

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Arroz e Feijão
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

A Cultura do Arroz no Brasil

*2ª Edição
Revisada e ampliada*

Alberto Baêta dos Santos
Luís Fernando Stone
Noris Regina de Almeida Vieira
Editores Técnicos

*Embrapa Arroz e Feijão
Santo Antônio de Goiás, GO
2006*

Exemplares desta publicação devem ser solicitados à:

Embrapa Arroz e Feijão

Rod. GO 462, Km 12
Caixa Postal 179
CEP 75375-000 Santo Antônio de Goiás , GO
Fone: (62) 3533-2110
Fax: (62) 3533-2100
sac@cnpaf.embrapa.br
www@cnpaf.embrapa.br

Embrapa Informação Tecnológica

Parque Estação Biológica (PqEB), Av. W3 Norte (final)
Fone: (61) 3340-9999
Fax: (61) 3340-2753
CEP 70770-901 - Brasília, DF
vendas@sct.embrapa.br
www.sct.embrapa.br

Supervisor Editorial: *Marina A. Souza de Oliveira*

Revisor de Texto: *Noris Regina de Almeida Vieira*

Normalização Bibliográfica: *Ana Lúcia Delalibera de Faria*

Tratamento das Ilustrações: *Sebastião José de Araújo e Fabiano Severino*

Editoração Eletrônica: *Fabiano Severino*

1ª edição

1ª impressão (1999): 1.000 exemplares

2ª edição

1ª impressão (2006): 2.000 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Arroz e Feijão

A cultura do arroz no Brasil / editores, Alberto Baêta dos Santos, Luís Fernando Stone, Noris Regina de Almeida Vieira. - 2. ed. rev. ampl. - Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 1000 p. : il. ; 23 cm.

ISBN 85-7437-030-4

1. Arroz - Produção. 2. Arroz - Tecnologia. 3. Arroz - Pesquisa. I. Santos, Alberto Baêta dos, *ed.* II. Stone, Luís Fernando, *ed.* III. Vieira, Noris Regina de Almeida, *ed.* IV. Embrapa Arroz e Feijão.

CDD 633.18 (21. ed.)

© Embrapa 2006

Características Morfofisiológicas da Planta Relacionadas à Produtividade

Beatriz da Silveira Pinheiro

RESUMO - O grande contraste entre os dois ecossistemas, várzeas e terras altas, em que se cultiva arroz no Brasil, tem ocasionado variações nas características da planta, conferindo adaptação às cultivares. Apesar de os processos fisiológicos não diferirem de um ambiente para o outro, podem ser otimizados no ecossistema várzeas, sob o sistema de cultivo irrigado, levando a grandes diferenças de produtividade. A conceituação de ideotipo, com base no estudo das características morfológicas e fisiológicas determinantes da produtividade, tem sido aplicada a várias culturas e a planta de arroz irrigado beneficiou-se particularmente desse conceito. A chamada "Revolução Verde", resultante da drástica alteração do tipo de planta do arroz irrigado do grupo Indica, praticamente dobrou o potencial produtivo da cultura na Ásia tropical e expandiu-se a outros continentes, inclusive sob clima sub-tropical e temperado. As tentativas de estabelecer um novo ideotipo para romper o patamar de produtividade estabelecido pela IR 8, ainda não teve o sucesso desejado e possivelmente só venha ser atingido com modificações mais drásticas sobre os processos fisiológicos. Para o sistema de cultivo sequeiro, dadas as peculiaridades climáticas prevaletentes no ecossistema terras altas, o risco advindo da deficiência hídrica fez com que, no passado, maior ênfase fosse colocada sobre a resistência à seca e estabilidade de produção, do que sobre o potencial produtivo, propriamente dito. Dessa forma, as cultivares de tipo de planta tradicional, do grupo Japonica tropical, foram amplamente utilizadas para abertura dos Cerrados no Brasil. Com a migração da fronteira agrícola para regiões favorecidas quanto à distribuição pluvial, novas cultivares de tipo de planta melhorado, resultantes de cruzamento entre os grupos Japonica tropical e Indica, foram adotadas com sucesso e tiveram grande impacto sobre a produtividade média do cultivo a partir de meados da década de 90. Neste capítulo são discutidas as implicações do tipo de planta na produtividade da cultura, enfocando as principais características morfológicas e fisiológicas, bem como alguns parâmetros climáticos.

IIINTRODUÇÃO

A produção de arroz no Brasil provém tanto de várzeas sistematizadas e condições ótimas, quanto à disponibilidade de água, como de terras altas, em solos oxisolos bem drenados, onde a cultura depende exclusivamente das chuvas para o desenvolvimento dos



processos fisiológicos determinantes da produção. O grande contraste entre esses dois ecossistemas faz com que ocorram variações nas características que vão conferir adaptação às cultivares. Apesar de que os processos fisiológicos não vão diferir de um ambiente para o outro, podem ser otimizados no ecossistema várzeas, sob o sistema de cultivo irrigado por inundação, levando a grandes diferenças de produtividade. Assim, um genótipo adaptado a esse sistema de cultivo pode atingir até 12 t de grãos ha⁻¹, enquanto um genótipo sob o sistema de sequeiro, mesmo em condições ótimas, não ultrapassa de 6 - 7 t ha⁻¹.

O estudo das características morfológicas e fisiológicas determinantes da produtividade tem levado à conceituação do ideotipo para várias culturas, e o arroz irrigado beneficiou-se particularmente desse conceito. A chamada "Revolução Verde", resultante da drástica alteração do tipo de planta do arroz irrigado, praticamente dobrou o potencial produtivo da cultura na Ásia tropical e expandiu-se a outros continentes, inclusive sob clima sub-tropical e temperado. Atualmente, a pesquisa busca superar o patamar de produtividade do arroz irrigado, através de um novo tipo de planta, mas ainda não obteve o sucesso desejado. No ecossistema terras altas no Brasil, o risco advindo da deficiência hídrica fez com que maior ênfase fosse colocada, no passado, sobre a resistência à seca e à estabilidade de produção, do que sobre o potencial produtivo propriamente dito. Contudo, a migração do cultivo para áreas de menor risco climático, associada à preferência do consumidor por grão longo fino, levou a uma mudança do ideotipo e das prioridades do programa de melhoramento. Atualmente, novas cultivares de arroz de terras altas, de alto potencial produtivo, estão disponíveis tanto para as regiões brasileiras consideradas favorecidas quanto à distribuição pluvial, quanto para sistemas sob irrigação suplementar. As implicações das características morfológicas e fisiológicas na determinação da produtividade, sob diferentes sistemas de cultivo, serão examinadas no presente capítulo.

FASES DE DESENVOLVIMENTO DA PLANTA DE ARROZ

O ciclo de vida da planta de arroz pode ser dividido em três fases distintas (Vergara et al., 1969; Vergara, 1970): fase vegetativa; fase reprodutiva; e fase de maturação.

210

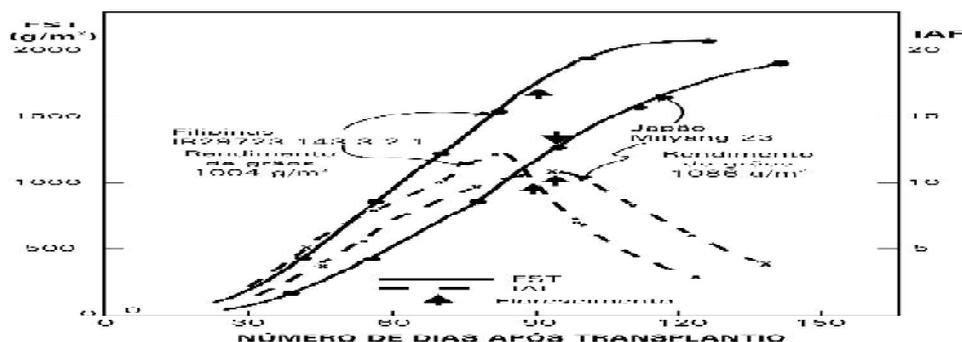
A fase vegetativa corresponde ao período compreendido entre a germinação da semente e a iniciação da panícula. É modificada pela temperatura e pelo fotoperíodo, o que permite sua divisão em fase vegetativa básica, ou basal, e fase sensível ao fotoperíodo. Diferenças



varietais na duração do crescimento devem-se basicamente a diferenças na fase vegetativa (Tanaka et al., 1964; Vergara et al., 1969; Vergara, 1970). A emissão de perfilhos e a diferenciação das folhas ocorre nessa fase. O número máximo de perfilhos coincide com o início da diferenciação de panículas em cultivares de ciclo curto, enquanto em cultivares de ciclo longo se prolonga pela fase reprodutiva.

A fase reprodutiva, que vai da iniciação da panícula ao florescimento, tem duração relativamente constante de cultivar para cultivar, requerendo normalmente 35 dias em condições tropicais (Vergara, 1970). O processo de desenvolvimento da panícula, em nível citológico, foi dividido por Matsushima (1975), em 25 estádios. Essa divisão foi simplificada pelo mesmo autor, para sua aplicação prática. Dessa forma, são reconhecidos dois períodos, o de formação da panícula jovem, que vai da determinação da primeira bráctea ao estágio final de diferenciação de espiguetas, e o de gestação da panícula, que finaliza com a maturação do grão de pólen. Este último período, etapa crucial do desenvolvimento reprodutivo, é dividido em quatro subperíodos: de diferenciação da célula-mãe do pólen; de divisão da célula-mãe do pólen (meiose); de formação da exina; e de maturação do pólen (Tabela 7.1).

Tabela 7.1. Duração do processo de diferenciação da estrutura reprodutiva em plantas de arroz.



Fonte: Adaptada de Matsushima (1975).

A panícula jovem torna-se visível a olho nu como uma estrutura cônica, plumosa, medindo de 0,5 a 1,5 mm, cerca de dez dias após sua diferenciação (Fernandez et al., 1985). Contudo, como essa estrutura em desenvolvimento encontra-se envolvida pela bainha das folhas, sua observação só é possível mediante dissecação do colmo (Vergara, 1970). O alongamento dos entrenós normalmente tem início com a diferenciação da panícula e ocorre apenas nos quatro últimos



entrenós. O alongamento do último entrenó, o qual subtende a inflorescência, determina a emergência da panícula (Fernandez et al., 1985). A emergência da panícula dá início ao período de florescimento, em que ocorrem os processos de abertura de flores, polinização e fertilização.

De acordo com Chandraratna (1964) a panícula, em condições normais, completa sua emissão em três dias. O florescimento tem seu pico do 2º ao 4º dia após a emergência. No intervalo que precede a abertura da espiguetas, os filetes alongam-se rapidamente, pressionando as anteras contra a porção superior da espiguetas. A deiscência da antera ocorre em sincronia com a abertura da espiguetas, mas pode também precedê-la ou segui-la. O pólen pode perder sua viabilidade cinco minutos após a deiscência, bem como permanecer viável por até 50 h. Ainda de acordo com Chandraratna (1964), o intervalo entre a iniciação da panícula e a sua emissão representa a fase mais vulnerável do ciclo da planta de arroz, em que esta exibe a mais alta sensibilidade aos fatores adversos de ambiente.

A fase de maturação, etapa final do ciclo de vida da planta, vai do florescimento à maturação dos grãos; tem uma duração de 30 a 35 dias e subdivide-se em estágio de grão leitoso, ceroso e maduro (Vergara, 1970).

O processo de crescimento da planta de arroz exibe variações quanto ao padrão de absorção de nutrientes e metabolismo, durante as várias fases de desenvolvimento (Murayama, 1995). Na fase vegetativa, os nutrientes, incluindo N, P, K e S são absorvidos ativamente, enquanto fotoassimilados são produzidos e proteínas são sintetizadas de forma a sustentar os processos de perfilhamento e de expansão foliar (Tabela 7.2).

Durante a fase reprodutiva, caracterizada pelo desenvolvimento do primórdio da panícula e alongamento do caule, os fotoassimilados são transformados em componentes da parede celular, como lignina e celulose. Os fotoassimilados em excesso são armazenados nos colmos e bainhas na forma de amido. Na fase de maturação, a morfogênese da planta já se completou e os fotoassimilados acumulam-se nas panículas na forma de amido. À medida que esse processo avança, os carboidratos, proteínas e minerais acumulados nas folhas movem-se para as panículas e a planta torna-se senescente (Tabela 7.2).



Tabela 7.2. Processos, principais compostos orgânicos e nutrientes envolvidos no crescimento, durante as três fases do ciclo de vida da planta de arroz.

	Fase vegetativa	Fase Reprodutiva	Fase de maturação
Processos envolvidos	Emergência de perfilhos e folhas	Desenvolvimento do primórdio da panícula, alongamento dos entrenós	Enchimento de grãos, senescência da raiz e parte aérea
Compostos orgânicos	Proteínas	Celulose e lignina; amido	Amido
Nutrientes	N, P, K e S	Mg, Ca e S	Translocação de N,P, S e Mg para panículas

Fonte: Adaptada de Murayama (1995).

Fases do desenvolvimento baseadas em critério morfológico

As fases de desenvolvimento da planta de arroz, descritas anteriormente, são amplamente utilizadas na literatura, mas devido a sua longa duração, não permitem estabelecer um referencial confiável para comparação de dados entre ensaios. Counce et al. (2000), propuseram um método preciso de determinar o estágio da planta de arroz com base em critério morfológico bem definido.

Na sua proposta, a fase de plântula é separada da fase vegetativa, e a fase de enchimento de grãos é considerada como parte da fase reprodutiva. A fase de plântula é composta de quatro estádios de crescimento, enquanto a fase vegetativa é composta de um número variável de estádios, i.e., 1 a n, em que n corresponde ao número total de folhas do colmo principal. Já a fase reprodutiva se subdivide em dez estádios. Na Tabela 7.3 encontra-se a relação desses vários estádios, com uma breve descrição do critério para sua diferenciação.

É importante observar que os eventos morfológicos ocorrem sincronizados e sequencialmente, de forma que vários estádios se justapõem, quando se consideram os vários perfilhos/panículas da mesma planta ou os grãos de uma mesma panícula. Dessa forma, uma planta desenvolve simultaneamente, vários estádios ao mesmo tempo.



Tabela 7.3. Descrição de eventos e marcadores morfológicos relativos às fases e estádios de desenvolvimento da planta de arroz, de acordo com a classificação de Counce et al. (2000).

Fase de desenvolvimento	Estádio	Marcador morfológico/Descrição do evento no colmo principal	Eventos concomitantes no mesmo colmo
Plântula	S0	Semente seca	
	S1	Emergência do coleoptilo	
	S2	Emergência da radícula	
	S3	Emergência do perfilo do coleoptilo	
Vegetativo	V1	Formação do colar da primeira folha no colmo principal	
	V2	Formação do colar da segunda folha no colmo principal	Formação das raízes nodais V2 a R0
	V3	Formação do colar da terceira folha no colmo principal	
	V4	Formação do colar da quarta folha no colmo principal	Processo de perfilhamento V3 a Vn, podendo ir até R9
	Vn	Formação da n folha (folha-bandeira) no colmo principal	
	R0	Início do desenvolvimento da panícula	V9 a V10
	R1	Diferenciação da panícula	Formação das ramificações e diferenciação da lema e da pálea V11 a V12
	R2	Formação do colar da folha-bandeira	Microsporogênese e emborrachamento V13
	R3	Emissão da panícula na bainha, ponta acima do colar	Alongamento do pedúnculo R2
	R4	Antese: um ou mais floretes da panícula em antese	Polinização R3
Reprodutivo	R5	Expansão do grão em comprimento e largura: ao menos uma cariopse da panícula do colmo principal apresenta alongamento	Crescimento da cariopse R4
	R6	Expansão do grão em espessura: ao menos uma cariopse da panícula do colmo principal preencheu completamente a casca	Enchimento dos grãos, estágio de grão leitoso R5;
	R7	Secarimento do grão: ao menos um grão do colmo principal apresenta-se com pericarpo amarelo	Enchimento dos grãos, estágio ceroso e massa dura; R6
	R8	Maturação do grão: ao menos um grão do colmo principal apresenta-se com pericarpo marrom	Grãos secos, maturidade fisiológica R7;
	R9	Completa maturidade da panícula: todos os grãos apresentam-se com pericarpo marrom	Mudanças pós-colheita; R8

Fonte: Adaptada de Counce et al. (2000).

