento.

Fixação biológica de nitrogênio

Embora a cultura da soja seja beneficiada da fixação biológica de nitrogênio (FBN), esse processo no solo ocorre em condições aeróbicas, sendo desfavorecido em cultivos com alternância de condições de umidade (solo seco, solo saturado). Em solos mal drenados, as bactérias responsáveis pela FBN encontram dificuldades em infectar as raízes das plantas. Isso ocorre devido à baixa concentração de O_2 , causando baixa nodulação ou nódulos menos eficientes (James & Crawford, 1998). Os efeitos, possivelmente, são mais evidentes em cultivares de ciclo precoce do que em cultivares de ciclo longo, tendo em vista o tempo de cultivo e as etapas envolvidas na FBN.

Considerações finais

Os solos de várzea são amplamente utilizados para o cultivo de arroz irrigado por alagamento e a cultura da soja é uma das mais promissoras para fazer parte de um sistema de rotação com o arroz. Entretanto, as características dos solos, as alterações decorrentes do alagamento, mesmo que temporário, e as necessidades nutricionais diferentes dessas duas culturas alteraram o planejamento da calagem e da adubação para o cultivo destas duas espécies na mesma área. Também é requerido um adequado sistema de drenagem do terreno. O conhecimento das condições do solo de várzea e as exigências específicas do arroz e da soja são fundamentais para o adequado planejamento de manejo visando altas produtividades de ambas as culturas cultivadas em rotação.

Apesar de não ser uma adversidade de natureza química, outro aspecto importante a ser considerado é que o alagamento provoca a desagregação da estrutura da camada superficial do solo e uma acomodação das partículas quando o solo seca, aumentando a coesão entre elas. Dessa forma, é esperada uma maior resistência mecânica do solo à germinação e ao crescimento das raízes de soja quando cultivada em rotação com o arroz irrigado, o que pode requerer cuidados específicos e intervenções adequadas nas operações e equipamentos de preparo do solo e de semeadura.

Referências bibliográficas

AMADO, T.J.C.; SCHLEINDWEIN, J.A., FIORIN, J.E. 2010. Manejo do solo visando à obtenção de elevados rendimentos de soja sob sistema plantio direto. In: THOMAS, A.L.; COSTA, J.A. (org.) - **Soja: manejo para alta produtividade de grãos**. Porto Alegre: Evangraf. p.35-112.

ARMSTRONG, J.; ARMSTRONG, W. 2001. Rice and *Phragmites*: effects of organic acids on growth, root permeability, and radial oxygen loss to the rhizosphere. **American Journal of Botany**, v.88, p.1359-1370.

BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; CAMARGO, F.A.O.; TEDESCO, M.J. 2008. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Metrópole. 344p.

BOENI, M.; ANGHINONI, I.; GENRO JR, S.A.; FILHO, B.D.O. 2010. **Evolução da fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA. Divisão de Pesquisa. 38 p. (Boletim Técnico, 9).

BRITTO, D.T.; SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M.; KRONZUCKER, H.J. 2001. Futile transmembrane NH_4^+ cycling: A cellular hypothesis

to explain ammonium toxicity in plants. **Proceedings of the National Academy of Science of USA**, v.98, p.4255-4258.

CARMONA, F.C. 2011. **Salinidade da água e do solo e sua influência sobre o arroz Irrigado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, tese de doutorado. 114p.

COLMER, T.D.; GREENWAY, H. 2011. Ion transport in seminal and adventitious roots of cereals during O₂ deficiency. **Journal of Experimental Botany**, v.6, p.39-57.

CQFS-RS/SC. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. 2004. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre - RS: SBCS-NRS/EMBRAPA-CNPT. 400p.

GUERINOT, M.L.; YI, Y. 1994. Iron: Nutritious, noxious, and not readily available. **Plant Physiology**, v.104, p.815-820.

HOWITT, S.M.; UDVARDI, M.K. 2000. Structure, function and regulation of ammonium transporters in plants. **Biochimica and Biophysica Acta**, v.1465, p.152-170.

JAMES, E.; CRAWFORD, R. 1998. Effect of oxygen availability on nitrogen fixation by two *Lotus* species under flooded conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 49, p. 599-609.

LIESACK, W.; SCHNELL, S.; REVSBECH, N.P. 2000. Microbiology of flooded rice paddies. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 24, p.625-645.

MALAVOLTA, E. 1981. **Manual de química agrícola - adubos e adubação**. 3. ed. São Paulo: Ceres. 596p.

MARSCHNER, H. 1995. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press. 889p.

PAULETTO, E.A.; SOUSA, R.O.; GOMES, A.S. 1998. Caracterização e manejo de solos de várzea cultivados com arroz irrigado. In: **Produção de arroz irrigado**. Peske,S.T.; Nedel, J.L.; Barros, A.C.S.A. (ed.). Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS. 659p.

PONNAMPERUMA, F.N. 1972. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, v. 24, p.29-96.

REDDY, K.R.; PATRICK, W.H. 1984. Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments. **CRC Critical Reviews in Environmental Control**, v.13, p. 273-309.

SCHMIDT, F.; FORTES, M.A.; BORTOLON, L.; BORTOLON, E.S.O.; SOUSA, R.O. 2010. Nível crítico de toxidez do ácido acético em culturas alternativas para solos de várzea. **Ciência Rural**, v.40, p.1068-1074.

SOSBAI. SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. 2012. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Porto Alegre, SOSBAI. 176p.

SOUSA, R.O.; PERALBA, M.C.R.; MEURER, E.J. 2002. Short chain organic acids dynamics in solution of flooded soil treated with ryegrass residues. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.33, p.779-787.

SOUSA, S.; CAMARGO, F.A.O.; VAHL, L.C. 2010. Solos Alagados (Reações de redox). In: **Fundamentos de química de solo**. Meurer, E.J. (ed.). Porto Alegre: Gênese. p.185-209.

THOMAS, A. L. 2009 . Potencialização da absorção de sódio pelo amônio em soja com sistema radicular inundado. In: XXXVII Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, 2009, Porto Alegre - RS. **Programa e resumos da XXXVII Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul**. Porto Alegre - RS : UFRGS.

THOMAS, A.L. 2004. **Modificações morfológicas e assimilação de nitrogênio em plantas de soja (*Glycine max*) com sistemas radiculares sob deficiência de O₂**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, tese de doutorado. 76p.

THOMAS, A.L.; SODEK, L. 2005. Development of the nodulated soybean plant after flooding of the root system with different sources of nitrogen. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.17, p.291-297.

VEDELAGO, A.; CARMONA, F.C.; BOENI, M.; LANGE, C.E.; ANGHINONI, I. 2012. **Fertilidade e aptidão de uso dos solos para cultivo da soja nas regiões arrozeira do Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA. Divisão de Pesquisa. 48 p. (Boletim Técnico, 12).

WIRÉN, N. VON; GAZZARRINI, S.; GOJON, A; FROMMER, W.B. 2000. The molecular physiology of ammonium uptake and retrieval. **Current Opinion in Plant Physiology**, v.3, p.254-261.



Adaptações morfológicas da soja ao excesso de umidade no solo

André Luís Thomas¹ & Sandra Maria Carmello-Guerreiro²

A inundação do solo limita a disponibilidade de O_2 ao sistema radicular das plantas, restringindo a síntese de energia (ATP) e carboidratos que são essenciais ao desenvolvimento vegetal. A habilidade de um genótipo sobreviver ao suprimento limitado de O_2 está relacionada, num primeiro momento, a sua capacidade de superar essa crise de energia através de adaptações fisiológicas e morfológicas (Bailey-Serres & Voesenek, 2008).

O desenvolvimento, nos órgãos submersos, de aerênquima e de raízes adventícias são as principais modificações morfológicas para um genótipo superar a deficiência de O_2 no sistema radicular (Bailey-Serres & Voesenek, 2008; Voesenek & Sasidharan, 2013). O aerênquima pode reduzir substancialmente a resistência interna ao trans-

1 Professor do Departamento de Plantas de Lavoura da Faculdade de Agronomia da UFRGS, Porto Alegre - RS. E-mail: thomaspl@ufrgs.br

2 Professora do Departamento de Biologia Vegetal do Instituto de Biologia da UNICAMP, Campinas - SP. E-mail: smcg@unicamp.br

porte de O_2 , N_2 e vários metabólitos gasosos como CO_2 e etileno, especialmente entre a parte aérea e as raízes. O transporte de O_2 pelo aerênquima diminui o risco de anoxia na planta, quando ela está com o sistema radicular inundado ou completamente submersa e, ainda, promove a desintoxicação da rizosfera das substâncias formadas em solos reduzidos (como óxidos ferrosos e manganosos) devido à perda de O_2 pelas raízes (Jackson & Armstrong, 1999; Sousa et al., 2010).

Modificações morfológicas e desenvolvimento de aerênquima

a) na planta

Em genótipos de soja com sistema radicular inundado pode ocorrer uma interconexão de aerênquima (Figura 1) entre o segmento do caule submerso e a raiz principal, a raiz principal e as raízes laterais mais superficiais (até 5 cm de profundidade) e as raízes laterais mais superficiais e os nódulos, a partir do 5° dia de inundação. Além do que, no segmento do caule submerso pode ocorrer o desenvolvimento de raízes adventícias (a partir do 2° dia de inundação) com aerênquima esquizógeno e lisígeno (desde o 2° dia de desenvolvimento da raiz adventícia) e a partir do periciclo (após 2 semanas de inundação). Isso demonstra a capacidade da planta de soja tolerar o excesso de umidade no solo (VanToai et al., 1994; Bacanamwo & Purcell, 1999; Thomas et al., 2000; Pires et al., 2002; Shimamura et al., 2003; Thomas et al., 2005).

b) no segmento do caule submerso e raízes adventícias

Com um dia de alagamento, em temperaturas acima de 25 °C, pode iniciar a hipertrofia de lenticelas no segmento do caule submerso. No segundo dia aumentam o número de lenticelas hipertrofiadas e o desenvolvimento de aerênquima nas lenticelas já hipertrofiadas, começam a surgir raízes adventícias (Figura 2A) e a epiderme do caule submerso começa a se romper (Figura 2B e 3A) devido ao desenvolvimento de aerênquima produzido a partir de divisões de células do periciclo (Figuras 3A e B). Com 3 dias de inundação as raízes adventícias atingem 2 a 5 mm de comprimento. Durante o 4° ou 5° dia acentua-se o desenvolvimento do aerênquima no caule submerso e na transição caule-raiz principal da planta (Figura 2C e D, respectivamente), bem como algumas raízes adventícias apresentam mais de 1 cm de comprimento (Figura 4A). Do 7° para o 14° (Figura 1) e 21° dia de inundação praticamente não ocorre alteração no volume de aerênquima na seção transversal do caule submerso, já o número de raízes adventícias aumenta.

As raízes adventícias (Figura 4B) do caule submerso apresentam aerênquima esquizógeno e lisígeno no córtex (Figura 4C). Com o prolongamento da inundação aumenta a formação de aerênquima lisígeno e a partir do 14° dia de inundação observa-se o desenvolvimento de aerênquima a partir de divisões de células do periciclo (Figura 5). O aerênquima produzido a partir do periciclo desloca a endoderme e o córtex em direção à parte mais externa da raiz, rompendo a epiderme e eliminando esses tecidos. Após 14 dias de inundação observa-se a presença de raízes laterais nas raízes adventícias (Figura 1).

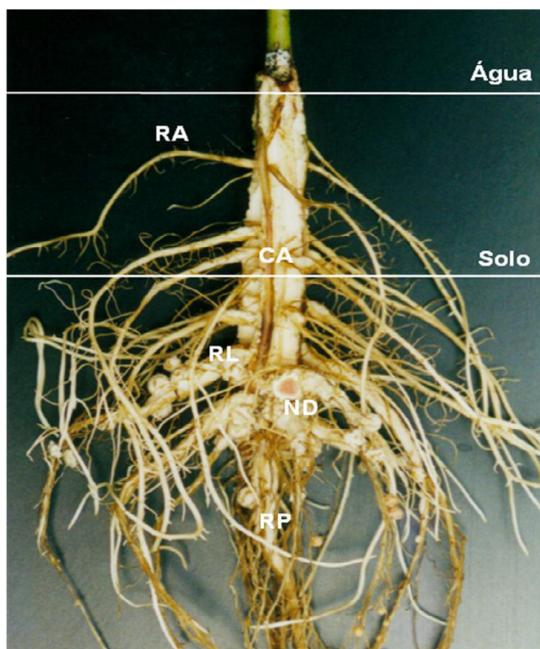


Figura 1. Planta de soja com segmento do caule e sistema radicular inundados por 14 dias, com desenvolvimento de raízes adventícias (RA) e interconexão de aerênquima entre o segmento do caule (CA) submerso, a raiz principal (RP) e as raízes laterais (RL) mais superficiais e dessas com os nódulos (ND).

Thomas, 2004.

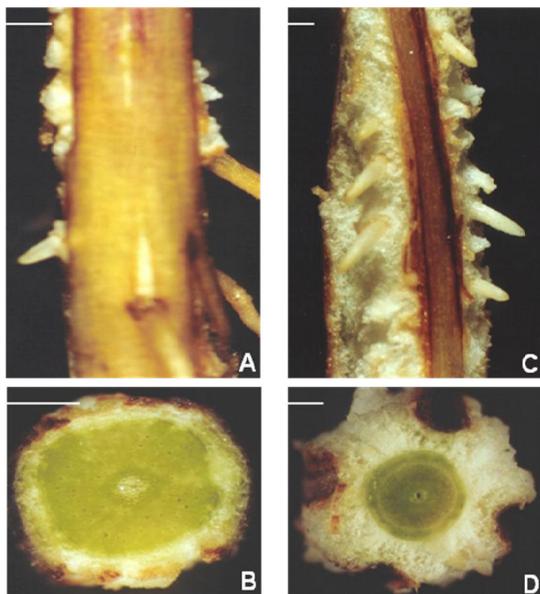


Figura 2. Segmento da transição do caule com a raiz principal de uma planta de soja inundada por 2 dias (A) e inundada por 5 dias (C). Corte transversal do caule de uma planta de soja inundada por 2 dias (B) e inundada por 5 dias (D). Barras = 1mm.

Thomas, 2004.

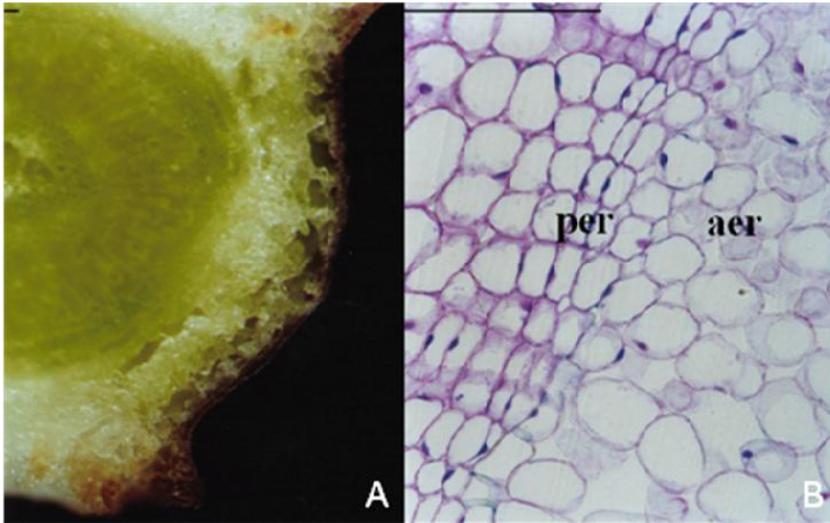


Figura 3. A) Desenvolvimento de aerênquima no caule submerso de uma planta de soja inundada; B) Corte transversal do caule submerso mostrando o desenvolvimento de aerênquima (aer) a partir do periciclo (per). Barras = 100 μ m.

Thomas, 2004.

c) na raiz principal e nas raízes laterais

O desenvolvimento de aerênquima nos primeiros 8 cm da raiz principal (Figura 4A) é pequeno até o 4^o dia de inundação, a partir daí ele aumenta rapidamente (Tabela 1). O aerênquima tem origem a partir de divisões de células do periciclo. Nas raízes laterais observa-se o surgimento de aerênquima a partir do 5^o ou 6^o dia de inundação, tendo como origem divisões de células do periciclo (Figura 6B). No 14^o dia de inundação, observa-se que, tanto nos primeiros 8 cm da raiz principal como nas raízes laterais situadas entre 2 e 3 cm de profundidade, o aerênquima produzido a partir do periciclo desloca a endoderme e o córtex em direção à parte mais externa da raiz, rompe a

epiderme e elimina esses tecidos. O desenvolvimento de aerênquima na raiz principal e nas raízes laterais não ocorre no córtex conforme descrito por Bacanamwo & Purcell (1999) e Pires et al. (2002), mas sim em substituição ao córtex, tendo em vista que o aerênquima é produzido a partir de células do periciclo.

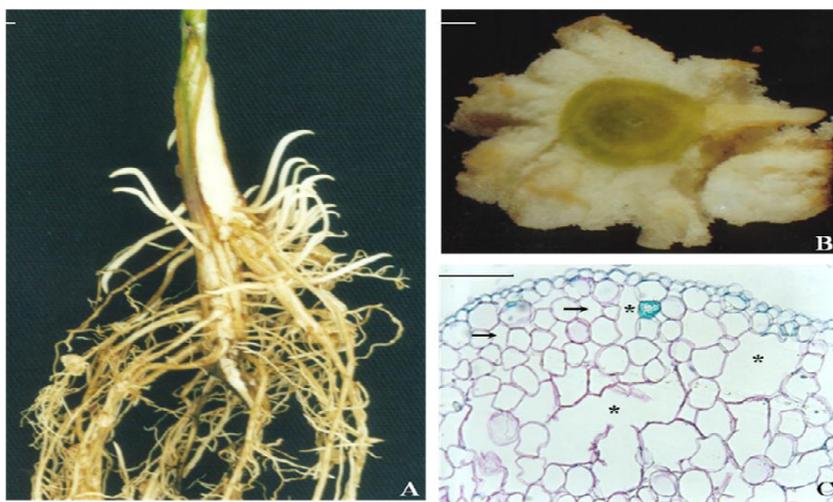


Figura 4. A) Planta de soja inundada por 5 dias; B) Desenvolvimento da raiz adventícia a partir do caule submerso por 14 dias; C) Corte transversal da raiz adventícia mostrando a presença de aerênquima esquizógeno (→) e lisígeno (*) no córtex. Barras: A e B = 1mm e C = 100 mm.

Thomas, 2004.

d) nos nódulos

O desenvolvimento de aerênquima nos nódulos, situados nos primeiros 3 cm de profundidade, é rápido com a inundação, atingindo em torno de 1,8 % do volume do nódulo após 1 dia de inundação e não se alterando mais (Tabela 1). O aerênquima tem origem em divisões de c -

lulas do felogênio (Figura 6C), apresentando uma conexão entre o aerênquima do nódulo e o aerênquima da raiz lateral a que ele está ligado (Figura 6A). Os nódulos da soja suportam a inundação por até 21 dias (Pankhurst & Sprent, 1975; Dakora & Atkins, 1989; Parson & Day, 1990; Thomas, 2004) e isso se deve ao desenvolvimento de aerênquima a partir de células do felogênio. Entretanto, em nódulos situados abaixo de 7-8 cm de profundidade praticamente não ocorre desenvolvimento de aerênquima. Mesmo em nódulos de raízes de plantas não inundadas, cultivadas em vermiculita, que retém grande quantidade de água, pode ocorrer o desenvolvimento de aerênquima a partir da hipertrofia de lenticelas. A hipertrofia das lenticelas ocorre devido a divisões de células do felogênio.

