

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

EFEITO DE TRÊS MANEJOS DO LENÇOL FREÁTICO NA ADAPTAÇÃO FISIOMORFOLÓGICA DO FEIJOEIRO (*Phaseolus vulgaris*, L.) AO ENCHARCAMENTO⁽¹⁾

R. O. CALHEIROS⁽²⁾, D. E. CRUCIANI⁽³⁾,
F. B. ARRUDA⁽²⁾ & R. B. QUEIROZ VOLTAN⁽²⁾

RESUMO

Estudou-se o efeito de três manejos do lençol freático na indução de adaptações fisiomorfológicas do cultivar Bat 477 de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.) à hipoxia, com vistas em caracterizar a influência relativa dos principais fatores físicos, químicos e biológicos interferentes. O experimento foi realizado em campo, na ESALQ/USP, Piracicaba (SP), de março a junho de 1999, utilizando-se caixas de cimento amianto de 1.000 L como unidade experimental no delineamento de parcelas inteiramente ao acaso, com quatro tratamentos e cinco repetições. As caixas receberam estrutura própria de manejo e controle do lençol freático. Simulou-se ao máximo um meio físico/condição natural de uma várzea. Após a indução no período vegetativo, a eficiência dos manejos foi testada pela inundação temporária do solo no fim do florescimento/formação de vagens. Houve um efetivo processo de nodulação das raízes, a despeito da condição de alta saturação do solo. As características biométricas de crescimento, embora acusando prejuízo da hipoxia, evidenciaram a utilização pela planta de mecanismos adaptativos morfológicos (raízes adventícias e lenticelas), biológicos (fixação de N) e fisiomorfológicos (resistividade estomática e transpiração). Já as características biométricas de colheita evidenciaram que tanto o manejo do lençol mantido a 15 cm como o de elevação gradativa, embora com rendimento de grãos sem vantagem estatística sobre o manejo não-indutivo, foram efetivos, permitindo a planta completar seu ciclo, além de menor comprometimento na qualidade de grãos. A alternância de vantagens relativas biométricas entre os dois manejos não acarretou diferença estatística no rendimento de grãos, levando-se a inferir ser vantajoso o uso de cultivares de ciclo mais longo nesse tipo de condição.

Termos de indexação: drenagem, várzea, mesófitas, sucessão.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP. Recebido para publicação em novembro de 1999 e aprovado em dezembro 2000.

⁽²⁾ Pesquisador do Instituto Agronômico de Campinas – IAC. Caixa Postal 28, CEP 13001-970 Campinas (SP).

⁽³⁾ Professor do Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, Caixa Postal 9, CEP 13400-970 Piracicaba (SP). E-mail: cruciani@carpa.ciagri.usp.br

SUMMARY: *EFFECT OF THREE WATER TABLE MANAGEMENT SYSTEMS ON THE PHYSICAL-MORPHOLOGICAL ADAPTATION OF SNAP BEANS (Phaseolus vulgaris, L) TO FLOODING TOLERANCE*

The effect of three water table management systems on the physical-morphological adaptation of snap beans (Phaseolus vulgaris, L.), cv. BAT 477 to flooding tolerance was studied and the relative influence of the main physical, chemical and biological interfering factors discussed. The trial was conducted at ESALQ/USP, Piracicaba (SP) Brazil, from March to June, 1999, under maximal simulation of natural low land conditions. A 1.000 L concrete box was used as plot, under a completely randomized design, with four treatments and five replications. After induction at vegetative growth stage, management efficiency was tested by a short-term waterlogging event at a reproductive stage. The biometric characteristics of growth, although displaying damage caused by hypoxia, showed the plant used morphological (adventitious roots and lenticels), as well as biological (N fixation) and physical-morphological (diffusion resistance and transpiration) adaptive mechanisms. On the other hand, the yield biometric characteristics showed that the water table maintained at 15 cm, as well as the gradual elevation, although without any significant yield difference in relation to no inductive management, were effective, allowing the plant to complete its phenological cycle, resulting in better grain quality. Alternating relative biometric advantages between the two management systems caused difference in yield, suggesting that the use of longer-cycle cultivars under hypoxia is more advantageous.

Index terms: drainage, low land, mesophyces plant, succession.

INTRODUÇÃO

Na utilização econômica das terras baixas, a monocultura é problema mundial (Garrity & Pernito, 1996), porque a diversificação de culturas mesófitas sofre alto risco de encharcamento ocasional, levando à prática da drenagem, normalmente exagerada e com conseqüente degradação do meio.

Como solução desse impasse, surgem os trabalhos de tolerância fisiomorfológica das culturas ao encharcamento. Com resultados muito variáveis, considerando a diversidade de fatores interferentes, é escassa a literatura relativa ao feijoeiro, sobretudo para as condições tropicais, de estudos em campo, durante todo o ciclo e com os principais fatores interferentes monitorados. A maioria dos trabalhos é de laboratório, com substrato artificial e, ou, esterilizado (Wadman & Van Andel, 1985), com plântulas (Minchin & Summerfield, 1976; Waters et al., 1991) e, ou, sem a adequada caracterização ou monitoramento do solo/clima/água (Singh et al., 1991; White & Molano, 1994; Garrity & Pernito, 1996; Umaharan et al., 1997).

Nesse tipo de estudo, a influência do clima é tão grande que os trabalhos realizados em regiões de clima temperado - a maioria - devem ser interpretados com muito cuidado, porque, por exemplo, as inundações de inverno raramente são prejudiciais às plantas perenes por estarem em dormência, com baixa atividade metabólica e evapotranspirométrica (Blackwell, 1983). Já no clima

tropical, a temperatura maximiza o efeito da hipoxia hídrica, tanto pela menor dissolução do O₂ na água como pelo seu maior consumo pela planta e microrganismos, ocasionando o aumento da velocidade das reações químicas.

Um dos mais importantes parâmetros básicos a ser monitorado é o teor de oxigênio no solo, tendo sido correlacionadas várias respostas da planta com a taxa de difusão do oxigênio (TDO) e com a concentração de O₂ no solo (Sojka & Soltzy, 1980). Como efeitos decorrentes, surgem modificações de natureza física, como a penetração das raízes e permeabilidade do solo; nutricionais; químicas, como potencial redox e pH, e biológicas, como proliferação de algas e organismos anaeróbicos.

Teoricamente, pode-se buscar a adaptabilidade fisiomorfológica das plantas por meio de um regime de hipoxia/anoxia específico exercido pelo lençol freático. Nesta estratégia, deve ser atentado que o estabelecimento abrupto da hipoxia abaixa significativamente o estado de energia das células, não permitindo aclimatação ou indução de um metabolismo alternativo antes da condição se tornar letal. Wadman & Van Andel (1985) observaram que, após encharcamento repentino, as raízes do feijoeiro paralisaram imediatamente o crescimento, permanecendo com peso constante por dois dias, seguindo-se um decréscimo, com a maioria morrendo após quatro dias. Já um pré-tratamento hipóxico em raízes de milho aumentou sua capacidade de sobrevivência sob anoxia de menos de 10 h para mais de um dia (Saglio et al., 1988).