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

214

Classificação botânica e morfologia

A espécie *Oryza sativa* é uma Monocotiledônea da família Poaceae, de acordo com a classificação de Cronquist (1988). Como tal,



caracteriza-se por possuir caules ocos, flores reduzidas de cor verde e aquênios especializados, ou cariopses, como frutos.

Embora não se pretenda fazer uma revisão da morfologia da planta de arroz, descrita em detalhe por Chang & Bardenas (1965), e adaptada para o Português por Fageria (1984), com base nessa literatura, pode-se descrever, resumidamente, a planta de arroz, quanto às suas principais características morfológicas, da seguinte forma:

Raiz

A raiz seminal, ou radícula, surge da coleorriza logo após o seu aparecimento e é seguida por uma ou duas raízes seminais secundárias, todas elas desenvolvendo raízes laterais. Persistem apenas por um curto período de tempo após a germinação, sendo logo substituídas pelo sistema secundário de raízes adventícias. Estas são produzidas a partir de nós inferiores dos caules jovens. São fibrosas, possuindo muitas ramificações e pêlos radiculares.

Folha

A folha primária, surgida do coleoptilo, difere das demais por ser cilíndrica e não apresentar lâmina. A segunda folha, e todas as demais, são dispostas de forma alternada no colmo, surgindo a partir de gemas situadas nos nós. A porção da folha que envolve o colmo denomina-se bainha. A porção pendente da folha é a lâmina. Na junção dessas duas partes situa-se o colar, do qual emergem dois pequenos apêndices em forma de orelha, sendo por essa razão denominados de aurículas, e uma estrutura membranosa em forma de língua, denominada lígula. A partir do colmo principal originam-se de 8 a 14 folhas, dependendo do ciclo da cultivar. A última folha a surgir em cada colmo denomina-se folha-bandeira. Variedades diferem quanto ao seu comprimento, largura, ângulo de inserção, pubescência e cor. Essas características são de grande relevância na caracterização e descrição varietal.

Caule

O caule da planta de arroz é composto por um colmo principal e um número variável de colmos primários e secundários, ou perfilhos. Durante o período vegetativo, um perfilho é visualizado como uma estrutura composta de folhas e gemas axilares. O caule propriamente



dito encontra-se na base do perfilho, sendo visível mediante dissecação, como um conjunto de nós. Somente no período reprodutivo da cultura é que os nós se distanciam devido ao alongamento dos entrenós, permitindo a sua visualização.

As características dos entrenós, tais como comprimento, diâmetro e espessura, determinam a resistência ao acamamento. A cor dos nós e entrenós, o número de perfilhos e o seu ângulo são importantes características de descrição varietal.

Panícula

A inflorescência determinada da planta de arroz denomina-se panícula. Localiza-se sobre o último entrenó do caule, erroneamente considerado como um pedúnculo, e é subtendida pela folha-bandeira. É composta pela ráquis principal, que possui nós dos quais saem as ramificações primárias que, por sua vez, dão origem às ramificações secundárias de onde surgem as espiguetas. Estas são formadas por dois pares de brácteas ou glumas. O par inferior é rudimentar, sendo suas glumas denominadas de estéreis. As glumas do par superior denominam-se pálea e lema e contém no seu interior a flor propriamente dita, composta por um pistilo e seis estames. O pistilo contém um óvulo. A lema pode ter uma extensão filiforme denominada arista, que é um importante descritor varietal.

Grão

É formado pelo ovário fecundado, contendo uma única semente aderida às suas paredes (pericarpo), envolvida pela lema e a pálea. Estas, juntamente com as glumas estéreis e estruturas associadas, formam a casca. O grão sem casca denomina-se cariopse. Um diagrama do grão de arroz encontra-se no capítulo 23 deste livro.

Raças ou grupos eco-geográficos

A literatura aponta para a existência de diferenças varietais no que se refere às características morfológicas e serológicas e à fertilidade dos híbridos intervarietais. De acordo com Chang & Bardenas (1965), Kato e colaboradores, em 1928, classificaram o arroz cultivado em duas subespécies, *Indica* (hsien) e *Japonica* (keng); posteriormente, na década de 50, outros pesquisadores japoneses, adicionaram a subespécie *Javanica* a essa classificação, para incluir



os ecotipos bulu e tongil da Indonésia. Oka (1958), citado por Glaszmann (1987), postulou que os grupos *Japonica* e *Javanica* podem ser considerados, respectivamente, como os componentes de clima temperado e tropical de um único grupo varietal.

As características dos três grupos varietais foram descritas por Chang & Bardenas (1965):

Indica - Folhas largas de cor verde-claro; perfilhamento profuso e estatura alta; tecidos com consistência macia. Grãos finos, com pêlos curtos na lema e pálea; na maioria das vezes não apresentam arista e degranam facilmente. Sensibilidade variável ao fotoperíodo.

Japonica - Folhas estreitas de cor verde-escuro; médio perfilhamento e baixa estatura; tecidos de consistência dura. Grãos curtos e redondos, pêlos densos e longos na lema e pálea; arista ausente ou longa; baixo degrane. Sensibilidade variável ao fotoperíodo.

Javanica - Folhas largas, rígidas, de cor verde-claro; baixo perfilhamento e alta estatura; tecidos de consistência dura. Grãos largos e espessos, pêlos longos na lema e pálea; arista ausente ou longa; baixo degrane. Baixa sensibilidade ao fotoperíodo.

Chang & Bardenas (1965) previam que essa classificação morfofisiológica fosse gradativamente perder seu significado; contudo, ganhou renovado interesse após os estudos realizados por Glaszmann et al. (1984) e Glaszmann (1987), que utilizaram a variação enzimática detectada através de análise eletroforética para investigar a estrutura genética da espécie. Foi estabelecida a existência de seis grupos varietais, com predominância dos grupos I e VI, os quais apresentam grande complementaridade com a classificação morfofisiológica. Já os grupos II, III, IV e V constituem um "pool" alternativo de genes aos grupos I e VI, sugerindo um padrão de evolução diferenciado.

O Grupo I corresponde ao grupo *Indica*, compreendendo o arroz irrigado de clima tropical. Esse grupo está disseminado por toda a Ásia tropical e domina o sul do continente indiano. Em Bangladesh, corresponde ao ecotipo aman; no sudeste da Ásia Continental, engloba todas as variedades irrigadas; na Indonésia, corresponde ao ecotipo tjereh e, na China, ao ecotipo hsien.

O Grupo VI corresponde à soma dos grupos *Japonica* e *Javanica*, confirmando o postulado por Oka (1958), citado por



Glaszmann (1987), de que são um mesmo grupo varietal. É dominante em regiões de clima temperado e em áreas elevadas do sudeste e sul da Ásia. Inclui os ecotipos bulu de Java e Bali, a maioria dos tipos cultivados em sistema de sequeiro do sudeste da Ásia, o ecotipo keng da China e os genótipos tradicionais do Japão e da Coréia.

Glaszmann (1988), estudando o padrão de distribuição geográfica desses mesmos grupos varietais, observou que o tipo I é altamente polimórfico, o que pode ser resultado de uma origem difusa de uma população selvagem, e de significativa introgressão de arrozos simpátricos e daninhos. Em contraste, o grupo VI é menos polimórfico e a sua diversidade parece ser mais intensa nas regiões elevadas do sudeste da Ásia continental. Isso sugere que o grupo VI pode ter tido origem nessa região e daí se disseminado para o leste, oeste e sul. Estudando caracteres quantitativos e qualitativos, Jacquot & Arnaud (1979) verificaram grande semelhança dos arrozos de sequeiro africano com os asiáticos e sul-americanos. Foram classificados como grupos G3 e G4 e mostraram muita similaridade fenotípica com o grupo *Javanica*. A confrontação da classificação morfológica e enzimática (Glaszmann et al., 1984), confirmou essa similaridade. Com base nas evidências da classificação enzimática, neste capítulo consideraremos a existência de dois grandes grupos, *Indica* e *Japonica*, especificando como *Japonica* tropical o antigo grupo *Javanica*.

Estudos recentes, com a utilização de marcadores moleculares, indicou que as cultivares do grupo *Japonica* apresentam uma maior diversidade genética nos cromossomos 6 e 7, e uma diversidade consideravelmente menor no cromossomo 2, em comparação com o grupo *Indica* (Ni et al., 2002).

Diferenças morfológicas entre arroz irrigado e de sequeiro

Chang & Bardenas (1965) consideram que não existe critério, morfológico ou fisiológico, que possa diferenciar o arroz com base no ecossistema a que estão adaptados, várzeas ou terras altas. Ao estudar a evolução e diversificação de arrozos asiáticos e africanos, Chang (1976) postulou que a ampla dispersão do genoma asiático levou à formação das três raças eco-geográficas, bem como ao surgimento das várias formas de cultivo da cultura. De acordo com O'Toole & Chang (1979), o arroz tradicionalmente cultivado sob o sistema de sequeiro evoluiu do arroz irrigado há algumas centenas de anos, através de pressão exercida pelo



homem, ao deslocar-se de áreas baixas de várzeas para locais mais elevados. Contudo, sabe-se que a pressão natural de seleção exercida no ecossistema terras altas induziu a alterações e adaptações, especialmente no hábito de crescimento radicular. De acordo com Yoshida & Hasegawa (1982), de uma maneira geral, as cultivares tradicionais de sequeiro apresentam raízes longas e espessas, enquanto as semi-anãs, finas e fibrosas. Normalmente, a maior relação raiz-parte aérea está relacionada a uma maior proporção de raízes espessas. Além disso, o trabalho dos melhoristas levou à exploração das diferenças entre grupos varietais e, conseqüentemente, dos seus atributos morfológicos, no sentido de melhor adaptar os materiais a cada ambiente.

As cultivares de arroz irrigado em uso no Brasil pertencem ao grupo *Indica*, ou Grupo I da classificação de Glaszmann (Glaszmann, 1988). São, na maioria dos casos, seleções locais de coleções de linhagens introduzidas dos programas do International Rice Research Institute (IRRI), nas Filipinas, e do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), na Colômbia, ou produto de cruzamentos entre essas mesmas linhagens. Por sua vez, as cultivares tradicionais de arroz de sequeiro do Brasil pertencem ao grupo *Japonica* tropical ou Grupo VI, da classificação de Glaszmann. Contudo, desde meados da década de 90, os novos lançamentos são produto de hibridizações entre os grupos *Indica* e *Japonica* tropical, para obter cultivares com tipo de planta melhorado e tipo de grão similar ao dos genótipos comerciais de arroz irrigado.

Assim, a introgressão de genes de um grupo em outro está criando tipos derivativos, em termos morfológicos e enzimáticos, e levando a uma gradativa perda da identidade dos mesmos. Adicionalmente, hibridizações voltadas para ampliar a base genética das cultivares comerciais, tem levado à mescla de atributos das espécies do gênero *Oryza*, como *O. glumaepatula* (Brondani et al., 2001, 2002), *O. rufipogon* (Xiao et al., 1996) e *O. glaberrima* (Defoer et al., 2004).

O cruzamento interespecífico de *O. sativa* com *O. glaberrima*, de origem africana, levou à criação de um novo grupo de genótipos, os NERICA (abreviatura de "new rice plant type for Africa"). Este trabalho é considerado como um marco para o melhoramento do arroz nesse continente, pois permitiu o desenvolvimento de cultivares comerciais rústicas, tolerantes a estresses bióticos e abióticos e, por



isso mesmo, de grande potencial para aumentar a produção em ambientes desfavoráveis (Defoer et al., 2004).

CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS

Da mesma forma que a morfologia, a fisiologia da planta de arroz não será examinada em detalhe no presente capítulo, abordando-se apenas alguns aspectos selecionados. Na literatura internacional, várias revisões são voltadas ao assunto, dentre as quais destacamos Ishizuka (1971), Yoshida (1972, 1983), Murata & Matsushima (1975) e, mais recentemente, Matsuo et al. (1995). Na literatura disponível em Português, recomenda-se consultar Fageria (1984, 1989), Ferraz (1987) e Akita (1995).

Os processos fisiológicos essenciais que controlam a produção econômica dos cereais são a atividade fotossintética, a área total das folhas e a partição dos produtos da fotossíntese para os grãos (Boyer & McPherson, 1976). A relevância desses processos para a determinação da produtividade, nos sistemas de cultivo irrigado, em várzeas, e de sequeiro, com ou sem irrigação suplementar, será examinada a seguir.

Fotossíntese e processos associados

A fotossíntese diária é a base para a determinação da taxa de crescimento da cultura e, conseqüentemente, do acúmulo de fitomassa. A radiação solar impõe limite à fotossíntese total e conseqüentemente à produtividade atingida pela cultura (Loomis & Williams, 1963). A taxa máxima de fotossíntese observada em arroz, uma espécie C-3, de 47 kg CO₂ ha⁻¹ h⁻¹ à 25°C, é menor do que a de gramíneas C-4, como o milho, o milheto e o sorgo, entre 60 e 70 kg CO₂ ha⁻¹ h⁻¹, mas similar à de trigo e soja, de acordo com dados compilados por Penning de Vries et al. (1989). Entretanto, espécies C-3 normalmente apresentam melhor performance do que as C-4 em temperaturas baixas (abaixo de 15°C). A redução da eficiência quântica da fotossíntese é de 5% para cada 4°C de aumento na temperatura, enquanto a taxa de respiração aumenta em 30%, indicando que a respiração desempenha um papel dominante negativo.

A fotorespiração induzida por O₂ em espécies C-3 eleva o requerimento de energia para reduzir uma molécula de CO₂ de 12 para 15 quanta (Penning de Vries et al., 1989). Akita et al. (1990)



encontraram valores de 17 quanta para plantas de arroz entre 25 - 30°C. Experimentos de simulação indicam que a supressão da fotorespiração em arroz poderia causar acréscimos de produtividade de 6 a 9% (Penning de Vries et al., 1991). Contudo parece extremamente remota a possibilidade de incorporar características C-4 em arroz. Outro processo relacionado que reduz a eficiência de fixação de carbono é a respiração de manutenção, que consome cerca de 24% do carbono fixado. Penning de Vries & Spitters (1990) estimam que a redução de 10% dessa respiração aumentaria a produção de grãos em 5%.

Parece haver consenso entre pesquisadores na área de simulação que a respiração de crescimento não pode ser aumentada, pois é um complemento da eficiência de conversão de assimilados em fitomassa seca, que é bastante alta (Penning de Vries et al., 1991). Produzir 1 kg de grãos de arroz requer 1,4 kg de fotoassimilados e libera 0,3 kg de CO₂ (Penning de Vries et al., 1983).

Sabe-se que a fixação de CO₂ pelas panículas de arroz é pequena, quando comparada com a de outros cereais. O estudo de Machado et al. (1990), com duas cultivares nacionais, obteve valores entre 9 e 13%. De acordo com os mesmos autores, o balanço de carbono nas panículas foi nulo, apenas compensando as perdas respiratórias à luz.

A área foliar e suas implicações sobre a produção de fitomassa e de grãos

A análise de crescimento provê uma importante ferramenta ao estudo das limitações à produção e as formas usualmente utilizadas para expressá-la tem por base a alteração da superfície foliar e da fitomassa seca. As formas mais usuais de expressar a área foliar são: o índice da área foliar (IAF), que se refere à relação entre a superfície foliar e a superfície do terreno (m² m⁻²) e a duração da área foliar (DAF), que é a integral da área foliar no tempo (dia).

A partir do clássico estudo de Watson (1952), concluiu-se que a variação da área foliar e a sua duração são os principais responsáveis para a variação da produção; a variação na taxa de assimilação líquida seria de menor importância. Assim, o IAF foi utilizado extensivamente na análise da produção de fitomassa seca. Contudo, Loomis & Williams (1963), posteriormente, demonstraram



que a taxa fotossintética da folha é um importante determinante da taxa de crescimento da cultura.

Penning de Vries et al. (1989) apontam que os fatores da folha mais importantes para a fotossíntese são a curva de resposta à luz, a radiação interceptada e sua distribuição na copa vegetal. De acordo com a ampla revisão de literatura feita por Yoshida (1972) sobre os aspectos fisiológicos da produção das culturas, a interceptação da luz pela copa é fortemente influenciada pelo tamanho e forma da folha, ângulo e orientação azimutal, separação vertical, arranjo horizontal, além da absorção pela estrutura não-foliar. A ótima arquitetura da planta, no que se refere à distribuição de luz para a máxima fotossíntese, varia com as condições climáticas, em especial o ângulo de incidência da luz e a proporção entre luz direta e luz difusa.

