**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE EXTRAÇÃO DA ÁGUA
DO SOLO PELO ARROZ DE SEQUEIRO (*Oryza sativa* L.)
SOB DIFERENTES DOSES DE NITROGÊNIO**

JOSÉ HOLANDA CAMPELO JÚNIOR

Orientador : NILSON A. VILLA NOVA

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do Título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Maio de 1985

À minha mãe
ZULEIDE

À minha esposa
MARIA HELENA

e às minhas filhas
LUCIANA e MÔNICA

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Nilson Augusto Villa Nova, a orientação recebida;
- Ao Professor Ronaldo Ivan Silveira, as sugestões referentes aos aspectos de fertilidade do solo;
- Ao Professor Luiz Roberto Angelocci, as sugestões para a redação do trabalho;
- Ao Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", os ensinamentos
- Ao Departamento de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Mato Grosso, a oportunidade de afastamento para realização do Curso de Doutorado;
- Ao MEC/SESU/CAPES - PICD, pelo suporte financeiro;
- Aos colegas Lourival Ferreira Cavalcante e Dilson Augusto Capucho Frazão, pelo auxílio nas determinações experimentais;
- A todos os professores e colegas dos Cursos de Solos e Nutrição de Plantas e de Agrometeorologia, pelo companheirismo.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	vi
SUMMARY	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Deficiência hídrica	4
2.1.1. Solo	4
2.1.2. Planta	8
2.1.3. Atmosfera	11
2.1.4. O sistema solo-planta-atmosfera ...	13
2.2. Efeito da deficiência hídrica	18
2.3. Efeito do nitrogênio	23
3. MATERIAL E MÉTODO	27
3.1. Caracterização geral	27
3.2. Determinação da CAD	31
3.3. Medições utilizadas na comparação dos tra-	
tamentos	33
3.3.1. Altura das plantas	33
3.3.2. Número de perfilhos	34
3.3.3. Evapotranspiração	34
3.3.4. Água disponível residual durante o	
período crítico	34
3.3.5. Matéria seca total da parte aérea e	
dos grãos	34
3.3.6. Componentes da produção	35
3.3.7. Índice de colheita	35
3.3.8. Eficiência de uso da água	35

	Página
3.4. Aeração	36
3.5. Fundamentos teóricos	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1. Altura das plantas e perfilhamento	50
4.2. Evapotranspiração	57
4.2.1. No ciclo	57
4.2.2. Durante período crítico	59
4.2.3. Após o período crítico	65
4.3. O modelo matemático	67
4.4. Aeração	84
4.5. Produção de matéria seca	86
4.5.1. Matéria seca total da parte aérea .	86
4.5.2. Produção de grãos	91
4.5.3. Componentes da produção	93
4.5.4. Índice de colheita	97
4.6. Eficiência de uso da água	100
5. CONCLUSÕES	105
6. LITERATURA CITADA	108
APÊNDICE	119

**AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE EXTRAÇÃO DA ÁGUA DO SOLO PELO
ARROZ DE SEQUEIRO (*Oryza sativa* L.) SOB DIFERENTES
DOSES DE NITROGÊNIO**

Autor: JOSÉ HOLANDA CAMPELO JÚNIOR

Orientador: NILSON A. VILLA NOVA

RESUMO

No presente trabalho estudou-se o efeito de deficiência hídrica e do nitrogênio no consumo de água e produção do arroz de sequeiro (*Oryza sativa* L.), variedade Pratão Precoce.

O experimento foi conduzido em casa de vegetação e o delineamento empregado foi um fatorial 3^2 com 3 repetições. As parcelas consistiram de vasos com 7 litros de solo com 4 plantas por vaso. Utilizaram-se 3 doses de sulfato de amônio e o regime hídrico consistiu na imposição de 3 níveis iniciais de água disponível, repostos a cada dois dias, durante o período crítico, que se estendeu por 32 dias entre a iniciação floral e o amadurecimento.

As medidas efetuadas foram de altura de plantas, número de perfilhos, umidade do solo no final do intervalo de reposição de umidade, evapotranspiração, produção de matéria seca e produção de grãos.

Utilizou-se o modelo matemático de DOORENBOS e KASSAM (1979)*, com algumas modificações, para estudar o consumo de água.

O modelo teórico mostrou-se ajustado para as condições do experimento, permitindo estabelecer em que grupo de culturas a variedade pode ser enquadrada, no que diz respeito à capacidade de extração da água do solo.

O adubo aumentou a altura das plantas, o perfilhamento, a produção de matéria seca total, a demanda hídrica e a produção de grãos, reduzindo porém o índice de colheita e a eficiência de uso da água.

A deficiência hídrica reduziu a altura de plantas, a produção de matéria seca total, a evapotranspiração, a produção de grãos e a eficiência de uso da água.

A interação mostrou efeitos significativos na altura de plantas e na evapotranspiração, em consequência do acionamento de mecanismos de tolerância à seca, alterando os efeitos na produção de grãos e na eficiência de uso da água.

* DOORENBOS, J. e A.H. KASSAM, 1979. Yeld response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 33. Rome. 193p.

**EVALUATION OF SOIL WATER EXTRACTION CAPACITY IN UPLAND RICE
UNDER DIFFERENT LEVELS OF NITROGEN**

Author: JOSÉ HOLANDA CAMPELO JÚNIOR

Adviser: NILSON A. VILLA NOVA

SUMMARY

A study was made of the effect of water stress and nitrogen deficiency on the water consumption and production of upland rice (*Oryza sativa* L.), var. Pratao Precoce.

The experiment was carried out in a greenhouse, utilizing a 3^2 factorial design, with 3 replications. The plots consisted of pots with 7 l of soil and 4 plants each. Three doses of ammonium sulphate were utilized and the water deficiency consisted of 3 initial levels of available water, replaced every 2 days during the critical period, which covered 32 days between flowering initiation and ripening.

Measurements were taken of plant height, number of shoots, soil moisture at the end of the water replacement interval, evapotranspiration, dry matter production and grain yield.

The model used to study the water consumption was that of DOORENBOS and KASSAN (1979)*, with some modifications.

The theoretical model showed to be adequate for the conditions of the experiment, permitting to establish the crop group in which the variety can be placed as to capacity of soil-water extraction.

The fertilizer increased plant height, shooting, total production of dry matter, water requirements and grain yield, but decreased the harvest index and the water - use efficiency.

The water deficiency decreased plant height, total production of dry matter, evapotranspiration, grain yield and water use efficiency.

The interaction showed significant effects on plant height and evapotranspiration, as a consequence of activating drought-resistance mechanisms, modifying the effects on grain yield and water-use efficiency.

* DOORENBOS, J. e A.H. KASSAM, 1979. Yield response to water.
FAO Irrigation and Drainage Paper n° 33. Rome. 193p.

1. INTRODUÇÃO

A produção brasileira de arroz se situa atualmente em torno de 9 milhões de toneladas anuais, ocupando uma área de aproximadamente 6 milhões de hectares. O sistema de sequeiro contribui com cerca de 60 % da produção de 80% da área cultivada.

O produto faz parte da dieta básica da população, com a produção nacional sendo consumida no mercado interno, sendo frequente a necessidade de importação para atender a demanda.

Nas regiões produtoras de arroz de sequeiro, a precipitação pluvial geralmente é o elemento do clima que restringe a extensão do período de cultivo da maioria das plantas anuais. Durante esse período, a variabilidade do teor de água no solo, principalmente nos estádios mais sensíveis da cultura, tem sido responsável por oscilações de rendimento ano a ano. Quando a ocorrência de veranico é simultânea à forma-

ção de grãos na planta, a produção sofre reduções significativas.

Os ensaios de campo têm demonstrado que, embora o arroz seja altamente exigente em nitrogênio, as respostas à adubação nitrogenada têm apresentado resultados dependentes do clima, em particular no que diz respeito à chuva.

Recentemente várias pesquisas têm se concentrado no estudo dos efeitos resultantes da combinação da deficiência hídrica e da aplicação de adubos nitrogenados. A maioria desses estudos todavia tem esbarrado na dificuldade de quantificar a deficiência hídrica. Essa quantificação exige um tratamento em que se considere o sistema solo-planta-atmosfera como um todo, podendo ser avaliada, em termos práticos, pela comparação entre evapotranspiração máxima (demanda) e evapotranspiração real (consumo).

A determinação da evapotranspiração máxima em condições de campo pode ser efetuada através de métodos já conhecidos, que se utilizam de observações meteorológicas. A evapotranspiração real, embora possa ser determinada de forma direta, apresenta-se extremamente trabalhosa, uma vez que geralmente é obtida por balanço hídrico, onde a determinação de alguns termos torna-se crítica, como é o caso da precipitação efetiva, das entradas e saídas laterais de água e da drenagem.

Por outro lado, a evapotranspiração real em condições de campo pode ser estimada conhecendo-se a evapo-

transpiração máxima, a água disponível e o ponto crítico de umidade do solo. Para o arroz de sequeiro, no entanto, não se conhece como varia a umidade crítica do solo.

No caso de experimentos em casa de vegetação, onde se conta com a vantagem de maior facilidade na introdução de tratamentos, não se tem observado esforços no sentido de quantificar a deficiência hídrica. Alguns autores têm inclusive alertado para o fato de que experimentos de estresse hídrico em casa de vegetação agravam os efeitos da deficiência hídrica em comparação com resultados de campo, uma vez que correspondem a um estresse abrupto, não permitindo que as plantas acionem seus mecanismos de resistência, como acontece com o estresse gradual obtido em campo.

No presente trabalho estudou-se o comportamento do arroz de sequeiro, variedade Pratão Precoce, sob diferentes condições de deficiência hídrica e suprimento de nitrogênio, em casa de vegetação.

Os objetivos do trabalho foram testar a validade, em casa de vegetação, de um modelo matemático de estimativa da evapotranspiração utilizado em condições de campo, determinar o padrão de variação do ponto crítico de umidade do solo e utilizar os parâmetros do modelo para explicar os efeitos dos tratamentos sobre a produção do arroz.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Deficiência hídrica

O estudo das relações hídricas dentro do sistema solo-planta-atmosfera pode ser conduzido através de aproximações sucessivas. O sistema pode ser encarado inicialmente isolando seus componentes, para depois ser examinado como um todo.

2.1.1. Solo

O conceito de que o solo funciona como um reservatório de água representa uma primeira aproximação do problema.

As plantas perdem água dia a dia por transpiração e a quantidade que elas contêm é insuficiente para atender à transpiração. A água armazenada no espaço poroso do solo

mantêm o fornecimento para atender suas necessidades nos intervalos entre as precipitações ou irrigações. Entretanto, nem toda a água contida no solo está disponível para as plantas. Os limites entre os quais ela está disponível têm sido identificados genericamente como a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (GARDNER, 1965).

De acordo com KIEHL (1979), os conceitos de ponto de murcha permanente (PMP) e capacidade de campo (CC) foram estabelecidos por BRIGGS e SHANTZ (1912) e VEIHMEYER e HENDRICKSON (1955), respectivamente. O PMP foi considerado como sendo a porcentagem de água que um solo encerra quando as plantas que nele crescem adquirem um estado de murchamento permanente, não voltando à turgidez mesmo quando colocadas em ambiente saturado de umidade. A CC foi tomada como sendo a quantidade de água retida pelo solo previamente saturado, após o movimento descendente da água ter-se tornado praticamente nulo.

A quantidade de água existente no solo entre a CC e o PMP é denominada capacidade de água disponível (CAD). Essa denominação vem sendo usada pela maioria dos autores (DAKER, 1970; WINTER, 1974; KIEHL, 1979; KLAR, 1984).

A determinação direta do ponto de murcha permanente e da capacidade de campo é caracterizada pela aplicação de métodos subjetivos, conforme se deduz nas descrições encontradas em KIEHL (1979).

A concepção de que o importante não é saber a

quantidade de água retida no solo, mas a tenacidade com que a água é retida, representa uma segunda aproximação do problema.

A tenacidade, causada principalmente por forças adsorptivas e capilares, é medida em termos de potencial da água no solo em relação à água livre. A unidade de medida comumente empregada é a da pressão (atmosferas). O potencial total da água no solo é composto de vários componentes, prevalecendo geralmente os componentes matricial e gravitacional, em função das forças atuantes. A proporção que diminui a umidade do solo, a tensão com que a água é retida aumenta (GARDNER, 1965).

A utilização do conceito de potencial da água no solo permitiu a adoção de medidas indiretas e não subjetivas da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente, utilizando-se respectivamente as tensões de 1/3 e 15 atmosferas (DAKER, 1970; MEDINA, 1972; WINTER, 1974; KIEHL, 1979; REICHARDT, 1974, 1975).

BRUNINI et alii (1976), trabalhando com arroz de sequeiro, sugeriram que a água disponível no solo deve ser medida "in situ", pois as determinações de laboratório subestimam a CAD.

GARDNER (1965), no entanto, evitou deliberadamente uma definição precisa dos conceitos de limites de água disponível porque os considerou apenas grosseiros, apesar de reconhecer a utilidade prática deles. Encontrou evidências

de que as plantas absorviam água mesmo quando o solo se encontrava acima da capacidade de campo ou abaixo do ponto de murcha permanente. REICHARDT (1975, 1978), também questionou a quantificação ou mesmo a existência de limites fixos de água disponível no solo.

Independente da concepção dos limites de água disponível, o volume de solo explorado pelas raízes é fundamental na quantificação do volume de água útil que o solo pode armazenar. Desta forma observa-se que a quantidade de água disponível difere se as plantas desenvolvem-se em condições naturais ou em vasos. Além disso, em condições naturais pode haver uma contribuição decorrente do fluxo de água proveniente da zona não explorada diretamente pelas raízes (HAGAN et alii, 1957; JORDAN e RITCHIE, 1971; RITCHIE, 1974).

Para o arroz de sequeiro há divergência na literatura sobre a profundidade efetiva das raízes, com BRUNINI et alii (1976) utilizando 120 cm e JONES e GUIMARÃES (1979) considerando apenas 60 cm.

Uma outra abordagem das relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera é a do grau de disponibilidade hídrica ao longo da faixa de umidade do solo compreendida entre os limites de água disponível.

WEIHMEYER e HENDRICKSON (1955) assumiram que toda água contida no solo entre a CC e o PMP era igualmente disponível para as plantas.

RICHARDS e WALDLEIGH (1952) consideraram que a

disponibilidade da água do solo decrescia linearmente com a umidade do solo, sujeitando a planta à paralisação do crescimento antes que o PMP fosse atingido. THORNTHWAITE e MATHER (1955) visualizaram da mesma forma ao estabelecerem que a relação entre evapotranspiração real e potencial decrescia linearmente entre a CC e o PMP.

PENMAN (1949), BUTLER e PRESCOTT (1955), PIERCE (1958), MARLATT et alii (1961) e HOLMES (1961) assumiram que havia um ponto crítico de umidade do solo entre os limites superior e inferior de água disponível. Acima do ponto crítico a água seria igualmente disponível, abaixo dele a disponibilidade seria decrescente até atingir o limite inferior.

De acordo com DENMEAD e SHAW (1962) a localização do ponto crítico dependia da demanda atmosférica. GARDNER e HILLEL (1962) e GARDNER e EHLIG (1963) mostraram que o ponto crítico variava em função da demanda atmosférica e da difusividade da água no solo. TOMAR e O'TOOLE (1979) determinaram que o ponto crítico para o arroz era atingido quando o potencial da água no solo se situava entre -5,0 e -7,0 atmosferas.

2.1.2. Planta

O conceito de potencial da água também é aplicável para avaliar o nível de energia da água na planta em relação à água livre. Nesse caso os componentes predominantes são

o potencial osmótico e o de pressão, ao contrário do solo onde prevalecem geralmente o matricial e o gravitacional. O potencial osmótico varia com a concentração de solutos no interior da célula. O potencial de pressão, também chamado de pressão de turgor, resulta da ação da parede celular (REICHARDT, 1975).

A perda de água das células-guarda de modo a reduzir sua pressão de turgor é a causa imediata do fechamento dos estômatos e redução da transpiração. Não obstante, existem vários fatores tais como a luz, a temperatura, a umidade do ar e do solo, a disponibilidade de gás carbônico e o estado nutricional da planta, os quais exercem algum tipo de controle sobre o fechamento estomático (RUTTER, 1975).

Quando a água evapora no mesófilo das folhas e sai pelos estômatos, o potencial da água na matriz intercelular adjacente à interfase líquido-ar cai, provocando o movimento da água vinda de outros locais, da planta e do solo, com maior potencial. Em consequência do movimento da água desenvolve-se uma série de resistências e gradientes de potencial (BEGG e TURNER, 1976).

As medidas de potencial da água na folha e de resistência estomática têm sido utilizados para avaliar a deficiência hídrica. Entretanto, devem ser analisadas considerando-se que podem refletir o efeito de diversos fatores e estão sujeitas a variações acentuadas ao longo do dia (SLATYER, 1967; RUTTER, 1975; BEGG e TURNER, 1976; VIEIRA, 1984).

A despeito da complexidade das relações entre a resistência, o potencial da água e o fluxo, é possível observar-se, em alguns casos, um padrão de comportamento. A resistência à difusão do vapor d'água nas folhas apresenta inicialmente pouca ou nenhuma variação em consequência da redução do potencial da água na folha, variando principalmente com a radiação incidente. Reduções posteriores do potencial resultam em um crescimento abrupto da resistência. O potencial onde ocorre a mudança da resistência é chamado potencial crítico da água na folha. Quando o potencial se encontra acima do valor crítico, o fluxo é praticamente afetado apenas pelas condições atmosféricas. Além do limite crítico o fluxo sofre uma redução progressiva em função do potencial da água na folha (RUTTER, 1975), DENMEAD e MILLAR (1976b).

A comparação de resistências obtidas em condições de campo e em casa de vegetação tem revelado comportamentos semelhantes, verificando-se no entanto que o ponto crítico geralmente é atingido mais rapidamente em casa de vegetação (BEGG e TURNER, 1976).