Um dos mais importantes mecanismos de adaptação à falta de O_2 na rizosfera é o desenvolvimento de raízes adventícias, tendo sido a elas creditada uma condutância estomática perto da normalidade (Sena Gomes & Kozlowski, 1980). Também são importantes a formação de lenticelas hipertrofiadas no caule e a de aerênquima no córtex (Justin & Armstrong, 1987), com as primeiras funcionando como órgãos de absorção de O_2 e depósitos de metabólitos tóxicos (etanol e acetaldeído), resultantes da respiração anaeróbica nas raízes (Kawase, 1981).

Quanto às alterações biológicas, Nawata et al. (1990), ressaltando a importância da fixação biológica do nitrogênio, afirmaram que a relação entre a bactéria e a resposta da planta ao encharcamento deve ser estudada. Embora seja um organismo absolutamente aeróbico, sua sensibilidade à hipoxia tem sido reportada em diferentes leguminosas (Sprent, 1972; Minchin & Summerfield, 1976). Por outro lado, Wang et al. (1993) observaram na soja em solo saturado que a fixação de N aumentou, contrariando a expectativa.

Com base nas considerações supracitadas, há forte evidência de que o adequado manejo do lençol freático pode constituir a melhor estratégia de exploração de culturas mesófitas em terras baixas. Fica também inquestionável que um melhor entendimento do comportamento final de uma mesófita sob hipoxia é alcançado se o estudo for realizado no campo (condições naturais) e com adequada caracterização e monitoramento dos principais fatores produtivos interferentes.

Os objetivos deste trabalho foram estudar o efeito de diferentes manejos do lençol freático nos principais mecanismos adaptativos/mitigadores da hipoxia utilizada pelo feijoeiro e caracterizar e monitorar os principais fatores de produção numa condição de hipoxia, interpretando seu papel individual e interativo na resposta final da cultura.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em 25/02/99 em delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e cinco repetições, procurando-se simular o máximo possível, em cada fator experimental, o meio físico/condição natural de uma área de terras baixas produtivas.

O efeito dos diferentes manejos do lençol foi estudado por meio dos tratamentos: T_1 - testemunha (sem lençol freático); T_2 - igual à testemunha, com elevação e manutenção do lençol freático à superfície do solo no fim do florescimento por sete dias (Teste do grau de adaptação à hipoxia - TAH) e rebaixamento brusco do lençol freático; T_3 - elevação e manutenção do lençol freático a 15 cm da superfície

do solo durante todo o estágio vegetativo, aplicação do TAH e rebaixamento gradativo do lençol freático; T_4 - elevação do lençol freático a 15 cm, elevação gradativa do lençol à superfície do solo ao longo do desenvolvimento vegetativo, aplicação do TAH e rebaixamento gradativo do lençol freático.

No tratamento sem lençol freático (T_1), a cultura foi semeada em solo aerado, recebendo irrigações em caráter suplementar por meio da elevação do lençol até à superfície. O "momento da irrigação" foi no potencial mátrico do solo de -0,05 MPa, acusado por tensiômetros instalados na profundidade estimada correspondente a 50% do sistema radicular. Rebaixava-se o lençol imediatamente após este ter atingido a superfície. Esse tratamento representou o potencial máximo produtivo relativo da cultura neste solo e clima. Já o T_2 representou a condição da planta de feijão com adaptação zero repentinamente submetida ao encharcamento temporário.

A eficiência da indução adaptativa à hipoxia de cada manejo foi avaliada por meio do teste do grau de adaptação à hipoxia - TAH pela imposição de uma condição de encharcamento temporário pela elevação do lençol acima da superfície no fim do florescimento/formação de vagens, estágio de maior sensibilidade (Garrity & Pernito, 1996). Essa eficiência foi quantificada de modo comparativo entre tratamentos, por meio das características biométricas de colheita, incluindo o rendimento de grãos.

Como unidade experimental, utilizaram-se caixas de cimento amianto de 1.000 L com área de 1,9 m²; manejou-se o lençol por meio de tubos de duas polegadas posicionados na base interna das caixas-parcelas, conectados, num sistema de vasos comunicantes, a recipiente adjacente cheio de água que continha uma bóia hidráulica para exercer o controle e manutenção do nível da água (no recipiente) e do lençol (na caixa-parcela) (Figura 1).

O monitoramento do nível do lençol foi executado por leitura diária por meio de poço de observação, constituído de tubo de PVC perfurado de duas polegadas.



Figura 1. Vista geral do experimento e estruturas de manejo e monitoramento do lençol.

No preenchimento das caixas, o substrato foi composto de uma camada de brita 1, na altura dos drenos (10 cm), seguida de outra camada de mesma espessura de pedrisco e, finalmente, de uma camada de 60 cm de terra oriunda de várzea, situada no Distrito de Paredão Vermelho, Ártemis (SP), de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico abruptico, textura arenosa sub-média (Arenic Abruptic Paleudalt). A água utilizada foi de rio, não tratada. As análises físicas e químicas do solo e da água são apresentadas nos quadros 1 e 2 e a curva de retenção de água no solo na figura 2. Adicional descrição do substrato, bem como da estrutura experimental, foi apresentada por Calheiros (2000).

O cultivar Bat 477 recebeu adubação no solo equivalente a 90 kg ha⁻¹ da formulação 4-14-8 e 30 kg ha⁻¹ de micronutriente FTE. Procurando minimizar a deficiência nutricional decorrente da hipoxia, realizaram-se, ainda, adubações foliares ao longo do ciclo fenológico.

O lençol foi elevado a 15 cm de profundidade em T₃ e T₄ 13 dias após a emergência.

As alterações hídricas no processo de transferência de água no sistema planta-atmosfera foram avaliadas por meio da resistência estomática e taxa de transpiração, lidas com porômetro de equilíbrio dinâmico (Licor, modelo Li-1600), utilizando a folha mais alta e completamente expandida. Com esse último, avaliaram-se também a temperatura da folha e a umidade relativa.