De acordo com a equação desenvolvida por Monsi & Saeki (1953), citados por Murata & Matsushima (1975), a distribuição de luz em uma comunidade vegetal é determinada pelo IAF e pelo coeficiente de extinção que, por sua vez, é determinado pelo ângulo das folhas. Quanto menor o coeficiente de extinção, melhor a distribuição de luz e menor a saturação lumínica das folhas individuais. Dessa forma, explica-se por que a relação entre a área foliar e a produtividade cresce apenas até o ponto em que o sombreamento mútuo começa a reduzir a taxa fotossintética por unidade de área foliar, e que folhas eretas sejam o arranjo mais eficiente para a fotossíntese sob alto IAF.

O IAF varia de acordo com a fase de crescimento, apresentando seu máximo ao redor do florescimento, enquanto a fitomassa seca total (FST) apresenta uma variação similar ao IAF, até o florescimento. À partir daí, o IAF diminui devido à senescência das folhas, enquanto a FST segue crescendo até completar-se o processo de enchimento de grãos. Na Fig. 7.1, está ilustrada a variação desses dois parâmetros, para o caso do arroz irrigado, utilizando dados obtidos em clima tropical, durante a estação seca no IRRI, nas Filipinas e em clima temperado, no Japão. Foram observados valores máximos de IAF entre 10 e 12, e de FST entre 18 e 22 t ha⁻¹, enquanto a produtividade de grãos situou-se ao redor de 10 t ha⁻¹. Os autores destacam que o crescimento e a produtividade de cultivares semi-anãs, durante a estação chuvosa nas Filipinas são, respectivamente, 25 e 40% menores que os observados na estação seca.



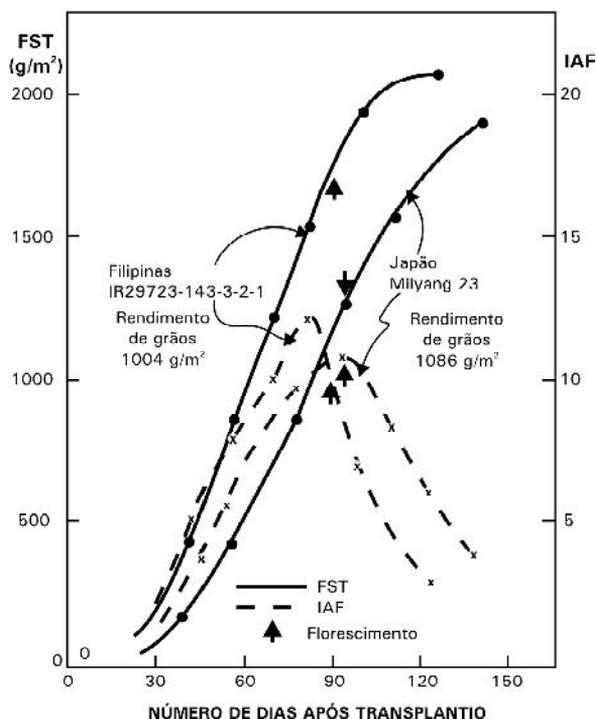


Fig 7.1. Evolução do índice de área foliar (IAF) e da fitomassa seca total (FST) do arroz irrigado, em clima tropical (Filipinas) e temperado (Japão).

Fonte: Adaptada de Akita et al. (1990).

Os valores máximos de IAF e de FST obtidos no sistema de cultivo de sequeiro sem irrigação suplementar são normalmente inferiores aos obtidos no sistema irrigado por inundação controlada. A Fig. 7.2, apresenta a variação do IAF e do FST para uma linhagem de terras altas de tipo de planta moderno, sob condições ótimas para crescimento.

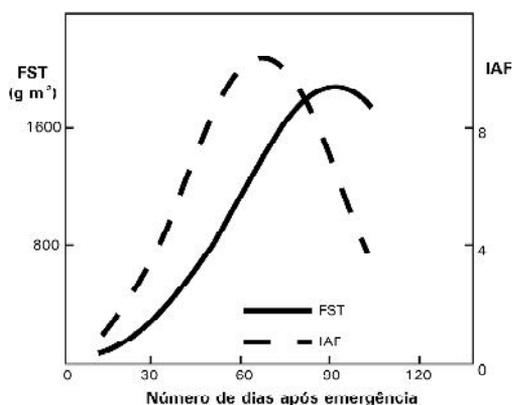


Fig 7.2. Evolução do índice de área foliar (IAF) e da fitomassa seca total (FST) de uma cultivar moderna de arroz de sequeiro favorecido, no Centro-Oeste do Brasil.

Fonte: Adaptada de Stone & Pereira (1994a).



Yoshida (1972) aponta controvérsias na literatura no que se refere à existência de um IAF ótimo, definido como o valor sob o qual a taxa de crescimento da cultura atinge o seu máximo, reduzindo-se além desse ponto. Como o IAF é uma característica muito variável, pode ser amplamente alterado pela manipulação da época e densidade de semeadura, espaçamento entre as linhas de plantio e aplicação de fertilizantes. Assim, um objetivo do manejo é atingir um IAF adequado para obter a máxima produtividade.

Para o sistema de cultivo de sequeiro, Pinheiro & Guimarães (1990) obtiveram, para uma cultivar de tipo de planta tradicional, IAC 47, uma ampla variação do IAF, entre 1,5 e 8,3, em 13 experimentos de campo, em várias épocas de semeadura. A produtividade máxima, de 4,5 t ha⁻¹, foi obtida sob valores de IAF entre 4,5 e 6,3, associados à boa disponibilidade de água e radiação solar. Sob IAF entre 1,0 e 2,0, a produtividade foi inferior a 2 t ha⁻¹; ao redor de 3 permitiu produtividades entre 2 e 3 t ha⁻¹; superior a 5, resultou em acamamento e baixa eficiência de absorção de luz, especialmente quando associado a tempo encoberto.

Através da variação do espaçamento entre linhas e da fertilização, e utilizando cultivares de tipo de planta tradicional e moderno, Stone & Pereira (1994a), obtiveram valores de IAF entre 1,5 e 10,3, e de FST entre 6,5 e 18 t ha⁻¹. Contudo, os altos crescimentos não se traduziram em altas produtividades, mesmo nas linhagens modernas, que se mantiveram ao redor de 3,5 t ha⁻¹, devido à alta incidência de doenças (Stone & Pereira, 1994b). Para a cultivar Maravilha, lançada em 1996 para plantio em ambientes favorecidos quanto à disponibilidade hídrica (sequeiro favorecido), Stone et al. (1999) obtiveram produtividades de 5 t ha⁻¹, em um IAF de 5 e FST de 10 t ha⁻¹. Em estudo mais recente, Guimarães et al. (2003), utilizando Caiapó, de tipo de planta tradicional, e BRS Primavera e BRS Soberana, de tipo de planta moderno, sob espaçamentos de 0,20 a 0,50 m, observaram altos valores de IAF (entre 6 e 11) e FST (entre 12 e 15 t ha⁻¹), para todas essas cultivares, em especial sob os espaçamentos menores (Fig. 7.3). Apesar da cultivar Caiapó ter apresentado maior taxa de crescimento da área foliar, além de maiores valores absolutos de IAF e FST em comparação com a BRS Primavera e a BRS Soberana, estas apresentaram maior taxa de crescimento da cultura (TCC), além de maior massa da matéria seca por unidade de área foliar (FST/IAF), conforme pode ser observado na Fig. 7.4.



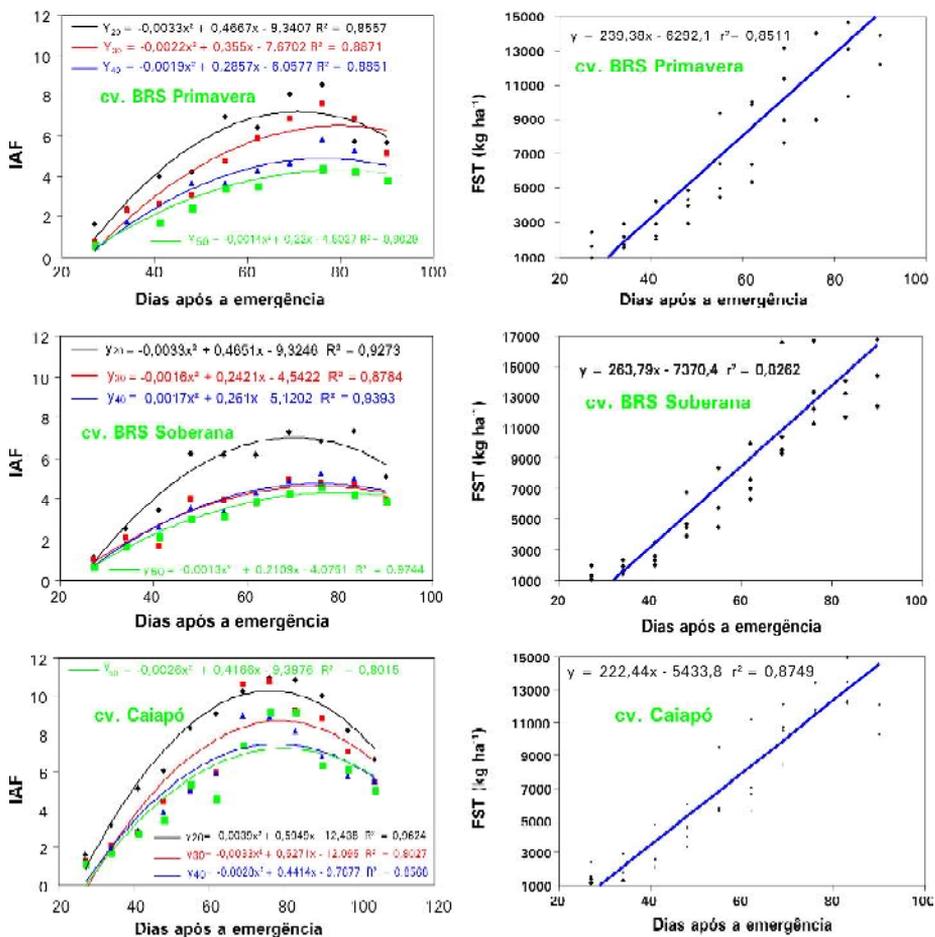


Fig 7.3. Índice de área foliar (IAF) e fitomassa seca total (FST) para as cultivares modernas, BRS Primavera e BRS Soberana, comparados com a cultivar tradicional Caiapó, sob diferentes espaçamentos.

Fonte: Adaptada de Guimarães et al. (2003).



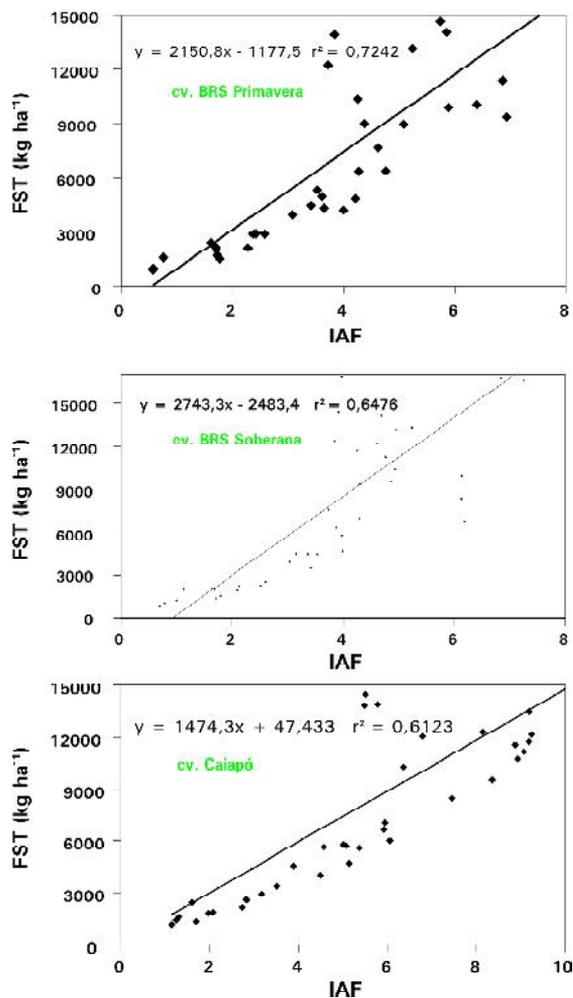


Fig 7.4. Relação entre a fitomassa seca total (FST) e o índice de área foliar (IAF) para as cultivares modernas, BRS Primavera e BRS Soberana, em comparação com a cultivar tradicional Caiapó.
Fonte: Adaptada de Guimarães et al. (2003).

Partição de fotoassimilados para os grãos

A produtividade de grãos da cultura de arroz pode ser estimada pelo produto dos seus componentes, quais sejam: o número de panículas por unidade de área; o número de espiguetas por panícula; o percentual de fertilidade das espiguetas; e a massa média dos grãos (Tanaka et al., 1964; Matsushima, 1975).



De acordo com Matsushima (1975), o número de panículas é determinado basicamente durante o período logo após o transplântio até a fase de máximo perfilhamento; o número de espiguetas no período que vai dos 32 aos 5 dias que antecedem o florescimento; a fertilidade das espiguetas, da diferenciação do último entrenó do colmo até 35 - 40 dias após florescimento; a massa dos grãos, da diferenciação da ramificação secundária da raquis até 33 - 38 dias após o florescimento. Assim, é importante que todas as etapas de desenvolvimento decorram sob condições adequadas, promovendo o crescimento da superfície foliar e, conseqüentemente, o acúmulo de fitomassa. Por outro lado, de nada adianta uma boa produção de fitomassa se não houver um bom enchimento de grãos.

Apesar de a maioria dos fotoassimilados contidos nos grãos ser proveniente de fotossíntese realizada durante a fase de maturação, sabe-se que parte dos carboidratos acumulados na bainha da folha e no colmo antes do florescimento é translocado para a panícula (Yoshida & Anh, 1968). Dessa forma, o carboidrato contido nos grãos pode ser dividido em duas frações: aquela acumulada antes do florescimento (carboidrato de reserva) e aquela resultante da fotossíntese realizada após o florescimento.

Cock & Yoshida (1972) estimaram que 68% dos carboidratos armazenados na fase vegetativa é remobilizado para os grãos, 20% é consumido com respiração e 12% permanece nos órgãos vegetativos. Contudo, essa contribuição aparente pode variar de acordo com o ciclo da cultivar, pois genótipos de ciclo curto tendem a acumular pouco carboidrato durante a fase vegetativa, enquanto os de ciclo longo acumulam uma fração considerável (Vergara et al., 1966). Sabe-se que cerca de 25% dos carboidratos dos grãos de cultivares de ciclo longo provém das reservas, em contraste com 0 a 6% em cultivares de ciclo curto (Yoshida & Anh, 1968).

As condições culturais e ambientais também desempenham um papel nessa contribuição aparente. O nitrogênio tende a reduzi-la (Yoshida & Anh, 1968) e, sob altas doses, mais de 80% do carboidrato do grão provém da fotossíntese pós-florescimento. Sob deficiência hídrica, Reyniers et al. (1982) estimaram que as reservas podem contribuir com até 57% da produção de grãos.

Raissac (1992) observou variações na capacidade de cultivares de arroz de terras altas, tanto em armazenar quanto em remobilizar carboidratos. Sob condições de boa disponibilidade hídrica, a maior



parte dos carboidratos dos grãos originou-se de fotossíntese recente enquanto, sob deficiência hídrica, das reservas dos caules e bainhas. Segundo o mesmo autor, a utilização de reservas no enchimento dos grãos é um fenômeno meramente compensatório, ligado à incapacidade da fonte em satisfazer a demanda do dreno representado pela panícula, devido à características intrínsecas da cultivar ou ocasionado por estresses ambientais.