TOMAR e GHILDYAL (1973) determinaram que o potencial crítico na folha para o arroz era de $-3,0$ atmosferas, conflitando com os resultados posteriores de TOMAR e O'TOOLE (1979).

Segundo DENMEAD e MILLAR (1976a), uma das deficiências dos estudos de transporte de água através das plantas é a obtenção de medidas de potencial crítico em uma folha

em particular. MILLAR e DENMEAD (1976) observaram que o fechamento estomático em trigo ocorreu no mesmo potencial de turgor em qualquer folha da planta, mas o potencial total foi diferente dependendo da posição da folha na planta.

2.1.3. Atmosfera

A evaporação da água do solo e a transpiração das plantas são processos que dependem de energia, envolvendo uma mudança de estado líquido-vapor, dependendo ainda do gradiente de pressão de vapor, da resistência ao fluxo e da capacidade do solo e da planta transportarem a água para os sítios de evaporação (BEGG e TURNER, 1976).

A fonte primária de energia para o calor latente de evaporação é a radiação líquida proveniente do balanço de radiação global e do balanço de radiação de ondas longas. O calor sensível transferido de áreas vizinhas é uma fonte secundária de energia para o processo (SLATYER, 1967; VILLA NOVA, 1973).

A dependência da evaporação em relação aos elementos do clima proporcionou a elaboração de diversos métodos climatológicos de estimativa de evapotranspiração, entre os quais se destacam os de THORNTHWAITE (1948) e de PENMAN (1948). Os métodos climatológicos são utilizados para o cálculo da evapotranspiração de referência (E_o). A evapotranspiração de referência é uma medida da demanda atmosférica e representa a taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa plantada

com grama, com altura entre 8 e 15cm, crescendo ativamente, sombreando completamente o solo sem restrições de água. A denominação evapotranspiração de referência vem sendo adotada em substituição ao termo evapotranspiração potencial (DOORENBOS e PRUITT, 1977).

O conceito de evapotranspiração de referência enquadra-se portanto em uma situação particular de cobertura do solo. A exigência de uma área extensa exclui a contribuição da energia advectiva. A natureza e altura da cobertura vegetal estabelecem uma superfície com características aerodinâmicas próprias. A exigência de crescimento ativo exclui a ocorrência de estresse de natureza fisiológica. A necessidade de cobertura completa do solo exclui a variação provocada por diferenças de índice de área foliar. A exigência de um suprimento adequado de água descarta a influência da variação provocada pela umidade do solo.

Apesar das restrições, a evapotranspiração de referência pode ser utilizada para estimar as necessidades hídricas de uma cultura, desde que seja corrigida por um fator característico da cultura e de seu estágio de desenvolvimento (DOORENBOS e PRUITT, 1977). Ainda assim permanecem as exigências quanto à ausência da contribuição da energia advectiva, ao crescimento ativo e ao suprimento de água no solo. O valor corrigido passa a ser chamado de evapotranspiração máxima (ET_m) da cultura naquele estágio.

O índice de área foliar (IAF) tem sido identi-

ficado como o fator que mais contribui para a existência de diferenças entre as necessidades hídricas das culturas. As pesquisas têm demonstrado que a relação entre a evapotranspiração medida e a evapotranspiração de referência cresce com o IAF, para valores de IAF menores do que três (FRITSCHEN e SHAW, 1961; DENMEAD et alii, 1962; STERN, 1965; FISCHER e KOHN, 1966; RITCHIE e BURNETT, 1971; JOHNS e LAZENBY, 1973; TANNER e JURY, 1976).

As pesquisas onde a evapotranspiração é abordada do ponto de vista climatológico utilizam os termos evapotranspiração real ou evapotranspiração atual para os valores que, em decorrência das restrições de disponibilidade de água no solo, são inferiores a ET_m . Nesse caso, embora não haja unanimidade, também se reconhece a existência de um ponto crítico de umidade do solo (TANNER, 1967; LINACRE, 1973).

Em casa de vegetação a quantificação da demanda atmosférica é problemática. A exigência de uma bordadura mínima torna impraticável a determinação da evapotranspiração de referência. Além disso, a radiação líquida sob o vidro fica praticamente restrita ao balanço de radiação global, que se apresenta inferior ao externo devido à transmissividade do material de cobertura (HASSELKUS e BECK, 1963; DESJARDINS e ROBERTSON, 1968).

2.1.4. O sistema solo-planta-atmosfera

A identificação de fatores do solo, da planta e

da atmosfera envolvidos na evapotranspiração conduziu a uma aproximação na qual se considera o sistema solo-planta-atmosfera como um todo.

Como as plantas transpiram ao longo do dia uma quantidade de água maior do que seu próprio peso, a transpiração não pode ser mantida sem a absorção da água do solo; como o conteúdo de água da planta varia somente dentro de limites estreitos em intervalos de um dia, a absorção e a transpiração podem ser consideradas como dois elos de um processo em cadeia, no qual a água é transferida do solo para o ar através das plantas, com a mudança líquido-vapor ocorrendo nas folhas. Este sistema foi chamado de continuum solo-planta-atmosfera (PHILIP, 1966).

Considera-se que a água move-se através desse continuum devido ao fato de que o potencial da água é decrescente ao longo do continuum. A resistência ao movimento da água através das várias partes do sistema é revelada pela queda de potencial ao longo delas (RUTTER, 1975). Como a diferença de potencial é maior entre a folha e o ar, a maior resistência geralmente está associada com a transpiração ao invés da absorção (COWAN, 1965; 1972; WEATHERLEY, 1970; RUTTER, 1975).

Desde que a maior resistência é portanto aquela que exerce o controle, se situa entre a folha e o ar, isto implica que o fluxo no sistema é determinado principalmente por fatores que regulam a transpiração, incluindo o suprimen-

to de energia para a mudança de estado. Observa-se, todavia, que a redução da umidade do solo pode restringir a transpiração. Esta aparente contradição é devida à realimentação do sistema, que, reduzindo a absorção, eleva de maneira progressiva a resistência ao longo da corrente transpiratória (RUTTER, 1975).

A resistência à difusão do vapor d'água entre a folha e o ar é composta por duas resistências dispostas em série, em analogia a um circuito elétrico: a resistência interna e a resistência da camada limite. A resistência interna, por sua vez, consiste na resistência efetiva resultante da associação em paralelo da resistência cuticular e a resistência estomática. A resistência estomática resulta da associação em série das resistências da parede celular, da cavidade subestomática e da abertura estomática. O sistema pode assim continuar sendo decomposto em um conjunto de associação de resistências até atingir a resistência ao transporte de água no solo (COWAN, 1965; MONTEITH, 1973; REICHARDT, 1975).

Antes que o solo esteja completamente seco a transpiração pode ser restringida pela redução na abertura estomática, em resposta à redução no conteúdo de água da folha. A planta procura manter um equilíbrio entre absorção e transpiração. Conseqüentemente, se o fluxo de água até a folha é menor do que a demanda, ocorre uma progressiva perda de água e queda do potencial da água na folha, resultando em aumento da absorção, até que se recupere o potencial de equilí-

brio. Qualquer defasagem entre os dois processos representa uma mudança no conteúdo de água da planta durante o ajustamento à situação. O limite a este ajustamento é a dessecação ou murchamento permanente (RUTTER, 1975).

A simulação do efeito da redução da umidade do solo pode ser alcançada pela resolução de quatro equações que representam as interações no sistema. As variáveis envolvidas são os potenciais da água no solo e na folha, a resistên-
cia da planta e do solo, a resistência interna da folha e os elementos do clima. As soluções encontradas resultaram na conclusão de que há um limite crítico de umidade do solo. Acima do limite crítico a evapotranspiração é governada pela deman-
da atmosférica, abaixo dele há uma redução mais ou menos li-
near em relação à umidade do solo. Os fatores identificados como capazes de alterar o ponto crítico são a evapotranspira
ção de referência, as características físicas do solo e a densidade do sistema radicular (COWAN, 1965; ZAHNER, 1967; NEW-
MAN, 1969; MOLZ e REMSON, 1971; FEDDES e RIJTEMA, 1972; RIT-
CHIE, 1973; RUTTER, 1975; DOORENBOS e KASSAN, 1979; SLABBERS, 1980).

O modelo matemático de DOORENBOS e KASSAM (1979) permite o cálculo da evapotranspiração real em função da capacidade de água disponível (CAD), do ponto crítico de umidade do solo (p), do intervalo de tempo (t) decorrido a partir do instante em que o solo se encontrava na capacidade de campo e da evapotranspiração máxima (ET_m) média diária nesse inter

valo. O ponto crítico de umidade do solo é identificado pela fração p da CAD, até onde a umidade do solo não restringe a evapotranspiração diária. A fração p varia com o tipo de cultura e com a evapotranspiração máxima, com o tipo de cultura sendo classificado em quatro grupos de acordo com a variação $p \times ET_m$, isto é, de acordo com sua capacidade de extração da água do solo.

O arroz de sequeiro não se encontra entre as culturas relacionadas por DOORENBOS e KASSAM (1979) nos quatro grupos identificados por aqueles pesquisadores, o que torna necessária a avaliação da capacidade de extração da água do solo dessa cultura.

O trabalho de DOORENBOS e KASSAM (1979) não faz também qualquer referência ao efeito da adubação sobre a capacidade de extração da água do solo pelas culturas.

SLABERS (1980) alertou que não se deve aplicar o conceito de ponto crítico de umidade do solo para cultivos em casa-de-vegetação.

A diferença de sensibilidade do sistema em condições de campo e de casa-de-vegetação pode ser atribuída às diferenças de volume de solo utilizado e disponibilidade de energia, que modificam os gradientes de potencial da água ao longo do sistema e conduzem a um estresse mais abrupto em casa-de-vegetação. O estresse gradual obtido em condições de campo pode ainda permitir um desenvolvimento adicional do sistema radicular e o ajustamento osmótico (BEGG e TURNER, 1976).

2.2. Efeito da deficiência hídrica

As respostas das plantas à deficiência hídrica têm sido divididas, de forma didática, em efeitos morfológicos e fisiológicos (SHAW e LANG, 1965; SLATYER, 1969; BEGG e TURNER, 1976). No presente trabalho são descritos resumidamente, a seguir, os principais efeitos.

O crescimento celular tem sido reconhecido como o efeito morfológico mais sensível à deficiência hídrica. É atribuído à redução da turgescência das células. O aumento de tamanho das células resulta da ação da pressão exercida internamente pela água sobre a parede celular. A taxa de crescimento é proporcional à pressão de turgor, com a constante de proporcionalidade sendo denominada módulo de elasticidade (BEGG e TURNER, 1976).

Acredita-se que o efeito sobre a divisão celular seja uma consequência da redução provocada no crescimento das células, com as células meristemáticas não atingindo dimensões mínimas que permitam a divisão celular (ACEVEDO et alii, 1971; MARC e PALMER, 1976; MENGEL e KIRBY, 1982).

Embora o crescimento total da planta seja reduzido pela deficiência hídrica, o crescimento das raízes geralmente é favorecido em relação à parte aérea. Em alguns casos o crescimento das raízes tem sido observado em termos absolutos, sendo considerado um mecanismo de tolerância à seca (BEGG e TURNER, 1976).

Segundo SLATYER (1969), a iniciação e diferenciação de primórdios vegetativos e reprodutivos em meristemas apicais apresentam-se sensíveis à deficiência hídrica. O efeito é aparentemente similar à dormência, com a iniciação sendo suspensa, mas retomada após a planta recuperar-se do estresse, desde que não ocorra uma deficiência hídrica severa. STONE (1983) verificou que a ocorrência de estresse hídrico no período vegetativo aumentou o ciclo do arroz, entretanto não observou diferença significativa quando o estresse foi imposto após a iniciação floral.

Entre os efeitos fisiológicos, o comportamento dos estômatos sofre influência marcante da deficiência hídrica. A abertura estomática permanece inalterada com a redução inicial do potencial da água na folha, até que um valor crítico seja atingido. Qualquer redução do potencial além desse limite provoca um aumento abrupto da resistência à difusão do vapor d'água (RUTTER, 1975).

Como os estômatos são a via preferencial de entrada de gás carbônico nas folhas, o efeito da deficiência hídrica sobre a abertura estomática tem reflexo na fotossíntese. Segundo BEGG e TURNER (1976), a fotossíntese declina inicialmente como resultado do fechamento estomático, mas um estresse severo pode conduzir a uma redução na atividade enzimática e do cloroplasto, resultando em um efeito não estomático da deficiência hídrica. Com a redução da fotossíntese há uma redução na produção de matéria seca (SLATYER, 1967).

O fechamento estomático também restringe a respiração, uma vez que reduz o fluxo de entrada de oxigênio na planta. O efeito é mais intenso sobre tecidos meristemáticos (BOYER, 1970, 1971).

O decréscimo de fotossíntese líquida só ocorre em estresse moderado a severo, porque no início há uma redução equivalente na fotossíntese e na respiração, em seguida a assimilação do CO_2 passa a ser crítica (BOYER, 1970; HSIAO, 1973; O'TOOLE et alii, 1977 e MENGEL e KIRIBG, 1982).

O efeito da deficiência hídrica sobre a trans-locação de fotossintetizados é provocado pela redução na fotos-síntese (fonte) ou crescimento de órgãos consumidores (dreno), não havendo efeito direto sobre o sistema condutor (BEGG e TURNER, 1976).

O estudo da maioria dos nutrientes minerais tem mostrado que o estresse de umidade produz uma redução na quantidade de nutriente absorvida, porém a redução no teor dos nutrientes na matéria seca não sofre reduções significativas. SLATYER (1969) considerou que a absorção iônica não dependia diretamente da absorção de água e que a disponibilidade do nutriente, per se, não era afetada pelo estresse hídrico, pelo menos na faixa de água disponível do solo.

A literatura mostra que os diversos efeitos até aqui descritos afetam as plantas de maneira diferenciada, havendo variedades que produzem satisfatoriamente em regiões sujeitas à deficiência hídrica, no que se convencionou chamar

de resistência à seca (SHAW e LAND, 1965; SLATYER, 1969; BEGG e TURNER, 1976; BLUM, 1982).

A resistência à seca é obtida por mecanismos de escape ou de tolerância, a despeito da controvérsia a respeito do enquadramento dos diversos mecanismos em cada categoria (LEVITT, 1972, 1980; BEGG e TURNER, 1976; BLUM, 1982).

Entre os mecanismos de escape destacam-se a redução do ciclo, o armazenamento de água nos tecidos e a elevada resistência cuticular à transpiração. Os mecanismos de tolerância podem ser de natureza morfológica ou fisiológica. A redução do crescimento das folhas, a senescência precoce das folhas mais velhas, a orientação da folha para absorver menos energia, o enrolamento das folhas, a formação de estruturas que aumentem a refletividade e o desenvolvimento preferencial das raízes são mecanismos morfológicos de tolerância. O fechamento dos estômatos e o ajustamento osmótico são mecanismos fisiológicos de tolerância (BEGG e TURNER, 1976). No arroz é comum a deficiência hídrica acarretar redução na altura das plantas (STONE, 1983), podendo haver ainda enrolamento das folhas (O'TOOLE e CRUZ, 1979), fechamento dos estômatos e ajuste osmótico (BLUM, 1982).

Além de afetar de forma diferente as plantas, o déficit hídrico pode ter efeito variável sobre uma mesma variedade, dependendo da época de ocorrência em relação ao ciclo da planta. Segundo DENMEAD e SHAW (1960) e SLATYER (1969), a ocorrência de fases de maior ou menor sensibilida-

de ao estresse hídrico se deve ao fato de que o efeito é mais pronunciado em tecidos e órgãos que estão crescendo e se desenvolvendo mais rapidamente. No arroz de sequeiro, o período crítico de aparecimento de deficiência hídrica se situa entre a iniciação floral e o amadurecimento (MURATA e MATSUSHIMA, 1975).

O efeito do estresse hídrico sobre a produção de grãos vai desde o número de primórdios florais, ao número e ao peso dos grãos (STONE, 1983).

A intensidade e a duração da deficiência hídrica apresentam influência marcante sobre as respostas observadas nas plantas. Não obstante, há na literatura exemplos que vão da descrição puramente qualitativa à quantificação da resistência à difusão do vapor d'água. Em situação intermediária, mas considerando o sistema solo-planta-atmosfera como um todo, a deficiência pode ser quantificada pelo número de dias sob estresse (DALE e SHAW, 1965a,b) ou pela relação entre evapotranspiração real e evapotranspiração máxima (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Nesse particular, TANNER (1968) demonstrou que, fisicamente a relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima é uma medida da resistência do sistema solo-planta-atmosfera ao transporte de água.

Para comparar rendimentos em diferentes condições de deficiência hídrica recorre-se ao coeficiente de rendimento (DOORENBOS e KASSAM, 1979), ou à eficiência de uso da água (BEGG e TURNER, 1976). O primeiro só é recomendado

quando outros fatores não interferem na produção. A eficiência de uso da água (EUA) é uma relação entre a quantidade de matéria seca de produto e a quantidade de água consumida na produção. A EUA também tem sido usada para avaliar a resistência a seca, porém há controvérsia nesse sentido. Valores elevados de EUA significam um rendimento elevado do fator água, mas a resistência à seca pode ser considerada como a sobrevivência em condições de deficiência hídrica, não resultando necessariamente em produção elevada (BEGG e TURNER, 1976). Além disso, observa-se que alguns autores divergem na própria definição do parâmetro (BURTON, 1959; KRAMER, 1959; BEGG e TURNER, 1976).

Segundo BOUCHET et alii (1963), o desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água das plantas, mesmo aquela que só ocorre nas horas mais quentes do dia, provoca uma redução na produção de matéria seca pela cultura. A melhoria do rendimento pode então ser obtida pela redução da demanda atmosférica e/ou pela adequação da oferta à demanda.