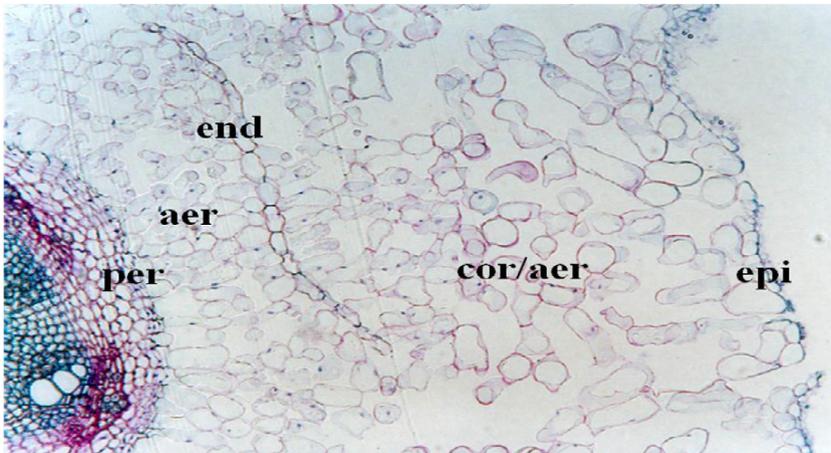


Figura 5. Corte transversal da raiz adventícia de soja com 21 dias de inundação. aer = aerênquima; cor = córtex; end = endoderme; epi = epiderme; per = periciclo.

Thomas, 2004.

Tabela 1. Percentual de espaço poroso (aerênquima) nos nódulos e raiz principal, nos primeiros 8 cm de profundidade, em plantas de soja, com 10-12 folhas trifolioladas desenvolvidas e no florescimento, com sistemas radiculares inundados durante 10 dias.

	Dias de inundação									
	0	1	2	3	4	5	6	7	10	
 Aerênquima (%)									
Nódulos	0,4	1,9	1,9	1,9	1,7	1,8	1,8	1,8	2,1	
Raiz principal	0,3	1,6	2,5	2,6	4,7	13,4	17,3	22,0	21,7	

Thomas, 2004.

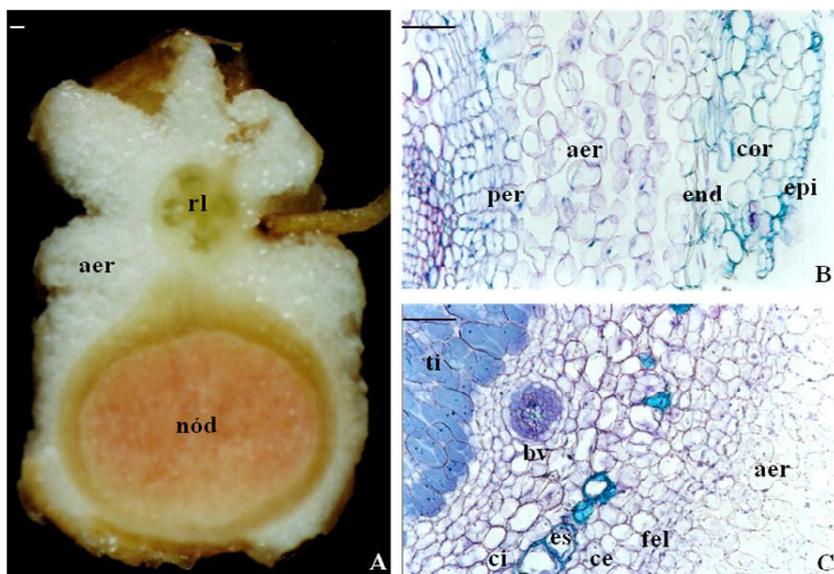


Figura 6. A) Aerênquima (aer) na raiz lateral (rl) e no nódulo (nód) de uma planta de soja inundada por 21 dias; B) Desenvolvimento de aerênquima a partir do periciclo (per) na raiz lateral; C) Desenvolvimento de aerênquima a partir do felogênio (fel) no nódulo. Abreviaturas - bv: bainha vascular, cor: córtex, ce: córtex externo, ci: córtex interno, end: endoderme, es: esclereídes, epi: epiderme, ti: tecido infectado. Barras = 100 mm.

Thomas et al., 2005.

Em suma, genótipos de soja possuem a capacidade de tolerar o excesso de umidade no solo pelo desenvolvimento de raízes adventícias e aerênquima nos órgãos submersos. A origem do aerênquima no segmento do caule submerso é o periciclo; nas raízes adventícias é esquizógena e lisígena no córtex, com posterior desenvolvimento a partir do periciclo; na raiz principal e nas raízes laterais é o periciclo; e no nódulo é o felogênio.

O aerênquima pode ter origem meristemática ou não. A origem meristemática ocorre a partir de sucessivas divisões, induzidas pela hipoxia, de células meristemáticas originando um tecido parenquimático esponjoso (Justin & Armstrong, 1987), esse tipo de aerênquima é denominado aerênquima secundário. O aerênquima não meristemático pode ser formado por padrões específicos de separação e expansão diferencial entre células adultas (aerênquima esquizógeno) ou pela morte e dissolução de células adultas específicas (aerênquima lisígeno). Entretanto, os dois tipos de aerênquima não meristemático podem ocorrer na mesma planta. O aerênquima esquizógeno pode preceder a ocorrência do aerênquima lisígeno no mesmo órgão, que também pode apresentar aerênquima meristemático (Justin & Armstrong, 1987; Armstrong et al., 1994; Schussler & Longstreth, 1996; Jackson & Armstrong, 1999; Drew et al., 2000; Thomas et al.; 2005; Fagerstedt, 2010).

Aerênquima e raízes adventícias: de essenciais a coadjuvantes para um genótipo de soja tolerar o excesso hídrico no solo

O desenvolvimento de raízes adventícias e aerênquima nos órgãos submersos da planta de soja têm sido considerados essenciais para a espécie tolerar o excesso de umidade no solo (VanToai et al., 1994; Bacanamwo & Purcell, 1999; Thomas et al., 2000; Pires et al., 2002; Shimamura et al., 2003; Thomas, 2004; Thomas et al., 2005; Shimamura et al., 2010). Entretanto, o custo energético dessas adaptações morfológicas reduz o desenvolvimento das plantas de soja (Tabela 2; Figuras 7 e 8). Tem-se observado que genótipos de soja com pouco aerênquima e poucas raízes adventícias apresentam maior tolerância ao excesso hídrico que genótipos com abundância de aerênquima e raízes adventícias, demonstrando que diferenças metabólicas também estão envolvidas no processo (Thomas, 2008).

Tabela 2. Área foliar, altura do caule, comprimento da raiz principal, diâmetro e área do caule no nível do solo, e número de raízes adventícias em uma planta de soja de um genótipo tolerante e outro suscetível à inundação do sistema radicular, após 21 dias de inundação*.

Parâmetros avaliados na planta	Genótipos	
	Tolerante	Suscetível
Área foliar (cm ²)	107 a	32 b
Altura do caule (cm)	11 a	5 b
Comprimento da raiz principal (cm)	10 a	5 b
Diâmetro do caule no nível do solo (mm)	5 b	8 a
Área do caule no nível do solo (mm ²)	20b	50a

*iniciou com plantas com 2 folhas trifolioladas.

Thomas, 2008.



Figura 7. Variabilidade genética da soja à inundação do sistema radicular. Genótipos no mesmo est dio de desenvolvimento.

Thomas, 2008.



Figura 8. Genótipo de soja tolerante   inundação (8A   esquerda) com hipertrofia de lenticelas no segmento do caule submerso e poucas raízes adventícias (8B) e genótipo suscetível (8A   direita) com grande desenvolvimento de aerênquima e de raízes adventícias no segmento do caule submerso (8C).

Thomas, 2008.

O menor desenvolvimento de aerênquima e de raízes adventícias em genótipos mais tolerantes ao excesso de água no solo quebra o dogma de que essas modificações morfológicas são essenciais para a soja sobreviver à baixa concentração de O_2 no sistema radicular. A capacidade de um genótipo tolerar a baixa disponibilidade de O_2 está relacionada a uma série de fatores como: seletividade das raízes a elementos tóxicos como NH_4 e Fe; capacidade de quelar grande quantidade de Fe para ele não participar de reações que produzem radicais livres, habilidade de detoxificação desses quando produzidos em grande quantidade; bem como ter a capacidade de atuação de hemoglobinas não simbióticas que capturam O_2 em baixas concentrações e eliminam o excesso de óxido nítrico sintetizando nitrato, entre outros fatores que são abordados no Capítulo 4.

Referências bibliográficas

- ARMSTRONG, W.; BRÄNDLE, R.; JACKSON, M.B. 1994. Mechanisms of flood tolerance in plants. *Acta Botanica Neerlandica*, v.43, p.307-358.
- BACANAMWO, M.; PURCELL, L.C. 1999. Soybean root morphological and anatomical traits associated with acclimation to flooding. *Crop Science*, v.39, p.143-149.
- BAILEY-SERRES, J.; VOESENEK, L.A.C.J. 2008. Flooding stress: acclimations and genetics diversity. *Annual Review of Plant Biology*, v.59, p.313-339.
- DAKORA, F.D.; ATKINS, C.A. 1989. Diffusion of oxygen in relation to structure and function in legume root nodules. *Australian Journal of Plant Physiology*, v.16, p.131-140.

DREW, M.C.; HE, C.; MORGAN, P.W. 2000. Programmed cell death and aerenchyma formation in roots. **Trends in Plant Science**, v.5, p.123-127.

FAGERSTEDT, K.V. 2010. Programmed cell death and aerenchyma formation under hypoxia. In: Mancuso, S.; Shabala, S. (eds.). **Waterlogging signalling and tolerance in plants**. Heidelberg, Germany: Springer. p. 99-118.

JACKSON, M.B.; ARMSTRONG, W. 1999. Formation of aerenchyma and the processes of plant ventilation in relation to soil flooding and submergence. **Plant Biology**, v.1, p.274-287.

JUSTIN, S.F.W.; ARMSTRONG, W. 1987. The anatomical characteristics of roots and plant response to soil flooding. **New Phytologist**, v.106, p.465-495.

PANKHURST, C.E.; SPRENT, J.I. 1975. Surface features of soybean nodules. **Protoplasma**, v.85, p.85-98.

PARSONS, R.; DAY, D.A. 1990. Mechanism of soybean nodule adaptation to different oxygen pressures. **Plant, Cell & Environment**, v.13, p.501-512.

PIRES, J.L.; SOPRANO, E.; CASSOL, B. 2002. Adaptações morfo-fisiológicas da soja em solo inundado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p.41-50.

SCHUSSLER, E.E.; LONGSTRETH, D.J. 1996. Aerenchyma develops by cell lyses in roots and cell separation in leaf petioles in *Sagittaria lancifolia* (Alismataceae). **American Journal of Botany**, v.83, p.1266-1273.

SHIMAMURA, S.; MOCHIZUKI, T.; NADA, Y; FUKUYAMA, M. 2003. Formation and function of secondary aerenchyma in hypocotyl, roots and nodules of soybean (*Glycine max*) under flooded conditions. **Plant and Soil**, v.251, p.351-359.

SHIMAMURA, S.; YAMAMOTO, R.; NAKAMURA, T.; SHIMADA, S.; KOMATSU, S. 2010. Stem hypertrophic lenticels and secondary

aerenchyma enable oxygen transport to roots of soybean in flooded soil. **Annals of Botany**, v. 106, p.277-284.

SOUSA, S.; CAMARGO, F.A.O.; VAHL, L.C. 2010. Solos Alagados (Reações de redox). In: **Fundamentos de química de solo**. Meurer, E.J. (ed.). Porto Alegre: Gênese. p.185-209.

THOMAS, A.L. 2004. **Modificações morfológicas e assimilação de nitrogênio em plantas de soja (*Glycine max*) com sistemas radiculares sob deficiência de O₂**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, tese de doutorado. 76p.

THOMAS, A.L. 2008. Modificações morfológicas na planta de soja como indicadoras da tolerância à inundação. In: Reunião da pesquisa de soja da região sul, 36, 2008, Porto Alegre. **Ata e resumos...** Porto Alegre: Fepagro. p.75.

THOMAS, A.L.; GUERREIRO, S.M.C.; SODEK, L. 2005. Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the root system of nodulated soybean. **Annals of Botany**, v.96, p.1191-1198.

THOMAS, A.L.; PIRES, J.L.F.; MENEZES, V.G. 2000. Rendimento de grãos de cultivares de soja na várzea. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**. Porto Alegre, v.6, p.107-112.

VAN TOAI, T.T.; BEUERLEIN, J.E.; SCHMITTHENNER, A.F.; MARTIN, S.K.ST., 1994. Genetic variability for flooding tolerance in soybeans. **Crop Science**, v.34, p.1112-1115.

VOESENEK, L. A. C. J.; ASIDHARAN, R. 2013. Ethylene - and oxygen signalling - drive plant survival during flooding. **Plant Biology**, v.15, p.426-435.

Adaptações fisiológicas da soja ao excesso de umidade no solo

André Luís Thomas¹ & Ladaslav Sodek²

No sistema radicular inundado, durante a diminuição da disponibilidade de O_2 , a respiração aeróbica é substituída parcialmente pela glicólise e fermentação. Neste caso, a respiração mitocondrial é limitada pela falta de O_2 como aceptor final de elétrons. A fermentação corresponde a um período excepcional e transitório no metabolismo das raízes, onde a produção de ATP cai de 36 para 2 moles por mol de glicose metabolizada (Dennis et al., 1992; Morard & Silvestre, 1996; Sousa & Sodek, 2002; Bailey-Serres & Voesenek, 2008).

Na respiração anaeróbica, pela falta de O_2 como aceptor final de elétrons, ocorre o acúmulo de intermediários no ciclo de Krebs, diminuição da disponibilidade de NAD^+ e acúmulo de piruvato. A partir do piruvato são produ-

1 Professor do Departamento de Plantas de Lavoura da Faculdade de Agronomia da UFRGS, Porto Alegre - RS. E-mail: thomaspl@ufrgs.br

2 Professor do Departamento de Biologia Vegetal do Instituto de Biologia da UNICAMP, Campinas-SP. E-mail: lsodek@unicamp.br

zidos os principais produtos da fermentação em tecidos vegetais: etanol e lactato (Figura 1). Embora a atividade conjunta da glicólise e da fermentação permitam apenas a síntese limitada de ATP, pela fosforilação ao nível de substrato, regenera-se NAD^+ e remove-se o excesso de prótons (Dennis et al., 1992; Armstrong et al., 1994; Ricard et al., 1994; Morard & Silvestre, 1996; Drew, 1997; Sousa & Sodek, 2002).

Em raízes de soja sob hipoxia, outro destino importante do piruvato é a conversão em alanina. O acúmulo de alanina em vez de lactato ou etanol tem a vantagem de provocar uma queda menor no pH celular e levar ao funcionamento parcial do ciclo de Krebs (Rocha et al., 2010), permitindo maior produção de ATP; sem perda de carbono, pois a alanina pode ser metabolizada facilmente após a remoção do estresse (Sousa & Sodek, 2003). Por outro lado, com a formação de alanina não há regeneração de NAD^+ , essencial para a continuidade da glicólise e a formação de ATP. Possivelmente, a regeneração de NAD^+ está associada a uma reação secundária envolvida na formação de alanina. Como esquematizado na Figura 1, o doador de N para transformar piruvato em alanina é o ácido glutâmico, em reação catalizada pela alanina aminotransferase. O N do ácido glutâmico é repostado em outra reação de transaminação envolvendo o ácido aspártico. Nesta reação, o ácido aspártico ao doar seu N se transforma em ácido oxaloacético, por sua vez é rapidamente transformado em ácido málico numa reação que regenera NAD^+ . Esta via metabólica faz parte do esquema proposto por Rocha et al. (2010) envolvendo o funcionamento parcial do ciclo de Krebs associado à formação de alanina sob hipoxia e viabiliza o funcionamento da glicólise.

Adaptações fisiológicas da soja ao excesso de umidade no solo

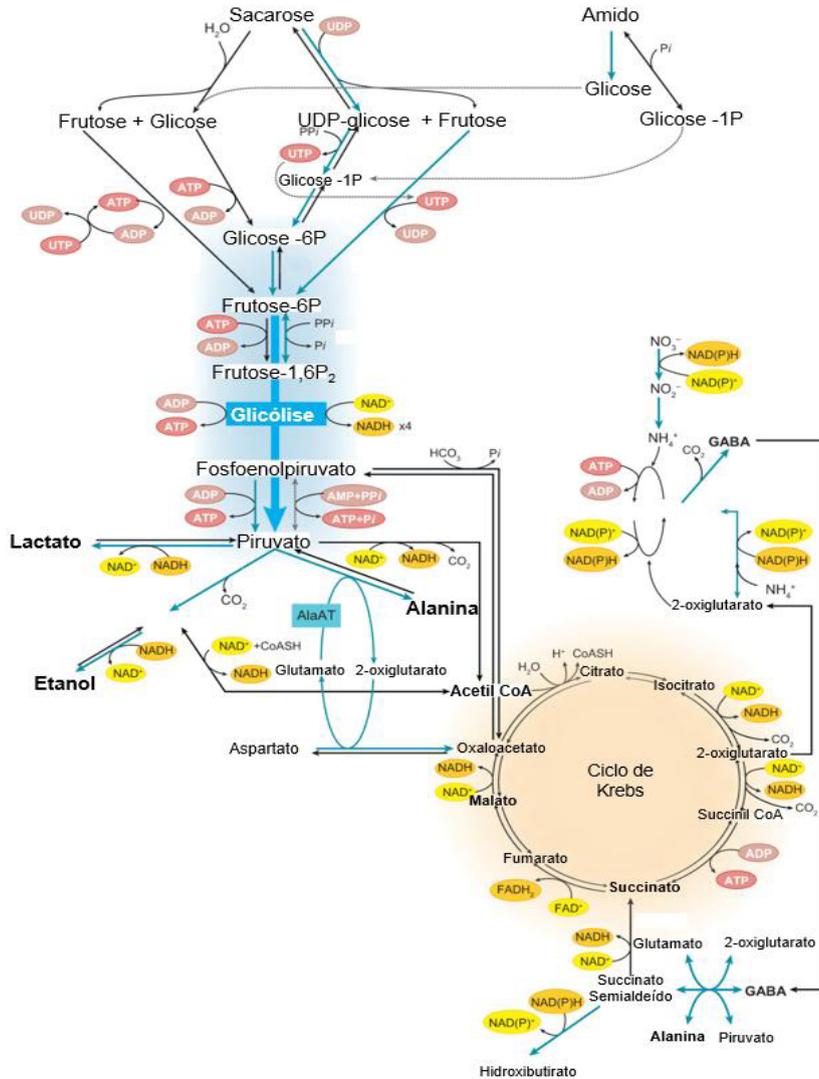


Figura 1. Aclimação metabólica sob deficiência de O₂. As plantas têm muitas rotas de catabolismo da sacarose, produção de ATP e regeneração de NAD⁺ e NAD(P)⁺. As setas azuis indicam as reações que são produzidas durante o estresse.

Adaptado de Bailey-Serres & Voeselek, 2008.

O desenvolvimento de aerênquima e de raízes adventícias é uma resposta comum em plantas após inundação do sistema radicular. Tais modificações morfológicas podem melhorar a tolerância destas espécies à hipoxia, pois estas estruturas facilitam a difusão de oxigênio para as raízes submersas (Jackson & Armstrong, 1999; Drew et al., 2000; Schussler & Longstreth, 2000; Gibberd et al., 2001; Thomas et al., 2005). Entretanto, nem sempre a formação dessas estruturas constitui a melhor estratégia para um genótipo de soja tolerar a inundação do solo, pois genótipos com poucas modificações morfológicas podem apresentar melhor tolerância à inundação (ver Capítulo 3). A presença na solução do solo de NH_4 como forma predominante de nitrogênio e a grande disponibilidade de Fe, bem como o aumento na concentração de Mn e Na são fatores importantes que interferem no metabolismo da soja sob hipoxia. Estes fatores são abordados com mais detalhe a seguir.