Yoshida (1972) indica que os termos produtividade biológica (PB) e produtividade econômica (PE) foram introduzidos por Nichiporovich, em 1954, significando, respectivamente, a fitomassa total produzida pela planta e a fitomassa com utilidade econômica. A relação entre a PB e a PE é denominada de índice de colheita (IC). No caso da cultura do arroz, e de cereais em geral, a PB é representada pela soma da massa de palha e de grãos, por ocasião da colheita, enquanto a PE é a massa de grãos, sendo usualmente referida na literatura como produtividade ou rendimento de grãos.

De acordo com Akita (1995), no processo de melhoramento de cultivares de arroz irrigado, o aumento da PE não foi devido ao aumento da PB e sim ao aumento do IC. Este aumento, por sua vez, relacionou-se com o aumento do número de espiguetas, proporcionando um aumento efetivo do dreno metabólico. A menor partição de fotoassimilados para o crescimento de órgãos vegetativos em cultivares semi-anãs resultou em maior acúmulo de carboidratos não estruturais (CNE) nos caules e bainhas antes do florescimento. Essa fração, composta por amido, açúcares e aminoácidos, pode atingir até 2 t ha^{-1} , sendo prontamente translocada para as panículas e utilizada no enchimento dos grãos. O autor estimou que, para obter uma PE de 15 t ha^{-1} , seria necessário uma PB de 22 t ha^{-1} , obtendo-se valores de fitomassa seca ao redor de 14 t ha^{-1} no florescimento e 8 t ha^{-1} durante o enchimento dos grãos. Nessa estimativa foi considerado o acúmulo de CNE de 3 t ha^{-1} e um índice de colheita de 0,6. O número de espiguetas para obter tal rendimento seria de 72 mil/m^2 , com 90% de fertilidade e massa de 100 grãos de 2,3 g.

Atingir esses números não parece ser muito factível. Apesar da PB preconizada por Akita (1995) ser observada durante a estação seca nos trópicos, o IC para o arroz no sistema de cultivo irrigado, apresenta valores muito inferiores (ao redor de 0,5), enquanto o número máximo de espiguetas, observado em híbridos de alto rendimento é de apenas 55 mil t ha^{-1} .



No que se refere ao sistema de cultivo de sequeiro, a Tabela 7.4 apresenta valores obtidos em dois experimentos de campo com cultivares de tipo de planta tradicional (Rio Verde, Caiapó e Rio Paranaíba) e melhorado (Progresso), sob duas doses de nitrogênio. A PB variou de 6 a 10 t ha⁻¹, enquanto a produtividade variou de 3,5 a 5,5 t ha⁻¹, situando-se em valores abaixo dos observados por Akita (1995) para arroz irrigado. No que se refere ao IC foram observados valores superiores a 0,5 para todos os genótipos, no segundo experimento.

Tabela 7.4. Produtividade econômica, produtividade biológica e índice de colheita de cultivares de arroz, em dois experimentos sob o sistema de cultivo de sequeiro (sem irrigação suplementar), em dois níveis de nitrogênio.

Genótipo	Produtividade econômica (t ha ⁻¹)		Produtividade biológica (t ha ⁻¹)		Índice de colheita (%)	
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
Rio Verde	3,60	4,86	7,91	8,96	0,45	0,54
Caiapó	3,14	5,42	7,79	10,82	0,39	0,50
Rio Paranaíba	3,65	5,33	8,23	10,16	0,44	0,52
Progresso	3,39	5,30	6,79	10,49	0,50	0,51

Experimento 1: 40 kg N ha⁻¹; Experimento 2: 80 kg N ha⁻¹

Fonte: Adaptada de Pinheiro et al. (1998).

IMPLICAÇÕES DO TIPO DE PLANTA SOBRE A PRODUTIVIDADE

Donald (1968) propôs a busca de modelos de planta, ou ideotipos, como método de melhoramento, oferecendo uma alternativa ao enfoque tradicional, embasado na seleção direta para produtividade. Entretanto, este enfoque não era novo: os princípios básicos em fisiologia e, especialmente, as variações de morfologia da planta vinham sendo, desde muito, utilizados intuitivamente no melhoramento das culturas.

De acordo com Rasmusson (1987), o grau de utilização do conceito de ideotipo para aumento do potencial produtivo varia de acordo com a circunstância. Parece ser uma metodologia adequada para subsidiar o melhoramento quando o aumento desse potencial é a meta principal. O mesmo autor recomenda que 75% dos esforços sejam enfocados sobre métodos tradicionais e 25% orientado para a obtenção do ideotipo.

A alteração do tipo de planta do arroz irrigado para as regiões tropicais resultou em um enorme impacto sobre a produtividade,



primeiramente na Ásia e, posteriormente, alastrando-se para os demais continentes. Dadas as peculiaridades do ecossistema terras altas, o risco advindo da deficiência hídrica fez com que a maior ênfase no melhoramento para o arroz nesse ecossistema fosse colocada sobre a resistência à seca e à estabilidade de rendimento do que sobre o potencial produtivo. As implicações do tipo de planta sobre a produtividade nos dois ecossistemas, várzeas e terras altas, são examinados a seguir.

Tipo de planta de arroz irrigado

O fundamento científico para a alteração do tipo de planta de arroz irrigado que desencadeou a dita “Revolução Verde” foi dado por estudos em fisiologia, realizados sobre o grupo *Japonica* de clima temperado, por diversos pesquisadores japoneses.

De acordo com Jennings (1964) e Beachell & Jennings (1965), os principais argumentos para aplicar esses princípios no melhoramento do grupo *Indica* foram: em regiões de clima temperado eram atingidos altos rendimentos como resultado da resposta à nitrogênio dos genótipos do grupo *Japonica*, associados à práticas culturais intensivas; os baixos rendimentos observados na região tropical eram resultado de alta temperatura e umidade, dias curtos e baixa intensidade luminosa, em associação com o tipo de planta do grupo *Indica*.

Na tentativa de melhorar o tipo de planta de arroz tropical, foram realizados vários cruzamentos mal sucedidos entre *Indica* e *Japonica*, devido ao fato dos melhoristas continuarem selecionando o tipo de planta *Indica* nas progênies obtidas. Somente após o reconhecimento de que a resposta ao nitrogênio estava associada à baixa estatura e a colmos fortes, é que foram utilizadas as cultivares anãs do grupo *Indica*, originárias de Taiwan, como fonte de baixa estatura em cruzamentos com cultivares do mesmo grupo (Khush, 1974). O cruzamento de uma dessas fontes, Dee-geo-woo-gen, com a variedade tradicional Peta da Indonésia, resultou na criação do IR 8, cuja adoção em larga escala a partir de 1966, desencadeou a chamada “Revolução Verde”. Apesar de as alterações no tipo de planta terem sido eminentemente de caráter morfológico, causaram profundas alterações sobre o uso dos recursos, em especial da luz e do nitrogênio, o que resultou em maior produtividade econômica.

O aumento de produtividade das cultivares semi-anãs não poderia ser viabilizado sem o aumento concomitante das doses de nitrogênio. Cultivares de alto rendimento removem muito mais nitrogênio do que o



disponível via mineralização ou em relação às doses recomendadas no passado. Isso também se verificou para a planta moderna de trigo. Austin et al. (1993) observaram que a cultivar moderna de trigo produziu somente $0,3 \text{ t ha}^{-1}$ a mais do que a antiga, na ausência de nitrogênio; sob 144 kg ha^{-1} desse nutriente, a nova cultivar produziu 3,5 vezes mais. A análise da série de dados históricos permitiu verificar que a produtividade do trigo, na Inglaterra, aumentou de 4 a 7 vezes do século 13 ao 17, mas que as cultivares melhoradas somente suplantaram as “landraces” sob manejo melhorado (Austin, 1994).

Diferenças mais profundas na fotossíntese e respiração dos dois tipos de planta de arroz postuladas inicialmente não foram demonstradas. Um dos argumentos fisiológicos para preconizar a redução de estatura é que plantas altas possuem maior proporção de tecidos não fotossintéticos (bainhas e caules), devendo, portanto, apresentar maiores perdas de carbono fotossintético por respiração do que plantas de baixa estatura.

O estudo de Cock & Yoshida (1973) demonstrou que não existe um IAF ótimo para Peta ou IR 8. Ambas apresentaram taxas de crescimento similares sob baixo IAF, aumentando com este parâmetro até um IAF de 6,0, quando ambos os tipos de planta atingiram um platô. Nesse ponto, a taxa de fotossíntese da IR 8 foi um pouco maior que a de Peta, mas a respiração não se relacionou de forma linear, e sim de forma assintótica, com o IAF, em ambos os tipos de planta. Os autores concluíram que a relação entre a fotossíntese e a respiração é relativamente estável para uma ampla faixa de taxas fotossintéticas, sendo improvável que um valor ótimo de IAF resulte do desequilíbrio entre esses dois processos. Assim, a existência de um valor ótimo de IAF para Peta é resultante da sua arquitetura foliar propriamente dita, em que folhas decumbentes, sob altos valores de IAF, apresentam menor fotossíntese total.

Evans et al. (1984) compararam grupos de genótipos utilizados nas Filipinas no período de 70 anos, a partir do início do século. Constataram que os genótipos utilizados nas seis primeiras décadas de abrangência do estudo apresentavam características muito similares. Com o advento das cultivares semi-anãs, nas décadas de 60 e 70, observaram uma profunda alteração na maioria das características morfológicas estudadas, quais sejam: redução do comprimento da folha, do seu ângulo de inserção e da altura do colmo e aumento do número de perfilhos. Os mesmos autores indicam que não ocorreram alterações nas taxas de crescimento ou de fotossíntese da cultura, em paralelo com o evidente aumento do



índice de colheita e da produtividade econômica do novo tipo de planta, em relação aos materiais utilizados anteriormente ao IR 8. Esses benefícios decorreram basicamente da maior transmissão de luz através da copa, derivada de folhas mais eretas. Enquanto os materiais mais antigos apresentavam coeficientes de extinção entre 0,5 e 0,6, o novo tipo de planta apresentou valores inferiores a 0,4.

O impacto da “Revolução Verde” também fez-se sentir de forma muito clara na América Latina, durante a década de 80. Tal impacto foi medido por Sanint (1992), que estimou o total de benefícios da adoção do novo tipo de planta em 250 mil dólares anuais.

É muito difícil separar o efeito do componente varietal do efeito das práticas de manejo associadas à adoção das cultivares semi-anãs. No Brasil, a combinação desses dois fatores trouxe um incremento de rendimento estimado inicialmente em mais de 30% para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (Carmona et al., 1994). Atualmente, as produtividades nesses dois estados é superior a 6 t ha⁻¹.

O novo tipo de planta de arroz irrigado

As estatísticas de demanda para a Ásia prevêem um incremento que não será satisfeito, caso se mantenha a tendência de urbanização de áreas sob a cultura e o atual rendimento por unidade de área. É evidente que os rendimentos em nível de lavoura estão muito abaixo do potencial e muito pode ser feito para diminuir ou eliminar esse desnível através de técnicas melhoradas de manejo.

Vários estudos foram realizados visando a estabelecer as estratégias a serem utilizadas na alteração da planta de arroz para elevar o potencial produtivo da cultura, estagnado ao redor de 12 t ha⁻¹ desde a adoção do IR 8. Akita (1989, 1995) considera possível o aumento do índice de colheita atual das semi-anãs, situado entre 0,4 e 0,5, para um valor ao redor de 0,6. Como principais estratégias o autor preconiza o aumento da produtividade biológica, para um valor ao redor de 22 t ha⁻¹, via incremento da eficiência de produção de espiguetas e da duração da fase de maturação, de 30 para 45 dias.

Uma tendência observada nos países asiáticos é a passagem gradativa do sistema de transplântio, predominante na região, para o sistema de semeadura direta em solo seco, devido especialmente à redução da mão-de-obra. Os estudos de Schnier et al. (1990) e Dingkuhn et al. (1991) indicam que cultivares semi-anãs, sob semeadura direta, apresentam um crescimento excessivo, devido à densidade de semeadura



e, especialmente, à ausência do “choque de transplântio”, resultando em produção excessiva de folhas e perfilhos, seguido da diluição do nitrogênio e senescência prematura. Para atingir o mesmo nível de produtividade do sistema de transplântio, exigem maiores doses de nitrogênio.

Utilizando resultados de vários experimentos de campo, bem como aplicando técnicas de simulação, Dingkuhn et al. (1991) concluíram que as seguintes modificações na fisiologia da planta poderiam melhorar o rendimento de grãos, tanto em transplântio quanto em semeadura direta: prolongamento do período de maturação; manutenção de uma alta concentração de nitrogênio nas folhas, aumentando o gradiente vertical na copa; alocação de mais fotossimilados ao crescimento da folha nos estádios iniciais; redução do crescimento das folhas no final da fase vegetativa e na fase reprodutiva; e expansão da capacidade de armazenamento de fotoassimilados nos caules.

Venkateswarlu et al. (1986, 1987), constataram que a massa individual de grãos em um dado genótipo é variável em função de sua posição na panícula, e sugeriram que é possível aumentar o potencial produtivo, maximizando a proporção desses grãos. Com base nesses estudos, Vergara et al. (1991), sugerem um novo ideótipo, o “tipo de planta de alta densidade de grãos”. Para aumentar a densidade dos grãos, esses autores sugerem várias alterações morfo-fisiológicas, entre as quais moderado perfilhamento; panículas longas, com muitas ramificações primárias e largos feixes vasculares no pedicelo; plantas de estatura intermediária; folhas espessas e eretas; bainha da folha bandeira de cor verde-escuro, capaz de realizar fotossíntese; senescência vagarosa; e alta taxa fotossintética sob baixos níveis de radiação fotossinteticamente ativa.

Os trabalhos de melhoramento para esse tipo de planta, conhecido pela sigla NPT (new plant type), foram iniciados pelo IRRRI em 1989, utilizando na sua composição, genitores do grupo *Japonica* tropical com introdução seletiva de genes do *Japonica* de clima temperado e, em menor proporção, do grupo *Indica* (Khush, 1995). As novas linhas NPT, predominantemente de base *Japonica*, tem poucos perfilhos e grandes panículas, em contraste com as cultivares *Indica* de alta produtividade, que possuem alto número de panículas, de tamanho relativamente pequeno. Para determinar se essas linhas tem um maior potencial para a produção de espiguetas do que o material *Indica* elite, Sheehy et al. (2001), determinaram, em condições de campo, o número total de espiguetas juvenis e o número de espiguetas na colheita de linhas NPT, estabelecendo um modelo para quantificar o potencial produtivo e sua redução pela perda de espiguetas entre a fase juvenil e



de maturidade. O modelo indicou que caso todas as espiguetas juvenis se transformassem em grão, o potencial produtivo seria o dobro do obtido com as NPT, sugerindo que a capacidade da fonte, e não o tamanho do dreno, é que está impondo limitação à sua produtividade.

Laza et al. (2003), compararam 47 entradas, envolvendo híbridos F1, linhagens do grupo *Indica*, NPT e progênies de cruzamentos de NPT com *Indica*. A produtividade dos híbridos foi a mais alta e a das NPT, a mais baixa. A produtividade se associou ao índice de colheita, tanto na estação seca quanto na estação chuvosa, mas não se associou à FST. Foi observada uma relação negativa entre a fitomassa acumulada antes do florescimento (T) e a fitomassa acumulada do florescimento à maturidade fisiológica (Wr). As linhas NPT apresentaram a maior Wr média, mas também o T mais baixo, dentre todos os grupos, justamente o oposto dos híbridos F1.

Os resultados de Peng et al. (1999), também indicam que o melhoramento via NPT não obteve os resultados esperados, devido ao baixo enchimento de grãos e à baixa produção de biomassa. Estes autores sugerem que a seleção de parentais com bom enchimento de grãos, introdução de genes *Indica* no background do *Japonica* tropical, e refinamento do ideotipo original deve melhorar o seu desempenho.