2.3. Efeito do nitrogênio

Segundo MURATA (1969), o processo de produção em culturas graníferas pode ser dividido em três fases: a formação de órgãos para a absorção de nutrientes minerais e fotossíntese; o florescimento; e o enchimento de grãos. O nitrogênio afeta a produção de grãos nas três fases.

No caso do arroz, a resposta da cultura pode ser melhor entendida considerando-se que a planta é um conjunto de várias unidades. A unidade é repetida em cada nó e consiste de uma folha, uma gema de perfilho, uma raiz e um internódio. Se uma unidade for separada do conjunto e dispuser de condições ambientais favoráveis, pode dar origem a uma nova planta e cada perfilho é potencialmente capaz de produzir uma panícula (CHANDLER, 1969).

Excetuando-se as raízes seminais, que emergem na germinação, todas as restantes nascem dos nós do colmo, mantendo uma relação definida com a emergência e desenvolvimento das folhas. A emergência das raízes apresenta uma correlação positiva com o teor de nitrogênio da base do colmo (MURATA e MATSUSHIMA, 1975).

O perfilhamento se inicia com a emergência da quarta ou quinta folha e apresenta um sincronismo com a emergência das folhas seguintes. A capacidade de perfilhamento é uma das características mais importantes de uma variedade, mas a emergência e desenvolvimento são influenciadas pelo suprimento de nitrogênio (MURATA e MATSUSHIMA, 1975).

De acordo com TANAKA et alii (1964) o aumento do índice de área foliar se deve a dois fatores: o aumento do número de perfilhos e das dimensões das folhas. A folha, por sua vez, apresenta uma largura praticamente constante, variando em comprimento (TANAKA et alii, 1966). O índice de área foliar pode crescer significativamente com a aplicação de

nitrogênio (MURATA, 1969; CHANDLER, 1969; MURATA e MATSUSHIMA, 1975; FAGERIA, 1984).

A produção de matéria seca na fase vegetativa depende da capacidade fotossintética das folhas e do índice de área foliar, sendo ambas incrementadas com a aplicação de adubo nitrogenado (MURATA e MUTSUSHIMA, 1975).

A fase reprodutiva no arroz começa com a iniciação do primórdio floral, sendo uma fase muito sensível ao estresse ambiental, principalmente no caso da radiação, da água e do nitrogênio (FAGERIA, 1984).

A produção de grãos de arroz é determinada pelo número de panículas por unidade de área, número de espiguetas por panícula, percentagem de grãos cheios e peso dos grãos (ISHIZUKA, 1969; MURATA e MATSUSHIMA, 1975).

O número de panículas por unidade de área é determinado 10 dias depois de atingido o número máximo de perfilhos. O número de espiguetas por panícula é determinado 10 dias antes do florescimento. A diferenciação das espiguetas é fortemente influenciada pelo nitrogênio, mas a falta de um suprimento adequado de carboidratos pode levar à sua degeneração (MURADA, 1969).

CHANDLER (1969) e YOSHIDA (1977) consideraram que o peso dos grãos é uma característica varietal.

A quantidade de nitrogênio influi sobre a produção de grãos de arroz desde a fase vegetativa e durante a fase reprodutiva. As necessidades são maiores para o período

vegetativo. A aplicação do adubo precisa ser feita em época adequada, sob pena de não apresentar resultados satisfatórios (MURATA e MUTSUSHIMA, 1975).

A aplicação de nitrogênio, embora eleve a produção de grãos, geralmente resulta em produção de mais palha do que de grãos, reduzindo o índice de colheita. Na cultura do sorgo, no entanto observou-se aumento do índice de colheita com a aplicação de N (McNEAL et alii, 1971; DONALD e HAMBLIN, 1976). Quando ocorre um suplemento limitado de água a aplicação de nitrogênio pode resultar somente na produção de mais palha, havendo uma redução na produção de grãos. O nitrogênio aumenta a área foliar aumentando a demanda hídrica, o que torna a disponibilidade de água ainda mais crítica (RAMIG e RHOADES, 1963; LUEBS e LAAG, 1966; DONALD e HAMBLIN, 1976).

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Caracterização geral

O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", em Piracicaba, São Paulo.

As coordenadas geográficas do local são: latitude $22,70^{\circ}$ sul, longitude $47,63^{\circ}$ oeste e altitude de 586 metros.

A variedade de arroz (*Oryza sativa* L.) empregado foi o Pratão Precoce, que é cultivado em sistema de sequeiro, apresentando ciclo precoce.

O solo utilizado foi retirado do horizonte Ap de Terra Roxa Estruturada, classificado como pertencente à Série Luiz de Queiroz (RANZANI et alii, 1966). A coleta do solo foi efetuada após o preparo do terreno para plantio, não se efetuando o peneiramento.

A análise química de fertilidade do solo apresentou os resultados que se encontram na tabela 1.

Tabela 1. Resultados da análise química de fertilidade do solo

Determinação	Amostra 1	Amostra 2
pH	5,2	5,0
Ca (meq/100g)	3,12	2,68
Mg (meq/100g)	0,80	1,16
K (meq/100g)	0,34	0,42
PO ₄ (meq/100g)	0,07	0,07
Al ³⁺ (meq/100g)	0,16	0,24
H ⁺ (meq/100g)	4,40	5,36
T (meq/100g)	8,66	9,62
V (%)	49,19	44,28
C (%)	1,05	1,14

A casa de vegetação possuía orientação Leste-Oeste e contava com três ventiladores, os quais eram ligados automaticamente, através de um termostato, quando a temperatura do interior superava 27,0°C. O desligamento também era automático, quando a temperatura era reduzida a menos de 27,0°C.

As parcelas do experimento consistiram em vasos de polietileno, sem dreno, com capacidade para 10,0 litros, onde foram colocados o equivalente a 10,150kg de terra seca em estufa, ocupando um volume de 7,0 litros.

Os vasos apresentavam a forma de um tronco de cone, com altura de 23,0 cm, diâmetro maior de 26,0 cm e diâmetro menor de 21,0 cm (figura 1).

A altura de terra nos vasos foi de 17,0 cm, sobrando um bordo livre de 6,0 cm. O raio superior do tronco de cone de terra foi de 12,5 cm, correspondendo a uma superfície de terreno de aproximadamente 500,0 cm². Desta forma, o peso equivalente a uma lâmina de água de 1,0 mm na superfície do solo foi de 50,0 g.

Utilizou-se uma balança com sensibilidade de 10,0 g e capacidade para 15,000 kg, para efetuar medições de peso dos vasos.

O delineamento consistiu de um fatorial 3² em blocos ao acaso com 3 repetições. Os fatores estudados foram o nitrogênio e o nível de água disponível inicial. Os níveis de nitrogênio foram 0, 0,45 e 0,90 g de N por vaso. Os níveis de água disponível inicial foram 26,0, 18,0 e 10,0 mm, repostos a cada dois dias durante o período crítico da cultura (da iniciação floral à maturação).

As doses de nitrogênio foram obtidas empregando-se 0, 2,16 e 4,32 g de sulfato de amônio por vaso. O adubo foi parcelado, aplicando-se 1/3 no plantio e 2/3 por ocasião do perfilhamento. No plantio aplicou-se ainda 7,5 g de superfosfato triplo e 0,5 g de cloreto de potássio, em cada vaso.

Figura 1. Forma e dimensões dos vasos empregados.

Procurou-se conservar uniformemente o regime de umidade do solo antes e após o período crítico. Para tanto todos os vasos foram levados inicialmente à capacidade de campo, permitindo-se o consumo de até 40% da água disponível, com o controle de irrigação sendo efetuado por amostragem aleatória. Semanalmente procedia-se a uniformização levando a umidade ao limite superior da água disponível.

Durante todo o experimento, inclusive no período crítico, efetuaram-se irrigações sempre que os sintomas de murcha se agravaram em um dos tratamentos. A dose empregada era fornecida igualmente a todos os vasos, medindo-se o volume aplicado com provetas de 250 ± 2 ml.

O plantio foi efetuado em 29 de agosto de 1983, permanecendo 4 plantas por vaso a partir do desbaste realizado em 29 de setembro do mesmo ano.

A colheita foi realizada em 09 de dezembro de 1983, colhendo-se todas as parcelas no mesmo dia, quando as panículas apresentavam 2/3 superiores maduros.

3.2. Determinação da capacidade de água disponível (CAD)

Para determinação do peso dos vasos no limite superior de água disponível foram utilizados três vasos com a parte inferior perfurada, de modo a permitir a entrada e a drenagem da água. Após a colocação da terra, a parte supe-

rior dos vasos foi coberta por um filme de polietileno, fixando-se a cobertura nos bordos dos vasos, de modo a evitar a evaporação da água pela superfície do solo.

Os vasos assim preparados foram colocados dentro de bandejas com água para permitir a ascensão capilar da água no solo.

Após 72 horas, os vasos foram retirados das bandejas e deixados drenando livremente até cessar, aparentemente, o fluxo de água. Foram então pesados, utilizando-se a média dos pesos como limite superior da água disponível.

O peso úmido médio dos vasos no limite superior da água disponível foi de 12,300 kg, equivalendo a uma lâmina de água de 43 mm e uma umidade volumétrica de $0,3071 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

A instalação de microtensiômetros nos vasos revelou que a tensão correspondente ao limite superior de água disponível foi de cerca de 0,1 atmosferas. A umidade do solo nesta tensão foi considerada como a capacidade de campo.

O peso dos vasos no limite inferior da água disponível foi obtido nos mesmos vasos utilizados na obtenção do limite superior, nos quais se executou o plantio simultaneamente às parcelas experimentais. A determinação foi efetuada no início do período crítico da cultura, quando se observou o desenvolvimento dos primórdios florais.

O procedimento para obter o limite inferior de água disponível consistiu em permitir o esgotamento natural

da água do solo até surgirem sintomas de murcha permanente. Estes sintomas foram o enrolamento total de todas as folhas, seguindo-se da quebra da nervura principal e secamento das folhas inferiores; as folhas mais novas, no entanto, recuperaram a turgescência após o reumedecimento do solo. Tal procedimento se justificou pelo fato de que os sintomas de murcha permentente só foram identificados quando a umidade do solo se encontrava abaixo da umidade correspondente a 15 atmosferas.

O peso úmido médio dos vasos no limite inferior de água disponível foi de 11,000 kg, correspondendo a uma lâmina de 17 mm e a uma umidade volumétrica de 0,1214 cm³/cm³. Em relação ao peso seco, o limite inferior equivaleu a uma umidade de 8,37%, enquanto a umidade a 15 atmosferas foi de 14,00% (RANZANI et alii, 1966).

A capacidade de água disponível (CAD) foi tomada como a diferença entre os limites superior e inferior de água disponível, resultando em uma diferença de peso de 1,300 kg correspondente a uma lâmina de água de 26,0 mm.

3.3. Medições utilizadas na comparação dos tratamentos

3.3.1. Altura das plantas

A altura foi tomada estendendo-se as folhas verticalmente e medindo-se, com auxílio de uma régua, desde

a extremidade mais alta até a superfície do solo nos vasos.

3.3.2. Número de perfilhos

O número de perfilhos foi obtido pela diferença entre o número de colmos na colheita e o número de plantas por vaso após o desbaste.

3.3.3. Evapotranspiração

A evapotranspiração foi obtida efetuando-se o balanço hídrico entre cada duas pesagens consecutivas dos vasos, considerando-se a soma algébrica entre a irrigação e a variação do armazenamento da água no solo.

3.3.4. Água disponível residual durante o período crítico

Durante o período crítico, a cada intervalo de dois dias foi efetuada a pesagem individual dos vasos antes da reposição do nível de água adotado em cada tratamento.

3.3.5. Matéria seca total da parte aérea e dos grãos

No final do ciclo, as plantas foram cortadas rente à superfície do solo, separando-se ainda as panículas do

resto da planta. O material colhido foi colocado em estufa a 70°C até peso constante. Posteriormente determinou-se a matéria seca pela pesagem do material de cada vaso.

3.3.6. Componentes da produção

Procedeu-se a contagem do número de panículas em cada vaso no momento da colheita.

Após a secagem do material colhido, efetuou-se a separação dos grãos cheios das panículas de cada parcela, os quais foram contados e pesados.

O número de grãos cheios por panícula foi obtido dividindo-se o número total de grãos cheios pelo número de panículas, em cada parcela.

O peso médio de 100 grãos foi obtido dividindo-se o peso dos grãos cheios pelo número de grãos cheios e multiplicando-se por 100, em cada parcela.

3.3.7. Índice de colheita

O índice de colheita foi determinado dividindo-se o peso seco dos grãos cheios de cada parcela pelo respectivo peso seco do restante do material colhido.

3.3.8. Eficiência de uso da água

A eficiência de uso da água foi obtida dividino

do-se o peso seco dos grãos cheios pela evapotranspiração total do ciclo, em cada parcela.

3.4. Aeração

Em virtude da existência dos ventiladores na casa-de-vegetação, foi necessário avaliar o efeito da aeração do ambiente no consumo de água. Utilizou-se o termo aeração para significar o volume de ar fornecido pelos ventiladores para renovação do ar na casa-de-vegetação.

Apesar de não representar uma avaliação rigorosa, a aeração foi estimada através do tempo de funcionamento do sistema de ventilação (t_f), obtido com auxílio das medidas de temperatura máxima (T_M) e temperatura mínima (T_m), efetuadas diariamente ao longo do experimento. Este procedimento se deveu ao fato da vazão fornecida pelos ventiladores ser constante.

Como o sistema de ventilação era ligado e desligado automaticamente na temperatura de 27°C , o tempo de funcionamento (t_f em fração do dia) foi estimado por:

$$t_f = \frac{T_M - 27}{T_M - T_m} \dots\dots\dots (1)$$

A expressão (1) representa uma adaptação da metodologia de estimativa de unidades térmicas para o cálculo da aeração (OMETTO, 1981); isto é, t_f é a fração do dia em que a temperatura fica acima de 27°C , tomada em relação à amplitude térmica total do dia.

As temperaturas máximas e mínimas diárias foram determinadas com um termômetro de máxima e mínima de controle magnético instalado à sombra a 1,50 m do piso.

3.5. Fundamentos teóricos

O modelo matemático utilizado para estudar o consumo de água baseou-se no trabalho de DOORENBOS e KASSAM (1979).

O modelo pode ser entendido com auxílio das figuras 2 e 3.

A figura 2 mostra que a água disponível no solo apresenta inicialmente uma redução acentuada com o decorrer do tempo, passando em seguida a ter uma variação cada vez menor.

A taxa de redução da água disponível com o tempo pode ser obtida a partir dos valores da curva da figura 2. A figura 3 apresenta a variação desta taxa em função da umidade do solo. No início, a taxa de redução se apresenta constante, independente da variação da umidade do solo (segmento A'B'). A partir do ponto B' a taxa de redução varia linearmente com a umidade do solo até o esgotamento da água disponível.

As duas figuras foram traçadas considerando que a demanda atmosférica permanece constante (10 mm/dia). Entretanto, se a demanda atmosférica apresenta uma variação periódica,

Figura 2. Redução da unidade do solo com o tempo.

Figura 3. Taxa de variação da umidade do solo com o tempo, em função da umidade do solo.

dica, elas ainda são válidas se os intervalos de tempo corresponderem ao período de variação da demanda. Nesse caso, toma-se o valor médio da demanda como sendo representativo do período. Em termos práticos, sabe-se que a evapotranspiração de referência (demanda) obedece a uma variação periódica em 24 horas, devido à disponibilidade de energia para o processo. As figuras são então válidas para valores médios obtidos a intervalos de 1 dia, durante o período de observação (12 dias), quando a evapotranspiração máxima permanece invariável. Em intervalos de menos de 24 horas ou quando a demanda é variável, a umidade do solo segue um padrão de variação mais complexo.

Na figura 3, ao longo do segmento A'B' o solo perde água a uma taxa constante que corresponde à evapotranspiração máxima (ET_m).

O segmento B'C' representa a fase de taxa decrescente, que se inicia quando foi consumida a fração p da capacidade de água disponível. Matematicamente o trecho B'C' pode ser representado por:

$$-\frac{dAD}{dt} = \frac{AD}{(1-p)CAD} ET_m \dots\dots\dots (2)$$

Rearranjando a equação (2) tem-se:

$$\frac{dAD}{AD} = \frac{ET_m}{(1-p)CAD} dt \dots\dots\dots (3)$$

O intervalo de tempo decorrido entre o instan-

te em que o solo estava na capacidade de campo (t_0) e o instante em que começa a fase decrescente da evapotranspiração (t_1) é igual a p_{CAD}/ET_m .

Integrando a equação 3 desde o instante em que iniciou a fase decrescente, até uma AD qualquer atingida após o tempo t decorrido desde o início da secagem, tem-se:

$$\int_{(1-p)CAD}^{AD} - \frac{dAD}{AD} = \int_{\frac{p_{CAD}}{ET_m}}^t \frac{ET_m}{(1-p)CAD} dt \dots\dots\dots (4)$$

$$- \ln AD + \ln(1-p)CAD = \frac{ET_m \cdot t}{(1-p)CAD} - \frac{p}{1-p} \dots\dots\dots (5)$$

$$AD = (1-p) \cdot CAD \exp \left[\frac{ET_m \cdot t}{(1-p)CAD} - \frac{p}{1-p} \right] \dots\dots\dots (7)$$

DOORENBOS e KASSAM (1979) assumiram que o valor de p era inversamente proporcional a ET_m , variando ainda com o tipo de cultura. SLABBERS (1980) demonstrou que o valor de p guardava uma relação direta com o potencial crítico da água na folha e inversa em relação a ET_m . A figura 4 representa a taxa de variação da umidade do solo em condições diferentes de demanda, para uma mesma cultura ou potencial crítico.

É importante salientar que a figura 4 apresenta-se semelhante às representações encontradas nos trabalhos de DENMEAD e SHAW (1962) e COWAN (1965).

A metodologia empregada no presente trabalho obrigou a introdução das seguintes modificações no modelo matemático:

Figura 4. Taxa de variação da umidade do solo em condições diferentes de demanda.