As transformações morfológicas foram caracterizadas por meio de observação com lupa pela presença de lenticelas e pelo número de raízes adventícias emitidas. Para esta última, foram desenterradas, cuidadosamente, duas plantas por parcela, lavadas, e, após a localização do hipocótilo, efetuada por cortes

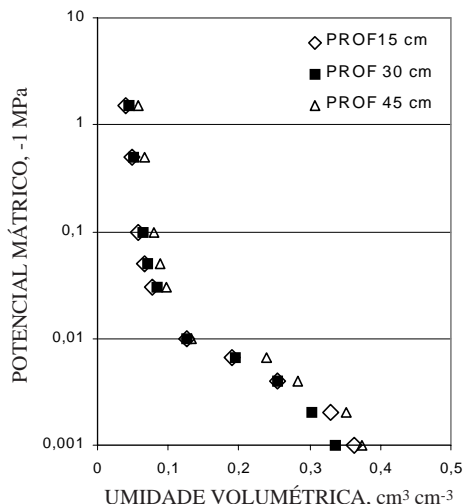


Figura 2. Curva de retenção de água no solo.

sistemáticos da raiz principal e observação em microscópio, contou-se o número de raízes adventícias emitidas.

Como características físicas e químicas do meio, antes, durante e nas primeiras horas após o TAH, avaliaram-se, em uma parcela do T₃, em quatro repetições (eletrodos), a alteração temporal da taxa de difusão de oxigênio (TDO) e o potencial redox do solo por meio de um aparelho desenvolvido pelo CNPDIA/Embrapa (Herrmann et al., 1997). Para tanto, os eletrodos foram instalados a 5 cm de profundidade, elevando-se, posteriormente, o lençol, num processo de 30 min. Essas características foram lidas novamente, na mesma profundidade, no penúltimo dia do TAH (144 h), realizando-se, no entanto, uma leitura em cada parcela.

Quadro 1. Análise química do solo

Profundidade	pH	M.O.	P	S-SO ₄	K	Ca	Mg	Al	H + Al	SB	T	V	m
cm	CaCl ₂	g dm ⁻³	- mg dm ⁻³ -		mmol. dm ⁻³							%	
0-30	4,0	9,0	4	10,7	1,2	5	2	10	34	8,2	42,2	19	55
30-60	4,3	6,0	2	5,0	0,5	3	2	5	20	5,5	25,5	22	48

Quadro 2. Análise granulométrica do solo após o período inicial de estabilização

Areia				Total	Silte	Argila	Floculação		Classe de textura
Grossa	Média	Fina	Muito fina				Total	Água	
%									
1	20	67	4	92	2	6	4	33	Arenosa

Auxiliando ainda as determinações físicas e químicas, mediu-se, gravimetricamente, o grau de saturação do solo dos tratamentos T₃ e T₄ imediatamente antes do TAH, coletando-se uma amostra por parcela, a 5 cm de profundidade.

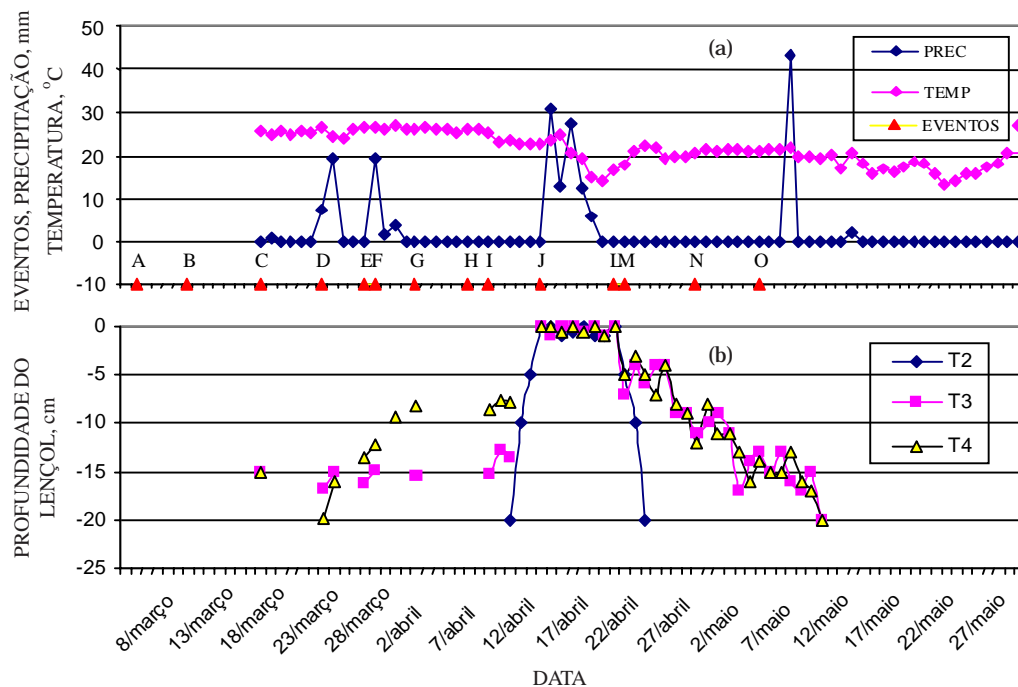
No sétimo dia do TAH, também nos tratamentos T₃ e T₄, avaliou-se o extrato de saturação do solo, quantificando-se o teor de oxigênio dissolvido, pH e temperatura por meio do aparelho Aquacheck da Radelkis Eletronical Instruments, realizando-se uma leitura por repetição, entre as 8 e 9 h e 45 min da manhã, a 5 cm de profundidade do lençol.

Avaliaram-se as características biométricas de desenvolvimento imediatamente antes do TAH e as características de produção na colheita, utilizando-se, em ambas, duas plantas por repetição, com exceção do rendimento de grãos, que correspondeu à amostragem em duas fileiras centrais de 1,0 m de comprimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ocorrências climáticas

Toda a seqüência de ocorrências climáticas pode ser interpretada como favorável ao T₂ e muito desfavorável aos tratamentos hipóxicos. Isso porque a ocorrência de temperaturas em torno de 27°C no período vegetativo, estágio de alta atividade metabólica, intensificou a demanda transpirométrica, encontrando a planta no início adaptativo à hipoxia e, portanto, com um sistema radicular pouco efetivo em processo de modificação/adaptação (Figura 3a). Em seguida, o decréscimo da temperatura, a ocorrência de precipitações e a elevação da umidade relativa do ar contribuíram para diminuir a taxa transpirométrica e, por conseguinte, o impacto do TAH, beneficiando, principalmente, o T₂, cujo sistema radicular não adaptado à hipoxia teria maior dificuldade na absorção de água do solo. A temperatura



- A Emergência.
- B 6 D.A.E., irrigação subterrânea de estabelecimento.
- C 13 D.A.E., 2 pares de trifólios; elevação do lençol a 15 cm.
- D 19 D.A.E., 1^os sintomas de clorose e epinastia no T₃ e T₄; 1^a adubação foliar; altura das plantas de 17 a 20 cm.
- E 23 D.A.E., 4 pares de trifólios; altura das plantas 30 cm.
- F 24 D.A.E., 1^{as} flores em todos tratamentos.
- G 28 D.A.E., sintoma nítido de clorose, epinastia e folhas de baixo amarelas no T₃ e T₄.