Com o apoio de ferramentas moleculares, um novo enfoque vem sendo dado a pesquisa sobre o ideotipo de arroz irrigado. Zhikang et al. (1999), usaram um mapa completo de ligação com 115 marcadores RFLP (Restriction Fragment Length Polymorphism), para estudar vários caracteres, incluindo ângulo dos perfilhos e das folhas, de 2418 linhas F4 derivadas de F2, do cruzamento entre cultivares *Indica* e *Japonica*. Um gene maior (Ta) e 11 QTLs (Quantitative Trait Loci) foram responsáveis pela grande variação desses caracteres na população estudada. O gene Ta respondeu por 47,5% da variação fenotípica no ângulo dos perfilhos e teve um grande efeito pleiotrópico sobre o ângulo das folhas. Oito QTLs adicionais, para ângulo das folhas e da folha bandeira, coletivamente explicam 52 e 66,4% da variação genotípica desses caracteres. Os autores concluíram que o tipo de planta e a produtividade podem ser melhorados pela manipulação deliberada desses QTLs, em um programa de seleção assistida por marcadores.

Assim, a nova tendência no melhoramento para o NPT é usar ferramentas moleculares, bem como lançar mão de novos “pools” gênicos no gênero *Oryza*. Um exemplo de trabalho bem sucedido foi o desenvolvimento das novas cultivares NERICA. No Brasil, a introgressão de genes de *O. glumaepatula* em *O. sativa*, monitorada por marcadores moleculares, permitiu obter linhagens com alto número de perfilhos e maior capacidade de rebrota da soca (Brondani et al., 2001, 2002).



Tipo de planta de arroz de sequeiro tradicional

Até meados da década de 80, as cultivares melhoradas utilizadas na abertura de áreas dos Cerrados eram originárias do Instituto Agronômico de Campinas. Cultivares como IAC 1246, IAC 47, IAC 25, IAC 164 e IAC 165, pertencem ao grupo *Japonica* tropical, sendo de porte alto, baixo perfilhamento e folhas longas e decumbentes. Estudos sobre as características agronômicas e morfológicas relacionadas ao desempenho de variedades tradicionais de sequeiro, em comparação com linhagens introduzidas, em sua maioria do grupo *Indica*, de porte e perfilhamento intermediários ou semi-anãs de cultivo irrigado, sob deficiência ou boa disponibilidade hídrica foram realizados pelo programa de agrofisiologia na Embrapa Arroz e Feijão, na década de 80, para dar subsídios ao programa de melhoramento. Trabalhando com 49 cultivares de tipo de planta contrastante, Pinheiro et al. (1985) verificaram que a disponibilidade de água afetou a importância relativa das várias características na determinação da produtividade (Tabela 7.5). Sob deficiência hídrica, as características mais relevantes foram o número de dias até o florescimento, o percentual de fertilidade das espiguetas e o ângulo das folhas; na ausência de deficiência hídrica, as características mais relevantes foram o número de panículas por unidade de área, o índice de área foliar e a largura das folhas.

Tabela 7.5. Correlações lineares simples da produtividade com seus componentes e algumas características morfofisiológicas, no experimento que sofreu deficiência hídrica (Exp I) e naquele que recebeu irrigação suplementar (Exp II).

Variáveis	Exp I	Exp II
Panículas m ²	0,202*	0,508**
Espiguetas/panícula	0,034 ns	0,050 ns
Fertilidade das espiguetas	0,700**	0,479**
Massa de 100 grãos	0,423**	-0,100 ns
Dias até 50% da floração	-0,612**	-0,101 ns
Índice de área foliar	-0,113 ns	0,357**
Altura da planta	0,286**	-0,264**
Comprimento da panícula	0,251*	-0,153 ns
Comprimento da tolha bandeira	0,340**	-0,137 ns
Largura da folha bandeira	0,204*	-0,421**
Ângulo da folha bandeira	-0,392**	-0,063 ns
Comprimento da 2ª folha	0,109 ns	-0,347**
Largura da 2ª folha	0,128 ns	-0,463**
Ângulo da 2ª folha	-0,436**	-0,186 ns

*, **, ns: significativo ao nível de 5% de probabilidade, 1% de probabilidade, e não significativo, respectivamente

Fonte: Adaptada de Pinheiro et al. (1985).



As nove melhores cultivares compuseram um estudo subsequente (Embrapa, 1984), envolvendo três pares de experimentos em três épocas de plantio (novembro a janeiro). Nas duas últimas épocas ocorreu deficiência hídrica e, por meio da irrigação suplementar, foi possível induzir as situações desejáveis para a comparação dos tipos de planta.

A primeira época caracterizou-se por chuvas abundantes e bem distribuídas e dias totalmente encobertos na fase reprodutiva da cultura. Essas condições, aliadas à boa fertilidade do solo, estimularam o crescimento da área foliar e as cultivares nacionais de sequeiro tradicional foram capazes de desenvolver valores de IAF e DAF tão altos quanto os das semi-anãs de cultivo irrigado (Tabela 7.6). A comparação do rendimento de grãos dos três grupos indicou que o grupo de cultivares introduzidas de porte intermediário foi superior aos demais (Tabela 7.7). Entretanto, a maior produtividade, nessa época, foi apresentada pela IAC 25, de ciclo curto. As duas outras cultivares nacionais, ambas de ciclo médio, apresentaram altos índices de acamamento, o que deprimiu a produtividade do grupo.

Tabela 7.6. Duração da área foliar (DAF) na fase reprodutiva e índice de área foliar (IAF) na floração observados em cultivares de diferente tipo de planta em três épocas de plantio, submetidas ou não à deficiência hídrica

Grupo/Cultivar	1ª época		2ª época s/irrigação		2ª época c/irrigação		3ª época s/irrigação		3ª época c/irrigação	
	DAF	IAF	DAF	IAF	DAF	IAF	DAF	IAF	DAF	IAF
1. Nacionais (porte alto)										
IAC 25	130,8b	5,32a	113,9d	3,76d	98,2d	3,45c	50,1b	2,28c	59,2c	2,38bc
EEPG 389	180,9ab	6,72a	117,8d	3,67d	138,6cd	4,39c	71,7ab	2,53bc	72,1bc	2,17c
IAC 47	310,3ab	7,52a	173,9abc	5,24abcd	159,8abcd	6,69ab	117,2a	3,86abc	101,9abc	3,37abc
2. Introduzidas (porte médio)										
IIAI 13	257,5ab	5,7ba	178,8abc	5,82ab	178,4abc	6,32ab	117,0a	4,42a	114,8ab	3,70abc
Kn 361-1-B-6	279,3ab	7,51a	155,7bcd	4,78abcd	157,2bcd	5,08bc	86,8ab	3,31abc	101,8abc	4,36a
Salumpikit	249,3ab	7,66a	223,8a	6,73a	228,8a	7,52a	98,3ab	4,03ab	129,9a	4,67a
3. Introduzidas (semi-anãs)										
IEL 1444	222,9ab	6,82a	184,3abc	5,72abc	194,7abc	7,35a	109,9ab	3,94abc	97,9abc	4,01ab
C 22	386,5a	7,17a	190,3ab	5,76abc	212,1ab	7,54a	85,5ab	3,54abc	95,7abc	3,40ab
SE 302-G	220,5ab	6,04a	133,8cd	4,08cd	146,1bcd	5,02bc	83,3ab	3,27abc	78,9abc	3,31abc

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5 % de probabilidade

Fonte: Embrapa (1984).



Tabela 7.7. Produtividades ($t\ ha^{-1}$) obtidas por cultivares de diferente tipo de planta, em três épocas de plantio, submetidas ou não à deficiência hídrica na fase reprodutiva.

Grupo/Cultivar	1ª época	2ª época sem irrigação	2ª época com irrigação	3ª época sem irrigação	3ª época com irrigação
1. Nacionais (porte alto)					
AC 25	3,53a	2,62a	3,34ab	1,77a	2,23ab
EPG 369	2,86ab	2,18a	2,94b	1,09b	2,41ab
AC 47	2,45ab	1,86ab	4,05a	0,24c	3,01a
Média do grupo	2,95	2,22	3,44	1,03	2,55
2. Introduzidas (porte médio)					
RAT 13	3,47a	1,19bc	3,94ab	0,17c	2,64a
Kn 361-1-8-6	3,48a	0,24d	3,64ab	0,26c	1,05c
Salumpikit	2,78ab	0,06d	2,97b	0,02c	2,09ab
Média do grupo	3,23	0,50	3,52	0,13	1,93
3. Introduzidas (semi-anãs)					
ET 1444	3,31a	1,23bc	4,06a	0,09c	1,48bc
C 22	2,10ab	0,06d	2,90b	0,20c	1,51bc
SE 302-G	1,79b	0,71cd	3,00ab	0,02c	0,96c
Média do grupo	2,40	0,67	3,32	0,10	1,32

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: Embrapa (1984).

A segunda época de plantio apresentou crescimento um pouco menor do que o da primeira (Tabela 7.6). Apesar do período encoberto durante a fase vegetativa, a fase reprodutiva caracterizou-se pela alta radiação derivada da estiagem, que ocorreu dos 82 aos 97 dias após a semeadura. No experimento que recebeu irrigação suplementar, a combinação de fatores favoráveis, quais sejam, água, radiação solar e ausência de acamamento, permitiu que fossem atingidas altas produtividades, ao redor de $4,0\ t\ ha^{-1}$ (Tabela 7.7). Nessa situação, o tipo de planta não impôs limitação à produtividade, não sendo observadas diferenças entre grupos. Nessa mesma época de plantio, sob deficiência hídrica, os maiores rendimentos foram obtidos pelo grupo nacional, especialmente devido à presença de cultivares precoces, cujo florescimento ocorreu antes da estiagem, caracterizando uma reação de escape. Os dois grupos de cultivares introduzidas apresentaram diferenças de produtividade que expressam a sua relativa resistência à seca. Assim, dentre as introduzidas, destacou-se a cultivar africana IRAT 13, do grupo *Japonica* tropical, que apresentou produtividade similar à da IAC 47 (Tabela 7.7), sendo ambas utilizadas extensivamente como genitores no programa de melhoramento para resistência à seca.



Na terceira época, o crescimento da área foliar foi menor do que o das demais épocas (Tabela 7.6). As chuvas não foram bem distribuídas e ambos os experimentos receberam irrigação suplementar durante grande parte do ciclo. Os regimes hídricos diferenciais foram aplicados dos 82 aos 106 dias após a semeadura e, nessa situação de alta demanda evaporativa, as cultivares nacionais revelaram-se superiores às dos demais grupos, tanto sob irrigação suplementar quanto sob deficiência hídrica, denotando não só maior resistência à seca como maior eficiência do uso da água suplementar aplicada (Tabela 7.7).

Assim, concluiu-se que, para condições de alto risco de deficiência hídrica, a incorporação de ciclo precoce, bem como de características de resistência à seca, expressa pela fertilidade de espiguetas, deveriam ser prioritárias em relação a melhoria do tipo de planta. Nesse sentido, o programa de melhoramento genético de arroz privilegiou, por longo tempo, cruzamentos dentro do grupo *Japonica* tropical, utilizando genótipos africanos e nacionais como genitores. Desses cruzamentos resultaram cultivares como Rio Paranaíba e Guaraní, que ocuparam os Cerrados até meados da década de 90.

Por outro lado, chegou-se também à conclusão de que a alteração no tipo de planta tradicional de sequeiro traria acréscimos de produtividade para ambientes favorecidos, que incluem tanto o cultivo em regiões de boa distribuição pluvial como aquele sob irrigação suplementar. Essas alterações implicavam em redução da estatura da planta, aumento do perfilhamento e redução do comprimento das folhas superiores, visando a evitar o acamamento, aumentar a eficiência de absorção de luz e alterar o ponto de inflexão da curva que expressa a relação entre o índice de área foliar e a produtividade.

O novo tipo de planta de arroz de sequeiro: o arroz de terras altas

Com base nos critérios acima descritos, parte do programa de melhoramento de arroz voltado para o ambiente favorecido, passou, desde meados da década de 80, a dedicar atenção ao tipo de planta, utilizando basicamente genitores do grupo *Indica* em cruzamentos. Com o passar do tempo, a mudança da preferência do consumidor brasileiro por grão longo-fino levou também o programa voltado para o ambiente de risco climático - ou desfavorecido - a utilizar extensivamente em cruzamentos, genitores do grupo *Indica*, visando transferir suas características de grão para a base *Japonica*. Adicionalmente, com a migração da fronteira agrícola para áreas climaticamente favorecidas, a resistência a seca perdeu sua alta prioridade no programa de melhoramento. Estas mudanças de



prioridade e do ambiente do cultivo levaram a uma gradual redução do programa voltado para o ambiente desfavorecido e concentração da equipe na criação de cultivares de arroz de tipo de planta moderno e tipo de grão longo-fino. As primeiras cultivares lançadas sob esse novo cenário da cultura, agora referida como arroz de terras altas, foram as cultivares Maravilha, Primavera, Canastra, Carisma e Confiança, lançadas em 1996. Apresentam estatura ao redor de 90 - 100 cm, 250 - 350 panículas por m², com aproximadamente 150 - 180 espiguetas por panícula e 2,3 a 2,5 g de massa de 100 grãos.

Enquanto o potencial produtivo das cultivares tradicionais, como a IAC 47 e Rio Paranaíba, situa-se ao redor de 4,5 t ha⁻¹, obtido com um índice de área foliar ao redor de 3,5-4,0 m² de folha m⁻² de terreno (Embrapa, 1984; Pinheiro & Guimarães, 1990), as novas cultivares de terras altas, em condições experimentais podem apresentar produtividades de até 7 t ha⁻¹, sob índices de área foliar entre 6 e 8 m² de folha m⁻² de terreno, na ausência de acamamento.

As cultivares de arroz de terras altas são aptas ao sistema de cultivo sob irrigação suplementar. Em ensaios conduzidos em Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul foram observados incrementos significativos de produtividade em relação ao controle sem irrigação, que, dependendo do local e do regime de chuvas, variou entre 30% e 200%, (Stone et al., 1999; Arf et al., 2001; Rodrigues & Arf, 2002; Soratto et al., 2002). Este incremento é atribuído ao aumento do número de grãos por panícula e da massa de grãos (Stone & Silva, 1998; Soratto et al., 2002).

Apesar dos consideráveis avanços do melhoramento, alguns pontos fracos do novo tipo de planta são detectados. O arranjo foliar, com folhas mais curtas, estreitas e eretas, leva a uma baixa cobertura inicial do terreno, e conseqüente menor competitividade com plantas daninhas. Ademais, sob condições de deficiência hídrica na fase reprodutiva, as cultivares de terras altas apresentam desempenho inferior ao das tradicionais (Pinheiro et al., 2000a; Pinheiro, 2003).

Há que considerar, contudo, que as cultivares de tipo de planta tradicional, apesar de mais tolerantes à seca, não se beneficiam de boas condições hídricas e de fertilidade do solo, pois um crescimento ótimo implica em mau aproveitamento da luz e do nitrogênio, devido ao acamamento. Já as novas cultivares, sob adequada disponibilidade hídrica, permitem a adoção de práticas de manejo que conduzem a altas produtividades.

Assim, a alteração do tipo de planta e de grão do arroz para cultivo no ecossistema de terras altas, associada à migração da cultura



para regiões climaticamente favorecidas, efetivamente resultou em uma evolução da produtividade da cultura. Depois de um longo período em que se manteve estagnada, a produtividade da cultura, com uma média nacional ao redor de 1 t ha^{-1} , desde o lançamento das novas cultivares de terras altas, apresentou uma rápida evolução. A média atual da cultura elevou-se para $1,9 \text{ t ha}^{-1}$, enquanto no Estado do Mato Grosso já atinge $2,9 \text{ t ha}^{-1}$. As lavouras otimizadas, que utilizam cultivares de terras altas chegam a ter médias próximas de 4 t ha^{-1} .

Conclui-se, portanto, que as novas cultivares conseguiram elevar o potencial produtivo da cultura de arroz no ecossistema de terras altas, permitindo que, em ambientes favoráveis, esse potencial se traduza em expressivos incrementos de produtividade e rentabilidade para o produtor.

IMPLICAÇÕES DOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS SOBRE A MORFOLOGIA, FISILOGIA E PRODUTIVIDADE

Radiação solar

A radiação solar impõe limite à fotossíntese total e conseqüentemente à produtividade atingida pela cultura (Loomis & Williams, 1963). O experimento clássico conduzido por Yoshida & Parao (1976) também destacado no capítulo de Clima, ilustra de forma muito clara a influência da radiação na produtividade ao estudar o comportamento da cultivar IR 8 sob vários níveis de IAF, durante a estação seca e estação chuvosa nas Filipinas. As produtividades na estação seca foram sempre superiores às da estação chuvosa, para um mesmo valor de IAF, em valores superiores a 4,0. Em valores inferiores, as produtividades foram similares nas duas estações, denotando incompleta interceptação de luz pela copa da planta.