Amônio

No tecido de plantas supridas somente com amônio (NH_4) ocorre o acúmulo desse íon, de ânions inorgânicos (cloro, sulfato e fosfato) e de aminoácidos, com redução de cátions essenciais (K, Ca e Mg) e ácidos orgânicos (Holldampf & Barker, 1993; Marschner, 1995), diminuindo o desenvolvimento da soja (Tabela 1). Em função disso, algumas hipóteses têm sido formuladas para explicar o efeito prejudicial do NH_4 às plantas, mas nenhuma delas é considerada satisfatória (Wirén et al 2000).

a) a absorção de NH_4 pelas raízes está associada ao mecanismo de efluxo de H^+ à rizosfera e a liberação de H^+ também está relacionada à incorporação de NH_4 em

proteínas, sugerindo a acidificação da rizosfera e/ou distúrbio do pH intracelular, o que poderia explicar o efeito prejudicial do NH_4 . Entretanto, em muitos casos a toxidez é observada em meio com pH tamponado e espécies sensíveis à toxidez não demonstram distúrbio no pH citosólico induzido pelo NH_4 (Wirén et al., 2000; Britto et al., 2001).

Tabela 1. Estatura e área foliar de plantas de soja inoculadas e com raízes inundadas durante 5 e 14 dias com solução nutritiva sem N (SN) e com NO_3 , NH_4 e NH_4NO_3 , a partir do estádio V6-7, e em plantas com raízes não inundadas (NI).

Tratamentos	Estatura (cm)		Área foliar (cm^2 /planta)	
	5 dias	14 dias	5 dias	14 dias
NI	62 ab*	77 a	1334 a	2199 a
SN	65 a	77 a	1132 b	1642 bc
NO_3	63 a	77 a	1307 a	2012 ab
NH_4	55 c	67 b	1219 ab	1458 c
NH_4NO_3	57 bc	69 b	1198 b	1640 bc

* Médias seguidas por letras diferentes na coluna diferem entre si.

Adaptado de Thomas, 2004.

b) a limitação de carboidratos nas raízes também contribuiria para o efeito prejudicial, baseado no fato de que o NH_4 por si só não é translocado à parte aérea em muitas espécies e, então, grande quantidade de esqueletos de carbono para assimilação de N precisariam ser providos às raízes, ocasionando a falta de esqueletos de carbono nas mesmas. Porém, em alguns casos, o suprimento externo de α -cetoglutarato, uma fonte chave de carbono para assimilação de N, alivia os sintomas de toxidez, mas em outros casos ele aumenta o metabolismo do NH_4 , sugerindo que outros fatores podem limitar a assimilação de NH_4 (Britto et al., 2001).

c) a diminuição de cátions essenciais como K, Mg e Ca no tecido de plantas submetidas a períodos prolongados de nutrição com NH_4 pode contribuir para a toxidez devido ao desbalanço nutricional (Britto et al., 2001). Transportadores e canais de K são hábeis para transportar NH_4 , portanto esses transportadores podem contribuir para a toxidez de NH_4 quando há baixa concentração de K na solução do solo (Hoopen et al., 2010).

d) em espécies sensíveis a toxidez de NH_4 , submetidas a altas concentrações externas de NH_4 , ocorre uma hiperpolarização negativa do potencial da membrana plasmática das células das raízes, ocasionando uma disfunção na regulação da entrada de NH_4 , que leva ao acúmulo excessivo de NH_4 no citosol. Para minimizar o efeito do excesso de NH_4 , ocorre um efluxo ativo (com gasto de ATP) de mais de 80% do NH_4 que entrou nas células através da membrana plasmática das células das raízes. Este ciclo fútil aumenta em 40% a respiração das raízes, é independente da atividade da glutamina sintetase e de outros processos relacionados ao metabolismo do N e é acompanhado por uma diminuição no desenvolvimento das plantas (Britto et al., 2001; Li et al., 2013). Entretanto, o alto custo energético do efluxo de NH_4 através da membrana plasmática está superestimado e o consumo da energia requerida para ativar o efluxo pode aumentar os sintomas de toxidez, ou seja, diminuir o desenvolvimento da planta (Kronzucker et al., 2001).

Em um solo inundado a fonte de N predominante é o NH_4 (ver Capítulo 2) que é prejudicial para muitas espécies vegetais. Entretanto, quando utiliza-se o nitrato (NO_3) como fonte de N para plantas de soja com sistema radicular sob hipoxia, cultivadas em solução nutritiva (ausência de solo e atividade microbiana) o desenvolvimento das plan-

tas é similar à condição de normoxia (Tabela 1). O efeito benéfico do nitrato na tolerância ao alagamento é bem conhecido (Malavolta 1954; Trought & Drew 1981; Allegre et al., 2004; Thomas & Sodek, 2005; Horchani et al., 2010). O NO_3 estimula a proliferação de raízes laterais no sistema radicular da soja sob hipoxia (Figura 2). A nível metabólico o efeito benéfico do NO_3 envolve a regeneração do NAD^+ (Figura 1). Primeiro, na redução do nitrato pela nitrato redutase formando o nitrito e, segundo, durante o metabolismo do nitrito que pode seguir dois caminhos sob hipoxia. O primeiro, idêntico ao que ocorre sob normoxia, leva a redução do nitrito em amônia seguido pela assimilação do N pelo sistema GS/GOGAT, reações que consomem elétrons e regeneram NAD^+ . Entretanto, este caminho é muito limitado em hipoxia (Lee 1978; Trought & Drew, 1981; Morard et al., 2004; Brandão & Sodek, 2009; Oliveira et al., 2013a). O segundo caminho leva a redução de nitrito em NO. A própria enzima redutase de nitrato responsável pela formação do nitrito a partir do nitrato também mostra atividade, em hipoxia, na transformação de nitrito em NO (Rockel et al., 2002). Entretanto, as evidências indicam que o papel da redutase de nitrato é apenas fornecer o nitrito precursor do NO e não na produção direta do NO a partir de nitrito (Salgado et al., 2006; Oliveira et al., 2013b). Mais recentemente, em trabalho com a soja, Oliveira e colaboradores (2013b) obtiveram evidência de que o nitrito se transforma em NO no mitocondria onde o nitrito substitui o O_2 como acceptor terminal de elétrons no processo de fosforilação oxidativa, assim formando NO (Gupta & Igamberdiev, 2011). Desta forma o nitrito permite não apenas a regeneração de NAD^+ mas também a formação de ATP. Tais processos podem explicar o efeito benéfico do nitrato na tolerância da planta ao alagamento e à hipoxia.



Figura 2. Sistemas radiculares de plantas de soja inoculadas e inundadas durante 14 dias com diferentes fontes de nitrogênio (N₂ - somente fixação simbiótica; NO₃ - adição de nitrato; NH₄ - adição de amônio).

Thomas, 2004.

Ferro

A absorção excessiva de ferro pode causar toxidez na planta de soja, limitando seu crescimento (Foy et al., 1978), provocando os sintomas de amarelecimento foliar, clorose e morte de folhas novas (Barni, 1999). A toxidez pode ser indireta ou direta (Sahrawat, 2005; Becker & Asch, 2005). Indireta quando ocorre deficiência de outros nutrientes como P, K, Ca, Mg e Zn, com a planta acumulando ou não concentrações tóxicas de Fe nos tecidos. Direta quando há excesso de Fe na forma livre dentro da célula, aumenta a produção de radicais livres, como consequência ocorre a peroxidação de lipídios e danos a proteínas e áci-

dos nucleicos, podendo levar a célula à morte (Halliwell & Gutteridge, 1992).

Plantas de soja cultivadas sob inundação em solos hidromórficos apresentam altos teores de ferro nas folhas, chegando a valores entre 0,8 e 3,0 g de Fe/ kg de matéria seca (Barni, 1999; Pires et al., 2002). Porém, existe diferença na suscetibilidade a toxidez por ferro entre cultivares de soja (Foy et al., 1978).

Para o excesso de absorção de ferro, em plantas sob inundação, são mencionados mecanismos de tolerância: 1. restrição da absorção pela capacidade da planta oxigenar o sistema radicular através de aerênquima, oxidando Fe^{+2} a Fe^{+3} na superfície das raízes, com consequente precipitação do Fe^{+3} sobre elas (Foy et al., 1978; Hendry & Brocklebank, 1985; Marschener, 1995), ou restrição à entrada através da membrana plasmática das células das raízes (Hall, 2002); 2. quelar o Fe que entrou na planta com citrato, nicotianamina e fitosideróferos da família do ácido mugineico a fim de diminuir sua reatividade durante o transporte (Kobayashi & Nishizawa, 2012); 3. a absorção de Fe^{+2} em excesso induz a produção do radical $O_2^{\cdot-}$ (superóxido) nas raízes, aumentando a atividade da superóxido dismutase que cataliza a síntese de H_2O_2 ($O_2^{\cdot-} + O_2^{\cdot-} + 2H^+ \rightarrow H_2O_2$). Com o acúmulo transitório de H_2O_2 nas raízes e a presença de ferro livre, pode haver a formação de radicais hidroxilas ($Fe^{+2} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{+3} + OH + OH$), que causam peroxidação de lipídios, inativação de membranas de proteínas, perda da integridade e morte celular. Em espécies e/ou genótipos tolerantes, além do aumento da atividade da superóxido dismutase, ocorre a indução da síntese da peroxidase que converte H_2O_2 em H_2O , sendo que esse mecanismo pode tornar-se ineficaz 36-48 horas após sua

indução (Hendry & Brocklebank, 1985); 4. absorção com compartimentalização do ferro em espaços apoplásticos e vacúolos; e 5. também uma classe de proteínas, as ferritinas, atuam no tamponamento do ferro dentro da célula. Cada molécula de ferritina da soja pode armazenar de 800 a 2700 átomos de ferro numa forma solúvel, não tóxica e prontamente disponível à célula. Portanto, o conteúdo de ferro no tecido vegetal (Tabela 2) é um parâmetro impreciso para avaliar o efeito tóxico desse elemento sobre o tecido vegetal. As ferritinas acumulam-se nos cloroplastos e plastídios não verdes (proplastídeos, etioplastos e amiloplastos), sendo encontradas em tecidos da parte aérea, ápice radicular, sementes e nódulos (Sczekan & Joshi, 1987; Lobréaux & Briat, 1991; Ragland & Theil, 1993; Guerinot & Yi, 1994; Briat & Lobréaux, 1997; Clemens et al., 2002). A tolerância de um genótipo à toxicidade por ferro e a tolerância à inundação do solo estão correlacionadas, sendo a susceptibilidade à toxidez por ferro influenciada pelos estádios de desenvolvimento e nutricional da planta (Foy et al., 1978).

Tabela 2. Teor de nitrogênio (N), potássio (K), ferro (Fe), manganês (Mn) e sódio (Na) nas folhas de quatro genótipos de soja com 5 a 6 folhas trifolioladas desenvolvidas (V6-7), após inundação de 7 dias, e rendimento de grãos com inundação de 7 dias em V6-7 e no enchimento de grãos, em solo de várzea (Gleissolo).

Genótipo	Nutrientes nas folhas					Rendimento de grãos
	N	K	Fe	Mn	Na	
	.....%	.....	..... mg/kg.....			kg/ha
1	2,6	1,1	2500	152	698	840
2	2,0	1,2	2100	178	67	1310
3	1,7	1,0	6800	92	58	2064
4	2,1	0,8	1900	95	93	2600

Thomas & Costa, 2010.

Manganês

Como um micronutriente essencial, baixos níveis de Mn são necessários para a nutrição e o desenvolvimento da planta. No entanto, quando está presente em quantidades excessivas, é extremamente tóxico para as células vegetais (Millaleo et al., 2010).

Os sintomas de toxidez por manganês (Mn) na planta caracterizam-se pelo aparecimento de pontuações castanhas nas folhas, seguidas de deformações e necrose. Entretanto o nível tóxico de Mn nas folhas de soja é característico de cada genótipo, sendo valores entre 140 e 300 mg de Mn/Kg de matéria seca de folhas relatados como tóxicos ao desenvolvimento das plantas (Carter et al., 1975; Foy et al., 1978; Heenan & Campbell, 1980; Ohki et al., 1980; Rosolem et al., 1992).

A toxidez por Mn pode ser indireta ou direta, semelhante a toxidez por Fe. Os mecanismos de tolerância da planta ao excesso de Mn envolvem o impedimento de entrada nas raízes (seletividade de membrana e liberação de exsudados como oxalato e citrato na rizosfera para diminuir a disponibilidade de Mn) e quando dentro da planta acumular Mn nas raízes, compartimentalizar em organelas ou no apoplasto, complexar com ácidos orgânicos e ativar sistemas antioxidantes (Blamey et al., 1986; Marschner, 1995; Macfie et al., 1994; Reichman, 2000; Millaleo et al., 2010). Genótipo de soja tolerante a inundação apresenta menor teor de Mn nas folhas (Tabelas 2 e 3).

Sódio

Existe diferença entre genótipos de soja quanto a tolerância à salinidade (El-Samad & Shaddad, 1997; Inanaga et al., 2001) e quando um genótipo está com o sistema ra-

dicular inundado, concentrações baixas de sódio (Na), 3 a 5 mM na solução do solo, não consideradas salinas (Colmer & Greenway, 2011), podem prejudicar seu desenvolvimento e mesmo levá-lo a morte (Thomas, 2009). Isso também ocorre com genótipos de milho (Bispo, 2011), porém não acontece a genótipos de arroz irrigado.

Tabela 3. Teor de ferro (Fe), manganês (Mn), sódio (Na) e cloro (Cl) nas folhas de genótipos de soja tolerante (Toler.) e suscetível (Susc.) à inundação, em tratamentos de solo não inundado (NI), inundado com água - I (H₂O), inundado com água mais amônio - I (NH₄), inundado com água mais cloreto de sódio - I (NaCl), e inundado com água mais amônio e cloreto de sódio - I (NH₄ + NaCl).

Tratamentos	Fe		Mn		Na		Cl	
	Toler.	Susc.	Toler.	Susc.	Toler.	Susc.	Toler.	Susc.
	..... mg / Kg de MS						%	
NI	A* 91 b	A 105 d	298	349	A* 33 b	A 28 c	0,37	0,97
I (H ₂ O)	B 301 a	A 459 a	254	379	A 29 b	A 55 c	0,35	0,91
I (NH ₄)	A 332 a	A 293 c	249	363	B 43 b	A 147 b	0,46	0,93
I (NaCl)	B 314 a	A 390 b	277	362	B 55 b	A 154 b	0,40	0,97
I (NH ₄ + NaCl)	B 295 a	A 359 b	272	381	B 279 a	A 457 a	0,51	1,02
Média	--	--	B* 270	A 367	--	--	B* 0,41	A 0,96

* Médias antecedidas de mesma letra maiúscula na linha e seguidas de mesma letra minúscula na coluna, para cada elemento, não diferem pelo teste de Duncan (P > 0,05).

Thomas, 2009.

A maior absorção de Na por alguns genótipos com raízes em hipoxia (Tabelas 2 e 3) pode ocasionar toxicidade metabólica de Na. Essa, em grande parte, é resultado da capacidade do Na competir com o K por sítios de ativação de enzimas essenciais para a função celular. Mais de 50 enzimas são ativadas pelo K (Evans & Sorger, 1966). Embora o Na pode substituir o K neste papel em alguns casos (Sodek

et al, 1980), quando ocorre o grau de ativação é bem inferior aquele obtido com o K. Assim, elevados níveis de Na ou alta relação Na:K podem perturbar vários processos enzimáticos no citoplasma (Tester & Davenport, 2003).

O menor teor de sódio encontrado no tecido de genótipos de soja mais tolerantes à inundação (Tabelas 2 e 3) é, provavelmente, devido à exclusão de sódio pelas raízes ou a selectividade das membranas plasmáticas das raízes em condições de hipoxia (Zhu, 2001; Tester & Davenport, 2003; Chinnusamy et al., 2005; Munns & Tester, 2008; Colmer & Greenway, 2011; Conde et al., 2011; Mian et al., 2011). O teor de sódio nas folhas pode ser considerado como um fator importante na tolerância à inundação de um genótipo. A questão que permanece é se a absorção de sódio diferencial entre genótipos tolerantes e sensíveis à inundação é devido à própria hipoxia ou à presença de amônio no solo inundado, pois esse pode causar a despolarização da membrana e a entrada de Na (Pang & Shabala, 2010). Também, a hipoxia pode estimular a entrada de Na através de canais de cátions não seletivos (Conde et al., 2011).

Fixação Simbiótica de N₂

A eficiência da fixação simbiótica de N₂ em soja depende da interação de fatores da planta, do rizóbio e do ambiente. É um processo que demanda alta quantidade de energia, requerendo ao menos 4 ATP para cada par de elétrons transferidos ao N₂. Essa energia é gerada mais eficientemente pela fosforilação oxidativa nos sítios de respiração localizados na membrana externa do rizóbio. Paradoxalmente, entretanto, o oxigênio é um inibidor da atividade da nitrogenase (Dakora & Atkins, 1989). Para contornar o problema as leguminosas possuem uma barreira à difusão de O₂ nas células do córtex do nódulo, a fim de manter um ambiente

microaeróbico (Serraj et al., 1995; Minchin, 1997; Guasch et al., 2001). Além dessa barreira, na zona infectada do nódulo há a presença de leghemoglobina cujo papel é transportar o oxigênio até a membrana externa da bactéria e ao mesmo tempo assegurar a ausência de oxigênio livre no ambiente da nitrogenase. A entrada de oxigênio nas células infectadas do nódulo é tão bem controlado por este mecanismo que mesmo em condições normais o oxigênio é o fator limitante para a atividade da nitrogenase (Layzell & Hunt, 1990). Isto explica a alta sensibilidade do processo ao alagamento, onde a disponibilidade de oxigênio no meio é muito menor. Consequentemente, a inibição da fixação de nitrogênio pelo alagamento é praticamente imediata (Amarante & Sodek, 2006).

A maioria dos genótipos de soja é suscetível ao alagamento do solo e a fixação simbiótica pode ser prejudicada pela falta de O_2 , bem como pela presença de altas concentrações de NH_4 , Fe e Mn na solução do solo. Em ensaios conduzidos em vasos, com substrato e em condições controladas de casa de vegetação, independentemente do nível de tolerância do genótipo (ver Capítulo 3), os nódulos podem suportar períodos de até 21 dias de inundação (Scholles & Vargas, 2004; Thomas, 2004), embora as plantas tenham seu desenvolvimento reduzido e apresentem clorose. Estas condições, no entanto, superestimam a capacidade de sobrevivência dos nódulos comparativamente ao que se observa em lavouras com excesso hídrico, pois não englobam vários fatores que podem impactar na vida útil dos nódulos, como as condições de maior radiação e temperatura elevada que ocorrem a campo e a interação com a atividade microbiana.

Quanto à fixação simbiótica em si, existem estudos (Thomas, 2004; Badinelli, 2008) com genótipos de soja que apresentam grande capacidade de desenvolver adap-

tações morfológicas (raízes adventícias e aerênquima), entretanto não existem informações para os genótipos que toleram o excesso hídrico no solo praticamente sem desenvolver essas adaptações.