I - A evapotranspiração máxima (ET_m) incluiu também a contribuição da energia advectiva, refletindo não só a demanda atmosférica, mas também a cultura e sua área foliar.

II - Cada tratamento de umidade correspondeu a um nível inicial diferente de água no solo, com apenas um deles (AD_1) coincidindo com a CAD. No presente trabalho admitiu-se a hipótese de que em cada tratamento o modelo poderia ser aplicado desde que fosse utilizada uma correção do tempo (t'), correspondente à diferença entre a CAD e a umidade inicial de cada tratamento (AD_i). Durante o tempo t' toda a água retirada do solo seria perdida sob taxa máxima, equivalente à ET_m .

III - A irrigação fornecida no intervalo de medida de umidade não afetaria o modelo, podendo entretanto ocorrer 3 hipóteses:

- Toda a água adicionada no intervalo (I) seria perdida à taxa máxima, igual a ET_m , em virtude de não ter sido ainda atingido o limite crítico de umidade do solo.
- Toda a água adicionada no intervalo (I) seria perdida a uma taxa inferior a ET_m , em decorrência de já ter sido ultrapassado o limite crítico de umidade no solo.
- A água adicionada no intervalo de medida seria perdida parcialmente a uma taxa igual a ET_m , com o restante perdendo-se a uma taxa menor. Nesse caso o limite crítico de umida

de do solo seria atingido antes de se proceder a irrigação, mas a água adicionada elevaria o teor do solo além do limite crítico.

Com base na primeira alteração a equação 7 não seria modificada, mas ET_m assumiria um significado diferenciado convencional, incluindo o efeito da aeração do ambiente.

A correção t' pode ser então calculada por:

$$t' = \frac{CAD - AD_i}{ET_m} \dots\dots\dots (8)$$

Acrescentando t' ao tempo t , tem-se:

$$AD = (1-p)CAD \exp - \frac{ET_m(t+t')}{(1-p)CAD} - \frac{P}{1-p} \dots\dots\dots (9)$$

ou,

$$AD = (1-p)CAD \exp - \left(\frac{ET_m \cdot t}{(1-p)CAD} + \frac{CAD - AD_i}{(1-p)CAD} - \frac{P}{1-p} \right) \dots\dots\dots (10)$$

$$AD = (1-p)CAD \exp - \left(\frac{ET_m \cdot t + CAD - AD_i - pCAD}{(1-p)CAD} \right) \dots\dots\dots (11)$$

$$AD = (1-p)CAD \exp - \left(\frac{ET_m \cdot t + (1-p)CAD - AD_i}{(1-p)CAD} \right) \dots\dots\dots (12)$$

$$AD = (1-p) CAD \exp - \left(\frac{ET_m \cdot t}{(1-p) \cdot CAD} + 1 \right) \cdot \exp \frac{AD_i}{(1-p) CAD} \quad (13)$$

A equação 13 expressa a umidade final do solo em função também da umidade inicial (AD_i). Se as outras grandezas incluídas forem consideradas constantes, a equação 13 pode ser expressa como:

$$AD = K \exp b AD_i \quad \dots\dots\dots (14)$$

onde: $b = \frac{1}{(1-p) CAD}$ e $K = (1-p) CAD \exp - \left(\frac{ET_m \cdot t}{(1-p) CAD} + 1 \right)$

A constante K pode ser expressa como:

$$K = \frac{1}{b} \exp - \left(b ET_m \cdot t + 1 \right) \quad \dots\dots\dots (15)$$

A equação 14 pode ainda ser expressa como:

$$\ln AD = \ln K + b AD_i \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\ln AD = a + b AD_i \quad \dots\dots\dots (17)$$

A expressão 17 permite então ajustar os resultados de umidade final de tratamentos com umidades iniciais diferentes a uma equação de regressão linear. Os coeficientes a e b podem então ser utilizados para determinar a fração p e o valor de ET_m do período t, desde que a CAD seja conhecida.

A fração p da CAD até onde a evapotranspira

ção é igual à ET_m é dada, de acordo com a definição de b , por:

$$p = 1 - \frac{1}{b \text{ CAD}} \dots\dots\dots (18)$$

A evapotranspiração máxima pode ser obtida a partir da equação 15 por:

$$ET_{m,t} = - \frac{\ln b + a + 1}{b} \dots\dots\dots (19)$$

A terceira alteração implica na introdução de um fator não incluído no modelo de DOORENBOS e KASSAM (1979), que é a ocorrência de recarga parcial ou total da água do solo através de irrigação.

Nas duas primeiras hipóteses previstas na terceira alteração fez-se necessário recorrer aos limites de integração utilizados para a obtenção da equação 7.

Quando a irrigação (I) foi adicionada antes de atingido o nível crítico, os limites de integração passam a ser:

$$\int_{(1-p)CAD}^{AD} - \frac{dAD}{AD} = \int_{(pCAD+I)/ET_m}^t \frac{ET_m}{(1-p)CAD} dt \dots\dots (20)$$

resultando em:

$$- \ln \frac{AD}{(1-p)CAD} = \frac{ET_m}{(1-p)CAD} \left(t - \frac{pCAD + I}{ET_m} \right) \quad (21)$$

$$- \ln \frac{AD}{(1-p)CAD} = \frac{ET_m \cdot t}{(1-p)CAD} - \frac{pCAD + I}{(1-p)CAD} \quad (22)$$

rearranjando:

$$AD = (1-p)CAD \exp - \left(\frac{ET_m \cdot t}{(1-p)CAD} - \frac{P}{1-p} - \frac{I}{(1-p)CAD} \right) \quad (23)$$

$$AD = (1-p)CAD \exp - \left(\frac{ET_m \cdot t}{(1-p)CAD} - \frac{P}{1-p} \right) \cdot \exp \frac{I}{(1-p)CAD} \quad (24)$$

A equação 24 difere da equação 7 pelo aparecimento da expressão $\exp (I/(1-p)CAD)$. Convém lembrar que resulta de um retardamento para atingir o nível de umidade, uma vez que a água foi adicionada antes da fração p haver sido esgotada.

Procedendo-se as alterações já efetuadas na equação 13, a equação 24 torna-se:

$$AD = (1-p)CAD \cdot \exp - \frac{ET_m \cdot t}{(1-p)CAD} + 1 \cdot \exp \frac{I}{(1-p)CAD} \cdot \exp \frac{AD_i}{(1-p)CAD} \quad (25)$$

Colocando-se de forma simplificada tem-se:

$$AD = K_1 \exp b AD_i \dots\dots\dots (26)$$

onde:

$$K_1 = (1-p)CAD \exp \left\{ - \left(\frac{ETm.t}{(1-p)CAD} + 1 \right) + \frac{I}{(1-p)CAD} \dots \right\} \quad (27)$$

$$K_1 = \frac{1}{b} \exp \left[-(b ETm.t+1) + bI \right] \dots \dots \dots (28)$$

A equação 26 pode ser expressa como:

$$\ln AD = \ln K_1 + b ADi \dots \dots \dots (29)$$

Comparando-se com a equação 17 verifica-se que permanece a expressão linear, alterando o significado do coeficiente linear da reta (a). Dessa forma apenas a evapotranspiração máxima tem sua fórmula de cálculo modificada para:

$$ETm.t = - \frac{\ln b + a + 1}{b} + I \dots \dots \dots (30)$$

Na segunda hipótese, quando a irrigação foi acrescentada depois de atingido o limite crítico de umidade do solo, a quantidade de água a ser perdida a uma taxa inferior a ETm passa de $(1-p)CAD$ para $(1-p)CAD + I$, correspondendo a um atraso ainda maior na curva de esgotamento da umidade do que aquele representado pela primeira hipótese. Os limites de integração passam a ser então:

$$\int \frac{AD}{(1-p)CAD+I} - \frac{dAD}{AD} = \int \frac{t}{\frac{pCAD}{ETm}} \frac{ETm}{(1-p)CAD} dt \dots \quad (31)$$

resultando em:

$$- \ln \frac{AD}{(1-p)CAD + I} = \frac{ETm \cdot t}{(1-p)CAD} - \frac{P}{1-p} \dots \quad (32)$$

$$AD = \left[(1-p)CAD + I \right] \exp - \left[\frac{ETm \cdot t}{(1-p)CAD} - \frac{P}{1-p} \right] \dots \quad (33)$$

Introduzindo as alterações efetuadas para a obtenção da equação 13, obteve-se:

$$AD = \left[(1-p)CAD + I \right] \exp - \left[\frac{ETm \cdot t}{(1-p)CAD} + 1 \right] \cdot \exp \frac{AD_i}{(1-p)CAD} \quad (34)$$

A equação 34 pode ser simplificada para:

$$AD = K_2 \exp b AD_i \dots \quad (35)$$

onde:

$$K_2 = \left[(1-p)CAD + I \right] \exp - \left[\frac{ETm \cdot t}{(1-p)CAD} + 1 \right] \dots \quad (36)$$

ou,

$$K_2 = \left(\frac{1}{b} + I \right) \exp - \left[b ETm \cdot t + 1 \right] \dots \quad (37)$$

A equação 35 pode ser escrita sob a forma de:

$$\ln AD = \ln K_2 + b AD_i \dots\dots\dots (38)$$

Comparando-se com a equação 17 observa-se que aparece novamente uma expressão linear onde o coeficiente linear da reta assume significado diferente. A evapotranspiração máxima pode então ser obtida por:

$$ET_{m.t} = \frac{\ln \left(\frac{1}{b} + I \right) - a - 1}{b} \dots\dots\dots (39)$$

A última hipótese da terceira alteração do modelo representa uma situação intermediária entre a primeira e segunda hipóteses. A água fornecida na irrigação seria perdida inicialmente sob taxa máxima, até atingir o nível crítico de umidade no solo, após o que seria perdida a uma taxa decrescente de acordo com o que resta de água disponível no solo.

Nas duas primeiras hipóteses foram obtidas duas expressões lineares com o mesmo coeficiente angular e diferentes coeficientes lineares. Consequentemente, deduz-se que na terceira hipótese deve permanecer o coeficiente angular. O coeficiente linear deve se situar em posição intermediária entre os das duas primeiras hipóteses e só pode ser obtido medindo-se a umidade do solo no instante da irrigação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Altura das plantas e perfilhamento

A tabela 2 apresenta os valores médios de altura das plantas obtidos nas combinações de água disponível e doses de nitrogênio.

Tabela 2. Altura (cm) das plantas de arroz no fatorial N x AD

Tratamentos	AD ₁	AD ₂	AD ₃
N ₀	112,2	116,5	106,0
N ₁	128,8	118,8	106,8
N ₂	130,5	118,2	104,7

AD₁ = 26 mm; AD₂ = 18 mm; AD₃ = 10 mm.

A análise da variância dos resultados (tabela

3) indicou que houve efeito significativo do adubo, do regime de irrigação e da interação entre eles, ao nível de 5% de probabilidade.

O desdobramento da interação revelou que o efeito do nitrogênio foi significativo quando o nível de umidade do solo foi o mais alto. Nos outros dois níveis de umidade, a aplicação do adubo não alterou significativamente os resultados. Por outro lado, os níveis de umidade afetaram a altura de forma significativa, com ou sem o fornecimento suplementar de nitrogênio.

Os valores da tabela 2 podem ainda ser vistos na figura 5. Na figura 5a observa-se que o efeito do nitrogênio só se manifestou na umidade mais alta, mostrando que a deficiência hídrica impediu o aparecimento do efeito do adubo. Na figura 5b vê-se que o efeito da água disponível foi linear quando se aplicou o nitrogênio. Na ausência do adubo, praticamente não surgiu diferença entre os dois tratamentos mais úmidos, indicando que a deficiência do nutriente limitou o crescimento.

O efeito do nitrogênio sobre o crescimento do arroz tem sido observado em muitos trabalhos, sendo resultante do aumento da atividade fotossintética (MURATA, 1969).

Apesar do adubo conter enxofre e nitrogênio, o efeito apresentado foi atribuído ao segundo em virtude do aparecimento de sintomas de deficiência típicos nas parcelas que não receberam sulfato de amônio.

Tabela 3. Resultados da análise da variância da altura de plantas no fatorial N x AD

Causa de variação	Teste F
Nitrogênio	6,27 *
Água disponível	38,28 *
Interação	4,87 *
N em AD ₁	
linear	25,53 *
quadrático	5,70 *
N em AD ₂	0,22
N em AD ₃	0,18
AD em N ₀	
linear	2,89
quadrático	5,57 *
AD em N ₁	
linear	36,76 *
quadrático	0,10
AD em N ₂	
linear	50,69 *
quadrático	0,03

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A redução da altura de plantas de arroz provocada por deficiência hídrica foi também verificada por STONE (1983), que atribuiu esse efeito à redução da turgescência das células.

Segundo BEGG e TURNER (1976), há um declínio inicialmente acentuado e depois gradual no crescimento celular à medida que o estresse hídrico se desenvolve, com o crescimento

Figura 5. Altura (H) das plantas de arroz em função da dose de nitrogênio (N) e dos níveis de água disponível (AD).

cessando quando a pressão de turgor ainda é positiva. O crescimento é função do módulo de elasticidade e da pressão de turgor, havendo ainda um limite de pressão abaixo do qual ele não ocorre. A paralisação do crescimento reveste-se de importância pelo fato de ser um efeito irreversível, com a retomada do crescimento da planta se dando através de novas células.

A redução na absorção do nutriente, induzida pela deficiência hídrica, pode também ter contribuído para a redução na altura das plantas (BEGG e TURNER, 1976). Entretanto sua contribuição deve ter sido relativamente menor do que a da redução da turgescência ou da mudança do módulo de elasticidade, pois o efeito do adubo só se apresentou significativo no nível mais elevado de água disponível.

A tabela 4 mostra os valores médios de número de perfilhos por vaso no fatorial N x AD.

Tabela 4. Valor médio do número de perfilhos por vaso no fatorial N x AD

Tratamentos	AD ₁	AD ₂	AD ₃
N ₀	4,3	4,0	4,3
N ₁	7,0	8,0	8,3
N ₂	8,3	6,7	7,0

A análise da variância do número de perfilhos por vaso foi efetuada através da transformação dos dados para $\sqrt{x+0,5}$, produzindo os resultados da tabela 5.

Tabela 5. Resultado da análise da variância do número de perfilhos por vaso

Causa de variação	Teste F
Nitrogênio linear	21,72 *
quadrático	11,63 *
Água disponível	0,19
Interação	0,13

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

O número de perfilhos por vaso foi afetado significativamente pelo nitrogênio, aumentando com a aplicação do adubo, obedecendo a um padrão quadrático de variação. O efeito do nitrogênio sobre o perfilhamento do arroz também foi observado em muitos trabalhos, não havendo discordância a esse respeito na literatura, de acordo com a revisão conduzida por CHANDLER (1969). Esse efeito pode ser entendido utilizando-se o conceito morfológico descrito por aquele autor, segundo o qual a planta de arroz pode ser considerada como constituída de várias unidades. A unidade se repete em cada nó e consis-

te de uma folha, um perfilho, uma raiz e um internô. De acordo com MURATA e MATSUSHIMA (1975), o perfilho primário emerge da axila da folha n-3 quando abre a folha n do colmo principal. Os perfilhos seguintes emergem de forma semelhante. Assim sendo, o perfilhamento está sincronizado com o crescimento foliar do colmo principal, sendo tanto maior quanto maior for o número de folhas. Ao influir no crescimento foliar, o nitrogênio aumenta, portanto, o número de perfilhos.

O perfilhamento não foi afetado pela água disponível no solo, o que pode ser atribuído ao fato de que os tratamentos de umidade foram impostos depois que a cultura passou pela fase de perfilhamento. A emissão dos perfilhos se inicia com a emissão da quarta ou quinta folha, paralisando com a iniciação floral ou antes disso, quando a competição por luz e nutrientes impede o desenvolvimento dos últimos perfilhos (MURATA e MATSUSHIMA, 1975; FAGERIA, 1984).

O índice de área foliar (IAF) em arroz aumenta com a idade da planta, atingindo seu valor máximo pouco antes do florescimento. O aumento de IAF se deve ao aumento do número de perfilhos e do tamanho das folhas (TANAKA et alii, 1964; MURATA e MATSUSHIMA, 1975; FAGERIA, 1984). O tamanho das folhas varia principalmente com o comprimento (TANAKA, KAWANO e YAMAGUCHI, 1966). Como a medida de altura de plantas foi tomada de modo a considerar o comprimento das folhas, utilizou-se a altura de plantas e o número de perfilhos como indicadores da variação do índice de área foliar.

4.2. Evapotranspiração

4.2.1. No ciclo

A evapotranspiração ao longo do ciclo da cultura, obtida através do balanço hídrico dos vasos, pode ser observada na figura 6. Os resultados nessa figura representam médias de três repetições e referem-se apenas aos vasos onde a umidade foi mantida no nível mais alto durante todo o ciclo.

A forma da curva de evapotranspiração acumulada em função do tempo apresentou forma sigmóide. A forma da curva se explica pela relação entre evapotranspiração e área foliar. Em condições semelhantes de demanda atmosférica, a perda de água do solo aumenta proporcionalmente ao aumento da área foliar, até um limite imposto pelo autosombreamento das folhas. Como o crescimento da área foliar apresenta padrão sigmóide, a evolução da perda acumulada de água do solo para a atmosfera também segue esse padrão.

Conforme se pode observar pela figura 6, a dose N_1 provocou o maior consumo de água, com cerca de 640 mm em todo o ciclo. Com a dose maior a evapotranspiração total foi de 600 mm, vindo em segundo lugar. O menor consumo de água foi observado quando não se aplicou o adubo, sendo de aproximadamente 450 mm. Os resultados indicam que a aplicação do sulfato de amônio contribuiu para o aumento da área foliar, resultando em maior consumo de água.

Figura 6. Evapotranspiração acumulada (ET) ao longo do ciclo do arroz nos tratamentos mais úmidos.