Existe uma grande variabilidade na disponibilidade de radiação solar entre as localidades e, de maneira geral, as maiores produtividades são observados nos locais com maior radiação (Yoshida, 1983; Akita, 1995). O balanço de energia de cultivares semi-anãs em condições tropicais foi estudado por Akita (1995). A fitomassa seca total, o IAF, a taxa de respiração e a fotossíntese bruta foram maiores no transplântio de março, em que a radiação era 20% maior, do que no transplântio de julho.

Resultados obtidos na Embrapa Arroz e Feijão, em Goiânia, GO, no ecossistema de terras altas (Pinheiro & Guimarães, 1990; Pinheiro et al., 1990), sob baixo nível de radiação durante período excepcionalmente encoberto, indicam que, mesmo para o arroz de tipo de planta tradicional, esse parâmetro climático pode impor limitação ao rendimento, apesar de



atuar de forma indireta, Na fase vegetativa, estimulou o crescimento da IAC47, cujo IAF alcançou valores superiores a 6,0, resultando posteriormente em altos níveis de acamamento e baixa fertilidade das espiguetas. Na fase reprodutiva, afetou a diferenciação da estrutura reprodutiva, resultando em baixo número de espiguetas por panícula. Nas duas situações, o potencial produtivo da cultivar, de 4,5 t ha⁻¹, foi reduzido em cerca de 50%.

Em áreas dos Cerrados situadas na pré-Amazônia, o tempo encoberto é comum, fazendo com que cultivares do tipo tradicional não atinjam produtividade adequada, devido ao crescimento excessivo com conseqüente redução na absorção da radiação solar causada por auto-sombreamento e acamamento. Já as novas cultivares de terras altas, de menor estatura, maior número de perfilhos, com folhas mais curtas e eretas, e resistentes ao acamamento, são aptas a se beneficiar de boas práticas de manejo, e em especial do aumento da adubação nitrogenada, pois o estímulo ao crescimento vai se traduzir em altas produtividades.

Temperatura

De acordo com Yoshida (1981), a temperatura crítica, máxima ou mínima, determina o ambiente no qual o ciclo de vida da planta de arroz pode se completar. Dentro dessa faixa, a temperatura afeta a taxa de desenvolvimento das folhas e panículas e de enchimento dos grãos, estabelecendo o ciclo da cultivar sob esse ambiente. Os valores são específicos para cada estágio de desenvolvimento e variam com a cultivar, duração da temperatura crítica, alterações diárias e atividade fisiológica da planta. De acordo com o mesmo autor, a faixa ótima para crescimento situa-se entre 25 e 30°C, com variações nos dois sentidos, de acordo com o estágio considerado.

Temperaturas extremas, mesmo ocorrendo por pequenos períodos, podem afetar a produtividade, se coincidirem com períodos de maior sensibilidade da planta de arroz. A coincidência do período de redução da célula-mãe do pólen, que ocorre de 10 a 14 dias antes do florescimento, com temperaturas inferiores a 15°C, pode trazer problemas ao grão de pólen e resultar em esterilidade de espiguetas (Lin & Peterson, 1975). Temperaturas superiores a 35°C, especialmente nos períodos de gametogênese e floração, resultam também em esterilidade de espiguetas (Yoshida et al., 1981).

Para o arroz irrigado, cultivado na Região Sul do Brasil, muitas vezes a temperatura situa-se abaixo do valor crítico, especialmente durante a fase reprodutiva da cultura, sendo esse estresse ambiental responsável por cerca



de 30% de quebra de produção (Terres & Galli, 1985). Os programas de melhoramento voltados para essa região têm, dentre os seus objetivos, obter cultivares tolerantes às baixas temperaturas. A Embrapa, em parceria com várias instituições de pesquisa locais e latino-americanas, vem desenvolvendo populações por seleção recorrente, visando extrair linhagens tolerantes a esse estresse, ao mesmo tempo em que busca identificar marcadores moleculares para acompanhar a introgressão de genes em cruzamentos com progenitores de ampla diversidade genética.

Em adição à disponibilidade de cultivares mais tolerantes ao frio, o conhecimento do risco de ocorrência de baixas temperaturas no período reprodutivo da cultura nas várias épocas de semeadura e para as várias microregiões do Estado do Rio Grande do Sul (Steinmetz & Braga, 2001), devidamente difundido e utilizado como mecanismo de crédito agrícola, pode minimizar em muito o problema.

Durante a estação normal de cultivo de arroz de terras altas nos Cerrados, que vai de outubro a abril, a temperatura média varia entre 23 e 25° C, enquanto as mínimas são raramente inferiores a 15° C ou as máximas superiores a 35° C, permitindo uma boa adaptabilidade à cultura. Contudo, temperaturas inferiores a 15° C são uma ocorrência normal nessa região no período de maio a julho, tornando-se um fator limitante à produção em determinadas situações, tais como cultivos tardios, que podem se fazer necessários em sistemas agrícolas sob irrigação suplementar.

Nas várzeas irrigadas da Região Norte, e em especial, do Estado do Tocantins, tem sido verificado que as altas temperaturas podem ocasionar esterilidade de espiguetas e quebras consideráveis de produtividade nas lavouras. De acordo com Santos et al. (2003), esse problema está mais relacionado com a alta temperatura da água de irrigação, que pode chegar até 50°C em determinadas horas do dia. A ausência de lâmina de água até a floração minimizou esse problema, propiciando maior produtividade de grãos. Sua ausência durante todo o ciclo também aumentou a produtividade, mas reduziu a qualidade dos grãos.

Deficiência Hídrica

Durante a abertura dos Cerrados, nas décadas de 70 e 80, a deficiência hídrica foi considerada como a maior limitação climática ao rendimento do arroz na região. Contudo, desde o início dos anos 90, este estresse abiótico vem perdendo importância, por dois fatores. O primeiro está relacionado com a gradativa ascensão da fronteira agrícola na direção sudeste-noroeste, para regiões naturalmente menos sujeitas a períodos de estiagem. O segundo diz respeito à regionalização agroclimática da



cultura. Utilizando modelos de simulação do balanço hídrico, foram elaborados mapas que indicam as microregiões favoráveis e o períodos adequados de plantio, de forma a evitar coincidência entre a fase crítica de sensibilidade da cultura, com o momento de maior probabilidade de seca. Esse trabalho, descrito em detalhe no Capítulo 5, permite nortear o crédito agrícola e reduzir as perdas de lavouras nos vários estados, servindo como um importante instrumento de regionalização da cultura, para o Ministério da Agricultura, da Pecuária e do Abastecimento.

A escolha das épocas de plantio mais adequadas, bem como a utilização de cultivares com ciclo apropriado, exerce um papel de destaque na minimização do risco por deficiência hídrica (Pinheiro et al., 2000a). De maneira geral, o período recomendado de plantio da cultura de arroz nos Cerrados vai da primeira semana de outubro à segunda semana de novembro. Cultivares de ciclo curto podem ter seu período de plantio ampliado de duas a três semanas em relação às de ciclo médio, sem incorrer em maior risco por seca. Por outro lado, plantios precoces podem sofrer prejuízos em determinados anos, devido à instalação tardia das chuvas.

Mas apesar desses avanços tecnológicos e da nova localização do cultivo, em áreas de menor risco climático, a deficiência hídrica tem voltado à agenda da pesquisa com prioridade, devido à maior sensibilidade à seca das novas cultivares de arroz de terras altas, em relação às cultivares tradicionais.

Efeito da deficiência hídrica

O efeito da deficiência hídrica depende da coincidência entre o seu período de ocorrência e o dos processos fisiológicos determinantes da produtividade, além da tolerância relativa da planta.

De forma geral, a deficiência hídrica não causa prejuízos muito severos à produção quando ocorre na fase vegetativa da planta de arroz (O'Toole & Chang, 1979; O'Toole & Moya, 1981; Reyniers et al., 1982). Dentre os períodos da fase reprodutiva, destacam-se como especialmente sensíveis o período de divisão e redução da célula-mãe do pólen (meiose) e o de florescimento (Matsushima, 1968). De acordo com Hsiao (1982), a acentuada sensibilidade do arroz na floração supera a dos demais cereais.

A deficiência hídrica interfere em todos os processos fisiológicos e, por isso mesmo, tem acentuado efeito sobre a produção de fitomassa e o rendimento de grãos. Sua intensidade pode ser estimada pela medição do potencial da água das folhas. Hsiao (1973) indica que a interferência nos diversos processos dá-se em diferentes níveis de



estresse, sendo o crescimento o mais sensível dentre todos os processos fisiológicos, enquanto a assimilação de CO_2 e a respiração um pouco menos sensíveis e, porquanto, afetados mais tardiamente em um ciclo de estresse (Tabela 7.8).

Tabela 7.8. Sensibilidade dos processos da planta à deficiência hídrica.

Processos ou Parâmetros afetados	MUITO SENSÍVEL	Valor de potencial da água requerido para afetar processos		MODERADAMENTE INSENSÍVEL
	0 MPa	1 MPa	2 MPa	
Crescimento da célula	-----			
Síntese da parede celular	-----			
Síntese de proteína	-----			
Formação de protoclorofila	-----			
Nível de redutase de nitrato	-----			
Acumulação de ácido abscísico	-----			
Nível de citocininas		-----		
Abertura estomática		-----		
Assimilação de CO_2		-----		
Respiração		-----		
Acumulação de prolina		-----		
Acumulação de fotoassimilados			-----	

Fonte: Hsiao (1973).

Em decorrência dessa sensibilidade diferencial dos processos, os diferentes sintomas vão, gradativamente, fazendo-se notar. Como a redução do crescimento é um sintoma menos óbvio, o primeiro sintoma observado visualmente é o enrolamento das folhas, inicialmente leve, mas com rápida progressão. Logo após, verifica-se o amarelecimento da folha, decorrente da inibição da síntese de proteínas e de formação de protoclorofila. Se a planta está no estágio vegetativo, os processos de perfilamento e de alongamento das folhas vão ser inibidos, em função do já citado efeito sobre o crescimento. Como resultado, a planta vai apresentar um baixo IAF, o que vai reduzir seu potencial produtivo, caso retornar a condições favoráveis (Pinheiro & Guimarães, 1990).

Machado et al. (1996), trabalhando com períodos curtos de deficiência hídrica, impostos durante a fase de floração e de crescimento linear dos grãos, observaram que, sob potencial da água na folha inferior a -1,75 MPa, a assimilação de CO_2 foi praticamente nula desde as primeiras horas da manhã em qualquer das fases. A transpiração atingiu apenas 10% da observada no controle irrigado e a condutância estomática foi inferior à $0,6 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-2}$, tendendo a um valor nulo sob alta irradiância.



Os estudos pioneiros de Farquhar & Richards (1984) e Farquhar et al. (1989), indicaram o potencial da discriminação isotópica de carbono (Δ) como um parâmetro de seleção no melhoramento para resistência à seca, devido a sua alta correlação com a eficiência de uso de água. Esta metodologia foi avaliada no Brasil, por Pinheiro et al. (2000b), em estudo financiado pela Comunidade Européia, que envolveu vários ensaios de campo e um grande número de genótipos, submetidos à deficiência hídrica na fase reprodutiva. A discriminação isotópica de carbono foi medida em várias frações da planta, incluindo os açúcares solúveis extraídos do último entrenó do colmo (Δ_s) (Tabela 7.9). Foi possível verificar o maior efeito da deficiência hídrica sobre essa amostra, do que sobre a matéria seca das folhas, dos grãos e dos entrenós superiores. Contudo, a relação do Δ_s com a fertilidade das espiguetas e a produtividade de grãos foi fraca, sugerindo que esse parâmetro não é um indicador seguro da resistência à seca em arroz para ser utilizado como ferramenta eficiente em programas de melhoramento. Estudos mais recentes, conduzidos no Japão (Zhao et al., 2004), sobre três cultivares submetidos a três regimes hídricos indicaram uma grande variação dos valores de Δ entre cultivares e estágios de crescimento. A relação do Δ com a eficiência de uso da água na fase reprodutiva também não foi consistente.

Tabela 7.9. Coeficientes de correlação linear simples entre características avaliadas no controle irrigado e nas parcelas submetidas à deficiência hídrica, em três experimentos de campo conduzidos na Embrapa Arroz e Feijão.

Características correlacionadas	1991		1992		1994		Média*	
	Controle irrigado	Estresse						
Prod x Δ_s	-0,162	-0,337	-0,548	-0,416	-0,111	-0,168	-0,273	-0,307
Prod x Δ_f	--	--	-0,089	-0,214	--	+0,182	--	--
Prod x Δ_e	-0,355	-0,212	--	--	-0,111	+0,041	--	--
Prod x Δ_g	-0,362	-0,393	-0,247	+0,207	-0,274	-0,108	-0,294	-0,098
Prod x Fert	+0,288	+0,491	+0,339	+0,842	+0,579	+0,811	+0,403	+0,715
Prod x Disf	-0,269	-0,271	-0,274	-0,541	+0,049	-0,330	-0,171	-0,380
Fert x Δ_s	-0,209	+0,222	-0,577	-0,482	+0,047	-0,040	-0,246	-0,100
Disf x Δ_s	-0,235	-0,520	+0,384	+0,084	-0,256	-0,318	-0,052	-0,251
GL	18	18	16	16	22	22	43	43
R	0,444	0,444	0,468	0,468	0,404	0,404	0,288	0,288

Δ_s = discriminação isotópica de carbono em açúcares solúveis extraídos do último entrenó do colmo, ao final do período de imposição do estresse hídrico; Δ_f = discriminação isotópica de carbono da folha-bandeira, ao final do período de imposição do estresse hídrico; Δ_e = discriminação isotópica do último entrenó do colmo e Δ_g = discriminação isotópica do grão, ambos na colheita; Disf= número de dias do início da imposição do estresse ao 50% do florescimento; Fert= fertilidade das espiguetas; GL= graus de liberdade; r= valor do coeficiente de correlação à 5% de probabilidade.

Fonte: Pinheiro et al. (2000b).



Em uma situação em que a camada de solo explorada é pequena, devido a impedimentos no perfil ou ao limitado desenvolvimento do sistema radicular, a planta muito rapidamente vai deprimir a reserva de água e entrar em déficit, comprometendo os processos fisiológicos básicos. Em condições de deficiência hídrica aplicada no período reprodutivo da cultura, observa-se uma forte relação positiva entre a produtividade e a densidade radicular na camada de 60 - 80 cm do perfil do solo (Pinheiro et al., 1996). De acordo com Guimarães & Moreira (2001), a planta de arroz é muito sensível à compactação do solo. Por essa razão, a sensibilidade da cultura a seca, pode ser agravada sob o sistema de plantio direto, que geralmente resulta em compactação subsuperficial, limitando o crescimento inicial da cultura e consequentemente o aprofundamento do sistema radicular.

De acordo com os estudos de Pinheiro (1989), na fase reprodutiva da cultura a inibição da emissão das panículas é um sintoma característico de deficiência hídrica, resultando em panículas mal expostas, ou mesmo não emitidas; um outro sintoma é o dessecamento parcial ou total das espiguetas. Juntamente com a inibição da antese, esses sintomas resultam em alta esterilidade de espiguetas. Assim, a fertilidade de espiguetas é o componente que melhor se relaciona à produtividade de grãos, sob condições de deficiência hídrica na fase reprodutiva (Pinheiro et al., 1985, 2000b; Lafitte, 2002).

Lafitte & Courtois (2002), testaram 45 cultivares em uma série de ensaios de campo, com o objetivo de estimar a interação genótipo x ambiente para várias características tidas como relevantes em condições de deficiência hídrica. Observaram grande variação entre produtividades entre ambientes. As características que melhor se relacionaram aos escores da interação cultivar x ambiente foram a data do florescimento, o conteúdo relativo de água da folha, a pressão de raiz, a área foliar e a profundidade radicular. Pinheiro (2003), descreveu a metodologia utilizada na Embrapa Arroz e Feijão para subsidiar o programa de melhoramento, bem como as dificuldades encontradas nesse tipo de trabalho.