- H 33 D.A.E., irrigação do T₁ e T₂
- I 35 D.A.E., 22 dias após a elevação do lençol freático a 15 cm da superfície; fenologia normal (floração e formação de vagem), sintomas nítidos de hipoxia;
- J 40 D.A.E., início da TAH
- L 47 D.A.E., fim da TAH
- M 48 D.A.E., 2^a adubação foliar
- N 55 D.A.E., 2^a irrigação do T₁
- O 61 D.A.E., início da senescência.

Figura 3. Seqüência de eventos, precipitação e temperatura média ocorridas ao longo do ciclo fenológico do feijoeiro (a); Flutuação do lençol ocorrida durante o ciclo fenológico da cultura (b).

continuou benéfica no período após o TAH por ter-se estabilizado num patamar de, aproximadamente, 7°C inferior ao período anterior (vegetativo).

Seis dias após a elevação do lençol a 15 cm de profundidade nos T₃ e T₄, observaram-se leve clorose e epinastia nas horas mais quentes do dia, prolongando-se, assim, até o décimo terceiro dia, quando os dois tratamentos já apresentavam 50% das plantas com as folhas de baixo amareladas. Sintomas idênticos foram observados já no terceiro dia de encharcamento por Garrity & Pernito (1996), trabalhando com feijão Mungo (*Vigna radiata*, L.).

A diferenciação do manejo do lençol no T₄ em relação ao T₃ ocorreu a partir do décimo dia após a elevação do lençol a 15 cm de profundidade com o início da elevação gradativa do lençol, resultando em um período de 18 dias de lençol mais elevado que no T₃, num máximo de 8 cm. Já o rebaixamento gradativo deu-se em 20 dias, com o término ocorrendo cinco dias após o aparecimento dos primeiros sintomas de senescência.

Características biométricas da parte aérea

O início do florescimento e da formação de vagens ocorreu sem diferença fenológica entre os tratamentos. Aos 22 dias da elevação do lençol, observou-se significativa diferença na altura das plantas entre os T₄ e T₃ em relação aos T₁ ou T₂, respectivamente, 70 e 76% (Quadro 3). Por outro lado, a tendência de maior altura de plantas no T₄ em relação ao T₃ deveu-se ao maior estiolamento do caule e não ao vigor adaptativo, como demonstra a massa da parte aérea. Isso também fica claro nas demais características biométricas, em que, por exemplo, o número de folhas do T₄ foi significativamente menor que do T₃, sendo, em relação ao T₁, 50% no T₄ contra 92,5% no T₃. Tal comportamento é concordante com o observado em feijão Caupi (*Vigna unguiculata*, L.

Wapp) por Takele & McDavid (1994). Esse menor vigor vegetativo nos tratamentos hipóxicos pode ser interpretado como resultado tanto de deficiente taxa metabólica como de gasto de energia adicional para formação de raízes adventícias. O comportamento da massa das vagens pode também ter a mesma interpretação.

A redução na área foliar e no número de folhas pode estar relacionada com o aumento da abscisão foliar, apontada como uma resposta comum ao encharcamento por Wadman & Van Anel (1985), que observaram paralisação total no crescimento foliar logo após 24 h de encharcamento. Singh et al. (1991) atribuíram o decréscimo dessas duas características à senescência das folhas largas de baixo. É importante observar que, se a proporção de decréscimo da área foliar do T₄ para o T₁ foi relativamente próxima da apresentada pelo número de folhas (39 e 47%, respectivamente), isso já não ocorreu do T₃ para o T₁ - decréscimo de 33,2% na área foliar e apenas 7,5% no número de folhas. Este fato evidencia o alto efeito do manejo na área foliar e, talvez, a não-aplicabilidade do número de folhas na avaliação do efeito da hipoxia hídrica, pelo menos nesse nível de restrição imposta.

Adaptações morfológicas de trocas gasosas

A formação de raízes adventícias foi expressiva nos tratamentos hipóxicos (Figura 4a). Aos 24 dias da elevação do lençol a 15 cm da superfície, o T₃ apresentava 25,9 emissões a mais que no T₁ (Figura 4b e 4c), atribuído ao estímulo do manejo empregado. No T₄, o acréscimo foi ainda maior - 241% a mais que no T₁, interpretando-se que, neste manejo, a gradativa elevação do lençol permitiu às plantas um tempo de readaptação aparentemente efetivo e adequado, levando-as a produzir, ainda, 59% a mais que o T₃.

Quadro 3. Características biométricas de crescimento e de colheita do feijoeiro

Tratamento	Crescimento ⁽¹⁾					Colheita						
	AP	NF	MPA	MV	AF	Colheita	Pop.	NV.PI ⁻¹	NG.V ⁻¹	SCV	MMS	Rend.
	cm		g		cm ²	DAE	pl m ⁻¹			cm	g	kg ha ⁻¹
T ₁	55,3 a	26,6 a	28,7 a	7,3 a	433,4 a	102	17,6	5,2 a	4,0 ab	27,4 a	381,3 a	3.808,1 a
T ₂						86	17,2	3,6 ab	3,0 b	24,8 a	261,7 b	1.323,2 b
T ₃	38,6 b	24,6 a	19,3 b	4,6 ab	289,8 b	110	18,0	2,3 b	3,5 ab	19,2 ab	363,7 a	1.671,6 b
T ₄	41,9 b	12,7 b	12,1 c	3,2 b	168,4 c	110	17,6	2,6 b	4,1 a	15,4 b	294,5 b	1.412,6 b
T.F.	26,3*	22,3*	17,6*	4,7*	59,3*			10,7*	3,8*	4,9*	17,7*	74,7*
C.V. (%)	12,0	23,6	32,0	55,3	18,3			26,1	15,3	42,4	9,2	14,8

T. F. (*) Teste F - Grau de significância a 5%; Teste Duncan - Médias com a mesma letra não diferem entre si.

⁽¹⁾ T₂=T₁; AP - altura da planta; NF - número de folhas; MPA - massa da parte aérea; MV - massa das vagens; AF - área foliar; Colheita - data de colheita; Pop - população de plantas; NV.PL⁻¹ - num. de vagem. PI⁻¹. N.G.V⁻¹ - num. de grão. vagem⁻¹; SCV - soma do comprimento das vagens; MMS - massa mil sementes; Rend - rendimento de grãos.