4.2.2. Durante o período crítico

A tabela 6 apresenta a evapotranspiração média das repetições durante o período em que foram impostos os três níveis de água disponível, que começou por ocasião da iniciação floral e terminou quando os grãos estavam no estágio leitoso, ou seja, no início da maturação. Esse é o período crítico da cultura em resposta ao estresse hídrico (MURATA e MUTSUSHIMA, 1975). Os resultados da tabela 6 podem ser vistos também na figura 7.

Tabela 6. Evapotranspiração média acumulada (mm) no período crítico no fatorial N x AD

Tratamentos	AD ₁	AD ₂	AD ₃
N ₀	216,1	227,4	205,6
N ₁	342,4	302,2	228,3
N ₂	330,1	319,9	240,4

A análise da variância da evapotranspiração durante o período crítico apresentou os resultados encontrados na tabela 7. Observa-se que o adubo, água disponível e a interação entre eles apresentaram efeito significativo.

Figura 7. Evapotranspiração (ET) do arroz no período crítico, em função do nitrogênio (N) e da água disponível (AD).

Tabela 7. Resultados da análise da variância da evapotranspi-
ração durante o período crítico

Causas de variação		Teste F
Nitrogênio		38,48 *
Água disponível		27,66 *
Interação		4,90*
N em AD ₁	linear	41,45 *
	quadrático	20,40 *
N em AD ₂	linear	27,28 *
	quadrático	3,46
N em AD ₃		1,99
AD em N ₀		0,76
AD em N ₁	linear	41,45 *
	quadrático	1,20
AD em N ₂	linear	25,65 *
	quadrático	5,11 *

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

O desdobramento da interação mostrou que o efeito do nitrogênio foi significativo apenas nos dois níveis mais elevados de umidade. A aplicação do sulfato de amônio quando ocorreu a maior deficiência hídrica, portanto, não teve efeito significativo, apesar do pequeno aumento observado. Esse resultado pode ser atribuído ao fato da umidade do solo ter limitado o suprimento de água para as plantas, mantendo a eva

potranspiração no mesmo nível, a despeito das diferenças na área foliar provocadas pela aplicação do sulfato de amônio. Essas diferenças na área foliar foram inferidas da observação do número de perfilhos, já que não houve diferença na altura das plantas. Em consequência, enquanto foram mantidos os diferentes níveis de umidade, devem ter ocorrido valores semelhantes de evapotranspiração real entre os tratamentos, apesar de apresentarem valores diferentes de evapotranspiração máxima, em consonância com os modelos de evapotranspiração encontrados por DENMEAD e SHAW (1962) e COWAN (1965).

O efeito do nitrogênio na evapotranspiração, quando a umidade foi mantida no nível intermediário, foi linear, ou seja, quanto maior a dose do adubo maior a evapotranspiração. Nesse caso, a quantidade de água existente no solo já permitiu o aparecimento do efeito das diferentes demandas sobre o consumo de água. Essas diferenças entre as necessidades hídricas foi atribuída às alterações da área foliar, as quais, por sua vez, foram provocadas pela aplicação do adubo, conforme se deduz dos resultados obtidos no número de perfilhos por vaso.

No nível mais elevado de umidade, o efeito do nitrogênio sobre a evapotranspiração no período crítico man teve o mesmo padrão de comportamento já observado globalmente no ciclo. A resposta foi quadrática, em consequência do crescimento do índice de área foliar promovido pelo adubo. Observa-se que no tratamento AD₁ cresceram a altura das plantas e o número de perfilhos.

Na tabela 7 observa-se que o efeito da água disponível foi significativo apenas quando se aplicou o adubo nitrogenado. Isso pode ser devido à reduzida área foliar nas parcelas sem o adubo, o que manteve a demanda hídrica em níveis suficientemente baixos, a ponto de ser atendida do mesmo modo nos três níveis de umidade em que a cultura foi mantida. DENMEAD e SHAW (1962) obtiveram também valores semelhantes de evapotranspiração real em parcelas com diferentes umidades, em um dia com baixa evapotranspiração potencial.

O efeito da água disponível foi linear quando se aplicou a dose N_1 . Nesse caso a área foliar condicionou demandas altas, mas a perda real de água foi limitada pelo suprimento. Além disso, a altura das plantas indicou que a área foliar foi maior conforme o aumento de água disponível.

Na dose N_2 , o efeito da água disponível sobre a evapotranspiração foi quadrático, observando-se um aumento da perda de água em relação à dose N_1 , quando comparou-se os tratamentos mais secos. Novamente, apesar da elevada necessidade de água decorrente do crescimento foliar, a evapotranspiração real foi limitada pela água disponível. Contribuíram ainda diferenças de área foliar, conforme indicou a altura das plantas. O efeito quadrático pode ser atribuído a uma capacidade maior de extração de água do solo, em decorrência do provável ajuste osmótico provocado pela dose N_2 . O ajuste osmótico é um mecanismo utilizado pelas plantas para tolerar a deficiência hídrica, que consiste no abaixamento do potencial osmótico (π) da água nas células.

Uma perda efetiva de água das células durante um déficit hídrico, concentra a solução no interior da célula e abaixa π . Entretanto, além do decréscimo de π devido ao aumento da concentração pela perda parcial do solvente, o estresse induz um aumento da concentração devido ao aumento da quantidade de solutos, o que reduz a perda efetiva de água da célula, mantendo o turgor, mesmo quando o potencial da água na folha (ψ) decresce. Dessa forma, a planta continua perdendo água apesar da redução do suprimento fornecido pelo solo.

Diversas substâncias têm sido identificadas como solutos responsáveis pelo ajustamento osmótico: a prolina; alguns álcoois; alguns ácidos orgânicos; o ion potássio e os carboidratos solúveis provenientes da oxidação de açúcares e amido, ou, principalmente, compostos produzidos na fotossíntese durante o período de estresse hídrico (BEGG e TURNER, 1976).

O ajustamento osmótico deve ter contribuído também para a resposta linear ao nitrogênio em AD_2 , além da já citada contribuição da área foliar. O mesmo pode ser dito em relação à tendência de aumento observado na umidade AD_3 .

Outra alternativa para explicar a maior capacidade de extração da água do solo seria a de que o adubo poderia ter promovido um aumento da densidade de raízes (COWAN, 1965). Entretanto, o próprio COWAN (1965), estabeleceu um limite de densidade de raízes além do qual não haveria mais alteração da capacidade extratora do sistema solo-planta. No

presente trabalho, com quatro plantas ocupando um volume de solo de apenas sete litros, provavelmente tal limite foi atingido. Além disso, NEWMAN (1969) e RUTTER (1975) assinalaram que as densidades de raízes assumidas por COWAN (1965) foram inferiores aos valores reais, as quais o levaram a superestimar a influência desse parâmetro.

4.2.3. Após o período crítico

A tabela 8 apresenta os valores médios de evapotranspiração do arroz após o período crítico, quando foram suspensos os tratamentos de umidade.

Tabela 8. Evapotranspiração média acumulada (mm) após o período crítico

Tratamentos	AD ₁ *	AD ₂ *	AD ₃ *
N ₀	94,9	100,3	92,3
N ₁	135,5	129,9	124,0
N ₂	128,8	139,5	131,7

* Do período crítico.

Procedeu-se a análise da variância da evapotranspiração após o período crítico, obtendo-se os resultados da tabela 9. A finalidade desta análise foi verificar se per

sistiam os efeitos atribuídos às diferenças de umidade no período anterior.

Tabela 9. Resultados da análise da variância da evapotranspiração após o período crítico

Causa de variação	Teste F
Nitrogênio	
linear	118,28 *
quadrático	25,97 *
Água disponível no período crítico	2,17
Interação	1,16

*. Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Após o período crítico, o nitrogênio apresentou efeito quadrático sobre a evapotranspiração. Esse efeito foi atribuído às diferenças de área foliar provocadas pelo adubo. O aumento de área foliar com a aplicação do adubo se deveu ao aumento de perfilhos e altura de plantas.

Os tratamentos de umidade impostos no período anterior não tiveram efeito significativo na evapotranspiração medida após o período crítico. Desse modo, inferiu-se que as variações de área foliar decorrentes das diferenças de altura foram insuficientes para provocar, sozinhas, diferenças significativas na evapotranspiração.

4.3. Modelo matemático

A tabela 10 e a figura 8 apresentam os valores médios da lâmina de água disponível ao final do intervalo de reposição de água (ADf). Os valores representam médias de todas as medidas efetuadas durante o período crítico.

Tabela 10. Valores médios, em todo o período crítico, da água disponível ao final dos intervalos de medida da umidade (ADf), em mm

Tratamentos	AD ₁	AD ₂	AD ₃
N ₀	23,1	14,4	8,2
N ₁	14,9	9,4	6,1
N ₂	15,7	8,3	5,4

Procedeu-se a transformação dos dados da tabela 10 para $\ln ADf$, com a análise da variância produzindo os resultados da tabela 11, onde observa-se que houve efeito significativo do adubo e da água disponível inicial.

Ambos os efeitos podem ser explicados com auxílio do modelo matemático adotado (equações 25 e 34).

A aplicação do adubo provocou um aumento de índice de área foliar, resultando em maior ET_m e menor p. De acordo com o modelo, a umidade final do intervalo de medida

Tabela 11. Resultados da análise da variância dos valores médios de ln ADf, em todo o período crítico

Causa de variação		Teste F
Nitrogênio	linear	55,98 *
	quadrático	8,90 *
Água disponível	linear	272,65 *
	quadrático	0,14
Interação		0,80

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

decrece exponencialmente com o aumento da ET_m. A redução de p decorre do aumento da ET_m e resulta em maior economia de água (DOORENBOS e KASSAM, 1979; SLABBERS, 1980). No presente caso, o efeito sobre o aumento da demanda foi maior do que sobre a restrição na evapotranspiração, resultando em uma umidade final menor quando se aplicou o adubo.

As retas da figura 8 indicam que a umidade final cresce exponencialmente com o aumento da umidade inicial, conforme prevê o modelo.

As plantas absorveram água do solo além do limite crítico de umidade, caso contrário não haveria efeito exponencial, pois a água seria igualmente disponível até o final do intervalo de medida utilizado, num efeito linear. O

Figura 8. Valores médios da lâmina de água disponível ao final do intervalo de reposição de umidade.

princípio de que a umidade do solo seria igualmente disponível para as plantas, desde a capacidade de campo até o ponto de murcha permanente, foi proposto por VEIHMEYER e HENDRICHSON (1955). No modelo aqui adotado isto corresponderia a assumir $p = 1$.

Como o efeito do nitrogênio sobre a evapotranspiração já havia mostrado significância, ajustou-se uma equação para cada dose de sulfato de amônio, resultando em:

- Para N_0

$$y = 1,4517 + 0,0655x; \text{ com } r = 0,974; p = 0,413$$

$$ET_m(30) = 14,50 \text{ mm}; \quad ET_m(39) = 12,06 \text{ mm}$$

$$\overline{ET_m} = 6,64 \text{ mm/dia}$$

- Para N_1

$$y = 1,2529 + 0,0552x; \text{ com } r = 0,963; p = 0,303$$

$$ET_m(30) = 21,98 \text{ mm}; \quad ET_m(39) = 19,83 \text{ mm}$$

$$\overline{ET_m} = 10,45 \text{ mm/dia}$$

- Para N_2

$$y = 0,9654 + 0,0673x; \text{ com } r = 0,966; p = 0,428$$

$$ET_m(30) = 21,21 \text{ mm}; \quad ET_m(39) = 19,97 \text{ mm}$$

$$\overline{ET_m} = 9,98 \text{ mm/dia}$$

sendo: $y = \ln AD_f$; $x = AD_i$

$ET_m(30)$ = evapotranspiração calculada pela equação 30

$ET_m(39)$ = evapotranspiração calculada pela equação 39.

As variâncias das estimativas dos coeficientes linear (a) e angular (b) das retas foram de 0,0158 e 0,000043, respectivamente.

A aplicação do teste t permitiu verificar que os valores estimados de a e de b diferiram significativamente de zero, ao nível de 5% de probabilidade, nas três equações obtidas (tabela 12).

No caso do coeficiente b, a significância estatística indicou que em todos os tratamentos de adubação a taxa de evapotranspiração foi reduzida em consequência da redução da umidade do solo.

No caso do coeficiente a, a significância estatística revelou que, mesmo nos tratamentos com maior área foliar, a evapotranspiração total resultou de uma parcela dependente da umidade do solo, mais outra parcela que não foi afetada pela variação da umidade do solo.

Tabela 12. Valores calculados de t para a e b das equações de regressão do fatorial N x AD.

Tratamento	a	b
N ₀	11,55 *	9,99 *
N ₁	9,97 *	8,42 *
N ₂	7,68 *	10,26 *

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

A base teórica do modelo matemático adotado assumiu que, acima do ponto crítico de umidade do solo, a parcela independente correspondia à perda ocorrida a uma taxa máxima (ET_m). A parcela dependente da umidade do solo foi considerada perdida a uma velocidade inferior a ET_m.

RICHARDS e WALDLEIGH (1952) e THORNTHWAITE e MATHER (1955) consideraram que a relação ETR/ETP decrescia linearmente entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, correspondendo a assumir $p = 0$ no modelo matemático aqui adotado. PENMAN (1949), MARLAT et alii (1961), HOLMES (1961), GARDNER e HILLEL (1962), GARDNER e EHLIG (1963), DENMEAD e SHAW (1962), COWAN (1965), TANNER (1972); RUTTER (1975). DOORENBOS e KASSAM (1979) e SLABBERS (1980) consideraram que o valor de p se situava entre zero e um. Alguns desses trabalhos assinalaram todavia que o limite inferior da água disponível se situava abaixo de 15 atm, entre 30 e 50 atm.

Para que a condição de contorno imposta pela segunda alteração do modelo inicial fosse rigorosamente obedecida, os valores de p deveriam ser maiores do que 0,615, indicando que a ET_m ocorreria até AD₃, ou 10 mm de água disponível. Apesar dos valores encontrados serem inferiores a este limite teórico, as estimativas obtidas foram consideradas satisfatórias para as condições do experimento, onde os intervalos de medida foram de dois dias. Além disso, é conveniente salientar que a redução da taxa de evapotranspiração causada pelo decréscimo da água disponível, depois de ultrapassado o li

mite crítico, é inicialmente muito pequena, não provocando al teração substancial na correção t' introduzida no modelo. Por tanto, embora os valores de p indiquem que t' foi subestimado, a relação exponencial entre a umidade final e a inicial permaneceu, conforme mostram os resultados. Além disso, não foram observados sintomas de murcha enquanto a umidade dos va sos foi superior ou igual a AD_3 .

Como a umidade do solo não foi determinada no momento da irrigação suplementar, tornou-se impossível ava liar que fração da água de irrigação foi consumida antes do pon to crítico de umidade ser atingido. Em consequência, não foi identificada se a expressão 30 ou a expressão 39 era a mais adequada para estimar ET_m . Efetuando-se o cálculo com cada uma delas, verificou-se que apresentaram uma diferença rela tivamente pequena em comparação com o total consumido no in tervalo. A solução aqui adotada foi utilizar a média aritmética entre elas como estimativa de ET_m . A utilização do va lor médio significa admitir que a umidade do solo encontrava-se abaixo do ponto crítico no momento da irrigação. O forne cimento suplementar de água, no entanto, elevou a umidade do so lo acima do ponto crítico. Adotou-se assim a última hipótese levantada nas modificações introduzidas no modelo matemático.

Os valores estimados de ET_m e de p foram com parados com os valores estabelecidos por DOORENBOS e KASSAM (1979), que dividiram as culturas em quatro grupos, numerados em ordem crescente de capacidade de extração da água do solo.

A figura 9 mostra a posição do arroz de sequeiro em relação aos quatro grupos, observando-se que a variedade estudada se situou entre os grupos 3 e 4.

Utilizando-se as variâncias de a e de b das equações de regressão, verifica-se que os intervalos de confiança dos coeficientes foram relativamente largos ao nível de 5% ($\pm 0,2983$ e $\pm 0,0156$, respectivamente). Em consequência, não foi possível identificar se o adubo provocou alteração significativa na relação $p \times ET_m$. Entretanto, os valores obtidos de p e ET_m aparentemente reforçaram a inferência de que ocorreu ajustamento osmótico.

Comparando-se os valores de p e ET_m estimados para N_0 e N_1 , verificou-se que eles variaram segundo uma relação inversa, seguindo o modelo previsto por SLABBERS (1980). Quando ET_m cresceu em decorrência do aumento de área foliar causado pelo adubo, p decresceu proporcionalmente de acordo com o esperado para uma cultura do grupo 3 (DOORENBOS e KASSAM, 1979). Na dose N_2 a ET_m foi praticamente igual ao valor encontrado para N_1 , entretanto o valor de p foi maior do que os obtidos para N_0 e N_1 , indicando que a aplicação de uma dose maior do adubo permitiu o abaixamento do ponto crítico de umidade. O comportamento da variedade foi o de maior tolerância a umidades mais baixas do solo, como as culturas do grupo 4 (DOORENBOS e KASSAM, 1979). A dose maior de adubo deve ter permitido manter a abertura estomática por mais tempo, provavelmente em consequência do mecanismo de ajuste osmótico (BEGG e TURNER, 1976).

Figura 9. Variação da fração crítica de água disponível segundo o grupo de culturas estabelecido por DOORENBOS e KASSAM (1979).

Os resultados obtidos no fatorial N x AD foram também analisados em cada intervalo de medida, durante todo o período crítico. A tabela 13 mostra os resultados da análise da variância desses resultados.

Tabela 13. Valores do teste F da análise da variância de $\ln$ ADf nos intervalos de medida de umidade ao longo do período crítico.