A maioria das cultivares de tipo de planta tradicional, do grupo *Japonica* tropical, recomendadas para o sistema de cultivo de sequeiro nas décadas de 80 e 90 possuem moderada tolerância à seca; por sua vez, as primeiras cultivares de terras altas, derivativos do grupo *Indica* e *Japonica* tropical, apresentam menor tolerância à seca do que as tradicionais (Pinheiro et al., 2000a, Pinheiro, 2003).

Para ilustrar o efeito da deficiência hídrica sobre a produtividade, apresentados na Tabela 7.10, os resultados do ensaio de avaliação final da tolerância à seca do ano agrícola 1998/1999. O experimento foi instalado sob delineamento de blocos ao caso e parcela subdividida, com dois tratamentos



(controle irrigado e deficiência hídrica) e 24 genótipos, em subparcelas, semeados de forma escalonada, visando sincronia do ciclo reprodutivo, condição essencial à uma adequada avaliação. Essa sincronia, contudo, não foi plenamente atingida, conforme pode ser observado pela variação no número de dias decorridos desde a data de início do ciclo de deficiência hídrica, até a data de 50% do florescimento. A estiagem que durou 14 dias durante o florescimento e início do enchimento de grãos, período muito crítico da cultura, resultou em deficiência hídrica de alta intensidade. Os tratamentos foram analisados como experimentos independentes, sendo a quebra de produtividade (QP) calculada pela relação: $QP = 1 - (\text{produtividade sob estresse} / \text{produtividade sob suplementação hídrica})$.

Tabela 7.10. Desempenho de linhas avançadas, cultivares de arroz de tipo de planta tradicional e tipo de planta moderna, sob irrigação suplementar ou deficiência hídrica durante o florescimento e início do enchimento de grãos. Embrapa Arroz e Feijão, Ensaio de Avaliação Final da Tolerância à Seca 1998/1999.

Genótipo	Grupo de semeadura ⁽¹⁾	Produtividade (kg ha ⁻¹)		DISF ⁽²⁾	Quebra de produtividade
		Controle irrigado	Deficiência hídrica		
CNA8553	G1	3450,4ab	405,0a	6,8	0,8910ab
CNA8561	G1	5473,3a	455,4a	7,0	0,9197a
CNA8564	G1	4179,4ab	1697,2a	4,8	0,6065abc
Canastra	G1	3319,1ab	1890,0a	12,5	0,4381c
Maravilha	G1	5230,9a	1089,9a	13,5	0,7964abc
Caiapó	G1	4821,0ab	1179,6a	7,3	0,7903abc
CNA8305	G2	3587,7ab	1310,4a	9,0	0,638abc
CNA8436	G2	3344,4ab	1257,8a	8,0	0,645abc
CNA8540	G2	3253,5ab	834,6a	8,0	0,7275abc
CNA8541	G2	3356,0ab	1153,1a	9,0	0,6319abc
CNA8545	G2	3795,6ab	841,3a	14,0	0,7871abc
CNA8548	G2	4178,9ab	1313,6a	10,3	0,6862abc
CNA8552	G2	3919,3ab	425,3a	7,3	0,8973ab
CNA8557	G2	4102,3ab	1103,3a	11,5	0,7284abc
R. Paranaíba	G2	3696,9ab	1586,5a	13,8	0,5680abc
CNA8177	G3	3453,0ab	860,7a	11,0	0,748abc
CNA8536	G3	3608,6ab	1657,0a	15,3	0,5762abc
CNA8435	G4	3198,1ab	2039,6a	8,0	0,5465abc
BRS Primavera	G4	4223,2ab	675,5a	8,8	0,8400ab
Carajás	G4	4217,8ab	1038,2a	12,8	0,7532abc
Guarani	G4	2664,1b	1225,3a	10,5	0,5401bc

Médias nas colunas seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tuckey à 5% de probabilidade.

⁽¹⁾Grupo 1: cultivares mais tardias, semeadura em 27/01/1998; grupo 2: 03/02/1998; grupo 3: 10/02/1998; grupo 4, cultivares mais precoces, 17/02/1998.

⁽²⁾DISF: número de dias do início do ciclo de deficiência hídrica até 50% do florescimento.



O alto coeficiente de variação, comum em ensaios de deficiência hídrica, associado à alta intensidade da deficiência hídrica, não permitiu detectar diferenças significativas para a produtividade ou para a quebra induzida por seca entre a maioria das entradas. Contudo, as cultivares Guarani, de ciclo curto, e Canastra, de ciclo médio, apresentaram um desempenho superior às entradas do seu grupo de semeadura, incluindo a testemunha de ciclo médio Rio Paranaíba.

Graças aos avanços da biotecnologia, a linha de pesquisa em resistência à seca que estava reduzida pela falta de avanços expressivos, voltou reforçada à agenda. A identificação de regiões do genoma que contribuem para a resposta à seca pode subsidiar o melhorista no desenvolvimento de cultivares mais resistentes. Vários QTLs já foram mapeados (Champoux et al., 1995; Courtois et al., 2000; Kamoshita et al., 2002; Babu et al., 2003; Lanceras et al., 2004), permitindo que marcadores moleculares sejam efetivamente utilizados em programas de melhoramento na seleção assistida.

Da mesma forma, técnicas de transformação genética começam a ser empregadas para obter genótipos com maior tolerância à seca. A introdução de genes da bactéria *Escherichia coli* para biossíntese de trehalose, um açúcar não redutor que atua na estabilização de estruturas biológicas, sob condições de estresse, apresentou resultados muito promissores. As plantas transformadas acumularam de 3 a 10 vezes mais trehalose e foram mais resistentes à seca e salinidade (Garg et al., 2002).

Esse novo panorama, potencializado pelo esforço concentrado dos centros internacionais de pesquisa do CGIAR, em estreita parceria com os programas nacionais, sob a égide dos "Challenge Programs", certamente deverá prover avanços substanciais no que se refere ao aumento da resistência à seca da cultura do arroz. Ressalta-se, contudo que a utilização de cultivares menos sensíveis à seca, por si só, não é uma salvaguarda às perdas de produtividade. A resposta da cultura vai depender não só do relativo balanço entre sua área foliar e sistema radicular, como também da integração entre os processos de retirada de água do solo e sua perda para a atmosfera. Portanto, seu comportamento é modulado pelo clima, ambiente e manejo, os quais desempenham um papel tão importante quanto as características genotípicas no seu desempenho agrônomo.

Assim, além da escolha criteriosa da época de semeadura e do ciclo da cultivar, com base no zoneamento agroclimático da microregião



de cultivo (Steinmetz et al., 1988; Silva et al., 1997), que desempenham papel fundamental na minimização do risco por deficiência hídrica, os cuidados no manejo da cultura, incluindo o preparo profundo do solo, adubação balanceada e adequada densidade de semeadura, propiciam maior aprofundamento do sistema radicular e maior disponibilidade de água para as plantas (Embrapa, 1992; Pinheiro et al., 2000a).

REFERÊNCIAS

- AKITA, S. Aspectos ecofisiológicos relacionados ao aumento do potencial de rendimento biológico e comercial da cultura do arroz (*Oryza sativa* L.). In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE ARROZ PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE 9.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 9., 1994, Goiânia. **Arroz na América Latina**: perspectivas para o incremento da produção e do potencial produtivo. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1995. v. 1, p. 57-76. (EMBRAPA-CNPAP Documentos, 60).
- AKITA, S. Improving yield potential in tropical rice. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH CONFERENCE, 1987, Hangzhou, China. **Progress in irrigated rice research**. Manila: IRRI. 1989. p. 41-73.
- AKITA, S.; PARAO, F. T.; LAZA, R. C.; BLANCO, L. C.; CORONEL, V. P. Physiological basis of rice yield potential improvements in the tropics. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF PLANT PHYSIOLOGY, 1988, New Delhi, India. **Proceedings...** New Delhi: Society of Plant Physiology and Biochemistry, 1990. v. 1, p. 60-74.
- ARF, O.; RODRIGUES, R. A. F.; SÁ, M. E.; CRUSCIOL, C. A. C. Resposta de cultivares de arroz de sequeiro ao preparo do solo e à irrigação por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, DF, v. 36, n. 6, p. 871-879, jun. 2001.
- AUSTIN, R. B. Plant breeding opportunities. In: BOOTE, K. J.; BENNETT, J. M.; SINCLAIR, T. R.; PAULSEN, G. M. (Ed.). **Physiology and determination of crop yields**. Madison: American Society of Agronomy, 1994. p. 567-586.
- AUSTIN, R. B.; FORD, M. A.; MORGAN, C. L.; YEOMAN, D. Old and modern wheat cultivars compared on the broadbalk wheat experiment. **European Journal of Agronomy**, v. 2, p. 141-147, 1993.
- BABU, R. C.; NGUYEN, B. D.; CHAMARERK, V.; SHANMUGASUNDARAM, P.; CHEZHIAN, P.; JEYAPRAKASH, P.; GANESH, S. K.; PALCHAMY, A.; SADASIVAM, S.; SARKARUNG, S.; WADE, L. J.; NGUYEN, H. T. Genetic analysis of drought resistance in rice by molecular markers: association between secondary traits and field performance. **Crop Science**, Madison, v. 43, n. 4, p. 1457-1469, July/Aug. 2003.
- BEACHELL, H. M.; JENNINGS, P. R. Need for modification of plant type. In: IRRI. **The mineral nutrition of the rice plant**. Baltimore: Johns Hopkins, 1965. p. 29-35.
- BOYER, J.; McPHERSON, H. G. Physiology of water deficits in cereal grains. In: IRRI. **Climate and rice**. Los Baños, 1976. p. 321-343.
- BRONDANI, C.; BRONDANI, R. P. V.; RANGEL, P. H. N.; FERREIRA, M. E. Development and mapping of *Oryza glumaepatula*-derived microsatellite markers in the interspecific cross of *O. glumaepatula* x *O. sativa*. **Hereditas**, Lund, v. 134, n. 1, p. 59-71, 2001.



BRONDANI, C.; RANGEL, P. H. N.; FERREIRA, M. E. QTL mapping and introgression of yield related traits from *Oryza glumaepatula* to *O. sativa* using microsatellite markers. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 104, n. 6/7, p. 1192-1203, May 2002.

CARMONA, P. S.; TERRES, A. L.; SCHIOCCHET, M. Avaliação crítica dos projetos do PNP-Arroz na área de melhoramento genético, no período de 1980 a 1990: Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. **A pesquisa de arroz no Brasil nos anos 80: avaliação crítica dos principais resultados**. Goiânia, 1994. p. 269-275. (EMBRAPA-CNPAF Documentos, 40).

CHAMPOUX, M. C.; WANG, G.; SARKARUNG, S.; MACKILL, D. J.; O'TOOLE, J. C.; HUANG, N.; MCCOUCH, S.R. Locating genes associated with root morphology and drought avoidance in rice via linkage to RFLP markers. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 90, n. 7/8, p. 969-981, June 1995.

CHANDRARATNA, M. F. **Genetics and breeding of rice**. London: Longmans, 1964. 389 p.

CHANG, T. T. The origin, evolution, cultivation, dissemination, and diversification of Asian and African rices. **Euphytica**, Dordrecht, v. 25, n. 2, p. 425-441, June 1976.

CHANG, T. T.; BARDENAS, E. A. **The morphology and varietal characteristics of the rice plant**. Los Baños: IRRI, 1965. 40 p. (IRRI. Technical Bulletin, 4).

COCK, J. H.; YOSHIDA, S. Accumulation of ¹⁴C labelled carbohydrate before flowering and its subsequent redistribution and respiration in the rice plant. **Proceedings of the Crop Science Society of Japan**, Tokyo, v. 41, n. 2, p. 226-234, June 1972.

COCK, J. H.; YOSHIDA, S. Photosynthesis, crop growth and respiration of a tall and short rice varieties. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 19, n. 1, p. 53-59, Mar. 1973.

COUNCE, P. A.; KEISLING, T. C.; MITCHELL, A. J. A uniform, objective, and adaptative system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v. 40, n. 2, p. 436-443, Mar./Apr. 2000.

COURTOIS, B.; MCLAREN, G.; SINHA, P. K.; PRASAD, K.; YADAV, R.; SHEN, L. Mapping QTLs associated with drought avoidance in upland rice. **Molecular Breeding**, Dordrecht, v. 6, n. 1, p. 56-66, Feb. 2000.

CRONQUIST, A. **The evolution and classification of flowering plants**. 2. ed. Bronx: The New York Botanical Garden, 1988. 555 p.

DEFOER, T.; WOPEREIS, M. C. S.; JONES, M. P.; LANÇON, F.; EREINSTEIN, O.; GUEI, R. Q. Rice-based production systems for food security and poverty alleviation in Sub-Saharan Africa. **International Rice Commission Newsletter**, Rome, v. 53 p. 85-96, 2004. Edição especial.

DINGKUHN, M.; PENNING DE VRIES, F. W.; DE DATTA, S. K.; VAN LAAR, H. H. Concepts for a new plant type for direct seeded flooded tropical rice. In: IRRI. **Direct seeded flooded rice in the tropics**. Los Baños, 1991. p. 17-38.

DONALD, C. M. The breeding of crop ideotypes. **Euphytica**, Dordrecht, v. 17, n. 3, p. 385-403, Dec. 1968.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão. **Relatório científico**. Goiânia, 1984. p. 100-113.

EMBRAPA. Serviço de Produção de Informação. **Recomendações técnicas para o arroz em regiões com deficiência hídrica: zonas 10, 16, 19, 20, 58, 59, 60, 61 e 91**. Brasília, DF, 1992. 130 p.



EVANS, L. T.; VISPERAS, R. M.; VERGARA, B. S. Morphological and physiological changes among rice varieties used in the Philippines over the last seventy years. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 8, n. 1/2, p. 105-124, Feb. 1984.

FAGERIA, N. K. **Adução e nutrição mineral da cultura de arroz**. Rio de Janeiro: Campus; Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1984. 341 p.

FAGERIA, N. K. **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas**. Brasília, DF: EMBRAPA-DPU, 1989. 425 p. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 18).

FARQUHAR, G. D.; RICHARDS, R. A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v. 11, n. 6, p. 539-552, 1984.

FARQUHAR, G. D.; EHLERINGER, J. R.; HUBICK, K. T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 40, p. 503-537, 1989.

FERNANDEZ, F.; VERGARA, B. S.; YAPIT, N.; GARCIA, O. Crecimiento y etapas de desarrollo de la planta de arroz. In: TASCÓN J., E.; GARCIA D., E. (Ed.). **Arroz: investigación y producción**. Cali: CIAT, 1985. p. 83-101.

FERRAZ, E. C. Ecofisiologia do arroz. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: POTAFOS, 1987. p. 186-202.

GARG, A. K.; KIM, J. K.; OWENS, T. G.; RANWALA, A. P.; CHOI, Y. D.; KOCHIAN, L. V.; WU, R. J. Trehalose accumulation in rice plants confers high tolerance levels to different abiotic stresses. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 99, n. 25, p. 15898-15903, Dec. 2002.

GLASZMANN, J. C. Geographic pattern of variation among Asian native rice cultivars (*Oryza sativa* L.) based on fifteen isozyme loci. **Genome**, Ottawa, v.30, n. 5, p. 782-792, Oct. 1988.

GLASZMANN, J. C. Isozymes and classification of Asian rice varieties. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 74, n. 1, p. 21-30, 1987.

GLASZMANN, J. C.; BENOIT, H.; ARNAUD, M. Classification des riz cultivés (*Oryza sativa* L.) Utilisation de la variabilité isoenzymatique. **Agronomie Tropicale**, Paris, v. 39, n. 1, p. 51-66, jan./mars 1984.

GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 4, p. 703-707, abr. 2001.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; SILVA, F. X. **Cultivares de arroz de terras altas com arquitetura moderna: crescimento e eficiência produtiva**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. 4 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Comunicado Técnico, 61).

HSIAO, T. C. Plant responses to water stress. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 24, p. 519-570, 1973.

HSIAO, T. C. The soil-plant-atmosphere continuum in relation to drought and crop production. In: IRRI. **Drought resistance in crops with emphasis on rice**. Los Baños, 1982. p. 39-52.

ISHIZUKA, Y. Physiology of the rice plant. **Advances in Agronomy**, New York, v. 23, p. 241-315, 1971.