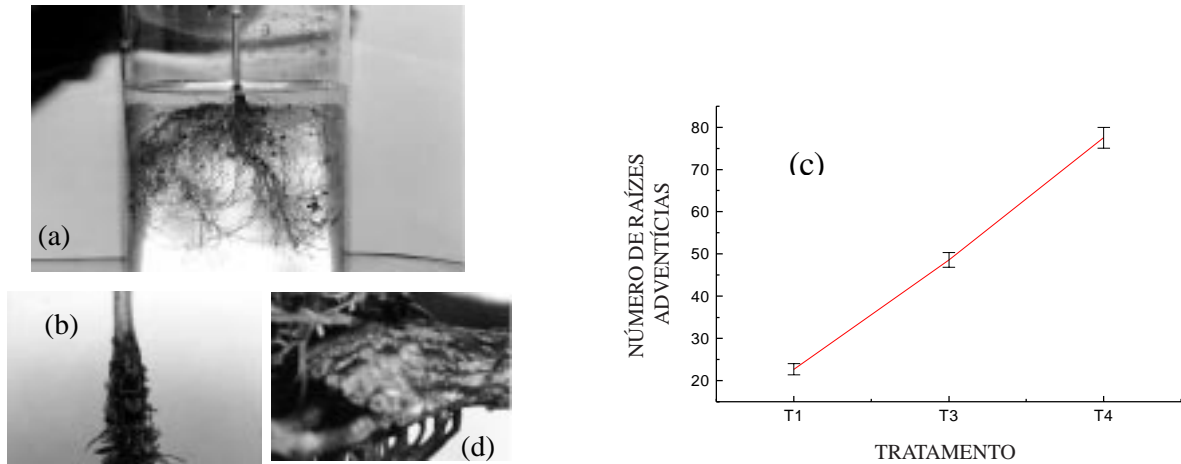


Figura 4. (a e b) Emissão de raízes adventícias; (c) número de raízes, por tratamento; (d) tecido de penetração de O₂ na base do caule do feijoeiro.

Fixação biológica do nitrogênio

Imediatamente antes do TAH, a umidade do solo (Quadro 4) no T₄ a 5 cm de profundidade, de acordo com a curva de retenção de água no solo, apresentava uma completa saturação, praticamente anoxia, com o lençol situado a 7 cm de profundidade. No T₃, com o lençol então a 15 cm, embora num grau de saturação ligeiramente menor com 1,3% de poros livres de água, também sofria alta restrição de oxigênio. Esta condição, surpreendentemente, não impediu a nodulação na planta (Figuras 4a e 5d).

Em busca da adaptabilidade, os organismos noduladores aproveitaram-se das raízes adventícias

superficiais situadas na interface solo/atmosfera. Nessas, uma rizosfera teoricamente menos hipóxica, somando-se a um possível suprimento interno de O₂ via lenticelas e aerênquimas, os organismos encontraram condições um pouco menos restritivas e se desenvolveram. Esse comportamento das raízes foi observado por Justin & Armstrong (1987), afirmando haver um apreciável número de plantas que não formam aerênquima, mas desenvolvem raízes superficiais na delgada zona aeróbica em contato com a atmosfera.

Também observando a presença de bactérias no centro dos nódulos de feijão caupi (*Vigna unguiculata*, L. Walp) inundado por 32 dias, Minchin &

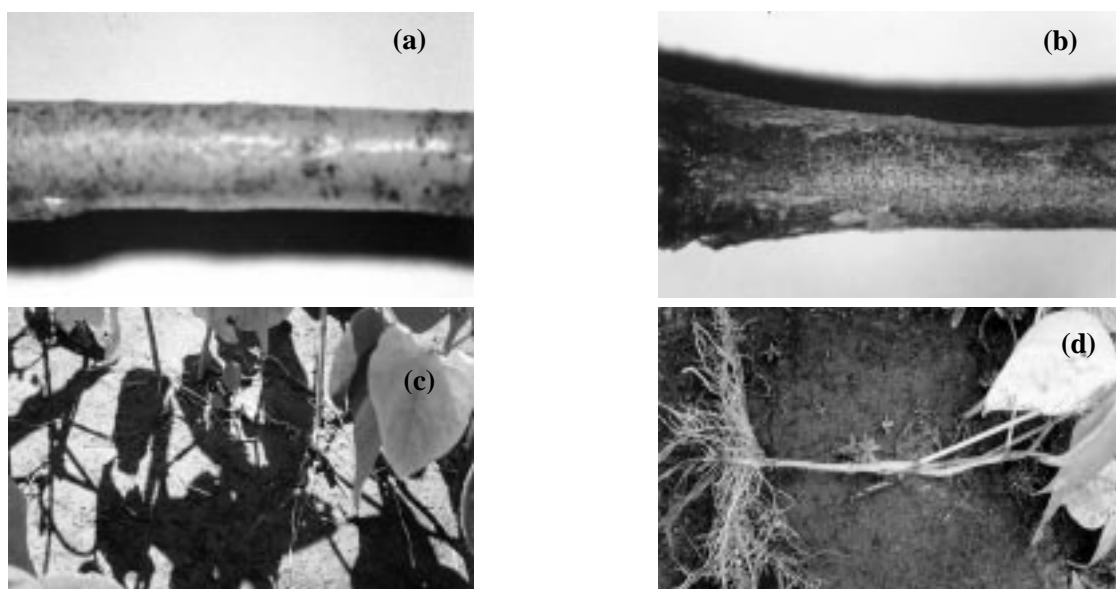


Figura 5. Formação de lenticelas na base do caule no T₁ - Testemunha (a) e no T₄ - Elevação gradativa do lençol (b); desenvolvimento de raízes adventícias junto à superfície do solo (c e d).

Summerfield (1976) atribuíram a viabilidade dos microrganismos à continuidade de suplemento de oxigênio para os nódulos.

Alterações de características físicas do solo

Durante a elevação do lençol, após um decréscimo inicial, a TDO (Figura 6) estabilizou-se num patamar em torno de $12 \cdot 10^{-8} \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, permanecendo assim até à oitava hora de amostragem para então, decrescer novamente, atingindo $5 \cdot 10^{-8} \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ após 145 h de encharcamento. O grau de restrição a que estavam expostas as plantas no presente trabalho pode ser avaliado, considerando-se que Stolzy & Letey (1964) observaram que uma TDO de $20 \cdot 10^{-8} \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ inibiu o crescimento radicular de numerosas espécies herbáceas.

O decréscimo do potencial redox foi mais brusco que da TDO, atingindo um ponto mínimo logo após 4 h e 30 min de hipoxia, elevando-se, posteriormente, até um ponto intermediário (-220 mV) após 145 h (Figura 6).

A percentagem de oxigênio dissolvido no extrato de saturação do solo apontava valores acima de 100% no último dia do TAH (Quadro 4). Esse valor pode ser atribuído à grande quantidade de algas presentes na superfície do solo antes mesmo da elevação do lençol à superfície e que, a partir do TAH, teoricamente, encontrariam condição ainda mais favorável, o que também estaria compatível com o comportamento da TDO e do potencial redox. Não foi identificado o tipo de alga, tampouco pode-se assumir uma contribuição efetiva sua em O_2 para o meio.