Na soja a inundação do sistema radicular induz o aumento no teor de alanina (indicador de anaerobiose) não apenas nas raízes mas na seiva do xilema também (Puiatti & Sodek, 1999; Sousa & Sodek, 2002; Thomas & Sodek, 2005). A seiva do xilema acusa outras alterações como uma diminuição nos teores de ureídeos e de glutamina (indicadores da eficiência da fixação simbiótica de N_2 em soja), bem como de aminoácidos livres totais (Tabela 4). Quando ocorre inundação, independentemente do período ser de 1h, 1 dia ou 4 dias, há uma redução de mais de 90% no teor de ureídeos e de glutamina na seiva do xilema, quando comparados com os teores em plantas não inundadas (Amarante & Sodek, 2006; Justino & Sodek, 2013). Quanto mais curto o período de inundação mais rápida a recuperação da atividade da nitrogenase e de glutamina na seiva do xilema (Justino & Sodek, 2013). A drenagem após períodos mais prolongados de inundação (1 a 9 dias) proporciona a retomada plena da fixação de N_2 pelos nódulos da planta de soja num período de 3 a 5 dias (Amarante, 2002; Badinelli, 2008), enquanto que após períodos de inundação mais curtos (horas) a recuperação é bem mais rápida (Justino & Sodek, 2013).

A hipoxia inibe o acúmulo de biomassa e a fixação de N_2 , entretanto a inibição da fixação ocorre mais cedo (praticamente é imediata - Amarante & Sodek, 2006) e é mais pronunciada que a inibição do acúmulo de biomassa (Bacanamwo & Purcell, 1999). Com o desenrolar da inundação, a planta desenvolve raízes adventícias e interconexões de aerênquima nos órgãos submersos que reverterem

o processo de hipoxia e ela recupera a fixação simbiótica de N_2 (Tabela 4). Entretanto, a planta tem seu desenvolvimento reduzido e apresenta-se clorótica.

O estágio de desenvolvimento da planta tem influência no processo de reversão da hipoxia, pois quanto maior a quantidade de reservas nas raízes, mais rapidamente ela supera o estresse anaeróbico. Plantas de soja com 10-12 folhas saíram dessa condição após 10 dias, enquanto plantas com 6-7 folhas levaram 14 dias (Thomas, 2004).

Tabela 4. Teores de O_2 na solução nutritiva, aerênquima nos nódulos e raiz principal, teores de alanina e glutamina, quantidade de ureídeos e aminoácidos livres totais (ALT) na seiva do xilema de plantas de soja com sistemas radiculares inoculados e inundados, durante 10 dias com solução nutritiva sem N, a partir do florescimento (plantas com 10-12 folhas trifolioladas desenvolvidas).

Dias de Inundação	O_2 na solução (mg/L)	Aerênquima (%)		mol% na seiva		mmol/mL de seiva	
		Nódulos	Raiz ¹	Alanina	Glutamina	Ureídeos	ALT
0	6,6	0,4 b ²	0,3 c	0,4	13,7	4,2 a	2,1 a
1	0,9	1,9 a	1,6 c	34,0	0,6	0,2 b	1,2 bc
2	0,7	1,9 a	2,5 c	--	--	--	--
3	0,6	1,9 a	2,6 c	17,7	0,2	0,2 b	0,8 c
4	0,8	1,7 ab	4,7 c	--	--	--	--
5	0,6	1,8 a	13,4 b	12,8	0,8	0,2 b	0,7 c
6	0,6	1,8 a	17,3 b	--	--	--	--
7	0,6	2,1 a	22,0 a	3,9	6,2	1,4 b	1,1 bc
10	0,7	1,7 ab	21,7 a	6,2	12,8	3,9 a	1,6 ab

¹ 8 cm da raiz principal a partir do colo da planta.

² Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Duncan ($P > 0,05$).

Thomas, 2004.

Hemoglobinas não simbióticas da classe 1 e óxido nítrico

Outro mecanismo que pode ser importante para a tolerância de plantas ao estresse de hipoxia provocado pela inundação envolve as hemoglobinas não simbióticas (Dordas, 2009). A deficiência de O_2 induz a síntese de hemoglobinas não simbióticas da classe 1 (nsHb-1) e de óxido nítrico (NO) em plantas. O ciclo nsHb-1/NO (Figura 3) pode aliviar a hipoxia porque: a) é uma rota alternativa à fermentação e regenera NAD^+ que é essencial para manter a glicólise; b) regenera NO_3 que alivia a condição de hipoxia (Figura 1); e c) protege as células de estresse nitrosativo, porque utiliza NO que é produzido em excesso durante a hipoxia (Figura 3) (Perazzolli et al., 2006; Garrocho-Villegas et al., 2007; Hebelstrup et al., 2007; Dordas, 2009; Hill, 2012; Sairam et al., 2012; Limami et al., 2014). Portanto, a degradação de NO por hemoglobinas não-simbióticas, conforme esquematizada na Figura 3, pode funcionar em conjunto com a transformação mitocondrial de nitrito em NO (discutida acima) na regeneração do $NAD(P)^+$ durante a hipoxia.

Tendo em vista que as hemoglobinas não simbióticas são expressas em vários tecidos (raízes, nódulos, caule, cotilédones, folhas e sementes) da planta de soja (Andersson, 1996) e a interação com o óxido nítrico alivia a hipoxia, é pertinente investigar se existe diferença nessa interação entre genótipos de soja suscetíveis e tolerantes a hipoxia, pois esses últimos se desenvolvem com pouco aerênquima e poucas raízes adventícias (ver Capítulo 3).

AMARANTE, L. DO. 2002. **Transporte e metabolismo de glutamina em soja [*Glycine max* (L.)]: uma relação estreita com a fixação simbiótica do nitrogênio atmosférico.** Universidade Estadual de Campinas, Campinas, tese de doutorado. 159p.

AMARANTE, L.; SODEK, L. 2006. Waterlogging effect on xylem sap glutamine of nodulated soybean. **Biologia Plantarum**, v.50, p.405-410.

ANDERSSON, C.R.; JENSEN, E.O.; LLEWELLYN, D.J.; DENNIS, E.S.; PEACOCK, W.J. 1996. A new hemoglobin gene from soybean: a role for hemoglobin in all plants. **Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America**, v.93, p.5682-5687.

ARMSTRONG, W.; BRÄNDLE, R.; JACKSON, M.B. 1994. Mechanisms of flood tolerance in plants. **Acta Botanica Neerlandica**, v.43, p.307-358.

BACANAMWO, M.; PURCELL, L.C. 1999. Soybean dry matter and N accumulation responses to flooding stress, N sources and hypoxia. **Journal of Experimental Botany**, v.50, p.689-696.

BADINELLI, P. G. 2008. **Respostas bioquímicas e fisiológicas de plantas noduladas de soja submetidas à hipoxia.** Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, dissertação de mestrado. 100p.

BAILEY-SERRES, J.; VOESENEK, L.A.C.J. 2008. Flooding Stress: Acclimations and genetic diversity. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.313-339.

BARNI, N.A. 1999. Efeito do período de inundação do solo na absorção de nutrientes, uso da água e crescimento da planta de soja. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v.5, p.7-18.

BECKER, M.; ASCH, F. 2005. Iron toxicity in rice: conditions and management concepts. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.168, p.558-573.

- BISPO, N.B. 2011. **Seleção de genótipos e análise da tolerância do milho (*Zea mays* L.) ao encharcamento do solo.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, tese de doutorado. 64p.
- BLAMEY, F.P.C.; JOYCE, D.C.; EDWARDS, D.G.; ASHER, C.J. 1986. Role of trichomes in sunflower tolerance to manganese toxicity. **Plant and Soil**, v.91, p.171-180.
- BRANDÃO, A.D.; SODEK, L. 2009. Nitrate uptake and metabolism by roots of soybean plants under oxygen deficiency. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.21, p.13-23.
- BRIAT, J. F.; LOBRÉAUX, S. 1997. Iron transport and storage in plants. **Trends in Plant Science**, v. 2, p.187-193, 1997.
- BRITTO, D.T.; SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M.; KRONZUCKER, H.J. 2001. Futile transmembrane NH_4^+ cycling: A cellular hypothesis to explain ammonium toxicity in plants. **Proceedings of the National Academy of Science of USA**, v.98, p.4255-4258.
- CARTER, O.G.; ROSE, I.A.; READING, P.F. 1975. Variation in susceptibility to manganese toxicity in 30 soybean genotypes. **Crop Science**, v.15, p.730-732.
- CHINNUSAMY, V.; JAGENDORF, A.; ZHU, J.K. 2005. Understanding and improving salt tolerance in plants. **Crop Science**, v.45, p. 437-448.
- CLEMENS, S.; PALMGREN, M.G.; KRÄMER, U. 2002. A long way ahead: understanding and engineering plant metal accumulation. **Trends in Plant Science**, v.7, p.309-315.
- COLMER, T.D.; GREENWAY, H. 2011. Ion transport in seminal and adventitious roots of cereals during O_2 deficiency. **Journal of Experimental Botany**, v.6, p.39-57.
- CONDE, A.; CHAVES, M.M.; GERÓS, H. 2011. Membrane transport, sensing and signaling in plant adaptation to environmental stress. **Plant Cell Physiology**, v.52, p.1583-1602.

DAKORA, F.D.; ATKINS, C.A., 1989. Diffusion of oxygen in relation to structure and function in legume root nodules. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.16, p.131-140.

DENNIS, E.S.; MILLAR, A.; DOLFERUS, R.; OLIVE, M.; BRUXELLES, G. DE; PEACOCK, W.J. 1992. Molecular analysis of the response to anaerobics stress. In: **Adaptation of food crops to temperature and water stress: Proceedings of an International Symposium**, Taiwan, 13-18 august 1992. Asian Vegetable Research and Development Center, publication n.93.410, p.59-67.

DORDAS, C. 2009. Nonsymbiotic hemoglobins and stress tolerance in plants. **Plant Science**, v.176, p.433-440.

DREW, M.C. 1997. Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and acclimation under hypoxia and anoxia. **Annual Review Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.48, p.223-250.

DREW, M.C.; HE, C-J.; MORGAN, P.W. 2000. Programmed cell death and aerenchyma formation in roots. **Trends in Plant Science**, v.5, p.123-127.

EL-SAMAD, A.; SHADDAD, M.A.K. 1997. Salt tolerance of soybean cultivars. **Biologia Plantarum**, v.39, p.263-269.

EVANS, H.J.; SORGER, G. 1966. Role of mineral elements with emphasis on the univalent cations. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 17, p.47-76.

FOY, C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 29, p.511-566.

GARROCHO-VILLEGAS, V.; GOPALASUBRAMANIAM, S.K.; ARREDONDO-PETER, R. 2007. Plant hemoglobins: What we know six decades after their discovery. **Gene**, v.398, p.78-85.

GIBBERD, M.R.; GRAY, J.D.; COCKS, P.S.; COLMER, T.D. 2001. Waterlogging tolerance among a diverse range of *Trifolium ac-*

cessions is related to root porosity, lateral root formation and 'aerotropic rooting'. **Annals of Botany**, v.88, p.579-589.

GUASCH, L.M.; FELIPE, M.R.; FERNÁNDEZ-PASCUAL, M. 2001. Effects of different O₂ concentrations on nitrogenase activity, respiration, and O₂ diffusion resistance in *Lupinus albus* L. cv. Multolupa nodules. **Journal of Plant Physiology**, v.158, p.1395-1402.

GUERINOT, M.L.; YI, Y. 1994. Iron: Nutritious, noxious, and not readily available. **Plant Physiology**, v.104, p.815-820.

GUPTA, K.J.; IGAMBERDIEV, A.U. 2011. The anoxic plant mitochondrion as a nitrite: NO reductase. **Mitochondrion**, v.11, p.537-543.

HALL, J.L. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v.53, p.1-11.

HALLIWELL, B.; GUTTERIDGE, J.M.C. 1992. Biologically relevant metal ion-dependent hydroxyl radical generation. **FEBS Letters**, v.307, p. 108-112.

HEBELSTRUP, K.H.; IGAMBERDIEV, A.U.; HILL, R.D. 2007. Metabolic effects of hemoglobin gene expression in plants. **Gene**, v.398, p.86-93.

HEENAN, D.P.; CAMPBELL, L.C. 1980. Growth, yield components and seed composition of two soybean cultivars affected by manganese supply. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.31, p.471-476.

HENDRY, G.A.F.; BROCKLEBANK, K.J. 1985. Iron-induced oxygen radical metabolism in waterlogged plants. **New Phytologist**, v.101, p.199-206.

HILL, R.D. 2012. Non-symbiotic haemoglobins - What's happening beyond nitric oxide scavenging? **AoB Plants** 2012: pls004; doi:10.1093/aobpla/pls004.

HOLLDAMPF, B.; BARKER, A.V. 1993. Effects of ammonium on elemental nutrition of red spruce and indicator plants grown in

acid soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.24, p.1945-1957.

HOOPEN, F.T.; CUIN, T.A.; PEDAS, P.; HEGELUND, J.N.; SHABALA, S.; SCHJOERRING, J.K.; JAHN, T.P. 2010. Competition between uptake of ammonium and potassium in barley and *Arabidopsis* roots: molecular mechanisms and physiological consequences. **Journal of Experimental Botany**, v.61, p.2303-2315.

HORCHANI, F.; ASCHI-SMITI, S.; BROUQUISSE, R. 2010. Involvement of nitrate reduction in the tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to prolonged root hypoxia. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.32, p.1113-1123.

INANAGA, P.N.A.; KAFKAFI, U.; LUX, A.; SUGIMOTO, Y. 2001. Different effect of humidity on growth and salt tolerance of two soybeans cultivars. **Biologia Plantarum**, v.44, p.405-410.

JACKSON, M.B.; ARMSTRONG, W. 1999. Formation of aerenchyma and the processes of plant ventilation in relation to soil flooding and submergence. **Plant Biology**, v.1, p.274-287.

JUSTINO, G. C.; SODEK, L. 2013. Recovery of nitrogen fixation after short-term flooding of the nodulated root system of soybean. **Journal of Plant Physiology**, v.170, p.235-241.

KOBAYASHI, T.; NISHIZAWA, N.K. 2012. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. **Annual Review of Plant Biology**, v.63, p.131-52.

KRONZUCKER, H.J.; BRITTO, D.T.; DAVENPORT, R.J.; TESTER, M. 2001. Ammonium toxicity and the real cost of transport. **Trends in Plant Science**, v.6, p.335-337.

LAYZELL, D.B.; HUNT, S. 1990. Oxygen and the regulation of nitrogen fixation in legume nodules. **Physiology Plantarum**, v. 80, p.322-327.

LEE, R.B. 1978. Inorganic nitrogen metabolism in barley roots under poorly aerated conditions. **Journal of Experimental Botany**, v.29, p.693-708.

LI, S.; WANG, Z.; STEWART, B.A. 2013. Responses of Crop Plants to Ammonium and Nitrate N. **Advances in Agronomy**, v. 118, p. 205-237.

LIMAMI, A.M.; DIAB, H.; LOTHIER, J. 2014. Nitrogen metabolism in plants under low oxygen stress. **Planta**, v.239, p.531-41.

LOBRÉAUX, S.; BRIAT, J.F. 1991. Ferritin accumulation and degradation in different organs of pea (*Pisum sativum*) during development. **Biochemical Journal**, v.274, p.601-606.

MACFIE, S.M.; COSSINS, E.A.; TAYLOR, G.J. 1994. Effects of Excess Manganese on Production of Organic Acids in Mn-Tolerant and Mn-Sensitive Cultivars of *Triticum aestivum* L. (Wheat). **Journal of Plant Physiology**, v.143, p.135-144.

MALAVOLTA, E. 1954. Studies on the nitrogenous nutrition of rice. **Plant Physiology**, v.29, p.98-99.

MARSCHNER, H. 1995. **Mineral nutrition of higher plants**. San Diego: Academic Press, 1995. 889p.

MIAN, A.A.; SENADHEERA, P.; MAATHUIS, F.J.M. 2011. Improving crop salt tolerance: anion and cation transporters as genetic engineering targets. **Plant Stress**, v.5, p.64-72.

MILLALEO, R.; M. REYES-DÍAZ, M.; IVANOV, A.G.; MORA, M.L.; ALBERDI, M. 2010. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.10, p. 476 - 494.

MINCHIN, F.R. 1997. Regulation of oxygen diffusion in legume nodules. **Soil Biology and Biochemistry**, v.29, p.881-888.

MORARD, P.; SILVESTRE, J. 1996. Plant injury due to oxygen deficiency in the root environment of soilless culture: A review. **Plant and Soil**, v.184, p.243-254.

MORARD, P.; SILVESTRE, J. LACOSTE, L.; CAUMES, E.; LAMAZE, T. 2004. Nitrate uptake and nitrite release by tomato roots in response to anoxia. **Journal of Plant Physiology**, v.161, p.855-866.

MUNNS, R.; TESTER, M. 2008. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v.59, p.651-681.

OHKI, K.; WILSON, D.O.; ANDERSON, O.E. 1980. Manganese deficiency and toxicity sensitivities of soybean cultivars. **Agronomy Journal**, v.72, p.713-716.

OLIVEIRA, H.C.; FRESCHI, L.; SODEK, L. 2013a. Nitrogen metabolism and translocation in soybean plants subjected to root oxygen deficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.66, p.141-149.

OLIVEIRA, H.C.; SALGADO, I.; SODEK, L. 2013b. Involvement of nitrite in the nitrate-mediated modulation of fermentative metabolism and nitric oxide production of soybean roots during hypoxia. **Planta**, v.237, p.255-264.

PANG, J.; SHABALA, S. 2010. Membrane transporters and waterlogging tolerance. In: Mancuso, S.; Shabala, S. (eds.). **Water signaling and tolerance in plants**. Springer, 2010. p.197-219.

PERAZZOLLI, M.; ROMERO-PUERTAS, M.C.; DELLEDONNE, M. 2006. Modulation of nitric oxide bioactivity by plant haemoglobins. **Journal of Experimental Botany**, v.57, p.479-488.

PIRES, J.L.; SOPRANO, E.; CASSOL, B. 2002. Adaptações morfo-fisiológicas da soja em solo inundado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p.41-50.

PUIATTI, M.; SODEK, L. 1999. Waterlogging affects nitrogen transport in the xylem of soybean. **Plant Physiology Biochemistry**, v.37, p.767-773.

RAGLAND, M.; THEIL, E.C. 1993. Ferritin (mRNA, protein) and iron concentration during soybean nodule development. **Plant Molecular Biology**, v.21, p.555-560.

REICHMAN, S. 2000. **The responses of plants to metal toxicity. A review focusing on copper, manganese and zinc**. Melbourne, Australia: Minerals & Energy Environment Foundation. 54p.

RICARD, B.; COUEÉ, I.; RAYMOND, P.; SAGLIO, P.H.; SAINT-GES, V.; PRADET, A. 1994. Plant metabolism under hypoxia and anoxia. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.32, p.1-10.

ROCHA, M.; LICAUSI, F.; ARAÚJO, W.L.; NUNES-NESE, A.; SODEK, L.; FERNIE, A.R.; DONGEN, J.T. 2010. Glycolysis and the tricarboxylic acid cycle are linked by alanine aminotransferase during hypoxia induced by waterlogging of *Lotus japonicus*. **Plant Physiology**, v.152, p.1501-1513.

ROCKEL, P.; STRUBE, F.; ROCKEL, A.; WILDT, J.; KAISER, W.M.; 2002. Regulation of nitric oxide (NO) production by plant nitrate reductase in vivo and in vitro. **Journal of Experimental Botany**, v.53, p.103-110.

ROSOLEM, C.A.; BESSA, M.A.; AMARAL, P.G. DO; PEREIRA, H.F.M. 1992. Manganês no solo, sua avaliação e toxidez de manganês em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, p.277-285.

SAHRAWAT, K.L. 2005. Managing iron toxicity in lowland rice: the role of tolerant genotypes and plant nutrients. In: TORIYAMA, K.; HEONG, K.L.; HARDY, B. (eds.). Rice is life: scientific perspectives for the 21st century. **Proceedings of the world rice research conference**, Tsukyba, Japan. p.420-422.

SAIRAM, R.K.; DHARMAR, K.; CHINNUSAMY, K.V.; LEKSHMY, S.; JOSHI, R.; BHATTACHARYA, P. 2012. The role of non-symbiotic haemoglobin and nitric oxide homeostasis in waterlogging tolerance in *Vigna* species. **Biologia Plantarum**, v.56, p.528-536.