JACQUOT, M.; ARNAUD, M. Classification numérique de variétés de riz. **Agronomie Tropicale**, Paris, v.34, n. 2, 157-173, avr./juin. 1979.



JENNINGS, P. R. Plant type as a rice breeding objective. **Crop Science**, Madison, v. 4, n. 1, p. 13-15, Jan./Feb. 1964.

KAMOSHITA, A.; WADE, L. J.; ALI, M. L.; ZHANG, K.; SARKARUNG, S.; NGUYEN, H. Mapping QTLs for root morphology of a rice population adapted to rainfed conditions. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 104, n. 5, p. 880-893, Apr. 2002.

KHUSH, G. S. Aumento do potencial genético de rendimento do arroz: perspectivas e métodos. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE ARROZ PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE 9.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 9., 1994, Goiânia. **Arroz na América Latina**: perspectivas para o incremento da produção e do potencial produtivo. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1995. v. 1, p. 13-29. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 60).

KHUSH, G. S. Rice. In: KING, R. C. (Ed.). **Handbook of genetics**. New York: Plenum, 1974. v. 2, p. 31-58.

LAFITTE, R. Relationship between leaf relative water content during reproductive stage water deficit and grain formation in rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 76, n. 2/3, p. 165-174, July 2002.

LAFITTE, H. R.; COURTOIS, B. Interpreting cultivar x environment interactions for yield in upland rice: assigning value to drought-adaptive traits. **Crop Science**, Madison, v. 42, n. 5, p. 1409-1420, Sept./Oct. 2002.

LANCERAS, J. C.; PANTUWAN, G.; JONGDEE, B.; TOOJINDA, T. Quantitative trait loci associated with drought tolerance at reproductive stage in rice. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 135, n. 1, p. 384-399, May 2004.

LAZA, M. R. C.; PENG, S.; AKITA, S.; SAKA, H. Contribution of biomass partitioning and translocation to grain yield under sub-optimum growing conditions in irrigated rice. **Plant Production Science**, Tokyo, v. 6, n. 1, p. 28-35, 2003.

LIN, S. S.; PETERSON, M. L. Low-temperature induced floret sterility in rice. **Crop Science**, Madison, v. 15, n. 5, p. 657-660, Sept./Oct. 1975.

LOOMIS, R. S.; WILLIAMS, W. A. Maximum crop productivity: an estimate. **Crop Science**, Madison, v. 3, n. 1, p. 67-72, Jan./Feb. 1963.

MACHADO, E. C.; LAGÔA, A. M. M. A.; AZZINI, L. E.; TISSELLI FILHO, O. Trocas gasosas e relações hídricas em dois cultivares de arroz de sequeiro submetidos à deficiência hídrica, em diferentes fases de crescimento. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Brasília, DF, v. 8, n. 2, p. 139-147, ago. 1996.

MACHADO, E. C.; SILVEIRA, J. A. G. da; BASTOS, C. R. Trocas de CO₂, acúmulo de fitomassa e remobilização de reservas durante o crescimento de panículas de duas cultivares de arroz. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Brasília, DF, v. 2, n. 1, p. 63-70, 1990.

MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. **Science of the rice plant**: physiology. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. v.2, 1240 p.

MATSUSHIMA, S. Water and physiology of *Indica* rice. **Proceedings of the Crop Science Society of Japan**, Tokyo, p. 102-109, Mar. 1968. Edição especial.

MATSUSHIMA, S. **Crop science in rice**: theory of yield determination and its application. Tokyo: Fuji, 1975. 379 p.



- MURATA, Y.; MATSUSHIMA, S. Rice. In: EVANS, L.T. (Ed.). **Crop physiology**. Cambridge: Cambridge University Press, 1975. p. 73-99.
- MURAYAMA, N. Development and senescence. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. v. 2, p. 119-178.
- NI, J.; COLOWIT, P.M.; MACKILL, D. J. Evaluation of genetic diversity in rice subspecies using microsatellite markers. **Crop Science**, Madison, v. 42, n. 2, p. 601-607, Mar./Apr. 2002.
- O'TOOLE, J. C.; CHANG, T. T. Drought resistance in cereals - rice: a case study. In: MUSSELL, H.; STAPLES, R. C. (Ed.). **Stress physiology in crop plants**. New York: Wiley Interscience, 1979. p. 373-405.
- O'TOOLE, J. C.; MOYA, T. B. Water deficits and yield in upland rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 4, n. 3, p. 247-259, Oct. 1981.
- PENG, S.; CASSMAN, K. G.; VIRMANI, S. S.; SHEEHY, J.; KHUSH, G. S. Yield potential trends of tropical rice since the release of IR8 and the challenge of increasing rice yield potential. **Crop Science**, Madison, v. 39, n. 6, p.1552-1559, Nov./Dec. 1999.
- PENNING DE VRIES, F. W. T.; SPITTERS, C. J. T. The potential for improvement in crop yield simulation. In: MUCHOW, R. C.; BELLAMY, J. A. (Ed.). **Climatic risk in crop production**. Brisbane: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1990. p. 123-140.
- PENNING DE VRIES, F. W. T.; JANSEN, D. M.; TEN BERGE, H. F. M.; BAKEMA, A. **Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual plants**. Wageningen: PUDOC, 1989. 271 p. (PUDOC. Simulation Monograph, 29).
- PENNING DE VRIES, F. W. T.; KROPFF, M. J.; TENG, P. S.; KIRK, G. J. D. **Systems simulation at IRRI**. Los Baños: IRRI, 1991. 67 p. (IRRI. Research Paper Series, 151).
- PENNING DE VRIES, F. W. T.; VAN LAAR, H. H.; CHARDON, M. C. M. Bioenergetics of growth of seeds, fruits and storage organs. In: IRRI. **Potential production of crops different environments**. Los Baños, 1983. p. 35-79.
- PINHEIRO, B. da S. **Estudo das relações hídricas durante o processo de emissão de panículas e antese do arroz de sequeiro (*Oryza sativa* L.)**. 1989. 176 f. Tese (Doutor em Biologia Vegetal) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- PINHEIRO, B. S. Integrating selection for drought into a breeding program: the Brazilian experience. In: FISHER, K. S.; LAFITTE, R.; FUKAI, S.; ATLIN, G.; HARDY, B. (Ed.). **Breeding rice for drought prone environments**. Los Baños: IRRI, 2003. p. 75-83.
- PINHEIRO, B. da S.; GUIMARÃES, E. P. Índice de área foliar e produtividade do arroz de sequeiro. 1. níveis limitantes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 25, n. 6, p. 863-872, jun. 1990.
- PINHEIRO, B. da S.; KONRAD, M. L. de F.; CARMO, M. P. do; VILELA, C. da C. Componentes fisiológicos da interferência de *Brachiaria brizantha* sobre genótipos de arroz em cultivo consorciado. In: REUNIAO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 6., 1998, Goiânia. **Perspectivas para a cultura do arroz nos ecossistemas de várzeas e terras altas**: resumos expandidos. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1998. v. 1, p. 153-156. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 85).



PINHEIRO, B. da S.; MARTINS, J. F. da S.; ZIMMERMANN, F. J. P. Índice de área foliar e produtividade do arroz de sequeiro. 2. manifestação através dos componentes da produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 25, n. 6, p. 873-879, jun. 1990.

PINHEIRO, B. da S.; RAISSAC, M. de; CARMO, M. P. do; FERREIRA JUNIOR, E. Atributos de resistência à seca da cultivar de arroz Rio Paranaíba e de seus progenitores. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE ARROZ PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE, 9.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 9., 1994, Goiânia. **Arroz na América Latina**: perspectivas para o incremento da produção e do potencial produtivo. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1996. v. 1, p. 119. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 62).

PINHEIRO, B. da S.; STEINMETZ, S.; STONE, L. F.; GUIMARÃES, E. P. Tipo de planta, regime hídrico e produtividade do arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 20, n. 1, p. 87-95, jan. 1985.

PINHEIRO, B. da S.; STONE, L. F.; SILVA, S. C. da. **Minimização do risco por deficiência hídrica em arroz de sequeiro na região dos cerrados**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2000a. 39 p. (Embrapa Arroz e Feijão. Circular Técnica, 36).

PINHEIRO, B. S.; AUSTIN, R. B.; CARMO, M. P.; HALL, M. A. Carbon isotope discrimination and yield of upland rice as affected by drought at flowering. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 10, p. 1939-1947, out. 2000b.

RAISSAC, M. de. L'utilización des carbohydrates de réserve et son incidence sur la production chez le riz. **Agronomie Tropicale**, Paris, v. 46, n. 2, p. 97-105, 1992.

RASMUSSEN, D. C. An evaluation of ideotype breeding. **Crop Science**, Madison, v. 27, n. 6, p. 1140-1146, Nov./Dec. 1987.

REYNIERS, F. N.; TRUONG-BINH; JACQUINOT, L.; NICOU, R. Breeding for drought resistance in dryland rice. In: IRRI. **Drought resistance in crops with emphasis on rice**. Los Baños, 1982. p. 273-292.

RODRIGUES, R. A. F.; ARF, O. Manejo de água em cultivares de arroz de terras altas. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1.; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 7., 2002, Florianópolis. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 365-368. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 134).

SANINT, L. R. New rice technologies for Latin America: social benefits, past reminiscences and issues for the future. In: CIAT. **Trends in CIAT commodities 1992**. Cali, 1992. p. 1-35. (CIAT. Working Document, 111).

SANTOS, A. B. dos; SILVA, S. C. da; ZIMMERMANN, F. J. P. Efeitos do manejo da irrigação na temperatura da água e no comportamento do arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ARROZ IRRIGADO, 3.; REUNIÃO DA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO, 25.; 2003, Balneário Camboriú. **Anais...** Itajaí: EPAGRI, 2003. p. 181-183.

SCHNIER, H. F.; DINGKUHN, M.; DE DATTA, S. K.; MENGEL, K.; FARONILO, J. E. Nitrogen fertilization of direct-seeded flooded vs. transplanted rice: I. nitrogen uptake, photosynthesis, growth, and yield. **Crop Science**, Madison, v. 30, n.6, p. 1276-1284, Nov./Dec. 1990.



SHEEHY, J. E.; DIONORA, M. J. A.; MITCHELL, P. L. Spikelet numbers, sink size and potential yield in rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 71, n. 2, p. 77- 85, June 2001.

SILVA, S. C. da; MEIRELES, E. J. V.; ASSAD, E. D.; XAVIER, L. de S.; CUNHA, M. A. C. da. **Caracterização do risco climático para a cultura do arroz de terras altas no Estado de Mato Grosso**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1997. 18 p. (EMBRAPA-CNPAP Documentos, 76).

SORATTO, R. P.; RODRIGUES, R. A. F.; ARF, O. Manejo de água em cultivares de arroz irrigados por aspersão no sistema de plantio direto. In: CONGRESSO DA CADEIA PRODUTIVA DE ARROZ, 1., REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE ARROZ, 7., 2002, Florianópolis. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. p. 369-372. (Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 134).

STEINMETZ, S.; BRAGA, H. J. Zoneamento de arroz irrigado por épocas de semeadura nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, p. 429-438, dez. 2001. Número especial.

STEINMETZ, S.; REYNIERS, F. N.; FOREST, F. **Caracterização do regime pluviométrico e do balanço hídrico do arroz de sequeiro em distintas regiões produtoras do Brasil: síntese e interpretação dos resultados**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1988. 66 p. (EMBRAPA-CNPAP Documentos, 23).

STONE, L. F.; PEREIRA, A. L. Sucessão arroz-feijão irrigados por aspersão: efeitos do espaçamento entre linhas, adubação e cultivar no crescimento, desenvolvimento radicular e consumo de água do arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 29, n. 10, p. 1577-1592, out. 1994a.

STONE, L. F.; PEREIRA, A. L. Sucessão arroz-feijão irrigados por aspersão: efeitos do espaçamento entre linhas, adubação e cultivar na produtividade e nutrição do arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 29, n. 11, p. 1701-1713, nov. 1994b.

STONE, L. F.; SILVA, J. G. Resposta do arroz de sequeiro à profundidade de aração, adubação nitrogenada e condições hídricas do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 33, n. 6, p. 891-897, jun. 1998.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da; MOREIRA, J. A. A.; YOKOYAMA, L. P. Adubação nitrogenada em arroz sob irrigação suplementar por aspersão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 34, n. 6, p. 927-932, jun. 1999.

TANAKA, A.; NAVASERO, S. A.; GARCIA, C. V.; PARAO, F. T.; RAMIREZ, E. **Growth habit of the rice plant in the tropics and its effects on nitrogen response**. Los Baños: IRRI, 1964. 80 p. (IRRI. Technical Bulletin, 3).

TERRES, A. L.; GALLI, J. Efeitos do frio em cultivares de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária de Terras Baixas e Clima Temperado. **Fundamentos para a cultura do arroz irrigado**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 83-94.

VENKATESWARLU, B.; PARAO, F. T.; VERGARA, B. S. Occurrence of good and high density grains on rice panicles. **SABRAO Journal**, Tokyo, v. 19, p. 1-6, 1987.

VENKATESWARLU, B.; VERGARA, B. S.; PARAO, F. T.; VISPERAS, R. M. Enhanced grain yield potentials in rice by increasing the number of high density grains. **Philippine Journal of Crop Science**, Manila, v. 11, p. 151-152, 1986.



VERGARA, B. S. Plant growth and development. In: UNIVERSITY OF THE PHILIPPINES. **Rice production manual**. Laguna, 1970. p. 17-37.

VERGARA, B. S.; CHANG, T. T.; LILIS, R. **The flowering response of the rice plant to photoperiod**: a review of literature. Los Baños: IRRI, 1969. 75 p.

VERGARA, B. S.; TANAKA, A.; LILIS, R.; PURANABHAVUNG, S. Relationship between growth duration and grain yield of rice plants. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 12, n. 1, p. 31-39, 1966.

VERGARA, B. S.; VENKATESWARLU, B.; JANORIA, M.; ANH, J. K.; KIM, J. K.; VISPERAS, R. M. Rationale for a low-tillering rice plant type: concepts for a new plant type for direct seeded flooded tropical rice. In: IRRI. **Direct seeded flooded rice in the tropics**. Los Baños, 1991. p. 39-53.

WATSON, D. J. The physiological basis of variation in yield. **Advances in Agronomy**, New York, v. 4, p. 101-145, 1952.

XIAO, J.; GRANDILLO, S.; AHN, S. N.; MCCOUCH, S. R.; TANKSLEY, S. D.; LIN, J. M.; YUAN, L. P. Genes from wild rice improve yield. **Nature**, London, v. 384, n. 6606, p. 223-224, Nov. 1996.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop science**. Los Baños: IRRI, 1981. 269 p.

YOSHIDA, S. Physiological aspects of grain yield. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 23, p. 437-464, 1972.

YOSHIDA, S. Rice. In: IRRI. **Potential productivity of field crops under different environments**. Los Baños, 1983. p. 103-127.

YOSHIDA, S.; ANH, S. B. The accumulation process of carbohydrate in rice varieties in relation to their response to nitrogen in the tropics. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 14, p. 153-162, 1968.

YOSHIDA, S.; HASEGAWA, S. The rice root system: its development and function. In: IRRI. **Drought resistance in crops with emphasis on rice**. Los Baños, 1982. p. 97-114.

YOSHIDA, S.; PARAO, F. T. Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. In: IRRI. **Climate and rice**. Los Baños, 1976. p. 471-494.

YOSHIDA, S.; SATAKE, T.; MACKILL, D. S. **High temperature stress in rice**. Los Baños: IRRI, 1981. 15 p. (IRRI. Research Paper Series, 67).

ZHAO, B. Z.; KONDO, M.; MAEDA, M.; OZAKI, Y.; ZHANG, J. B. Water-use efficiency and carbon isotope discrimination in two cultivars of upland rice during different developmental stages under three water regimes. **Plant and Soil**, The Hague, v. 261, n. 1/2, p. 61-75, Apr. 2004.

ZHIKANG, L.; PATERSON, A. H.; PINSON, S. R. M.; STANSEL, J. W.; LI, Z. K. RFLP facilitated analysis of tiller and leaf angles in rice (*Oryza sativa* L.). **Euphytica**, Wageningen, v. 109, n. 2, p. 79-84, Jan. 1999.