A concentração de O_2 nos dois tratamentos não atingiu mais que 5% da concentração do ar atmosférico. Considerando a concentração de O_2 do solo aerado próxima do ar atmosférico (Lindstrom, citado por Drew, 1992) e o rendimento de grãos, pode-se quantificar o reflexo da hipoxia na produtividade do feijoeiro para as condições tropicais e naturais (no campo). Ressalta-se que o decréscimo relativo do rendimento é desproporcional com a acentuada

Quadro 4. Nível de saturação do solo e análise do extrato de saturação do solo, do recipiente de distribuição e da caixa de abastecimento no 7º dia (168h) de TAH

Tratamento	Solo							Água				
	U. Vol. ⁽¹⁾	Oxig.	T	C.O ₂ .S ⁽²⁾	C.O ₂ Ext. ⁽³⁾	C.O ₂ A.A. ⁽⁴⁾	pH	Oxig.	T	C.O ₂ .S	C.O ₂ R	pH
	cm ³ cm ⁻³	%	°C	mg dm ⁻³				%	°C	mg dm ⁻³		
T3	0,35 (0,004)	123,2	21,0	8,85	10,8 (0,4)	272	5,9 (0,6)	132	20	9,0	11,90	7,7
T4	0,39 (0,006)	150,4	22,6	8,54	12,8 (0,4)	267	6,04 (0,5)	143	28	7,7	11,03	8,0
RCN ⁽⁵⁾								84	23	8,5	7,14	6,7

⁽¹⁾ U. Vol. Conteúdo de umidade do solo antes do TAH. ⁽²⁾ C.O₂. S. Teor de Oxigênio dissolvido na água saturada com ar em função da temperatura. ⁽³⁾ C.O₂ Ext. Teor do oxigênio dissolvido no extrato de saturação do solo (sem correção de pressão atmosférica e sais dissolvidos na água). ⁽⁴⁾ C.O₂ A.A. Concentração de oxigênio em ar atmosférico saturado com água na temperatura média da avaliação (Glinski & Stepniewski, 1985). (0,4) Erro-padrão. ⁽⁵⁾ RCN: Recipiente de controle de nível.

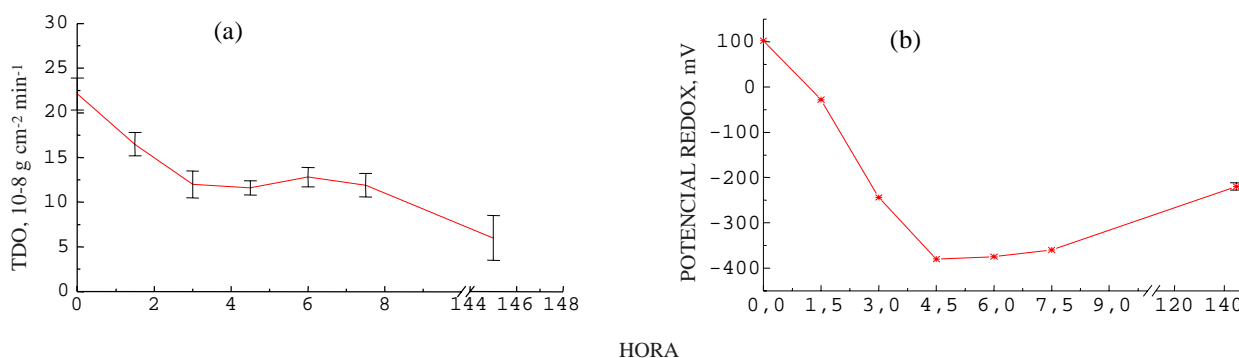


Figura 6. Variação da taxa de difusão de oxigênio (TDO) (a) e variação do potencial redox durante a elevação do lençol (b).

diminuição da concentração de O_2 . Isso é coerente, no entanto, com o observado por Webb & Armstrong (1983) em raízes de arroz intactas desenvolvidas em meio anaeróbico, mas com transferência interna de O_2 . Esses autores observaram que o crescimento somente cessou quando a concentração de O_2 aproximou-se de zero. Obviamente, em virtude da diferença de potencial adaptativo natural entre as duas espécies, tal consideração deve ser interpretada com cuidado.

Analisando o valor das temperaturas do extrato de saturação, a exemplo da atmosférica discutida anteriormente, pode-se considerá-lo altamente desfavorável pela menor capacidade de saturação de O_2 da água, além de elevar a taxa de consumo de O_2 . Cannell et al. (1980), trabalhando com trigo sob temperaturas de solo muito mais amenas, relataram que, em janeiro, com $4^\circ C$ a 20 cm de profundidade, o O_2 do solo esgotou-se em 13 dias, enquanto, em maio, com $11-12^\circ C$, esgotou-se em apenas cinco dias.

Trocas gasosas

Os valores da temperatura foliar 24 e 96 h após o TAH apresentavam-se sem grandes alterações entre os tratamentos; já com 120 h de TAH, o T_4 acusou um valor ligeiramente menor (Figura 7a).

A resistividade estomática (Figura 7c) mostrou nítida elevação de 24 h para 120 h, incluindo-se o T_1 , com a elevação desse último, devendo-se, evidentemente, às condições climáticas diferenciadas, principalmente à umidade relativa (Figura 7b) e estágio fenológico da planta. Isolando esse fator e analisando as amplitudes relativas em relação ao T_1 , com 24 h de TAH, o pico apresentado pelo T_2 , embora discreto, pode ser considerado uma manifestação de estresse com a planta já parecendo tender a conservar sua água metabólica em resposta ao comprometimento da absorção via radicular, comportamento esse concordante com o indicado por Bradford & Yang (1981), porém oposto ao encontrado por White & Molano (1994), também em feijoeiro, quando o "cultivo em solo encharcado" diminuiu a resistividade. As formas de aplicação da água e os sistemas de plantio empregados naquele e neste trabalho foram, sem dúvida, responsáveis por essa discordância.

Após 120 h de TAH, o T_2 e, em maior intensidade, o T_3 e o T_4 apresentaram amplitudes bem maiores que da primeira avaliação, devendo-se o maior tempo de submissão ao estresse. Infere-se que o menor valor no T_4 em relação ao T_3 seria uma vantagem advinda do maior esforço na emissão de raízes adventícias. Após 96 h do final do TAH, com as plantas do T_2 praticamente mortas, observou-se notável diminuição da resistividade estomática no T_3 referenciando-se ao T_1 , recuperação essa atribuída aos fatores de adaptação. Interpreta-se também que o T_3 , com sistema radicular menos modificado pela hipoxia - menor porosidade e mais profundo - respondeu melhor

à nova condição de menor grau de umidade sendo relativamente mais efetivo que o delicado e mais poroso sistema radicular do T_4 que pode ter, inclusive, se secado.