SALGADO, I.; MODOLO, L.V.; AUGUSTO, O.; BRAGA, M.R.; OLIVEIRA, H.C. 2006. Mitochondrial nitric oxide synthesis during plant-pathogen interactions: Role of nitrate reductase in providing substrates. In: Lamattina L.; Polacco J.C. (Eds.) **Nitric oxide in plant growth, development and stress physiology**. Berlin. Springer Verlag. p. 239-254.

SCZEKAN, S.R.; JOSHI, J.G. 1987. Isolation and characterization of ferritin from soybeans (*Glycine max*). **Journal of Biological Chemistry**, v.262, p.13780-13786.

- SCHUSSLER, E.E.; LONGSTRETH, D.J. 2000. Changes in cell structure during the formation of root aerenchyma in *Sagittaria lancifolia* (*alismataceae*). *American Journal of Botany*, v. 87, p.12-19.
- SERRAJ, R.; FLEURAT-LESSARD, P.; JAILLARD, B.; DREVON, J.J. 1995. Structural changes in the inner-cortex cells of soybean root nodules are induced by short-term exposure to high salt or oxygen concentrations. *Plant, Cell & Environment*, v.18, p.455-462.
- SCHOLLES, D.; VARGAS, L.K. 2004. Viabilidade da inoculação de soja com estirpes de *Bradyrhizobium* em solo inundado. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, v.28, p.973-979.
- SODEK, L.; LEA, P.J.; MIFLIN, B.J. 1980. Distribution and properties of a potassium-dependent asparaginase isolated from developing seeds of *Pisum sativum* and other plants. *Plant Physiology*, v.65, p.22-26.
- SOUSA, C.A.F. DE; SODEK, L. 2002. The metabolic response of plants to oxygen deficiency. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v.14, p.83-94.
- SOUSA, C.A.F.; SODEK, L. 2003. Alanine metabolism and alanine aminotransferase activity in soybean (*Glycine max*) during hypoxia of the root system and subsequent return to normoxia. *Environmental and Experimental Botany*, v. 50, p.1-8.
- TESTER, M.; DAVENPORT, R. 2003. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. *Annals of Botany*, v. 91, p.503-527.
- THOMAS, A. L. 2009. Potencialização da absorção de sódio pelo amônio em soja com sistema radicular inundado. In: XXXVII Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul, 2009, Porto Alegre - RS. Programa e resumos da XXXVII Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul. Porto Alegre - RS: UFRGS, 2009
- THOMAS, A.L. 2004. Modificações morfológicas e assimilação de nitrogênio em plantas de soja (*Glycine max*) com sistemas

radiculares sob deficiência de O₂. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, tese de doutorado. 76p.

THOMAS, A.L.; COSTA, J.A. 2010. **Soja: manejo para alta produtividade de grãos**. Porto Alegre: Evangraf. 248p.

THOMAS, A.L.; GUERREIRO, S.M.C.; SODEK, L. 2005. Aerenchyma formation and recovery from hypoxia of the flooded root of system of nodulated soybean. **Annals of Botany**, v.96, p.1191-1198.

THOMAS, A.L.; SODEK, L. 2005. Development of the nodulated soybean plant after flooding of the root system with different sources of nitrogen. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.17, p.291-297.

TROUGHT, M.C.T.; DREW, M.C. 1981. Alleviation of injury to young wheat plants in anaerobic solution cultures in relation to the supply of nitrate and other inorganic nutrients. **Journal of Experimental Botany**, v.32, p.509-522.

WIRÉN, N. VON; GAZZARRINI, S.; GOJON, A; FROMMER, W.B. 2000. The molecular physiology of ammonium uptake and retrieval. **Current Opinion in Plant Physiology**, v.3, p.254-261.

ZHU, J.K. 2001. Plant salt tolerance. **Trends in Plant Science**, v.6, p.66-71.

Potencial de rendimento de grãos de soja em solos de várzea do Rio Grande do Sul

Cláudia Erna Lange¹, Anderson Vedelago²
& André Luís Thomas³

Nos últimos anos, o cultivo de soja em solos de várzea gaúchos vem crescendo, passando de 66 mil para 320 mil hectares nas safras 2010/11 a 2013/14 (Dater-IRGA, 2014, comunicação pessoal). O avanço da cultura neste ambiente ocorre pela necessidade de rotação do arroz com a soja como uma ferramenta de controle de plantas daninhas. A sustentabilidade técnica e econômica do cultivo do arroz irrigado nas áreas com alta infestação com arroz vermelho e outras espécies daninhas, muitas das quais apresentando ecotipos com resistência a herbicidas, têm na rotação de culturas uma aliada. O excelente nível de remuneração da soja nos últimos anos também

1 Eng^a. Agr^a., Dr^a, melhorista de soja. E-mail: claudia.e.lange@gmail.com

2 Eng. Agr., Mestre em Ciência do Solo. E-mail: andersonvedelago@hotmail.com

3 Professor do Departamento de Plantas de Lavoura da Faculdade de Agronomia da UFRGS, Porto Alegre - RS. E-mail: thomaspl@ufrgs.br

vem alavancando o crescimento do cultivo da soja nas várzeas.

O cultivo de soja em maior escala nos solos de várzea gaúchos é um fenômeno recente e a expectativa inicial era de que o potencial de rendimento de grãos fosse limitado devido às restrições do ambiente em drenagem, submetendo o cultivo aos riscos de ocorrência de excesso hídrico, e, paradoxalmente, à deficiência hídrica, devido à baixa capacidade de armazenamento de água destes solos. Além disso, os atuais parâmetros físicos e químicos de fertilidade dos solos, além de práticas de manejo equívocas, restringem a produção de biomassa e o potencial de rendimento da soja em solos de várzea.

A aplicação de estratégias mitigadoras dos diferentes fatores limitantes ao crescimento das plantas de soja nos solos de várzea abre a possibilidade de aumento do potencial de rendimento de grãos desta cultura, assim como a estabilização deste ao longo dos anos. O sucesso do cultivo de soja em solos de várzea depende da interação de vários fatores como as características do solo (drenagem, fertilidade, condições físicas, etc.); tolerância do genótipo ao excesso de umidade no solo; estágio de desenvolvimento da planta em que ocorre o estresse e a sua duração; condições meteorológicas (quantidade de chuva e temperatura); do manejo empregado, como época de semeadura e arranjo de plantas; suplementação hídrica e qualidade da água de irrigação, entre outros.

O objetivo deste capítulo é transcorrer sobre as características do ambiente de cultivo de várzea para a soja e a oportunidade de explorar o potencial de rendimento da cultura, através de decisões acertadas de manejo e da mitigação dos estresses abióticos incidentes neste ambiente.

Drenagem

O excesso hídrico (EH) é o estresse responsável pelas maiores oscilações de rendimento de grãos na soja cultivada em solos de várzea. As consequências para a fisiologia da planta e os danos decorrentes da deficiência de oxigênio para as células das raízes em função do excesso hídrico são apresentados no Capítulo 4. Entretanto, é necessário ressaltar que a extensão dos danos causados e o tempo necessário para evolução é fortemente dependente das condições do ambiente (principalmente temperatura e insolação) e do estágio de desenvolvimento que as plantas se encontram, tornando a quantificação dos danos por EH nas lavouras muito variável e de difícil previsibilidade. Visto que o estresse é majoritariamente resultado da deficiência de oxigênio para a respiração dos tecidos submetidos ao solo encharcado, a maior sensibilidade das plantas coincide com os estádios de maior demanda energética, como ocorre no período de germinação e emergência, florescimento, formação e enchimento de grãos.

A umidade excessiva dos solos de várzea está associada ao lençol freático próximo à superfície devido ao relevo predominantemente plano e à presença de camadas impermeáveis no subsolo (Klamt et al.; 1985). Devido a essas características, a drenagem subsuperficial do solo pouco pode ser melhorada.

As várzeas de cultivo de arroz irrigado no Rio Grande do Sul (RS) diferenciam-se em relação ao risco de excesso hídrico que oferecem à cultura da soja, podendo ser classificadas em alto, médio e baixo risco: as áreas de cotas mais baixas, sujeitas a enchentes, são as de alto risco e não devem ser utilizadas para o cultivo de soja devido à

frequência de perda da lavoura por morte das plantas em períodos de excesso hídrico. Por outro lado, áreas de cotas mais altas e com declividade que favorece a drenagem são áreas de menor risco de excesso hídrico. Áreas de risco intermediário são aquelas em que a topografia plana dificulta a drenagem, sendo o sucesso do cultivo fortemente dependente da aplicação de um cuidadoso sistema de drenagem superficial.

Como a condutividade hidráulica nos solos de várzea é baixa, a drenagem superficial eficiente, que garanta o escoamento rápido da água superficial após as precipitações ou irrigações complementares, passa a ser decisiva para o adequado estabelecimento de cultivos de sequeiro em geral, e deve ser, necessariamente, a primeira meta a ser concretizada. Esta pode ser alcançada com a utilização de drenos nas seguintes configurações: em áreas não niveladas, o estabelecimento de drenos superficiais que devem, de preferência, passar exatamente no centro das áreas mais baixas (as conhecidas “lagoas” no meio da lavoura, as quais são vistas mais facilmente após as precipitações pluviais). A localização adequada desses drenos se constitui na maior dificuldade, uma vez que no momento da operação de construção dos drenos o terreno encontra-se seco, e a locação dos drenos é feita baseada na experiência e memória do operador do trator. Uma forma mais precisa, porém trabalhosa, é a marcação do terreno com sinalizadores, como estacas, no período em as poças de acúmulo de água estejam visíveis, para posteriormente realizar a operação de montagem dos drenos. Maior precisão é possível obter através de ferramentas que estão sendo introduzidas para a locação de taipas (diques que dividem a lavoura de arroz para manter lâmina de água constante

em terreno não nivelado) automatizadas através de um modelo digital de elevação do terreno com alta precisão, realizada com GPS (global positioning system) auxiliado por uma base RTK (real time kinematic). Consiste em projetar os drenos num mapa construído a partir de um modelo de elevação do terreno (Wilkler et al., 2013).

Em áreas com o microrrelevo corrigido pelo aplainamento e/ou pelo nivelamento superficial do solo, eliminando pequenas depressões e elevações do terreno, é conveniente considerar a possibilidade do uso de um leve desnível, que favoreça a drenagem dos cultivos de sequeiro. Isto envolve o planejamento e o estabelecimento adequado de canais de irrigação e drenagem, da estrutura viária e o nivelamento da superfície do terreno (SOSBAI, 2012). Em áreas aplainadas e niveladas, pode-se obter um bom sistema de drenagem superficial construindo drenos estreitos no sentido perpendicular à pendente do terreno e canais coletores (mais largos) no sentido da pendente do terreno, unindo os primeiros. A frequência dos drenos depende da condutividade hidráulica do solo, o que está relacionado à sua composição, textura e grau de agregação das partículas, sendo que, quanto menor a condutividade hidráulica, maior o número de drenos necessário.

A adequação da área para garantir a drenagem eficiente deve iniciar no outono que antecede o cultivo, tanto para garantir uma melhor taxa de degradação de resíduos de herbicidas, reduzindo chances de fitotoxicidade no cultivo na primavera, além de diminuir as chances de atraso de semeadura, principalmente em primaveras chuvosas. Para evitar perdas de rendimento de grãos na soja, a meta de uma boa drenagem é que as poças de água não perdurem por períodos mais longos do que 24 horas após a

precipitação (Lange, 2009). Iniciar a drenagem do terreno ainda no outono permite a observação da efetividade dele no período de inverno e a constante melhoria deste até a primavera. A eficiência de drenagem também depende da constante manutenção dos drenos, os quais, juntamente com os canais coletores, devem ser mantidos limpos e remontados quando necessário para garantir o escoamento da água. Outro aspecto importante é o dimensionamento da estrutura de macrodrenagem, evitando que canais e bueiros de saída da água da lavoura causem o represamento da mesma, tornando ineficiente a infraestrutura de drenos.

Em cotas baixas e topografia muito plana o uso de camalhões pode favorecer o desenvolvimento das plantas de soja por criar um relevo em que as plantas ficam alocadas na parte mais alta do terreno, facilitando a drenagem e a oxigenação das raízes após a ocorrência de chuvas. Há grande variação de configurações de camalhões, porém os de menor altura (aproximadamente 12 cm de altura entre fundo do dreno e parte mais alta do camalhão) (Figura 1), comumente denominados de microcamalhões, associados a um sistema de macrodrenagem adequadamente dimensionado, oferecem uma alternativa de cultivo de soja em solos de várzea alocados em cotas baixas e de difícil drenagem, com menor movimentação de solo do que os camalhões tradicionais de base larga ou de maior altura, facilitando o manejo do solo posteriormente no retorno do cultivo do arroz irrigado (Beecher, et al., 2005).

O microcamalhão é eficiente na redução do tempo em que o solo fica saturado após um evento que implica em excesso hídrico, como alto volume de precipitação, pre-

cipitação inesperada após a irrigação ou mesmo irrigação por “banho” ou por inundação (Figura 2). O seu uso é particularmente útil para a redução de riscos de perdas por excesso hídrico na germinação e emergência de lavouras implantadas no período mais cedo da época de semeadura (período compreendido entre a segunda quinzena de outubro e a primeira quinzena de novembro), quando há maior frequência de ocorrência de fortes precipitações. Porém para garantir a semeadura no período inicial da época de semeadura (segunda quinzena de outubro) é importante realizar as operações de preparo do talhão antecipadamente no outono, pois o início da primavera é normalmente chuvoso na metade sul do RS, o que limita as janelas de preparo do solo e de semeadura.



Figura 1. Cultivo de soja em microcamalhões.

Anderson Vedelago.

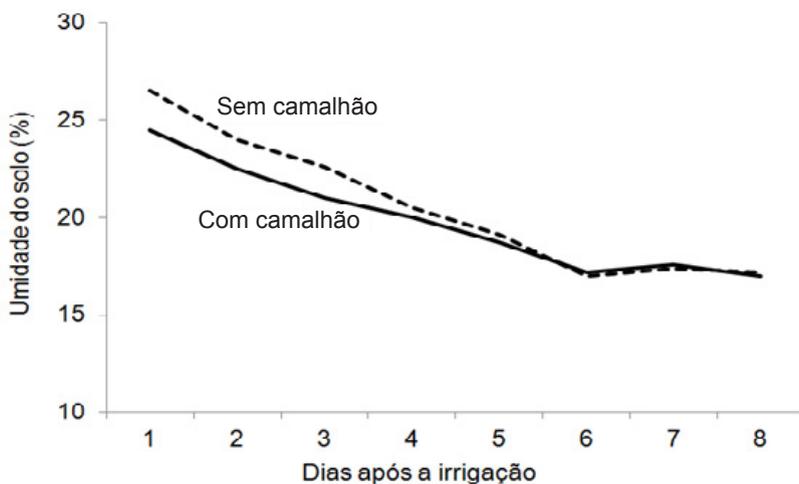


Figura 2. Evolução da umidade volumétrica do solo a 20 cm de profundidade após a irrigação por inundação em solo plano (sem camalhão) e em microcamalhão.

Vedelago et al., 2011 (não publicado).

O planejamento e o gerenciamento das áreas da propriedade arroseira que adota a rotação com soja é parte fundamental no sucesso do processo de drenagem, visto que o escoamento adequado da grande quantidade de água na drenagem superficial das lavouras de soja, muito superior aos volumes excedentes das lavouras de arroz depois de uma precipitação volumosa, passa frequentemente pelo redimensionamento dos canais e bueiros para o escoamento deste volume de água. Um equívoco muito comum é utilizar o canal que leva a água de irrigação aos talhões de arroz como canal de escoamento da água excedente da lavoura de soja, o qual, naturalmente, não cumpre a função de drenagem quando cheio para suprir a demanda de água nas lavouras de arroz.

Adequação da fertilidade do solo e resposta a adubação

Os solos de várzea gaúchos cultivados com arroz irrigado foram formados a partir da deposição de sedimentos ao longo de cursos de água. Devido à origem diversa e à intensidade de fluxo de transporte, esses sedimentos são muito heterogêneos em relação à composição mineralógica e granulométrica, o que resulta na formação de solos com grandes variações nos atributos físicos, químicos e mineralógicos (Pinto et al., 1999). Na Planície Costeira (Litoral e parte da Encosta do Sudeste) a origem dos sedimentos é fluviolacustres, lagunares e marinhos, enquanto que na Depressão Periférica e Planalto (parte da Depressão Central, Campanha e Missões) os sedimentos aluvionares são oriundos de rochas sedimentares e basálticas (Pinto et al., 1999).

Os solos de várzea representam cerca de 20% da área total do Estado. A classe dos Planossolos (incluindo Gleissolos associados) é a mais representativa (56% do total de áreas de várzea), seguindo-se, em ordem decrescente, dos Chernossolos (16,1%), dos Neossolos (11,6%), dos Plintossolos (8,3%), dos Gleissolos (7,1%) e dos Vertissolos (0,9%) (Pinto et al., 2004). Em sua grande maioria são solos aptos ao cultivo de soja com limitações contornáveis de atributos químicos de fertilidade (Vedelago et al., 2012). Estes, desde que devidamente drenados e adequadamente corrigidos e adubados, são passíveis de obter bons resultados com o cultivo de soja. Entretanto, os Organossolos, que ocorrem principalmente nas Planícies Costeiras, e Neossolos Rigolíticos, presentes em maior frequência na Fronteira Oeste, não são aptos ao cultivo de espécies anuais, inclusive soja, devi-

do à fragilidade frente às operações de preparo de solo (Streck et al., 2008).

Os diferentes tipos de solos de várzea do RS aptos ao cultivo de soja apresentam uma grande diversidade nos atributos químicos de fertilidade dentro e entre as regiões arroyeiras, porém apresentando, majoritariamente, baixa fertilidade natural. A grande maioria é ácida (94% necessitam de aplicação de corretivos de acidez), com baixos estoques de fósforo disponível (74% com teores baixo e muito baixo) e matéria orgânica (75% com teores baixo e muito baixo), embora apresentem teores de potássio menos críticos (46% dentro da suficiência) para a cultura da soja (Tabela 1).

A calagem exerce um papel central na adequação destes solos para o cultivo da soja, pois além de corrigir a acidez, que prejudica o desenvolvimento das plantas e a fixação biológica de nitrogênio, regula a disponibilidade dos nutrientes em geral e em particular a de molibdênio e de fósforo (P), que difere em muito da disponibilidade para o arroz que é cultivado em solo inundado (para maiores detalhes ver Vedelago et al., 2012). O desconhecimento por parte de produtores e até técnicos das diferentes dinâmicas da disponibilidade de P em solo drenado e inundado gera frequentemente grandes equívocos no uso de fertilizantes fosfatados na adoção da cultura da soja em rotação com o arroz irrigado, levando ao subdimensionamento da quantidade de fertilizante fosfatado para a soja (ver Capítulo 2).

Outro fator de estresse nutricional de grande impacto no cultivo de soja em rotação com o arroz irrigado é causado pela falha de nodulação que frequentemente é observada, acarretando severa deficiência de N, visto que os solos de várzea gaúchos apresentam baixos estoques de matéria orgânica (M.O), a qual pertence normalmente à fração recalcitrante (Nascimento et al., 2009), cuja taxa

de mineralização não supre as necessidades das plantas ao longo de seu ciclo de vida (Vedelago et al., 2012). As falhas de nodulação, em sua maioria, estão associadas ao excesso hídrico na fase de estabelecimento das plantas na lavoura, até o estágio de V3 (planta com 2 folhas trifolioladas desenvolvidas), ao pH abaixo de 6,0 e à presença de Al^{+3} no solo. Melhorias no sistema de drenagem, das condições físicas do solo, adoção do cultivo em camalhões e a correção do pH do solo com aplicação de calcário beneficiam a nodulação.