Intervalo	N'	N''	AD'	AD''	Interação
24 a 26/10	5,69*	2,79	168,75*	0,34	1,93
26 a 28/10	2,42	1,24	157,41*	1,31	0,34
28 a 30/10	1,87	2,11	130,83*	0,10	2,11
30/10 a 01/11	7,44*	3,28	278,11*	0,05	1,31
01 a 03/11	19,76*	4,41	316,48*	1,34	1,17
03 a 05/11	23,77*	8,82*	550,20*	0,44	1,04
05 a 07/11	26,88*	3,78	149,31*	0,27	3,17
07 a 09/11	38,48*	17,02*	88,69*	3,17	1,68
09 a 11/11	64,33*	4,32*	215,15*	0,07	1,34
11 a 13/11	58,50*	4,76*	284,94*	0,39	0,61
13 a 15/11	89,19*	3,78	115,69*	3,18	1,65
15 a 17/11	80,60*	9,61*	271,17*	0,39	0,17
17 a 19/11	81,59*	11,70*	69,58*	1,00	1,10
19 a 21/11	111,54*	9,47*	103,02*	1,08	1,53
21 a 23/11	117,44*	3,26	224,74*	2,26	2,21
23 a 25/11	34,49*	0,41	39,31*	0,21	0,40

N' : Nitrogênio (linear); N'': Nitrogênio (quadrático)

AD': Água disponível (linear); AD'': Água disponível (quadrático)

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

O efeito da água disponível foi o mesmo encontrado com os valores médios do período crítico.

O efeito do nitrogênio variou ao longo do período crítico. Em dois intervalos de medida não houve significância estatística, em seis intervalos o efeito foi quadrático e nos intervalos restantes o efeito foi linear.

As figuras 10 e 11 mostram que o efeito do sulfato de amônio sofreu influência da evolução do ciclo da planta. Observa-se que, durante o período crítico, os valores de F calculado cresceram com o decorrer do tempo, passaram por um valor máximo e depois decresceram.

A evolução do efeito do adubo pode ser atribuído ao crescimento da área foliar.

Inicialmente o efeito provocado pelo adubo sobre a área foliar foi insuficiente para causar diferenças significativas na evapotranspiração. Com o passar do tempo, o crescimento das plantas acentuou a diferença de área foliar dos diversos tratamentos, refletindo no consumo da água do solo. Quando o crescimento vegetativo se aproximou de seu valor máximo, não houve diferença significativa entre os tratamentos que receberam o adubo. Acontece que o índice de área foliar influi na evapotranspiração enquanto for inferior a 3 (FISCHER e KOHN, 1966; RITCHIE e BURNETT, 1971; RITCHIE, 1974; BEGG e TURNER, 1976). Com a senescência das folhas inferiores e consequente decréscimo do IAF, voltou a ocorrer diferenças no consumo da água do solo entre os três tratamentos.

Figura 10. Valor do teste F para o efeito linear do nitrogênio sobre $\ln ADf$, ao longo do período crítico.

Figura 11. Valor do teste F para o efeito quadrático do nitrogênio sobre $\ln ADf$, ao longo do período crítico.

A figura 12 e a tabela 14 mostram os valores de E_{Tm} e p obtidos em cada intervalo de medida. Embora se observe uma relação inversa entre eles (SLABERS, 1980), há uma acentuada dispersão dos pontos. Entre as causas da dispersão estão os mecanismos da planta para a tolerância à seca. Estes mecanismos são acionados em resposta a um estímulo do ambiente, manifestando-se portanto em diferentes intensidades conforme o nível empregado na variável água disponível. Entre esses mecanismos estão incluídos a redução do crescimento (ver altura de plantas) e ajustamento osmótico (ver evapotranspiração).

O emprego do próprio conceito de capacidade de água disponível (CAD) pode também ter contribuído para a dispersão observada na figura 12. Os limites superior e inferior de água disponível constituem uma visão estática da água retida no espaço poroso do solo. Esses limites são indefinidos, representando uma aproximação genérica da disponibilidade da água. De um ponto de vista de maior exatidão a disponibilidade deve ser considerada de forma dinâmica, levando em consideração o movimento da água no solo, o qual é condicionado pelos gradientes de potencial no solo e na planta, além da resistência do solo e da planta ao transporte de água. Nesse particular, a difusividade da água no solo exerce um papel importante, especialmente porque obedece a uma relação exponencial com a umidade, sujeita a alterações decorrentes da variabilidade espacial do solo (GARDNER, 1965; REICHARDT, 1975).

Figura 12. Valores de ET_m e de p obtidos em cada intervalo de medida de umidade.

Tabela 14. Valores de ETm e de p nos intervalos de medida de umidade no fatorial N x AD

Intervalo	N ₀		N ₁		N ₂	
	ETm	p	ETm	p	ETm	p
24 a 26/10	5,70	0,727	5,89	0,673	5,68	0,700
26 a 28/10	7,37	0,671	8,83	0,647	8,41	0,692
28 a 30/10	7,66	0,518	11,26	0,223	9,08	0,505
30/10 a 01/11	5,90	0,372	8,32	0,166	6,99	0,384
01 a 03/11	5,82	0,539	7,97	0,492	7,51	0,616
03 a 05/11	4,18	0,274	6,31	0,149	5,54	0,290
05 a 07/11	8,84	0,578	11,14	0,559	10,84	0,657
07 a 09/11	8,40	0,150	20,38	-0,473	15,01	0,101
09 a 11/11	7,51	0,540	10,28	0,444	10,36	0,596
11 a 13/11	5,39	0,361	8,30	0,321	8,84	0,392
13 a 15/11	7,29	0,492	14,27	0,281	10,35	0,582
15 a 17/11	5,08	0,270	8,88	0,229	9,12	0,317
17 a 19/11	8,46	0,288	18,18	-0,172	22,96	-0,364
19 a 21/11	8,51	0,378	16,92	-0,018	17,47	0,074
21 a 23/11	6,50	0,123	11,82	0,073	11,80	0,276
23 a 25/11	7,74	0,534	12,87	0,532	13,66	0,679

Na tabela 14 observa-se que foram encontrados valores de ETm entre 5,0 e 23,0 mm/dia. A ocorrência dos valores mais altos refletem a existência de advecção fornecendo a energia necessária para o processo de evapotranspiração. A advecção foi consequência do acionamento automático dos ventiladores instalados na casa de vegetação.

Nos dias de maior ETm os valores de p foram negativos, significando que, nesses dias, nem mesmo quando o solo se encontrava na capacidade de campo havia água suficiente para atender a demanda. Os valores negativos de p sugerem ainda que o limite superior de água disponível pode ter sido subestimado. No caso do arroz, o limite superior poderia ser tomado além do nível de saturação do solo, uma vez que a cultura suporta o encharcamento devido a existência do transporte de oxigênio da parte aérea para as raízes.

Apesar dos limites utilizados de água disponível serem questionáveis, a água existente além desses limites geralmente é pouco utilizada em condições de campo. Acima do limite superior a maior parte da água é perdida rapidamente por drenagem. Abaixo do limite inferior a taxa de evapotranspiração é geralmente muito baixa para produzir efeitos mensuráveis no consumo de água.

Assim sendo, considerou-se que a manutenção desses limites representa uma possibilidade de extrapolação para as conclusões aqui obtidas, pelo menos aquelas encontradas com os valores médios do período crítico.

Procedeu-se também a análise da variância dos dezesseis intervalos de medida agrupados, conforme mostram as tabelas 15 e 16.

Em ambos os casos houve efeito significativo dos tratamentos, do intervalos de medida e da interação.

O efeito dos tratamentos já foi discutido na análise das médias do período crítico.

Tabela 15. Resultados da análise da variância dos intervalos agrupados no fatorial N x AD (efeito do adubo)

Causa de variação	Teste F
Nitrogênio	28,88 *
Intervalos	12,25 *
Interação	5,09 *

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade

Tabela 16. Resultados da análise da variância dos intervalos agrupados no fatorial N x AD (efeito da água disponível)

Causa de variação	Teste F
Água disponível	104,01 *
Intervalos	7,20 *
Interação	8,65 *

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

O efeito dos intervalos foi consequência das variações da demanda durante o período crítico, ou seja, a evapotranspiração de referência e/ou a área foliar sofreram variações ao longo do período crítico.

O efeito da interação nitrogênio x intervalo foi atribuído ao aparecimento de variação do efeito do adubo ao longo do tempo, conforme foi discutido na análise dos resultados da tabela 13.

O efeito da interação água disponível x intervalo refletiu a ocorrência de uma relação entre p e ET_m (SLABERS, 1980), com p sendo afetado pelos fatores que influíram na ET_m , como a disponibilidade de energia ao longo do tempo e a evolução do índice de área foliar.

4.4. Aeração

A tabela 17 apresenta os valores médios de tempo de funcionamento do sistema de ventilação e de radiação global incidente, ao nível do solo, no exterior da casa-de-vegetação. As medidas de radiação global foram fornecidas pelo Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ.

Os valores de ET_m obtidos nos diversos níveis de adubação (tabela 14) foram comparados com os dados de aeração e radiação global. Os resultados encontram-se na tabela 18 e na figura 13.

Considerou-se que a evapotranspiração máxima (ET_m) foi resultante da área foliar e da demanda atmosférica. A demanda atmosférica foi tomada como a soma efetiva dos efeitos da radiação e aeração (BEGG e TURNER, 1976).

Tabela 17. Tempo de funcionamento do sistema de ventilação (tj) e radiação global incidente ao nível do solo no exterior da casa-de-vegetação (Rg)

Intervalo	tf (dias)	Rg (mm/dia)
24 a 26/10	0,135	8,93
26 a 28/10	0,480	13,54
28 a 30/10	0,555	13,69
30/10 a 01/11	0,610	9,18
01 a 03/11	0,565	9,43
03 a 05/11	0,295	7,23
05 a 07/11	0,480	13,11
07 a 09/11	0,640	14,00
09 a 11/11	0,660	9,50
11 a 13/11	0,540	8,75
13 a 15/11	0,530	9,87
15 a 17/11	0,385	9,35
17 a 19/11	0,555	11,37
19 a 21/11	0,650	11,60
21 a 23/11	0,610	9,79
23 a 25/11	0,555	12,03

A tabela 18 e a figura 13 mostram que a correlação entre ET_m e a demanda atmosférica apresentou uma redução em consequência da dose de adubo empregada.

A aplicação de doses crescentes de adubo proporcionou a variação da área foliar durante o período crítico, provocando também alteração em ET_m, além daquelas causadas pe

la demanda atmosférica. As figuras 10 e 11 já haviam indicado essa variação.

Tabela 18. Coeficientes de correlação (r) entre a ETm (X_1), a radiação global (X_2) e a aeração (X_3)

Tratamentos	$r(1,2)$	$r(1,3)$	$r(2,3)$	$r(1,23)$
N_0	0,82	0,54	0,38	0,86
N_1	0,59	0,59	0,38	0,69
N_2	0,45	0,50	0,38	0,57

Os resultados indicam também que o efeito da aeração foi maior nos tratamentos com maior área foliar, indicando que a advecção foi tanto mais efetiva como fonte de energia quanto maior foi a superfície evaporante.

4.5. Produção de matéria seca

4.5.1. Matéria seca total da parte aérea

A tabela 19 e a figura 14 apresentam as produções médias de matéria seca total, excluído o peso das raízes, obtidas no fatorial $N \times AD$.

Figura 13. Efeito da radiação, aeração e área foliar sobre a evapotranspiração máxima para cada dose de adubo.

Na tabela 20 observa-se que houve efeito significativo da água disponível e do adubo, não havendo significância na interação entre eles. Ambos os efeitos foram no sentido de aumentar a matéria seca em função do aumento das quantidades fornecidas em cada tratamento. Nos dois casos o efeito foi quadrático, ou seja, os incrementos obtidos com a maior dose foram inferiores aos incrementos iniciais.

Tabela 19. Produções médias de matéria seca total da parte aérea no fatorial N x AD (g/vaso)

Tratamentos	AD ₁	AD ₂	AD ₃
N ₀	26,09	28,26	20,70
N ₁	44,54	41,06	33,03
N ₂	44,44	43,13	35,83

A análise da variância mostrou os resultados da tabela 20.

Tabela 20. Resultados da análise da variância da matéria seca total da parte aérea do fatorial N x AD.

Causa de variação	Teste F
Nitrogênio linear	209,55 *
quadrático	45,16 *
Água disponível linear	58,23 *
quadrático	12,26 *
Interação	1,57

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Figura 14. Produção (y) de matéria seca e de grãos e índice de colheita (IC) no fatorial $N \times AD$.

No caso do nitrogênio, esse padrão de comportamento já havia sido observado em pesquisas anteriores (MURATA, 1969; CHANDLER, 1969; MURATA e MATSUSHIMA, 1975; FAGERIA, 1984). O aumento da produção de matéria seca tem sido atribuído ao aumento da taxa fotossintética e do índice de área foliar causados pelo elemento. O declínio no incremento da produção causado pela dose N_2 pode ser devido ao aumento excessivo da área foliar, que resulta em maior sombreamento das folhas inferiores e crescimento do colmo. Em consequência, o balanço fotossíntese-respiração torna-se menos favorável, reduzindo a quantidade efetiva de matéria seca produzida (MURATA e MATSUSHIMA, 1975).

O efeito quadrático da água disponível pode ser explicado com auxílio do modelo empregado na análise da umidade do solo. Nele verifica-se que há um limite crítico de umidade, acima do qual a quantidade de água disponível não afeta a evapotranspiração, quando ela ocorre a uma taxa máxima (ET_m). Abaixo desse limite, a umidade restringe a velocidade de perda de água do solo. Em consequência, partindo-se de uma umidade inferior ao limite crítico, o fornecimento inicial de água resulta em maior transpiração e maior produção de matéria seca na fotossíntese, devido à intensificação das trocas gasosas na folha. À proporção que se aproxima o limite crítico, o fornecimento adicional de água não provoca um aumento correspondente de transpiração e abertura estomática, o que resulta em acréscimos menos pronunciados na quantidade de ma-

terial assimilado. A redução de matéria seca produzida foi observada em outros trabalhos onde se verificou a ocorrência de deficiência hídrica (SLATYER, 1967 e STONE, 1983).

4.5.2. Produção de grãos

A tabela 21 e a figura 14 mostram os valores da produção de grãos no fatorial N x AD.

Tabela 21. Produção média de grãos no fatorial N x AD, em gramas de matéria seca por vaso

Tratamentos	AD ₁	AD ₂	AD ₃
N ₀	12,42	12,26	9,60
N ₁	16,61	16,46	10,54
N ₂	13,97	10,50	10,66

A análise da variância produziu os resultados da tabela 22, com efeitos significativos dos tratamentos e da interação.

O desdobramento da interação indicou que não houve efeito significativo do adubo quando o nível de água disponível foi o mais baixo. Nesse caso, os tratamentos com maior área foliar (devida ao número de perfilhos), não produ-

Tabela 22. Resultados da análise da variância da produção de grãos no fatorial N x AD

Causa de variação		Teste F
Nitrogênio		14,88 *
Água disponível		21,84 *
Interação		4,47 *
N em AD ₁	linear	2,01
	quadrático	13,04 *
N em AD ₂	linear	2,61
	quadrático	28,84 *
N em AD ₃		0,57
AD em N ₀	linear	6,71 *
	quadrático	1,76
AD em N ₁	linear	30,94 *
	quadrático	9,30 *
AD em N ₂	linear	9,18 *
	quadrático	3,69

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

ziram mais porque o suprimento de água foi limitante para a produção de grãos. A análise da evapotranspiração já indicou que o nível mais baixo de umidade resultou em maior estresse hídrico, porque a umidade do solo se achava abaixo do limite crítico logo após a irrigação.

Nos dois níveis mais elevados de umidade houve efeito significativo do nitrogênio sobre a produção de grãos. A aplicação do adubo aumentou inicialmente a produção, mas a

dose subsequente levou a um rendimento inferior ao da primeira dose, em consequência do desenvolvimento excessivo da área foliar. O efeito depressivo foi ainda maior em AD_2 , quando havia menor disponibilidade de água.

A água disponível teve efeito significativo sobre a produção de grãos, aumentando o rendimento da cultura em qualquer dose do adubo. É interessante observar que o efeito sobre a produção em N_0 foi significativo, apesar de não se verificarem diferenças na evapotranspiração. Provavelmente a diferença de área foliar estabelecida pelos tratamentos (ver altura de plantas), tenha sido a causa desse comportamento na ausência do adubo. Em N_2 , embora o excesso de adubo tenha reduzido a produção, provavelmente houve a compensação devida ao ajustamento osmótico, reduzindo o drástico efeito esperado para o tratamento mais seco. A esse propósito, convém lembrar que os valores de p encontrados em N_0 e N_2 foram semelhantes entre si e superiores ao obtido em N_1 .

4.5.3. Componentes da produção

O rendimento em grãos de arroz é resultante do produtório de: número de panículas por unidade de área; número de grãos cheios por panícula; e peso médio dos grãos. Estes fatores são denominados componentes da produção. O número de grãos cheios por panícula pode ser ainda dividido em número de espiguetas por panícula e percentagem de grãos cheios.

No presente trabalho não se procedeu a esta segunda divisão em virtude do manuseio do material seco ter provocado a fragmentação de parte das espiguetas, impedindo uma contagem criteriosa.

As tabelas 23, 24 e 25 apresentam os valores médios do número de panículas por vaso, do número de grãos cheios por panícula e do peso de 100 grãos, respectivamente, no fatorial N x AD.

Tabela 23. Médias do número de panículas por vaso no fatorial N x AD

Tratamentos	AD ₁	AD ₂	AD ₃
N ₀	8,3	8,0	8,3
N ₁	11,0	12,0	12,3
N ₂	12,3	10,7	11,0

Tabela 24. Médias do numero de graos cheios por panícula no fatorial N x AD

Tratamentos	AD ₁	AD ₂	AD ₃
N ₀	50,0	52,3	40,0
N ₁	55,7	48,7	32,7
N ₂	42,7	44,0	44,0

Tabela 25. Peso médio de 100 grãos (g) no fatorial N x AD

Tratamentos	AD ₁	AD ₂	AD ₃
N ₀	3,04	3,00	2,89
N ₁	2,75	2,83	2,63
N ₂	2,71	2,25	2,22

O número de panículas por vaso foi afetado significativamente pela adubação nitrogenada, enquanto a água disponível não apresentou efeito significativo. Esse efeito do nitrogênio já foi observado em outros trabalhos (CHANDLER, 1969), sendo atribuído ao maior perfilhamento provocado pelo nutriente, uma vez que, em condições ambientais favoráveis, de cada colmo pode emergir uma panícula.