O comportamento inversamente proporcional da transpiração com a resistividade estomática foi verificado na primeira e na terceira avaliação, mas não perfeitamente aos 120h de TAH (Figura 7d). Os resultados temporais, no entanto, são concordantes com os obtidos por Wadman & Van Andel (1985) em feijoeiro, cuja transpiração reduziu-se em 35% no primeiro dia de encharcamento, alcançando um mínimo no sexto dia, iniciando, então, uma lenta recuperação.

Respostas fisiomorfológicas e biométricas de produção

Com 120 h de TAH, os sintomas de hipoxia já se apresentavam muito mais nítidos no T_2 e em menor grau no T_3 e T_4 , inferindo-se estarem fazendo uso dos processos adaptativos.

Um dia após a suspensão do TAH, o T_2 já se apresentava totalmente comprometido, a exemplo do observado por Garrity & Pernito (1996) em feijão Mungo (*Vigna radiata*, L.), submetido a cinco dias de encharcamento. Por outro lado, o mesmo não ocorreu com o T_3 e T_4 , que mantiveram as folhas até o início da senescência, aos 14 dias do TAH.

A data de colheita mais longa nos T_3 e T_4 (Quadro 3) pode ser atribuída a um retardamento a partir do período reprodutivo causado pela hipoxia, uma vez que todos os tratamentos atingiram o florescimento juntos. Isso é concordante com o observado por Umaharan et al. (1997), em feijão caupi sob encharcamento periódico durante todo o ciclo da planta.

A significativa diferença entre o T_1 e T_2 no rendimento de grãos mostrou o quanto pode ser prejudicial uma hipoxia repentina, observada na prática em inundações ocasionais das várzeas. Já não houve diferença estatística entre os T_2 , T_3 e T_4 , embora o pior desempenho do T_2 seja notável. Tal insignificância não deve ser entendida, no entanto, como ausência de vantagens da indução dos processos adaptativos, porque, ao contrário do T_3 e T_4 , as plantas do T_2 parecem ter paralisado subitamente seu desenvolvimento e morrido, fato esse evidenciado pela massa de mil sementes significativamente menor que do T_1 e T_3 e pelo número de grãos por vagem, significativamente menor que do T_4 . Essas características são fortemente influenciados no estágio em que ocorreu a aplicação do TAH.

Já a insignificância do número de vagens por planta entre os tratamentos induzidos (T_3 e T_4) e o T_2 , bem como da soma do comprimento das vagens entre o T_2 e o T_1 , pode ser atribuída à aplicação do TAH após a determinação dessa característica.

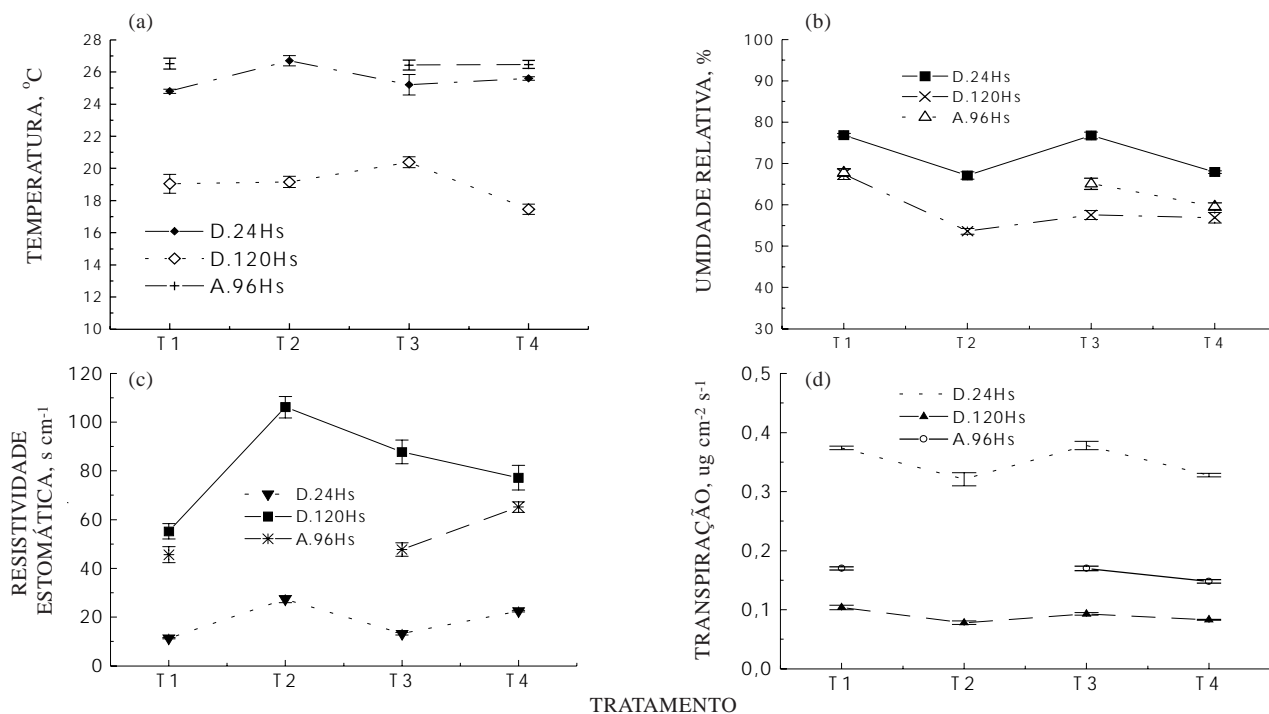


Figura 7. Alterações nos processos de transferência hídrica da planta com a atmosfera (a) Temperatura da folha; b) Umidade relativa; (c) Resistência estomática e (d) Taxa transpiratória, nos diferentes tratamentos, as 24 h (D.24Hs), 120 h (D.120Hs) do início do TAH e 96 h (A.96Hs) após o término do TAH.

A diferença significativa na massa de mil sementes entre o T₃ e T₄ pode ter sido causada pela maior adaptação do T₃, quando da reoxigenação, resultando em uma mais pronta normalização da taxa transpiratória, como já discutido anteriormente. Por outro lado, observando que o T₄ sofreu menor efeito no número de grãos por vagem e no número de vagens por planta, apreende-se que as vantagens adaptativas temporais da elevação gradativa do lençol por ocasião da formação de vagens e grãos por vagem perderam sua importância no desempenho final, teoricamente pelo menor acúmulo de fotoassimilados na planta e pelo maior dreno exercido pelas raízes adventícias. Acredita-se que os cultivares de ciclo mais longo seriam mais favorecidos, como apontado por Nathanson et al. (1984), em soja sob “cultivo em solo saturado”.