Tabela 1. Média ponderada da distribuição percentual em classes do pH em água, teores de fósforo (P) e potássio (K), e matéria orgânica (MO) nos solos das regiões arrozeiras do Rio Grande do Sul no período de 2009 a 2011.

	pH	P	K	MO
 %			
Extremamente baixo	5	-	-	-
Muito baixo	47	44	7	35
Baixo	22	30	22	40
Médio	20	13	25	21
Alto	6	9	40	4
Muito alto	-	4	6	-

Adaptado de Vedelago et al., 2012.

Além dos parâmetros químicos de fertilidade dos solos, as condições físicas destes exercem importante efeito sobre a capacidade de suporte ao desenvolvimento das plantas. Uma boa agregação das partículas do solo garante um ambiente adequado ao desenvolvimento das raízes, ao fornecer quantidades ótimas de oxigênio e armazenamento de água, além de oferecer menor resistência ao cres-

cimento das raízes. Porém, no aspecto tocante à física do solo, os solos de várzea gaúchos oferecem um ambiente bastante adverso ao cultivo de soja, com solos desestruturados, adensados e com grande tendência a formação de crostas superficiais. O maior adensamento em parte é esperado, tendo em vista a formação sedimentar destes solos, mas o grau de desestruturação tem grande contribuição do manejo de preparo do solo adotado tradicionalmente no cultivo do arroz irrigado, com forte emprego de mobilização do solo (revolvimento do solo como forma de preparo da área para a semeadura, controle de plantas daninhas durante o pousio através de gradagens sequenciais, correção de microrrelevo após a colheita mecanizada do arroz em solo úmido ou saturado), trânsito de máquinas pesadas e realização de operações de preparo e incorporação de restos culturais em solo saturado ou inundado (aplainamento com lâmina de água e controle de plantas daninhas no período de pousio através de gradagens sequenciais). Esses processos favorecem a desagregação das partículas do solo, acarretando o adensamento das partículas que o compõem, resultando em menor porosidade total; maior proporção de microporos comparados aos macroporos e aos poros de tamanho médio; menor capacidade de infiltração e armazenamento de água; menor fração de ar, induzindo à hipoxia com volumes menores de precipitações ou suplementação hídrica (Pauletto et al., 2004). O uso a médio e a longo prazo de sistemas conservacionistas de cultivo que aumentam os estoques de carbono é uma grande oportunidade de melhoria de qualidade destes solos para o cultivo de espécies de sequeiro, ao patrocinarem melhorias das condições físicas e químicas do solo (Lange et al., 2011; Carmona et al., 2012; Buzato

et al., 2013; Turra et al., 2013), principalmente nas camadas mais superficiais (Figura 3), com grande impacto sobre o desenvolvimento e performance agrônômica no cultivo da soja na sequência do arroz irrigado (Tabela 2).

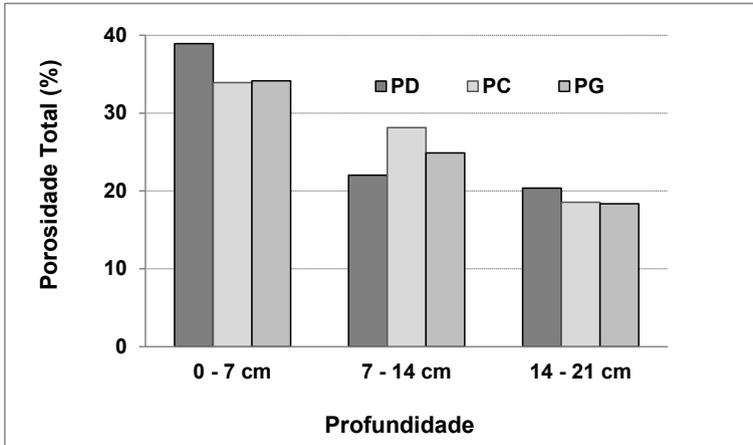


Figura 3. Porosidade total do solo em um Gleissolo, em três profundidades, em função dos sistemas de cultivo de arroz irrigado em 16 anos consecutivos. Cachoeirinha, RS. PD = plantio direto, PC = plantio convencional e PG = pré-germinado.

Buzato et al., 2013.

Tabela 2. Massa seca da parte aérea (MSPA), estatura de planta, nódulos por planta com 7 folhas trifolioladas desenvolvidas, e rendimento de grãos de soja cultivada em sucessão a 16 anos de cultivo de arroz em plantio direto, pré-germinado e plantio convencional.

Sistema de Cultivo	MSPA (g/planta)	Estatura de planta (cm)	Nódulos/planta	Grãos (kg/ha)
Plantio Direto	11,1 a	40 a	44 a	3291 a
Pré-Germinado	7,4 b	33 b	25 b	2611 a
Plantio Convencional	6,1 b	32 b	21 b	1850 b

Adaptado de Lange et al., 2011.

Apesar da aparente limitação de ambiente de cultivo dos solos de várzea, devido à baixa fertilidade natural e má drenagem, o manejo ajustado possibilita a obtenção de altos rendimentos de grãos de soja (Figura 4), além de contribuir para a estabilidade da produtividade ao longo dos anos. O manejo adequado engloba todos os fatores envolvidos na construção do potencial de rendimento, com ênfase na drenagem, na correção do solo e na adubação da cultura; além do emprego de cultivares mais adaptadas, semeadura na época correta e utilização do arranjo de plantas adequado para cada cultivar.

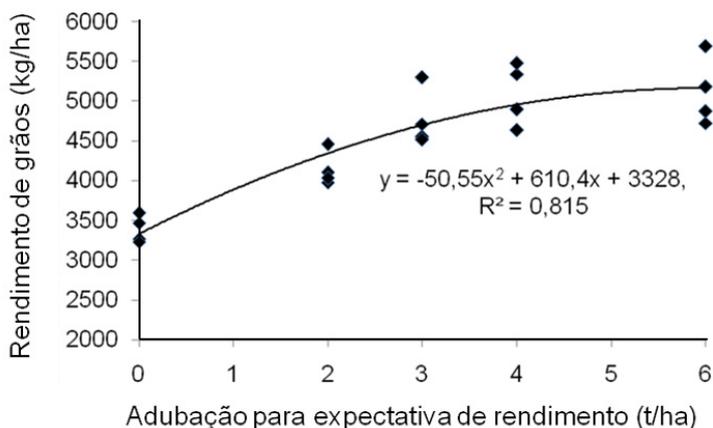


Figura 4. Rendimento de grãos de soja em função de níveis de adubação. Cachoeirinha-RS.

Vedelago et al., 2013 (não publicado).

No estudo acima, o teor de fósforo era médio e o de potássio alto. Mesmo assim obteve-se incremento no rendimento de grãos. Esse incremento está diretamente ligado com o potencial genético da cultivar e com as práticas

integradas de manejo utilizadas para a construção do potencial produtivo. Dentre as práticas de manejo utilizadas destacam-se a correção da acidez do solo, a descompactação, a semeadura em microcamalhões, a irrigação durante o enchimento de grãos, a época de semeadura adequada e o arranjo de plantas. Estes resultados evidenciam o potencial produtivo de soja cultivada em solos de várzea e mostram que parte da construção do potencial produtivo depende da adequada nutrição da cultura. O estoque de fósforo, por sua dinâmica no solo e também por ser menos exportado no grão de soja, apresenta comportamento distinto ao do potássio, com tendência de aumento dos suprimentos nos solos em adubações adequadas visando alta resposta de rendimento de grãos (Tabela 3).

Tabela 3. Teor de fósforo e potássio do solo antes da implantação e após a colheita da soja em diferentes locais do Rio Grande do Sul, com aplicação de 120 kg/ha de P_2O_5 e 120 kg/ha de K_2O .

	Capivari do Sul	Cachoeirinha	Cachoeira do Sul	São Gabriel
----- P (mg.dc ⁻³) -----				
Inicial	5,6 (B*)	15,0 (M)	9,1 (M)	4,4 (B)
Final	14,8 (M)	12,0 (M)	10,3 (M)	8,2 (M)
Grãos (t.ha⁻¹)	3,90	4,60	4,00	4,36
----- K (mg.dc ⁻³) -----				
Inicial	49 (M*)	70 (A)	55 (M)	64 (A)
Final	32 (B)	24 (B)	61 (A)	65 (A)
Grãos (t.ha⁻¹)	4,42	4,80	3,90	3,45

* Teor no solo: A = alto, B = baixo e M = médio.

Vedelago, 2014 (não publicado).

O potássio é um elemento muito exportado no grão e o alto potencial produtivo contribui para a redução dos esto-

ques deste nutriente no solo. Paradoxalmente, a limitação de rendimento de grãos ocasionada pela deficiência de potássio é mais acentuada em situações onde é empregado um adequado manejo da cultura, especialmente quando há suplementação hídrica. Esta condição proporciona às plantas uma grande capacidade de fixar legumes, que demandam maior quantidade de potássio para o enchimento dos grãos. As consequências da limitação nutricional de potássio se manifestam principalmente no terço superior das plantas e mais evidentemente em cultivares de soja com tipo de crescimento indeterminado. Nestas cultivares, os nutrientes são demandados em maiores quantidades na formação dos grãos do terço inferior e médio, provocando o aparecimento da deficiência no terço superior (Tecnologias..., 2011).

Devido a sua carga e ao raio iônico, o K é um elemento bastante móvel no solo, com alto risco de lixiviação em solos de baixa CTC. Além da fragilidade de lixiviação, a alta exportação deste nutriente nos grãos de soja contribui para elevar constantemente o risco de balanço negativo no solo (Tabela 3). Por isto, o dimensionamento de seus estoques no solo, a quantificação de sua suplementação pela fertilização, a definição quanto às épocas de aplicação do fertilizante e o seu gerenciamento no sistema através de captura e ciclagem pelo uso de um sistema de sucessão de cultivos, reduzindo as perdas do sistema, constituem peças chaves no manejo da adubação potássica na cultura da soja nos solos de várzea.

Escolha de variedades de soja

A escolha da variedade tem um papel importante na exploração do potencial de rendimento de grãos de soja

cultivada nos solos de várzea do RS. As principais características de adaptação das cultivares são tolerância ao excesso hídrico, ciclo de maturação, tipo de crescimento e resistência a doenças radiculares.

a) tolerância ao excesso hídrico no solo (TEH)

As áreas de várzea oferecem riscos diferentes ao cultivo de soja no que se refere ao excesso hídrico. Áreas com alguma declividade favorecem a drenagem superficial e tem menor risco de estresse por excesso hídrico. O critério de seleção de cultivares, neste caso, pode se basear no desempenho de rendimento de grãos em ensaios de competição de cultivares ou áreas demonstrativas, os quais tenham sido realizados em ambientes semelhantes em latitude, altitude e textura de solo. Outro aspecto que deve ser sempre considerado é o desempenho vinculado ao manejo dispensado (fertilidade do solo do local do ensaio ou do teste, adubação, manejo de plantas daninhas, tratamentos fitossanitários, época de semeadura, entre outros), pois o manejo define a formação do potencial de rendimento da cultura e há uma grande interação entre o desempenho de cultivares de soja e as variáveis de manejo.

Por outro lado, solos cujas capacidades de drenagem interna e superficial são imperfeitas são mais propensos ao estresse de excesso hídrico. O cultivo de soja nestes solos deve primeiramente estabelecer um sistema eficiente de drenagem e a escolha da cultivar deve levar em consideração o grau de tolerância ao excesso hídrico, pois a avaliação de rendimento de grãos de soja cultivada em várzea na ausência do estresse de excesso hídrico por si só não traduz a capacidade de tolerância dos genó-

tipos a esse estresse. Em soja, a perda de rendimento de grãos causados por excesso hídrico depende da duração do estresse (Lange, 2009) e da fase de desenvolvimento das plantas (Cornelius et al., 2006), porém é relativamente menor em genótipos mais tolerantes (Cornelius et al., 2006).

O excesso hídrico em plantas resulta em um estresse cujo principal componente advém da deficiência de oxigênio que as raízes ficam submetidas em um solo saturado ou inundado. A tolerância à hipoxia é conferida por muitos genes com efeito restrito na expressão final da característica (ver Capítulos 3 e 4), de herança quantitativa complexa e baixa herdabilidade (Vantoi et al., 2001; Reyna et al., 2003; Mano et al., 2005; Cornelius et al., 2006; Lange, 2007); sendo amplamente aceito que o germoplasma de soja proveniente de países da Ásia, berço da cultura, apresenta uma maior frequência de alelos positivos para a característica na espécie (Van Toai et al., 2001). Entretanto, os genótipos asiáticos que detêm maior tolerância ao excesso hídrico apresentam uma série de características indesejáveis em cultivares comerciais (Lange et al., 2011), sendo muito provável que o uso destes como fonte de tolerância ao excesso hídrico em programas de melhoramento produza resultados apenas a longo prazo. Em curto e médio prazo, o aumento da tolerância deve se valer de genitores adaptados e com características comerciais aceitáveis. O germoplasma brasileiro de soja, basicamente derivado do germoplasma norte-americano, foi desenvolvido quase que exclusivamente em solos bem drenados. Por este motivo, as atuais cultivares ocidentais de elite detêm um grau de TEH relativamente baixo, uma vez que os vários genes de

pequeno efeito para a característica encontram-se dispersos em diferentes genótipos (Barni & Costa, 1976a e b; Linkemer et al., 1998; Thomas et al., 2000; Vantoai, 2003). Neste sentido, é esperado que o melhoramento genético para esta característica seja eficiente, mas os progressos esperados, embora cumulativos, devem ser lentos, visto se tratar de uma característica de difícil avaliação fenotípica em função dos inúmeros fatores de ambiente que afetam sua expressão (Sullivan et al., 2001; Setter & Waters, 2003) (ver Capítulo 4).

A caracterização do grau de tolerância de genótipos de soja ao excesso hídrico é realizada em testes específicos e bastante severos, que consistem em cultivar diferentes genótipos em solos de várzea em condições de boa drenagem até uma determinada fase do desenvolvimento das plantas, quando é realizado um tratamento de excesso hídrico imposto por inundação do solo. A inundação é mantida pelo tempo necessário para que haja reação diferencial dos genótipos (Figura 5), quando então a área é drenada e os genótipos são avaliados para a tolerância através de uma escala visual de acordo com o grau de danos que as plantas apresentam (Cornelius et al., 2006; Lange, 2007). Na escolha de uma cultivar a ser semeada em área conhecida propensa ao excesso hídrico, deve-se buscar o genótipo de ciclo pretendido, de melhor desempenho agrônômico na região (melhor rendimento de grãos em solo e latitude semelhante) e que tenha demonstrado TEH em testes de inundação.



Figura 5. Genótipos de soja contrastantes para a tolerância ao excesso hídrico avaliados em ensaios de inundação, onde cada linha corresponde a um genótipo.

Cláudia Lange.

Ainda há uma lacuna no conhecimento sobre a ocorrência de interação entre TEH e os diferentes solos que compõem as várzeas do Estado. Com a deficiência de oxigênio decorrente do preenchimento dos espaços porosos do solo pela água no processo de saturação ou inundação do solo, há uma drástica mudança na disponibilidade de nutrientes do solo (ver Capítulos 2 e 4) em decorrência da mudança do potencial redox, a qual é variável conforme a constituição do próprio solo. Como consequência, alguns elementos passam a níveis tóxicos para as plantas (Setter et al., 2009). Entretanto, há que considerar que o aumento dos níveis destes elementos ocorrerá com o prolongamento do período de excesso hídrico, o qual deve obrigatoriamente ser minimizado com uma boa estratégia de drenagem, para evitar prejuízos no rendimento de grãos.

b) ciclo e tipo de crescimento das cultivares

As cultivares de soja apresentam uma larga variabilidade genética para ciclo de maturação e dois tipos de crescimento, com fortes implicações no seu aproveitamento agrônômico.

O ciclo de crescimento e desenvolvimento das cultivares, independente do grupo de maturação relativa (GMR) a que pertençam, é dividido nas fases vegetativa (da emergência à floração) e reprodutiva (floração à maturação dos grãos) (ver Capítulo 1). A duração da fase vegetativa é a que apresenta maior variação com o cultivo em diferentes latitudes/altitudes e com a época de semeadura.

Baseado no momento do término do crescimento apical do caule, as cultivares de soja podem apresentar tipo de crescimento determinado, quando o meristema apical cessa a atividade imediatamente após a indução floral e o meristema se diferencia em uma inflorescência, ou indeterminado, quando o meristema apical mantém atividade vegetativa produzindo novos nós com folhas trifolioladas após a indução floral (Tian et al., 2010). Neste caso, a atividade meristemática cessa somente quando a demanda de fotoassimilados para o desenvolvimento das sementes limita a produção de massa seca vegetativa. Como consequência, no tipo de crescimento determinado, a indução floral limita a altura da planta, a qual cresce apenas a quantidade suficiente para a alongação dos entre-nós já formados na floração. O tipo de crescimento indeterminado, pelo longo período de floração, é postulado como tendo maior poder de recuperação de potencial de rendimento de grãos após a ocorrência de estresses, como períodos restritos de deficiência ou excesso hídrico, seguidos por períodos favoráveis ao desenvolvimento da cultura. O tipo

de crescimento indeterminado é uma boa característica para as variedades cultivadas em ambientes propensos a estresses climáticos, como é o ambiente de cultivo de soja em várzea, na qual a deficiência e o excesso hídrico incidem frequentemente na mesma safra, às vezes alternadamente em questão de poucos dias.

Por outro lado, o tipo de crescimento determinado é genericamente apontado como sendo mais estável para o cultivo em ambientes de alto potencial produtivo, por reduzir as chances de acamamento, podendo ser empregado em situações específicas de cultivo em áreas de melhor drenagem e não propensas à deficiência hídrica, ou em que a suplementação hídrica está disponível.

As variedades de soja registradas para o cultivo no RS situam-se entre os grupos de maturação relativa (GMR) 5 e 8 (Aliprandini et al., 2009; MAPA, 2014), sendo novembro a época de semeadura que maximiza o potencial de rendimento de grãos destes genótipos. Semeaduras antecipadas alongam o ciclo vegetativo, podendo, em condições favoráveis de crescimento (solo fértil e boa disponibilidade de água), favorecer o acamamento, o que é indesejável, principalmente em cultivares de ciclo mais longo, altas e com propensão ao acamamento. Uma das consequências do acamamento é a perda da estrutura do dossel, limitando a entrada de luz, diminuindo a disponibilidade de foto-assimilados para formação de estruturas reprodutivas (legumes e grãos), causando uma drástica redução da massa seca de grãos em relação à massa seca de planta (caule, ramos e folhas), resultando em baixo índice de colheita. Outra consequência do acamamento é a maior dificuldade de atingir todas as estruturas das plantas nas pulverizações nos tratamentos fitossanitários, reduzindo a eficiência e o retorno econômico dos mesmos.

Semeaduras mais tardias (dezembro ou mais tarde), por outro lado, reduzem o tempo de desenvolvimento vegetativo e levam à redução do porte da planta, diminuindo o rendimento de grãos (Bonato et al., 2001). Este efeito é maior em cultivares mais precoces, principalmente se coincidirem com a ocorrência de fatores ambientais como deficiência hídrica, excesso hídrico ou mesmo de manejo que limitem a acumulação de biomassa (como baixa disponibilidade de nutrientes, intensa competição com plantas daninhas ou perda/redução de área foliar durante o estabelecimento da lavoura, falha na nodulação, etc.). Situações desta natureza frequentemente acarretam a formação de um dossel que não preenche a entrelinha, deixando espaço para a infestação de plantas daninhas durante todo o ciclo de crescimento da soja, e, em muitos casos, determinam a redução da inserção dos primeiros legumes.