A tabela 26 apresenta os resultados das análises da variância dos componentes da produção no fatorial N x AD.

O suprimento de água não influenciou no número de panículas devido ao fato dos tratamentos de umidade terem sido estabelecidos apenas na fase crítica, quando o número de perfilhos já havia sido determinado (MURATA e MATSUSHIMA, 1975; STONE, 1983).

A água disponível teve efeito linear significativo sobre o número de grãos cheios por panícula, apresentan-

Tabela 26. Resultados das análises da variância dos componentes da produção no fatorial N x AD

Causa de variação		Teste F		
		a	b	c
Nitrogênio	linear	24,81*	1,14	42,98*
	quadrático	13,49*	0,02	0,41
Água disponível	linear	0,002	9,72*	7,97*
	quadrático	0,39	2,12	0,05
Interação		0,84	2,44	1,82

a: Número de panículas por vaso, com transformação para $\sqrt{x+0,5}$

b: Número de grãos cheios por panícula, com transformação para $\sqrt{x+0,5}$

c: Peso de 100 grãos

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

do correlação positiva. O nitrogênio, entretanto, não teve efeito significativo sobre o mesmo componente da produção. No caso da água, a redução progressiva da abertura estomática teria limitado as trocas gasosas, reduzindo a quantidade de produtos fotossintetizados, com aumento da esterilidade das espiguetas. Segundo MURATA (1969), a degeneração das espiguetas pode ser provocada pela deficiência no suprimento de carboidratos durante a formação da panícula.

A ausência de resposta do número de grãos à aplicação do adubo pode ter ocorrido em consequência da iluminação insuficiente (MURATA, 1969). A casa-de-vegetação em que o experimento foi conduzido apresentava o teto enegrecido por fuligem. Em circunstâncias naturais, o nitrogênio tem apresentado efeito positivo sobre o número de grãos por panícula (MURATA, 1969; CHANDLER, 1969).

O nitrogênio e a água disponível apresentaram efeito linear significativo sobre o peso de 100 grãos, com correlação negativa e positiva, respectivamente.

A aplicação do adubo reduziu o peso médio dos grãos em virtude da diluição dos assimilados em uma maior quantidade de grãos por vaso. A água disponível, ao contrário aumentou o peso médio dos grãos por aumentar a quantidade de produtos para o enchimento dos grãos.

A análise global dos componentes da produção revelou que o aumento da produção de grãos promovido pelo adubo se deveu à maior quantidade de grãos. A deficiência hídrica reduziu a produção em consequência da maior esterilidade das espiguetas e menor peso médio dos grãos.

4.5.4. Índice de colheita

A tabela 27 mostra os valores médios do índice de colheita obtidos no fatorial N x AD.

Tabela 27. Valores médios do índice de colheita obtidos no fatorial N x AD

Tratamentos	AD ₁	AD ₂	AD ₃
N ₀	0,47	0,43	0,46
N ₁	0,37	0,40	0,32
N ₂	0,31	0,25	0,30

A análise da variância (tabela 28) revelou que apenas o nitrogênio teve efeito significativo sobre o parâmetro avaliado. O efeito foi linear, havendo uma correlação negativa entre índice de colheita e quantidade de adubo aplicada. O fornecimento de nitrogênio, portanto resultou em um acréscimo de palha (folha e colmo) em maior proporção do que de grãos, repetindo o padrão de comportamento já observado por outros autores (McNEAL et alii, 1971; DONALD e HAMBIM, 1976).

Tabela 28. Resultados da análise da variância do índice de colheita no fatorial N x AD

Causa de variação	Teste F
Nitrogênio linear	91,68*
quadrático	0,19
Água disponível	1,73
Interação	2,86

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

O valor médio do índice de colheita apresentou um ligeiro decréscimo com a redução da água disponível, embora esse efeito não tenha mostrado significância estatística ao nível de 5% de probabilidade. Além disso, o valor de F para a interação foi elevado, refletindo o fato de que em N_1 a umidade provocou uma alteração marcante do índice de colheita, enquanto em N_0 e N_2 os resultados provocados por AD foram nitidamente aleatórios.

Esperava-se que houvesse uma redução significativa tanto na produção de grãos como no índice de colheita no tratamento com mais adubo e menos água (N_2 AD₃), em consequência do maior desequilíbrio entre demanda e suprimento de água (DONALD e HAMBLIN, 1976). Resultados dessa natureza foram encontrados por LUEBS e LAAG (1969) em cevada; e RAMIG e RHOADES (1963) em trigo.

A variedade utilizada trata-se de uma planta obtida por melhoramento genético em condições de sequeiro. Consequentemente, apresenta mecanismos de tolerância à seca. A tolerância se manifestou na redução do crescimento foliar (altura de plantas), assim como modificou seu padrão de consumo de água do solo (valor de p) provavelmente por ajustamento osmótico quando recebeu mais adubo.

DONALD e HAMBLIN (1976) relataram efeitos positivos no índice de colheita com a aplicação de doses crescentes de N na cultura de sorgo. Tais resultados, sem causa evidente para aqueles autores, talvez possam ser atribuídos tam-

bém ao ajustamento osmótico, pois trata-se de cultura de reconhecida resistência à seca.

A variação do índice de colheita pode ser vista na figura 14.

4.6. Eficiência de uso da água

A tabela 29 e a figura 15 apresentam os valores médios de eficiência de uso da água (EUA) para o fatorial N x AD. O parâmetro foi expresso em mg de matéria seca dos grãos por mm de água consumido na evapotranspiração ao longo de todo o ciclo. Chama-se atenção para a unidade em virtude de ter sido adotado o critério seguido por BEGG e TURNER (1976). Outros autores, como BURTON (1959) e KRAMER (1959), expressaram a EUA em termos de transpiração.

Tabela 29. Valores médios de eficiência de uso da água (EUA) no fatorial N x AD (mg MS/mm)

Tratamentos	AD ₁	AD ₂	AD ₃
N ₀	27,49	25,65	21,49
N ₁	26,10	27,96	20,86
N ₂	23,25	16,92	20,47

Figura 15. Eficiência de uso da água (EUA) em mg/mm no fatorial $N \times AD$.

A tabela 30 mostra os resultados da análise da variância da EUA, verificando-se que houve efeito significativo dos tratamentos e da interação.

Tabela 30. Resultados da análise da variância da eficiência de uso da água no fatorial N x AD

Causa de variação		Teste F
Nitrogênio		11,06 *
Água disponível		8,17 *
Interação		4,14 *
N em AD ₁		2,33
N em AD ₂	linear	18,97 *
	quadrático	14,80 *
N em AD ₃		0,13
AD em N ₀	linear	8,93 *
	quadrático	0,45
AD em N ₁	linear	6,84 *
	quadrático	6,66 *
AD em N ₂	linear	1,92
	quadrático	8,10 *

* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Apesar da tendência decrescente, não houve efeito significativo do adubo sobre a EUA nas parcelas em que a umidade do solo foi mantida na capacidade de campo. O adubo

afetou de modo semelhante, portanto, a evapotranspiração e a produção de grãos.

O efeito do nitrogênio sobre a EUA em AD_3 também não foi significativo, refletindo a ausência de efeito do adubo sobre o consumo de água e sobre a produção quando o solo esteve mais seco no período crítico.

O efeito do nitrogênio só foi significativo em AD_2 , com variação quadrática da EUA em relação à dose de adubo, em decorrência do mesmo ter aumentado proporcionalmente o consumo de água, elevando contudo a produção de colmo e folhas ao invés de grãos, na dose mais elevada. Comparando-se a EUA em AD_1 e AD_3 , verifica-se que em ambas não apareceram diferenças significativas provocadas pelo adubo, entretanto o valor médio da eficiência de uso da água foi maior quando a umidade do solo esteve mais alta.

Sem aplicar o adubo, o efeito da água disponível sobre a EUA foi linear, crescendo proporcionalmente ao suprimento de água. Como a evapotranspiração não foi afetada, o efeito foi consequência do aumento da produção de grãos. A produção foi reduzida pela deficiência hídrica em consequência da redução do crescimento, que BEGG e TURNER (1976) consideraram mais sensível ao estresse de água do que o processo de fotossíntese.

O efeito da água disponível sobre a EUA quando se aplicou o adubo foi quadrático. Entretanto, em N_1 há um crescimento inicial maior seguido de um acréscimo menor, re-

sultando numa variação decrescente. Em N_2 há um decréscimo inicial seguido de um aumento, levando a uma variação praticamente oposta à N_1 . A curva de N_1 apresentou um ponto de máxima EUA, ao passo que a de N_2 apresentou um ponto de mínima.

Na dose N_1 , a eficiência de uso da água deve ter refletido basicamente o comportamento físico do sistema. O suprimento de água disponível restringiu a perda de água do solo, com o fechamento parcial dos estômatos e consequente redução na produção.

Na dose N_2 , o comportamento fisiológico da variedade influenciou a variação observada na EUA. Além de apresentar o efeito físico, devido a restrição no suprimento de água, a deficiência hídrica acionou os mecanismos de tolerância da planta: redução do crescimento e ajuste osmótico.

5. CONCLUSÕES

O consumo de água pelo arroz em casa-de-vegetação obedeceu ao modelo teórico proposto, dependendo da demanda atmosférica, da área foliar e da disponibilidade de água no solo, com um valor crítico que foi afetado pela adubação e pela demanda atmosférica.

A aplicação do modelo a intervalos de dois dias mostrou acentuada dispersão na relação $p \times ET_m$, todavia os resultados obtidos com os valores médios do período crítico mostraram-se consistentes com os valores da literatura. A variedade estudada apresentou, para os valores médios, uma capacidade de extração da água do solo que permitiu classificá-la em posição intermediária entre os grupos 3 e 4 de DOORENBOS e KASSAM (1979).

O aumento da área foliar provocada pelo fornecimento de nitrogênio elevou a demanda de água pelas plantas, que se mostrou variável durante o experimento, em consequen-

cia da evolução da área foliar e das variações na radiação incidente e no tempo de funcionamento do sistema de ventilação, ou aeração. Esta, por sua vez, teve efeito mais pronunciado nas parcelas com maior área foliar.

O estresse provocado pela diferença entre a demanda e o consumo de água reduziu a produção de arroz, com menor produção de matéria seca total, aumento da esterilidade da panícula e redução do peso médio dos grãos.

As plantas de arroz acionaram mecanismos de resistência à seca quando submetidas ao estresse hídrico. Um dos mecanismos foi a redução de crescimento, que foi evidenciada pelas diferenças significativas nas alturas das plantas. O outro mecanismo, o ajuste osmótico provocado pelo excesso de adubo, não foi determinado diretamente, contudo sua ocorrência foi inferida pelos valores de eficiência de uso da água, índice de colheita e evapotranspiração real, além da comparação das estimativas de p e ETm com os valores propostos por DOORENBOS e KASSAM (1979).

O fornecimento de nitrogênio provocou um aumento maior na produção de folhas e de colmos do que na produção de grãos, reduzindo o índice de colheita.

A aplicação do adubo elevou a produção de grãos nas plantas conduzidas nos dois níveis mais elevados de umidade, decorrendo da maior quantidade de grãos produzida, porém a segunda dose de adubo foi excessiva para as condições do experimento. No nível mais baixo de umidade, o aumento de área

foliar que havia sido causado pelo nitrogênio, provocou uma deficiência hídrica mais acentuada do que no caso da testemunha, resultando na ausência de efeito significativo do adubo sobre a produção de grãos. A adubação da cultura deve portanto também considerar os riscos de deficiência hídrica no período crítico, já que, no presente trabalho, a segunda anulou os efeitos benéficos da primeira.

6. LITERATURA CITADA

- ACEVEDO, E., T.C. HSIAO e D.W. HENDERSON, 1971. Immediate and subsequeute growth responses of maize leaves to exchanges in water status. Plant Physiol., 48: 631-636.
- BEGG, J.E. e N.C. TURNER, 1976. Crop water deficits. Advances in Agronomy, 28: 161-217..
- BLUM, A., 1982. Evidence for genetic variability in drought resistance and its implications in plant breeding. In: Drought Resistance in Crops with Emphasis on Rice. IRRI. Phillippines, p.53-70.
- BOUCHET, R.J., S. de PERCEVAUX e J. ARNOUX, 1963. Amélioration du rendement des végétaux par abaissement de l'évapotranspiration potentielle. Ann. Agron. 14(5): 825-834.
- BOYER, J.S., 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn soybean, and sunflower at various leaf potenciales. Plant Physiol., 46: 233-235.
- BOYER, J.S., 1971. Nonstomatal inibition of photosynthesis in sunflower at low leaf water potenciales and high light intensities. Plant Physiol., 48: 532-536.

- BRIGGS, L.J. e L. SHANTZ, 1912. The wilting coefficient for different plants and its determination. U.S. Dept. Agr. Bur. of Plant Industry. Bull. 230.
- BRUNINI, O.; K. REICHARDT e F. GROHMANN, 1976. Determinação da água disponível no solo em condições de campo. Anais do XV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. p.81-87.
- BURTON, G.W., 1959. Crop management for improved water-use efficiency. Advances in Agronomy, 11: 104-109.
- BUTLER, P.F. e J.A. PRESCOTT, 1955. Evapotranspiration from wheat and pasture in relation to available moisture. Austr. J. Agric. Res., 6: 52-61.
- CHANDLER Jr., R.F., 1969. Plant morphology and stand geometry in relation to nitrogen. In: Physiological Aspects of Crop Yield. Amer. Soc. Agron. e Crop Science Soc. Amer. p.265-290.
- COWAN, I.R., 1965. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system. Journal of Applied Ecology, 2: 221-239.
- DAKER, A., 1970. Irrigação e Drenagem. In: A Água na Agricultura vol. 3. Livraria Freitas Bastos. São Paulo. 453p.
- DALE, R.F. e R.H. SHAW, 1965a. The climatology of soil moisture atmospheric evaporative demand and resulting moisture stress days for corn at Ames, Yowa. Journal of Applied Meteorology, 4: 661-668.
- DALE, R.F. e R.H. SHAW, 1965b. Effect on corn yield of moisture stress and stand at two fertility levels. Agronomy Journal, 57: 475-479.

- DENMEAD, O.T. e R.H. SHAW, 1960. The effects of soil moisture stress at different stages of growth on development and yield of corn. Agronomy Journal, 52: 272-274.
- DENMEAD, O.T. e R.H. SHAW, 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. Agronomy Journal, 54: 385-390.
- DENMEAD, O.T., L.J. FRITSCHEN e R.H. SHAW, 1961. Spatial distribution of net radiation in a corn field. Agronomy Journal, 54: 505-510.
- DENMEAD, O.T. e B.D. MILLAR, 1976a. Water transport in wheat plants in the field. Agronomy Journal, 68: 297-303.
- DENMEAD, O.T. e B.D. MILLAR, 1976b. Field studies of the conductance of wheat leaves and transpiration. Agronomy Journal, 68: 307-311.
- DESJARDINS, R.L. e G.W. ROBERTSON, 1968. Variations of meteorological factors in a greenhouse. Canadian Agric. Eng., 10(2): 85-89.
- DONALD, C.M. e J. HAMBLIN, 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. Advances in Agronomy, 28: 361-405.
- DOORENBOS, J. e W.O. PRUITT, 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 24. Roma. 179p.
- DOORENBOS, J. e A.H. KASSAM, 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 33. Roma. 193p.
- FAGERIA, N.K., 1984. Adubação e Nutrição Mineral da Cultura de Arroz. EMBRAPA-CNPAF. Editora Campus. 34lp.

FEEDS, R.A. e P.E. RIJTEMA, 1972. Water withdrawal by plant roots. Journal of Hydrology, 17: 33-59.

FISCHER, R.A. e G.D. KOHN, 1966. The relationship between evapotranspiration and growth in the wheat crop. Austr. J. Agric. Res., 17: 255-267.

FRITSCHEN, L.J. e R.H. SHAW, 1961. Evapotranspiration for corn as related to pan evaporation. Agronomy Journal, 53: 149-150.

ISHIZUKA, Y., 1969. Engineering for higher yields. In: Physiological Aspects of Crop Yeld. Amer. Soc. Agron. e Crop Science Soc. Amer. p.15-26.

GARDNER, W.R., 1965. Soil water movement and root adsorption. In: Plant Environment and Efficient Water Use. Amer. Soc. Agron. e Soil Science Soc. Amer. p.127-149.

GARDNER, W.R. e D.I. HILLEL, 1962. The relation of external evaporative conditions to the dryng of soil. Journal of Geophysical Research, 67(11): 4319-4325.

GARDNER, W.R. e C.F. EHLIG, 1963. The influence of soil water on transpiration by plants. Journal of Geophysical Research, 68(20: 5719-5724.

HAGAN, R.M., M.L. PETERSON, M.L. UPCHURCH e L.G. JONES, 1957. Relationships of soil moisture stress to different aspects of growth in Ladino clover. Soil Science Soc. Amer. Proc. 21: 360-365.

HASSELKUS, E.R. e G.E. BECK, 1963. Plant responses to light transmitted into a fiber glass reinforced plastic greenhouse. Proc. Amer. Soc. Horticultural Science, 82: 637-644.