CONCLUSÕES

1. As características biométricas de crescimento, embora acusando prejuízo da hipoxia, evidenciaram a utilização pela planta de mecanismos adaptativos morfológicos (raízes adventícias e lenticelas), biológicos (fixação de N) e fisiomorfológicos (resistência estomática e transpiração).

2. As características biométricas de colheita número de grão por vagem, massa de mil sementes

e rendimento de grãos, tanto do manejo do lençol estabilizado a 15 cm como do manejo com elevação gradativa, evidenciaram a efetividade adaptativa, permitindo à planta manter-se viva, completar o ciclo, apresentar menor comprometimento da qualidade de grãos e maior produtividade.

3. A alternância de vantagens relativas nas características biométricas de colheita entre os manejos de lençol estabilizado a 15 cm e com elevação gradativa não resultou em diferença estatística no rendimento de grãos, razão por que se recomenda o uso de cultivares de ciclo mais longo nesse tipo de estudo.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP, pelo apoio financeiro no trabalho de pesquisa, e ao CNPq, pela bolsa ao primeiro autor.

LITERATURA CITADA

- BLACKWELL, P.S. Measurements of aeration in waterlogged soils: some improvements of techniques and their application to experiments using lysimeters. *J. Soil Sci.*, 34:271-285, 1983.
- BRADFORD, K.J. & YANG, S.F. Physiological responses of plants to waterlogging. *Hort. Sci.*, 16:25-30, 1981.

- CALHEIROS, R.O. Manejo da água de drenagem objetivando adaptação fisiomorfológica de plantas mesófitas ao encharcamento. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, 2000. 127p. (Tese de Doutorado)
- CANNELL, R.Q.; BELFORD, R.K.; GALES, K.; DENNIS, C.W. & PREW, R.D. Effects of waterlogging at different stages of development on the growth and yield of winter wheat. *J. Sci. Food Agric.*, 31:117-132, 1980.
- DREW, M.C. Soil aeration and plant root metabolism. *Soil Sci.*, 154:259-268, 1992.
- GARRITY, D.P. & PERNITO, R. Mungbean response to surface drainage when grown as a pre-rice crop on waterlog-prone rielands. *Agric. Water Manag.*, 29:299-314, 1996.
- GLINSKI J. & STEPNIEWSKI W. Soil aeration and its role for plants. Florida, CRC Press, 1996. 228p.
- HERRMANN, P.S.P.; ANDRADE, M.G.; COLMAGO, L.A. & SILVEIRA, P.M. Equipamento para medida da taxa de difusão de oxigênio e potencial de oxidação no solo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 32:725-730, 1997.
- JUSTIN, S.H.F. & ARMSTRONG, W. The anatomical characteristics of roots and plant response to soil flooding. *New Phytol.*, 106:465-95, 1987.
- KAWASE, M. Anatomical and morphological adaptation of plants to waterlogging. *Hort. Sci.*, 16:8-12, 1981.
- KOZLOWSKI, T.T. Flooding and plant growth. New York, Academic Press, 1984. 133p.
- MINCHIN, F.R. & SUMMERFIEL R.J. Symbiotic nitrogen fixation and vegetative growth of cowpea (*Vigna unguiculata*, (L.) Walp.) in waterlogged conditions. *Plant Soil*, 45:113-127, 1976.
- NATHANSON, K.; LAWN, R.J.; DE JABURM, P.L.M. & BYTH, D.E. Growth, nodulation and nitrogen accumulation by soybean in saturated soil culture. *Field Crops Res.*, 8:73-92, 1984
- NAWATA, E.; YOSHINAGA, S. & SHIGENAGA, S. Effects of waterlogging growth and yield of yard long bean (*Vigna saneness* var. *sesquipedalis*). *Trop. Agric. Res. Series*, 23:174-181, 1990.
- SAGLIO, P.H.; DREW, M.C. & PRODET, A. Metabolic acclimation to anoxia induced by low (2-4 kPa partial pressure) oxygen pretreatment (hypoxia) in root tips of *Zea mays*. *Plant Physiol.*, 86:61-66, 1988.
- SENA GOMES, A.R. & KOZLOWSKI, T.T. Growth responses and adaptations of *Fraxinus pennylvanica* seedlings to flooding. *Plant Physiol.*, 66:267-71, 1980.
- SINGH, B.P.; TUCKER, K.A.; SUTTON, J.D. & BHARDWAJ, H.L. Flooding reduces gas exchange and growth in snap bean. *Hort. Sci.*, 26:372-373, 1991.
- SOJKA, R.E. & STOLZY, L.H. Soil oxygen effects of stomatal responses. *Soil. Sci.*, 130:350-358, 1980.
- SPRENT, J.I. The effects of water stress on nitrogen-fixing root nodules IV. Effects on whole plants of *Vicia faba* and *Glycogen max*. *New Phytol.*, 71:603-611, 1972.
- STOLZY, L. H. & LETEY, J. Measurement of oxygen rates with the platinum microelectrode. III Correlation of plant responses to soil oxygen diffusion rates. *Hilgardia*, 35:567-76, 1964.
- TAKELE, A. & MCDAVID, C.R. Efeitos de pequenos períodos de encharcamento em cultivares de Cowpea (*Vigna unguiculata* Walp L.). *Trop. Agric.*, 71:74, 275-280, 1994.
- UMAHARAN, P.; ARIYANAYAGAM, R.P. & HAQUE, S.Q. Effect of short-term waterlogging applied at various growth phases on growth, development and yield in *Vigna unguiculata*. *J. Agricult. Sci.*, 128:189-98, 1997.
- WADMAN-Van SCHRAVENDIJK, H. & Van ANDEL, O.M. Interdependence of growth, water relations and abscisic acid level in *Phaseolus vulgaris* during waterlogging. *Physiol Plant*. 63:215-220, 1985.
- WANG, G.; PEOPLES, M.B.; HERRIDGE, D.F. & RERKASEM, B., Nitrogen fixation, growth and yield of soybean grown under saturated soil culture and conventional irrigation. *Field Crops Res.*, 32:257-268, 1993.
- WATERS, I.; MORRELL, S.; GREENWAY, H. & COLMER, T.D. Effects of anoxia on wheat seedlings. II. Influence of O₂ supply prior to anoxia on tolerance to anoxia, alcoholic fermentation, and sugar levels. *J. Exp. Bot.*, 42:1437-1447, 1991.
- WEBB, T. & ARMSTRONG, W. The effect of anoxia and carbohydrates on the growth and viability of rice, pea and pumpkin roots. *J. Exp. Bot.*, 34:579-603, 1983.
- WHITE, W.J. & MOLANO, C.H. Production of common bean under saturated soil culture. *Field Crops Res.*, 36:53-58, 1994.