A infestação de plantas daninhas durante todo o ciclo da cultura implica em maior número de pulverizações com herbicidas, aumentando o custo de produção. A falta de controle das plantas daninhas em infestações tardias dificulta a colheita, aumenta as impurezas e a umidade nos grãos, proporcionando descontos na comercialização. O não fechamento da entrelinha também significa que a luminosidade incidente na área não está sendo totalmente aproveitada pela cultura da soja.

Situações que implicam em baixa acumulação de biomassa também causam a redução da altura de inserção dos primeiros legumes, o que pode trazer prejuízos, pois os legumes posicionados abaixo de 10 cm não são colhidos por colheitadeiras que não dispõem de plataforma flexível. Em casos específicos de semeadura tardia ou com

variedades que sabidamente acumulam pouca biomassa, recomenda-se o aumento da densidade de plantas na linha ou a redução da distância entre as fileiras como medidas compensatórias.

A escolha de ciclo de maturação deve considerar quando será realizada a semeadura e a colheita. De uma forma geral, cultivares de baixo porte, como genótipos precoces e super-precoces, podem ter o porte muito reduzido nas semeaduras anteriores e posteriores ao mês de novembro em função do ambiente de menor acumulação de biomassa, refletindo menor potencial de rendimento de grãos e inserções baixas dos primeiros legumes. Para mitigar o efeito redutor de estatura e de acumulação de biomassa, o arranjo de plantas pode ser adequado, o que normalmente é feito através do aumento da população. Nas semeaduras tardias, pode-se reservar cultivares de ciclo mais longo e de preferência genótipos que não floresçam muito cedo (período juvenil longo). Cultivares muito tardias, no entanto, podem ser inadequadas para o cultivo em rotação com o arroz irrigado, por vários motivos: primeiramente, a maturação e colheita ocorrem mais tarde no outono, durante período de grande precipitação pluviométrica na região (Berlato, 1981), em solos com baixa capacidade de drenagem e fortemente desestruturados, que demoram demasiadamente para ficarem enxutos para chegar ao ponto de permitir a colheita mecanizada. Longos períodos de umidade nos legumes maduros favorecem a deterioração dos grãos em decorrência de fungos, perda de potencial produtivo em função de degrane e diminuição do peso dos grãos.

Por outro lado, a colheita em solo úmido pode formar rastros da colheitadeira e dos eventuais atolamentos, in-

viabilizando a utilização da área para semeadura direta do arroz na safra seguinte, obrigando a realização de um novo preparo ou aplainamento do solo. Neste caso, perde-se a vantagem de ter a área preparada antecipadamente, com a decorrente redução de custo, além de arriscar perder a melhor época de semeadura do arroz. A colheita deve ser planejada para que ocorra antes do período mais úmido do outono, sendo este um fator que irá limitar regionalmente o uso de cultivares tardias. Esta limitação será dependente do regime de chuvas histórico do local, mas, de uma forma geral, reduzirá fortemente o emprego de cultivares do GMR $\geq 7,0$.

c) retenção foliar e/ou haste verde

Ao término do enchimento dos grãos, tem início o período de amadurecimento. A senescência é um processo que se inicia nas folhas pela remobilização das reservas solúveis das células que são translocadas para outros órgãos da planta, em especial para os grãos. Isto causa a degradação da clorofila, proteínas e outros compostos sujeitos à degradação enzimática (Mundstock & Thomas, 2005). A retenção foliar ocorre quando há um desequilíbrio na relação nutricional entre folhas e legumes, causando a manutenção das folhas, caules e ramos verdes após os legumes já terem atingido a maturação. Tal situação determina dificuldades para a colheita, devido à grande quantidade de folhas e ramos verdes e úmidos misturados aos grãos secos; para a armazenagem, devido ao elevado teor de umidade; e para a comercialização, devido à grande quantidade de impurezas.

A retenção foliar pode ser causada por um grande número de fatores que resultam na presença de poucos le-

gumes, com o crescimento vegetativo muito vigoroso sem que seja formada uma quantidade de legumes adequada para consumir os fotoassimilados gerados, causando um excesso de carboidratos na planta. A baixa carga de legumes e/ou grãos pode ser causada pelo ataque intenso de percevejos no período reprodutivo, deficiência hídrica na floração e deficiência de potássio. Este último fator, principalmente observável em cultivares indeterminadas, é frequente em solos de baixa CTC, em safras com a ocorrência de chuvas de alta intensidade e pode ser mitigado com o parcelamento da adubação potássica (Tecnologias, 2011). Excesso hídrico no período reprodutivo e temperaturas altas também podem provocar abortamento de flores e legumes, resultando em retenção foliar. Entretanto, há genótipos que apresentam maior tendência à retenção foliar em condições de menor propensão para este fenômeno, devendo ser esta uma característica a ser observada na escolha das cultivares de soja para o cultivo em solos de várzea.

d) ramificação da planta

A soja apresenta grande variação de arquitetura de planta e tipo de ramificação. A formação de legumes e de grãos nos ramos pode responder por até 70% do rendimento total em ambientes altamente produtivos (Thomas et al., 1998). Entretanto, em cultivares com baixa capacidade de ramificação é possível compensar a ausência da produtividade dos ramos com arranjo de plantas (Heitholt et al., 2005). Cultivares de soja que praticamente não apresentam ramos vem sendo registradas para cultivo no RS. Como qualquer cultivar, estas também tem uma exigência ótima de manejo (data de semeadura, população e espaçamento

entre linhas) que maximiza a expressão do seu potencial de rendimento. O estabelecimento de lavouras de soja em solos de várzea, muito frequentemente, apresenta grande desuniformidade de estande de plantas em decorrência de vários fatores como semeadoras antigas e pouco precisas, variabilidade de tipos de solos e imperfeições do microrrelevo da lavoura que provocam variações de umidade e de condições à emergência das plantas. Assim sendo, normalmente a distribuição de plantas fica aquém da desejada. Soma-se a isto a velocidade de semeadura que vem sendo praticada, muito acima do recomendado em função da reduzida janela de condições de umidade adequada na várzea para a semeadura da soja.

Em decorrência do exposto, o que se percebe em grande parte das lavouras de soja nas regiões arrozeiras é uma má distribuição das plantas na linha, resultando em várias plantas agrupadas em 40 ou 50 cm e em seguida espaços vazios. Cultivares de soja com potencial de ramificação apresentam maior capacidade de compensar os espaços vazios decorrentes de deficiente distribuição das plantas.

e) resistência a moléstias

As várzeas são ambientes úmidos que favorecem uma grande quantidade de doenças causadas por fungos. Durante o estabelecimento da lavoura, a incidência de tombamento, causado por *Phytophthora sojae* (podridão de fitóftora), *Phytium* sp. e *Fusarium* sp., pode resultar em grande perda de estande. Dentre as três moléstias fúngicas, há resistência genética somente para podridão de fitóftora. Esta resistência, determinada por genes específicos para raças do patógeno, é desafiada pela alta variabilidade que o patógeno apresenta no Brasil, o qual acumula

virulência para a grande parte dos genes de resistência que vem sendo empregados no melhoramento genético brasileiro e também argentino (Costamilan et al., 2013). Outro mecanismo de resistência genética à fitóftora disponível é o parcial, determinado por vários genes e não específico para raças do patógeno, que não impede a infecção pelo fungo, mas reduz a taxa de evolução da doença e não se manifesta no estágio de germinação da semente e emergência de plântula. A resistência parcial não conduz à imunidade, o que significa que em ambientes de grande incidência de inóculo e/ou em condições que favoreçam o desenvolvimento do patógeno, a pressão da doença, que se reflete na incidência e severidade manifestadas, será muito pronunciada (Costamilan et al.; 2007). Por este motivo, em áreas com histórico desta moléstia, o tratamento de sementes com fungicidas que apresentam ação sobre estes patógenos deve ser considerado, mesmo utilizando cultivares resistentes.

Outra moléstia de grande poder destrutivo é a ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*). Trata-se de um patógeno biotrófico, policíclico e com alta capacidade de produção de esporos que infesta principalmente as folhas. A presença da ferrugem reduz a eficiência e a duração da área foliar da soja, com consequências significativas no rendimento de grãos, podendo chegar a redução de até 75% do potencial produtivo (Yorinori et al., 2005). Não é possível evitar a entrada dos esporos da ferrugem na lavoura, pois estes são transportados pelo vento, por longas distâncias, trazendo o inóculo de outros estados produtores de soja. As condições ideais de desenvolvimento são temperatura de 18 a 26,5°C e período de molhamento das folhas, em função de chuvas ou orvalho, de pelo menos 6

horas (Melching et al., 1989), sendo a precipitação considerada o fator mais importante no progresso da doença nas condições de campo (Del Ponte et al., 2006).

As pequenas, mas numerosas, lesões causadas pela ferrugem nas folhas podem apresentar cor castanho-claro, com esporulação abundante (tipo TAN), ou castanho-avermelhado, com pouca ou nenhuma esporulação (tipo Rb). Genes de resistência que conferem imunidade são conhecidos, porém são efetivos a poucos isolados do patógeno e perdem a eficiência em um intervalo de poucos meses (Carneiro, 2007). A formação da lesão Rb ocorre quando o genótipo de soja possui o gene de mesmo nome que confere resistência parcial. Um genótipo que possui o gene de resistência parcial não prescinde do uso dos fungicidas, mas poderá ter o número de aplicações reduzido pela diminuição da velocidade de progressão da moléstia.

Há poucas opções de cultivares resistentes à ferrugem asiática, razão pela qual o manejo da doença é fortemente baseado na aplicação de fungicidas combinados com outros métodos culturais para a redução de inóculo, através do uso de cultivares precoces e semeaduras antecipadas.

As várzeas do sul do RS também parecem favorecer o conjunto de moléstias denominado de “doenças de fim de ciclo” (DFC), causadas por *Cercospora kikuchii*, *Septoria glycines* e *Coletothricum truncatum*. Desequilíbrios nutricionais e baixa fertilidade do solo tornam as plantas mais vulneráveis, podendo ocorrer severa desfolha antes mesmo de a soja atingir a metade da granação. As semeaduras do final da época recomendada e as cultivares de ciclo longo podem apresentar maior incidência e severidade das DFCs.

Desenvolvimento da planta e o excesso hídrico no solo

O estabelecimento da densidade adequada de plantas em lavoura de soja é essencial para se obter alto rendimento de grãos, entretanto isso pode ser problemático em solos de várzea que apresentam drenagem deficiente. A ocorrência de chuvas intensas, que saturam o solo no período de germinação das sementes e emergência das plântulas, diminui a população inicial de plantas. O processo de germinação de uma semente de soja requer que o solo apresente teores adequados de umidade, de temperatura e de oxigênio para que ocorra a utilização das reservas presentes nos cotilédones. A falta de oxigênio no solo diminui ou inibe a respiração da semente de soja, que passa a ter metabolismo anaeróbico (fermentação) e por consequência menor disponibilidade de energia para emergir, ficando também mais suscetível ao ataque de doenças de solo. A formação de crosta superficial em solo com preparo convencional, após uma chuva pesada, pode ser um obstáculo adicional à emergência das plântulas. Em função disso, ocorre grande morte de sementes, tornando o estágio de germinação-emergência extremamente sensível ao excesso de umidade no solo (Hou & Thseng, 1991; Wuebker et al., 2001).

A inundação do solo prejudica o desenvolvimento da planta de soja porque altera a absorção de nutrientes, diminui o crescimento radicular, inibe/diminui a fixação biológica de nitrogênio, diminui a fotossíntese, diminui a taxa de expansão celular e, conseqüentemente, a taxa de crescimento da cultura (Sallam & Scott, 1987; Linkemer et al., 1998; Riche, 2004) (ver Capítulo 4).

O excesso de água no solo durante a fase vegetativa diminui o desenvolvimento das plantas de soja (Lange, 2009), restringindo o potencial de rendimento de grãos (Tabela 4). Já durante a fase reprodutiva ocorre o aborto de flores, legumes e grãos pela menor disponibilidade de nutrientes, principalmente nitrogênio, e fotoassimilados. Entretanto, o percentual de diminuição no rendimento de grãos vai depender da tolerância do genótipo (Tabela 5) à inundação, do estágio de desenvolvimento das plantas em que ocorre o estresse, do período de duração do excesso hídrico e das condições de ambiente, como temperatura, insolação e nível de atividade microbiana do solo que afetam o consumo e a depleção do O_2 dissolvido na água (Barni & Costa, 1975; Scott et al., 1989; Linkemer et al., 1998; Schöffel et al., 2001; Sullivan et al., 2001; Cornelius et al., 2006).

Irrigação

A deficiência hídrica é o principal fator que gera instabilidade produtiva na soja no RS. Em rotação com o arroz irrigado, o excesso hídrico é o principal estresse responsável pela instabilidade produtiva, seguido da deficiência hídrica. A irrigação da soja aproveitando a infraestrutura estabelecida do cultivo do arroz é um grande potencial das terras baixas, sendo que a irrigação por sulco ou por banhos uma forma econômica de suplementação hídrica e praticamente exclusiva deste ambiente. Contudo, a participação da irrigação como estratégia para a obtenção de altos rendimentos de grãos ainda é baixa.

Tabela 4. Percentual de redução da estatura de planta, estande de plantas e rendimento de grãos da cultivar de soja BRS Charrua RR submetida a três períodos de excesso hídrico durante o estágio V8, em relação ao tratamento não inundado.

Período de excesso hídrico	Estatura de planta	Número de plantas metro linear	Rendimento de grãos
..... Redução média (%)			
2 dias	26	0	23
4 dias	33	5	38
8 dias	38	47	61

Lange, 2009.

Tabela 5. Rendimento de grãos do genótipo TEC/IRGA 6070 RR, tolerante ao excesso de umidade no solo, e de três genótipos indicados para cultivo em várzea, em quatro locais, na safra 2012/13.

Local	TECIRGA 6070 RR	Apolo RR	Potência RR	Fundacep 57 RR
..... kg/ha				
Restinga Seca	4490	3920	3796	4028
Cachoeirinha	3490	3153	3446	2634
São Gabriel	3630	3263	3454	3353
Rio Grande	3265	3543	2674	2660
Média	3719	3470	3343	3169

Adaptado de Lange et al., 2013.

A irrigação superficial de cultivos de sequeiro em áreas de várzea requer algumas técnicas específicas, adaptadas a este ambiente. É muito conveniente, por exemplo, que o terreno tenha alguma declividade, pois a drenagem rápida nas áreas niveladas em cota-zero é bastante difícil; que tenham sido feitos drenos superficiais; que o “banho”, quando necessário, seja muito rápido; e que a irrigação

seja feita por frações da lavoura para evitar que algumas áreas fiquem encharcadas em período de tempo que prejudique a cultura (mais de um ou dois dias). Para atender este objetivo, a utilização da tecnologia de nivelamento da superfície do terreno a “laser” é uma meta que deve ser buscada. O perfeito nivelamento do terreno auxilia não apenas na realização de uma lavoura de arroz com maior resposta às tecnologias utilizadas, mas também potencializa o uso da área para a adoção de outras tecnologias em relação à rotação e sucessão de culturas para implantação dos cultivos (SOSBAI, 2012).

A irrigação da soja é uma alternativa viável técnica e economicamente, sendo indicada em situações onde se busca alta produtividade. A irrigação em lavouras de baixa produtividade não proporciona grandes benefícios. Os maiores benefícios desta prática são alcançados onde há domínio do manejo da cultura e são utilizadas as melhores estratégias para proporcionar às plantas uma alta capacidade produtiva. A escolha de cultivares para áreas irrigadas deve ser cuidadosa, pois há grande variabilidade genética no comportamento dos genótipos cultivados em um ambiente favorável ao alto rendimento de grãos. Alguns genótipos responderão à melhora de manejo com crescimento vegetativo, aumentando os entrenós e a área foliar, que leva à perda da estrutura do dossel e à redução da incidência de luz na parte inferior das plantas, resultando em baixa fixação de legumes nos nós inferiores e em acamamento. Este quadro acarreta diminuição da eficiência fotossintética, maior dificuldade do manejo fitossanitário, reduzindo o retorno do investimento em irrigação, e a redução do índice de colheita. O emprego de suplementação hídrica é uma grande oportunidade para os produtores da metade Sul do RS, visto a excelente infraestrutura dispo-

nível para armazenamento e distribuição da água, além da familiaridade dos produtores com a atividade. Entretanto, para usufruir de todo o benefício de alta produtividade e estabilidade produtiva que a suplementação hídrica pode oferecer, é importante empregar cultivares que respondam à melhoria do ambiente de cultivo com incremento no rendimento de grãos. Neste aspecto há grande variabilidade genética, como está demonstrado na Figura 6.

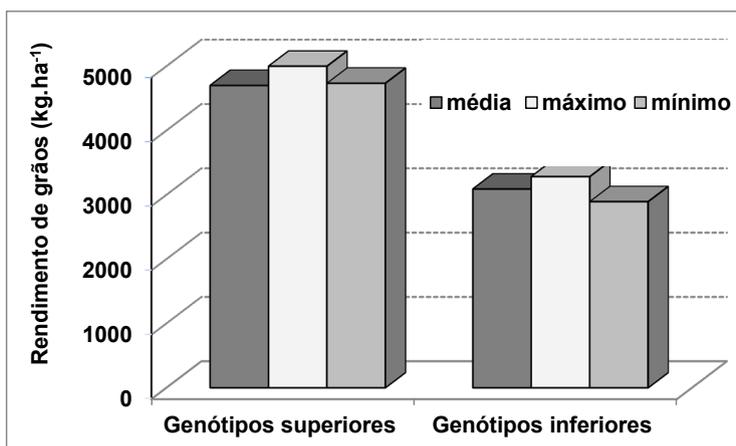


Figura 6. Média, valores máximo e mínimo de rendimento de grãos das cinco cultivares de soja mais produtivas e menos produtivas em um ensaio de competição de cultivares registradas para o cultivo na microregião 101, conduzido em solo de várzea com suplementação hídrica por sulco.

Lange & Vedelago, 2013 (dados não publicados).

A qualidade da água utilizada na irrigação da lavoura de soja também deve ser considerada. Nas regiões costeiras, as fontes de água para irrigação, conectadas ao Oceano Atlântico, sofrem a sua influência, principalmente, em épocas de baixa precipitação pluvial e elevada demanda atmosférica. Com a diminuição do nível de água

dos rios e lagoas litorâneas, pode ocorrer a entrada de água do mar, aumentando a concentração de sódio que é bem mais prejudicial à cultura da soja do que a do arroz (Carmona et al., 2011).

Quando a fonte de água fica próxima a áreas residenciais e industriais, cujos dejetos são lançados diretamente em córregos e rios, o sódio (Na) e o amônio (NH_4) podem ser problemas, principalmente em períodos de seca quando ocorre a diminuição do volume de água dos mananciais.

A presença de 3 mM de NH_4 e/ou de 3 mM de Na, concentrações baixas e não tóxicas ao arroz, em inundação por 5 dias, foi prejudicial a um genótipo de soja não tolerante ao excesso hídrico. Entretanto, a interação NH_4 e Na também prejudicou o desenvolvimento do genótipo tolerante. Isso demonstra quão específica deve ser uma indicação técnica para não prejudicar o desenvolvimento de um genótipo de soja na várzea (Thomas, 2009).

Defesa fitossanitária

Além dos fatores citados anteriormente, os fatores de proteção do potencial produtivo também exercem uma importante participação na resposta da soja ao manejo ajustado para a obtenção de altos rendimentos.

Grande parte dos solos de várzea do RS vem sendo cultivados com arroz irrigado por longa data, em algumas regiões por mais de um século, o que formou um banco de sementes de plantas daninhas. Um dos principais objetivos do cultivo de soja em rotação com o arroz irrigado é redução do banco de sementes de espécies daninhas para o arroz, com destaque para o arroz-vermelho. Por este motivo, o cultivo de soja é realizado quase na totalidade no sistema de preparo de solo convencional, que incentiva ao máximo a germinação das sementes de espécies daninhas.

As plântulas de espécies daninhas, principalmente as gramíneas, oferecem grande competição às plântulas de soja, sendo que eventuais atrasos no calendário de controle químico destas, acarretam forte competição e redução do potencial produtivo da soja. Atrasos no controle nem sempre são evitáveis, pois muito frequentemente a ocorrência de precipitação, principalmente em anos de ocorrência do fenômeno climático “El Niño”, quando há um atraso de todas as atividades de uma propriedade, principalmente as que necessitam de solo enxuto para serem realizadas com o auxílio de um trator. Neste contexto, a utilização de herbicidas pré-emergentes proporciona a redução da competição das plantas daninhas com a soja, além de prevenir o surgimento de ecótipos resistentes aos princípios ativos mais empregados no sistema de rotação, no caso o glifosato e aos herbicidas com mecanismo de ação ALS (inibição da enzima acetolactato sintase) (Vedelago et al., 2012; Turra et al., 2013).

Entre os herbicidas pré-emergentes registrados para o cultivo de soja, os com princípio ativo clomazone e S-metalachlor foram os que apresentaram melhor eficiência no controle de capim-arroz e arroz-vermelho (Figura 7). Como o clomazone é intensamente usado na cultura do arroz irrigado, o princípio ativo mais indicado para o uso na cultura da soja em rotação com o arroz é o S-metalachlor, para garantir melhor diversidade de uso de princípios ativos e assim reduzir as chances de desenvolver ecótipos de plantas daninhas resistentes a herbicidas.

A eficiência do uso de herbicidas pré-emergentes é variável dependendo das condições de umidade do solo, sendo que a sua função é reduzir a infestação de plantas daninhas, fazendo que o controle em pós-emergência possa ser feito com doses mais baixas de glifosato, com maior

flexibilidade de tempo quando de atrasos de aplicação, sem incorrer em grandes prejuízos, e até reduzir o número de aplicações em pós-emergência.

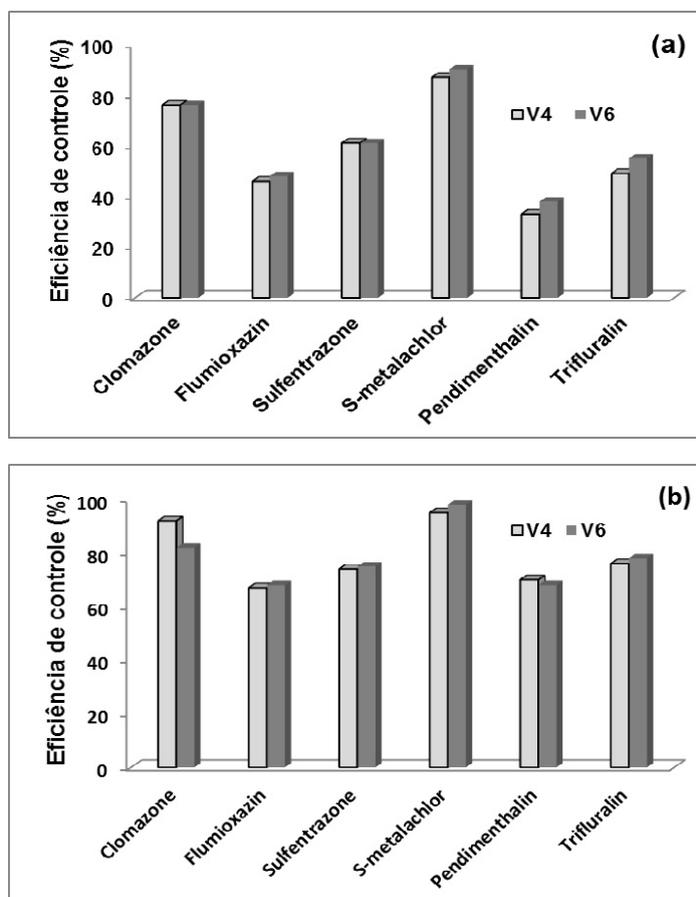


Figura 7. Eficiência de controle de seis herbicidas aplicados em pré-emergência na cultura da soja sobre a população de arroz-vermelho (a) e capim-arroz (b), avaliada nos estádios V4 e V6 da soja. Valor percentual em relação ao padrão sem controle.

Adaptado de Turra et al., 2013.

O adequado manejo de pragas e doenças da soja também é importante para a obtenção de alta produtividade. É recomendada a aplicação de defensivos que proporcionam residual de controle no início da infestação das pragas e de maneira preventiva para as doenças. As condições ambientais e de tecnologia de aplicação devem ser adequadas para cada produto e alvo de controle, seguindo as recomendações dos fabricantes.

Considerações finais

O ambiente de várzea para o cultivo de soja é um ambiente desafiador que impõe fortes instabilidades produtivas à cultura. Entretanto, o uso integrado de algumas estratégias de manejo pode garantir a estabilidade produtiva ao longo dos anos, proporcionando alto potencial de rendimento no cultivo de soja neste ambiente:

- a) Optar pelo cultivo em área nivelada com um pequeno desnível, porque facilita a drenagem do excesso de água em caso de chuvas pesadas, bem como facilita a irrigação por inundação em caso de seca;
- b) Verificar as condições físicas do solo, e se necessário, efetuar a descompactação;
- c) Fazer a correção da acidez do solo e a adubação exigida pela cultura;
- d) Semear em camalhões ou em microcamalhões em áreas sistematizadas;
- e) Fazer a semeadura da soja dentro da época preferencial indicada pela pesquisa;
- f) Buscar informações técnicas dos genótipos que mais se adaptam ao excesso de umidade no solo da região;

- g) Adequar o arranjo de plantas para cada cultivar, nível de manejo utilizado e época de semeadura;
- h) Irrigar as lavouras principalmente em períodos críticos (floração e enchimento de grãos);
- i) Adotar as melhores práticas de manejo fitossanitárias, com foco na prevenção de doenças e no controle de plantas daninhas que evita a competição com a cultura. As pragas devem ser controladas no início da infestação.

Referências bibliográficas

- ALLIPRANDINI, L.F.; ABATTI, C.; BERTAGNOLLI, P.F.; CAVASSIM, J.E.; GABE, H.L.; KUREK, A.; MATSUMOTO, M.N.; OLIVEIRA, M.A.R.; PITOL, C.; PRADO, L.C.; STECKLING, C. 2009. Understanding soybean maturity groups in Brazil: Environment, cultivar classification, and stability. **Crop Science**, v. 49, p.801-808.
- BARNI, N.A.; COSTA, J.A. 1975. Efeito de períodos de inundação do solo sobre o rendimento de grãos da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). **Agronomia Sulriograndense**, v.11, p.207-222.
- BEECHER, H.G; THOMPSON, J.A; DUNN, B.W; MATHEWS, S.K. 2005. Successful permanent raised beds in the irrigated farming systems of the Murrumbidgee and Murray valleys of New South Wales, Australia. p. 129-143, Canberra, 2005. In: ROTH, C.H; FISCHER, R.A; MEISNER, C.A. Editors: Evaluation and performance of permanent raised bed cropping systems in Asia, Australia and Mexico. **Proceedings** of a workshop held in Griffith, NSW, Australia.
- BERLATO, M. 1981. Exigências bioclimáticas e zoneamento agroclimático no Rio Grande do Sul. In: MIYASAKA S.; MEDINA, J.C. (Ed.) **A soja no Brasil**. São Paulo: Ital, p.187-190.

BONATO, E.R.; LANGE, C.E.; BERTAGNOLLI, P.F. 2001. Desempenho de cultivares de soja de diferentes ciclos em sementeiras de dezembro, na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.31, p. 935 -940.

BUZATO, L.F.B.; LANGE, C.E.; CARMONA, F.C.; VEDELAGO, A. 2013. Alteração de atributos químicos de um solo de várzea cultivado sob diferentes sistemas de cultivo por longo prazo. In: **Congresso Brasileiro do Arroz Irrigado**, VIII, 2013, Santa Maria-RS. Anais ... p.854-858.

CARMONA, F.C.; MENEZES, V.G.; RODRIGUES, J.F.; ALVES, J.A.C.; ZSCHORNACK, T.; BOENI, M.; SILVA, P.R.F.; ANGHINONI, I. 2012. Atributos de solo de várzea cultivado com arroz irrigado em sucessão a espécies de cobertura de inverno. - FERTBIO 2012 Maceió (AL) - **Resumos Expandidos**, 17 a 21 de setembro. CD Rom.

CARMONA, F.C.; ANGHINONI, I.; WEBER, E. 2011. **Salinidade da água e do solo e seus efeitos sobre o arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA/Estação Experimental do Arroz, Seção de Agronomia. 54 p., color. (Boletim Técnico, 10).

CARNEIRO, L.C. 2007. **Caracterização epidemiológica da resistência parcial e análise da tolerância de genótipos de soja à ferrugem asiática**. Piracicaba, Tese (Doutorado)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 75p:il.

COOPER, R.L. 2003. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. **Field Crops Research**, v.82, p. 27-35.

CORNELIUS, B.; CHEN, P.; CHEN, Y.; LEON, N.; SHANNON, J.G.; WANG, D. 2005. Identification of QTLs underlying water-logging tolerance in soybean. **Molecular Breeding**, v.16, p. 103 -112.

CORNELIUS, B.; CHEN, P.; HOU, A.; SHI, A.; SHANNON, J.G.; 2006. Yield potential and waterlogging tolerance of selected near-isogenic lines and recombinant inbred lines from two southern soybean populations. **Journal of Crop Improvement**, v. 16(1/2), p.97 -111.

COSTAMILAN, L.M.; CLEBSCH, C.C.; SOARES, R.M.; SEIXAS, C.D.S.; GODOY, C.V.; DORRANCE, A.E. 2013. Pathogenic diversity of *Phytophthora sojae* pathotypes from Brazil. **European Journal of Plant Pathology**, v. 135, p. 845-853.

COSTAMILAN, L.M.; BERTAGNOLLI, P.F.; MORAES, R.M.A., 2007. Podridão radicular de fitóftora em soja. Embrapa: Embrapa-Trigo. **Documentos Online** n.79. Dezembro 2007.

DEL PONTE, E.M.; GODOY, C.V.; LI, X.; YANG, X.B. 2006. Predicting severity of asian soybean rust epidemics with empirical rainfall models. **Phytopathology**, v.96, p.797-803.

HEITHOLT, J.J.; FARR, J.; BEASON, R. 2005. Planting configuration × cultivar effects on soybean production in low-yield environments. **Crop Science**, v 45, p. 1800-1808.

HOU, F.F.; THSENG, F.S. 1991. Studies on the flooding tolerance of soybean seed: varietal differences. **Euphytica**, v.57, p.169-173.

KLAMT, E.; KAMPF, N.; SCHNEIDER, P. 2005. **Solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS. 43p. (Boletim Técnico de Solos, 4).

LANGE, C.E. 2009 Efeito da duração do excesso hídrico sobre características agronômicas da cultivar de soja BRS Charrua. In: **Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 6; Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 28, 2009, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: IRGA. 2009. 1 CD ROM

LANGE, C.E. 2008. Metodologia de avaliação da tolerância de genótipos de soja ao excesso hídrico. In: **XXXVI Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul**. Atas... Fepagro, Porto Alegre. 2008.

LANGE, C.E.; VEDELAGO, A.; MARCOLIN, E.; OLIVEIRA, K.I.; SILVA, S. 2011. Desempenho de soja em solo de várzea cultivado com arroz irrigado por 16 anos sob plantio direto, cultivo mínimo e sistema pré-germinado. In: **Congresso Brasileiro do Arroz Irrigado**, VIII, 2011, Camboriú-SC. Anais ... p. 271-274.

LANGE, C.E.; VEDELAGO, A.; OLIVEIRA, K.I.; SILVA, S. 2011. Avaliação da reação de germoplasma exótico de soja ao excesso hídrico, safras 2008/09 e 2009/10. In: **Congresso Brasileiro do Arroz Irrigado**, VIII, 2011, Camboriú-SC. Anais ... p.263-266.

LANGE, C.E.; VEDELAGO, A.; STECKLING, C.; ROVERSI, T. 2013. Nova cultivar de soja TEC/IRGA 6070 RR foi desenvolvida para o cultivo em solos arroseiros gaúchos. In: **Congresso Brasileiro do Arroz Irrigado**, VIII, 2013, Santa Maria-RS. Anais ... p.1076-1079.

LINKEMER, G.; BOARD, J.E.; MUSGRAVE, M.E. 1998. Waterlogging effects on growth and yield components in late-planted soybean. **Crop Science**, v.38, p.1576-1584.

MAPA. **Portaria 72/2013 de 11/07/2013**. <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=-visualizarAto PortalMapa&chave=1878434138>, acessado em 28/03/2014.

MELCHING J.S.; DOWLER, W.M.; KOOGLE, D.L.; ROYER, M.H.; 1989. Effect of duration, frequency, and temperature of leaf wetness period on soybean rust. **Plant Disease**, v.73, p.117-122.

MUNDSTOCK, C.M.; THOMAS, A.L. 2005. **Soja: fatores que afetam o crescimento e o rendimento de grãos**. Porto Alegre: Departamento de Plantas de Lavoura da Universidade Federal do Rio Grande do sul: Evangraf. 31p.

NASCIMENTO, P. C.; BAYER, C.; NETTO, L.F.S.; VIAN, A.C.; VIEIRO, F.; MACEDO, V.R.M; MARCOLIN, E. 2009. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p.1821-1827.

PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S; PINTO, L.F.S. 2004. Física dos solos de várzea cultivados com arroz irrigado. In: Gomes, A.S.; Magalhães Júnior, A.M.M. (Eds.). **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. 899 p.

PINTO, L.F.S.; LAUS NETO, J.A.; PAULETTO, E.A. 2004. Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES, A.M. (Eds.) **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa. cap.3, p.75-96.

PINTO, L.F.S.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S.; SOUSA, R.O. 1999. Caracterização de solos de várzea. In: GOMES, A.S.; PAULETTO, E.A. (eds). **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. p. 11-35.

REYNA, N.; CORNELIOUS, B.; SHANNON, J.G.; SNELLER, C.H. 2003. Evaluation of a qtl for waterlogging tolerance in southern soybean germplasm. **Crop Science**, v. 43, p. 2077-2082.

RICHE, C.J. 2004. **Identification of soybean cultivars tolerance to waterlogging through analyses of leaf nitrogen concentration**. Louisiana State University, Department of Agronomy. Thesis, 36 p.

RODRIGUES, O.; DIDONET, A.D.; LHAMBY, J.C.B.; BERTAGNOLLI, P.F.; LUZ, J.S. 2001. Resposta quantitativa do florescimento da soja à temperatura e ao fotoperíodo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.431-37.

SALLAM, A.; SCOTT, H.D. 1987. Effects of prolonged flooding on soybeans during early vegetative growth. **Soil Science**, v.144, p.61-66.

SCHÖFFEL, E.R.; SACCOL, A.V.; MANFRON, P.A.; MEDEIROS, S.L.P. 2001. Excesso hídrico sobre os componentes do rendimento da cultura da soja. **Ciência Rural**, v.31, p.7-12.

SCOTT, H.D.; DEANGULO, J.; DANIELS, M.B.; WOOD, L.S. 1989. Flood duration effects on soybean growth and yield. **Agronomy Journal**, v.81, p.631-636.

SETTER, T.L.; WATERS, I. 2003. Review of prospects for germplasm improvement for waterlogging tolerance in wheat, barley and oats. **Plant and Soil**, v.253, p.1-34.

SETTER, T.L. et al. 2009. Review of wheat improvement for waterlogging tolerance in Australia and India: the importance of anaerobiosis and element toxicities associated with different soils. **Annals of Botany**, v. 103, p. 221-235.

SOSBAI. SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO. 2012. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Porto Alegre, SOSBAI. 176p.

STRECK, E.D.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. 2008. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, EMATER/RS-ASCAR. 222p.

SULLIVAN, M.; VANTOAI, T.; FAUSEY, N.; BEUERLEIN, J.; PARKINSON, R.; SOBOYEJO, A. 2001. Evaluating on-farm flooding impacts on soybean. **Crop Science**, v.41, p.93-100.

TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE SOJA - REGIÃO CENTRAL DO BRASIL 2012 E 2013. 2011. Londrina: Embrapa Soja. 261 p.

THOMAS, A. L. 2009 . Potencialização da absorção de sódio pelo amônio em soja com sistema radicular inundado. In: **XXXVII Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul**. Porto Alegre - RS. Programa e resumos da XXXVII Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul. Porto Alegre - RS: UFRGS.

THOMAS, A.L.; COSTA, J.A.; PIRES, J.L. 1998. Rendimento de grãos de soja afetado pelo espaçamento entre linhas e fertilidade do solo. **Ciência Rural**, v.28, p.543-546.

TODD, C.D.; TIPTON, P.A.; BLEVINS, D.G.; PIEDRAS, P.; PINEDA, M; POLACCO, J.C. 2006. Update on ureide degradation in legumes. **Journal of Experimental Botany**, v.57, p.5-12.

TURRA, M.A.; BUZATO, L.F.B.; VEDELAGO, A.; LANGE, C.E.; MARCOLIN, E.; CARMONA, F.C. 2013. Propriedades físicas de um Gleissolo cultivado com arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) sob diferentes sistemas de preparo do solo. In: **XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 28 de julho a 2 de agosto de 2013. Costão do Santinho Ressort, Florianópolis, SC. CD-rom.

TURRA, M.A.; LOPES, F.B.; FERRARI, L.E.; VEDELAGO, A.; LANGE, C. E.; KALSING, A. 2013. Redução da infestação de gramíneas anuais em soja cultivada em áreas arroteadas com herbicidas residuais - análise das safras 2011/12 e 2012/13. In: **VIII Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 2013, Santa Maria (RS). Anais. Santa Maria: Pallotti, 2013. v. 1. p. 379-382.

VANTOAI, T.T.; ST. MARTIN, S.K.; CHASE, K.; BORU, G.; SCHNIPKE, V.; SCHMITTHENNER, A.F.; LARK, K.G. 2001. Identification of a QTL associated with tolerance of soybean to soil waterlogging. **Crop Science**, v.41, p.1247-1252.

VEDELAGO, A.; KALSING, A.; LANGE, C. E.; MENEZES, V. G. 2012. Redução da infestação de arroz-vermelho na soja cultivada em várzea com herbicidas de ação residual. In: **XXXIX Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul**. Passo Fundo. Anais. Passo Fundo: EMBRAPA TRIGO. v. 1. p. 10-15.

VEDELAGO, A.; CARMONA, F.C.; BOENI, M.; LANGE, C.E.; ANGHINONI, I. 2012. **Fertilidade e aptidão de uso dos solos para cultivo da soja nas regiões arroteadas do Rio Grande do Sul**. Cachoeirinha: IRGA. Divisão de Pesquisa. 48 p. (Boletim Técnico, 12).

WINKLER A.S.; PARFITT, J.M.B; TIMM, L.C. 2013. Locação de drenos através da análise de modelo digital de elevação em área de várzea. In: **Congresso Brasileiro do Arroz Irrigado**, VIII, 2013, Santa Maria-RS. Anais ... p.1136-1139.

WUEBKER, E.F.; MULLEN, R.E.; KOEHLER, K. 2001. Flooding and temperature effects on soybean germination. **Crop Science**, v.41, p.1857-1861.

YORINORI, J.T.; PAIVA, W.M.; FREDERICK, R.D.; COSTAMILAN, L.M.; BERTAGNOLLI, P.F.; HARTMAN, G.E.; GODOY, C.V.; NUNES, J.J. 2005. Epidemics of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Brazil and Paraguay from 2001 to 2003. **Plant Disease**, v. 89, p.675-677.

Impressão:

Evangraf

Rua Waldomiro Schapke, 77 - POA/RS

Fone: (51) 3336.2466 - (51) 3336.0422

E-mail: evangraf.adm@terra.com.br