- HOLMES, R.M., 1961. Discussion of "A comparison of computed and measured soil moisture under snap beans". J. Geophys. Res., 66: 3620-3622.
- HSIAO, T.C., 1973. Plant response to water stress. Ann. Rev. Plant Physiol., 24: 519-570.
- JOHNS, G.G. e A. LAZENBY, 1973. Defoliation, leaf area index and the water use of four temperature pasture species under irrigated and dry land conditions. Aust. J. Agric. Res., 24: 783-795.
- JONES, C.A. e M. GUIMARÃES, 1979. The field water balance of a red yellow latossol under upland rice: effect of leaf area index on drought stress. In: Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics. R. Lal e D.J. Greenland ed. John Wiley Sons. New York, p.139-147.
- JORDAN, W.R. e J.T. FITCHIE, 1971. Influence of soil water stress on evaporation, root absorption, and internal water status of cotton. Plant Physiol., 48: 783-788.
- KIEHL, E.J., 1979. Manual de Edafologia. Relações Solo-Planta. Editora Agronômica Ceres. São Paulo, 263p.
- KLAR, A.E., 1984. A água no sistema solo-planta-atmosfera. Livraria Nobel S.A. São Paulo. 408p.
- KRAMER, P.J., 1959. The role of water in the physiology of plants. Advances in Agronomy, 11: 51-70.
- LEVITT, J., 1972. Response of plants to environmental stress. Academic Press. New York. 697p.

- LEVITT, J., 1980. Responses of Plant to Environmental Stress II. Water, Radiation, Salt and other Stress. Academic Press. New York. 607p.
- LINACRE, E.T., 1973. A simpler empirical expression for actual evapotranspiration rates - a discussion. Agricultural Meteorology, 11: 451-452.
- LUEBS, R.E. e A. LAAG, 1967. Evapotranspiration and water stress of barley with increased nitrogen. Agron. Journal 61: 921-924.
- MARC, J.J. e H. PALMER, 1976. Relationship between water potential and leaf inflorescence initiation in *Helianthus annuus*. Physiol. Plant, 36: 101-104.
- MARLATT, W.E., A.V. HAVENS, N.A. WILLITS e G.D. BRILL, 1961. A comparison of computed and measured soil moisture under snap beans. J. Geophys. Res., 66: 535-541.
- MCNEAL, F.H., M.A. BERG, P.L. BROWN e C.F. MCGUIRRE, 1971. Productivity and quality response of five spring wheat genotypes, *Triticum aestivum* L. to nitrogen fertilizer. Agron. Journal, 63: 908-910.
- MEDINA, H.P., 1972. Água no solo. In: Elementos de Pedologia. A.C. Moniz ed. Editora USP Editora Poligono, São Paulo. p.45-58.
- MENGEL, K. e E.A. KIRBY, 1982. Principles of Plant Nutrition. IPI. Bern. 655p.
- MILLAR, B.D. e O.T. DENMEAD, 1976. Water relations of wheat leaves in the field. Agronomy Journal, 68: 303-307.

- MOLZ, F.J. e I. REMSON, 1971. Application of an extraction-term model to the study of moisture flow to plant roots. Agronomy Journal, 63: 72-77.
- MURATA, Y., 1969. Physiological responses to nitrogen in plants. In: Physiological Aspects of Crop Yeld. Amer. Soc. Agron. e Science Soc. Amer. p.143-169.
- MURATA, Y. e S. MATSUSHIMA, 1975. Arroz. In: Fisiologia de los Cultivos. L.T. Evans ed. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, p.83-112.
- NEWMANN, E.I., 1969. Resistence to water flow in soil and plant. I. Soil resistance in relation to amounts of root: theorical estimates. J. Appl. Ecol., 6: 1-12.
- OMETTO, J.C., 1981. Bioclimatologia Vegetal. Editora Agronômica Ceres. São Paulo. 434p.
- O'TOOLE, J.C.; J.L. OZBUN e D.H. WALLACE, 1977. Photosynthetic response to water stress in *Phaseolus vulgaris*. Physiol. Plant, 40: 111-114.
- O'TOOLE, J.C. e R.T. CRUZ, 1979. Leaf rolling and transpiration. Plant Science Letters, 16: 111-114.
- PENMAN, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. Roy Soc. London Proc. Ser. A, 193: 120-146.
- PENMAN, H.L., 1949. The dependence of transpiration on weather and soil conditions. J. Soil Sci., 1: 74-89.

PIERCE, L.T., 1958. Estimating seasonal and shortterm fluctuations in evapotranspiration from meadow crops. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 39: 73-78.

PHILIP, J.R., 1966. Plant water relations: some physical aspects. Ann. Res. Plant Physiol., 17: 245-268.

RAMIG, R.E. e H.F. RHOADES, 1963. Interrelationships of soil moisture level at planting time and nitrogen fertilization on winter wheat production. Agronomy Journal, 55: 123-127.

RANZANI, G., O. FREIRE e T. KINJO, 1966. Carta de solos do município de Piracicaba. Centro de Estudos de Solos. ESALQ-USP. Piracicaba.

REICHARDT, K., 1975. Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera. 3a. ed. CENA-USP-CNEN. Fundação Cargill. 288p.

REICHARDT, K., 1978. A água na produção agrícola. McGraw-Hill. São Paulo. 119p.

RICHARDS, L.A. e C.H. WALDLEIGH, 1952. Soil water and plant growth. Amer. Soc. Agron. Monograph nº 2, p.13.

RITCHIE, J.T. e E. BURNETT, 1971. Dryland evapotrative flux in a subumid climate: II. Plant influence. Agronomy Journal, 63: 56-62.

RITCHIE, J.T., 1973. Influence of soil water status and meteorological conditions on evapotration from a corn canopy. Agronomy Journal, 65: 893-897.

RITCHIE, J.T., 1974. Atmospheric and soil water influences on the plant balance. Agric. Meteorol., 14: 183-198.

RUTTER, A.J., 1975. The hidrological cycle in vegetation. In: Vegetation and the Admosphere. J.L. Monteith ed. pg. 111-154.

SLABBERS, P.J., 1980. Pratical prediction of actual evapo-transpiration. Irrigation Science, 1: 185-196.

SHAW, R.H. e D.R. LAING, 1966. Moisture stress and plant response. In: Plant Environment and Efficient Water Use. Amer. Soc. Agronomy. Soil Science Soc. Amer., p.73-94.

SLATYER, R.O., 1967. Plant water relationships. Academic Press. New York. 366p.

SLATYER, R.O., 1969. Physiological significance of internal water relations to crop yeld. In: Physiological Aspects of Crop Yeld. Amer. Soc. Agronomy e Crop Science Soc. Amer. p.53-88.

STERN, W.R., 1965. Evapotranspiration of safflower at three densities of sowing. Aust. J. Agric. Res., 16: 961-971.

STONE, L.F., 1983. Produtividade e Utilização do Nitrogênio pelo Arroz (*Oryza sativa* L.): Efeitos da Deficiência Hídrica, Cultivares e Vermiculita. Tese de Doutorado. ESALQ/USP. Piracicaba. 200p.

TANAKA, A., S.A. NAVASERO, C.V. GARCIA, F.T. PARAÓ e E. RAMIREZ, 1964. Growth habit of the rice plant in the tropics and its effect on nitrogen response. IRRI. Tech. Bull. 3: 1-80.

- TANAKA, A.; K. KAWANO e YAMAGUCHI, 1966. Photosynthesis, respiration and plant type of the tropical rice plant. Tech. Bull. 7: 1-46.
- TANNER, C.B., 1967. Measurement of evapotranspiration. Agronomy, 11: 534-574.
- TANNER, C.B., 1968. Evaporation of water from plants and soil. In: Water Deficits and Plant Growth, T.T. Kozlowsky ed. p.74-106.
- TANNER, C.B. e W.A. JURY, 1976. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. Agronomy Journal, 68: 239-243.
- THORNTWHAITE, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev., 38: 55-94.
- THORNTWHAITE, C.W. e J.R. MATHER, 1955. The water budget and its use in irrigation. In: Water U.S. Dep. Agr. Yearbook p.346-357.
- TOMAR, V.S. e B.P. GHILDYAL, 1973. Internal leaf water status and transport of water in rice plants. Agronomy Journal, 65: 861-865.
- TOMAR, V.S. e J.C. O'TOOLE, 1979. Lower limit of available water and rice response to soil moisture during drought stress. IRRI. Saturday Seminar. 32p.
- VEIHMEYER, F.J. e A.H. HENDRICKSON, 1955. Does transpiration decrease as the soil moisture decreases? Amer. Geophys. Union Trans. 36: 425-448.

- VIEIRA, H.J., 1984. Parâmetros hídricos e de crescimento de duas variedades de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) sob diferentes condições de disponibilidade hídrica no solo. Tese de Mestrado. ESALQ/USP. 153p.
- VILLA NOVA, N.A. Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz. Tese de Livre-Docência. ESALQ/USP. Piracicaba. 89p.
- WEATHERLEY, P.E., 1970. Some aspects of water relations. Adv. Bot. Res., 3: 171-206.
- WINTER, E.G., 1976. A água, o solo e a planta. EPU - EDUSP, São Paulo. 170p.
- YOSHIDA, S., 1977. Rice. In: Ecophysiology of Tropical Crops. P.T. Alvin e T.T. Kozlowsky eds. p.57-88.
- ZAHNER, R., 1967. Refinement in empirical functions for realistic soil moisture regimes under forest cover. In: Forest Hidrology. W.E. Stopper e H.W. Hull (eds.). Pergamon Press. Oxford. p.261-274.

A P E N D I C E

Tabela 31. Altura das plantas (cm) no fatorial N x AD

Tratamentos	Repetições		
	1	2	3
N ₀ AD ₁	115,0	109,0	112,5
N ₀ AD ₂	113,0	116,0	120,5
N ₀ AD ₃	105,0	108,0	105,0
N ₁ AD ₁	126,0	128,5	132,0
N ₁ AD ₂	123,0	120,5	113,0
N ₁ AD ₃	105,0	108,5	107,0
N ₂ AD ₁	130,0	129,5	132,0
N ₂ AD ₂	113,0	119,0	122,5
N ₂ AD ₃	108,0	111,0	95,0

Tabela 32. Número de colmos/vaso na colheita no fatorial NxAD

Tratamentos	Repetições		
	1	2	3
N ₀ AD ₁	8	7	10
N ₀ AD ₂	9	9	6
N ₀ AD ₃	8	8	9
N ₁ AD ₁	11	12	10
N ₁ AD ₂	12	11	13
N ₁ AD ₃	13	12	12
N ₂ AD ₁	14	13	10
N ₂ AD ₂	12	10	10
N ₂ AD ₃	10	12	11

Tabela 33. Lâmina de água disponível residual (mm) no tratamento N₀

Data	I	AD ₁			AD ₂			AD ₃		
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₁	R ₂	R ₃	R ₁	R ₂	R ₃
26/10	-	18,2	18,4	16,2	6,8	6,8	8,2	4,8	4,6	3,0
28/10	5	18,2	18,8	16,0	7,6	7,6	10,8	3,2	2,4	2,6
30/10	10	22,4	22,0	19,2	11,2	10,4	14,4	7,6	5,2	5,2
01/11	10	24,8	24,2	23,6	15,2	14,8	17,6	10,2	9,4	7,8
03/11	5	21,2	20,8	19,6	11,0	11,2	13,8	5,4	6,0	5,0
05/11	10	28,4	28,4	27,2	18,2	18,6	21,4	12,6	12,2	11,2
07/11	10	21,0	21,4	20,4	10,6	10,6	15,0	5,4	6,0	3,6
09/11	20	27,8	27,0	26,2	16,4	17,2	21,6	14,6	13,0	11,8
11/11	10	24,0	24,2	21,8	13,8	12,8	17,0	9,2	7,8	5,4
13/11	10	25,2	25,8	24,8	16,6	16,6	18,8	10,8	11,2	7,4
15/11	10	21,4	22,0	21,6	12,2	12,4	14,8	7,2	7,2	5,6
17/11	10	25,6	26,2	25,0	16,2	16,6	19,2	11,8	12,6	9,0
19/11	20	26,6	29,0	27,8	16,0	16,6	21,2	15,0	13,0	10,8
21/11	15	24,6	25,6	23,4	14,4	15,4	19,2	11,6	11,0	7,4
23/11	10	24,0	22,8	22,8	15,2	14,0	17,4	10,2	9,4	8,2
25/11	10	19,8	22,0	20,0	11,2	11,6	14,8	8,4	4,6	4,4

I = Lâmina de água fornecida no intervalo de medida (mm)

R_i = Repetição

Tabela 34. Lâmina de água disponível residual (mm) no tratamento N₁

Data	I	AD ₁			AD ₂			AD ₃		
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₁	R ₂	R ₃	R ₁	R ₂	R ₃
26/10	-	13,0	16,0	16,4	6,2	6,0	5,8	1,4	2,8	1,2
28/10	5	8,4	15,2	15,6	7,2	7,2	6,0	1,2	3,4	2,6
30/10	10	9,0	15,8	18,4	10,8	8,6	8,8	5,6	7,0	6,2
01/11	10	14,8	19,8	22,2	13,8	13,0	12,2	8,6	9,2	9,0
03/11	5	11,2	15,2	18,0	9,2	8,2	7,6	4,0	4,8	4,2
05/11	10	19,4	22,6	25,6	16,8	15,6	15,2	10,4	11,0	11,2
07/11	10	7,2	11,8	18,0	7,8	6,0	7,6	2,8	3,4	3,0
09/11	20	11,8	16,0	20,0	13,2	10,8	12,4	10,0	10,8	10,0
11/11	10	12,2	14,2	15,6	11,6	8,0	6,8	4,8	5,4	4,0
13/11	10	16,6	17,8	20,0	13,4	11,8	11,2	6,6	8,2	7,2
15/11	10	10,0	9,8	13,6	6,0	4,4	4,6	4,4	5,8	4,0
17/11	10	16,4	16,6	19,0	12,4	11,2	12,4	7,2	8,6	7,6
19/11	20	11,6	16,6	15,2	11,8	10,0	11,0	8,0	8,6	8,8
21/11	15	10,0	12,8	14,2	9,0	8,2	8,8	6,4	6,6	7,0
23/11	10	14,2	14,6	15,0	10,4	9,2	10,0	7,0	8,2	7,4
25/11	10	8,6	10,4	9,4	5,2	4,2	4,8	2,0	3,4	2,4

I = Lâmina de água fornecida no intervalo de medida (mm)

R₁ = Repetição

Tabela 35. Lâmina de água disponível residual (mm) no tratamento N₂

Data	I	AD ₁			AD ₂			AD ₃		
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₁	R ₂	R ₃	R ₁	R ₂	R ₃
26/10	-	17,8	15,8	16,8	6,6	5,6	7,0	2,4	2,8	0,6
28/10	5	16,8	14,6	17,0	4,0	5,8	8,4	1,0	2,6	4,0
30/10	10	20,0	16,0	19,2	6,2	7,8	11,6	4,4	5,6	6,0
01/11	10	22,8	19,4	22,6	11,4	12,4	14,6	7,2	8,2	9,2
03/11	5	18,4	15,4	17,4	6,0	9,0	10,0	2,4	3,8	4,4
05/11	10	25,6	23,0	24,6	15,0	15,2	16,8	9,6	11,0	10,2
07/11	10	15,4	11,8	16,0	3,2	4,4	9,0	2,0	2,4	3,2
09/11	20	19,8	15,4	19,6	11,0	10,4	12,2	9,4	11,0	10,8
11/11	10	18,6	12,8	13,6	5,8	6,8	6,6	4,4	3,4	2,6
13/11	10	19,0	15,6	18,4	9,4	9,8	11,0	5,8	7,2	6,6
15/11	10	12,2	6,8	10,4	3,0	4,8	4,6	1,8	2,6	3,6
17/11	10	18,6	14,6	17,0	10,6	10,2	11,8	5,8	7,4	7,2
19/11	20	14,4	10,0	14,6	8,8	8,6	10,0	6,6	9,8	8,4
21/11	15	11,6	9,2	12,4	6,4	6,8	8,2	4,4	6,6	6,2
23/11	10	15,2	11,4	14,4	7,6	6,4	8,0	5,2	7,2	5,2
25/11	10	7,0	5,0	8,6	2,8	2,4	4,2	0,2	2,4	2,0

I = Lâmina de água fornecida no intervalo de medida (mm).

R_i = Repetição.

Tabela 36. Temperaturas máximas (TM) e mínimas (Tm) no interior da casa-de-vegetação

Data	T _M	T _m	Data	T _M	T _m
24/10	25,0	15,2	09/11	38,5	22,0
25/10	32,0	13,5	10/11	35,0	22,0
26/10	35,0	16,0	11/11	32,5	21,5
27/10	37,5	18,0	12/11	34,0	22,0
28/10	37,5	17,0	13/11	32,5	21,0
29/10	40,0	18,5	14/11	36,5	20,0
30/10	41,5	19,0	15/11	29,0	22,0
31/10	34,5	21,5	16/11	35,5	18,8
01/11	36,0	19,0	17/11	37,5	17,5
02/11	36,0	21,0	18/11	39,0	18,5
03/11	37,0	20,0	19/11	40,5	20,0
04/11	25,0	20,5	20/11	37,5	21,0
05/11	35,0	17,0	21/11	40,0	21,5
06/11	35,5	19,0	22/11	34,0	20,5
07/11	39,5	19,0	23/11	37,5	17,5
08/11	40,0	20,5	24/11	39,0	18,5
			25/11	40,5	21,0

Tabela 37. Número de panículas por vaso no fatorial N x AD

Tratamentos	Repetições		
	1	2	3
N ₀ AD ₁	8	7	10
N ₀ AD ₂	9	9	6
N ₀ AD ₃	8	8	9
N ₁ AD ₁	11	12	10
N ₁ AD ₂	12	11	13
N ₁ AD ₃	13	12	12
N ₂ AD ₁	14	13	10
N ₂ AD ₂	12	10	10
N ₂ AD ₃	10	12	11

Tabela 38. Número de grãos cheios por panícula no fatorial NxAD

Tratamentos	Repetições		
	1	2	3
N ₀ AD ₁	52	56	42
N ₀ AD ₂	51	45	61
N ₀ AD ₃	33	46	41
N ₁ AD ₁	61	52	54
N ₁ AD ₂	47	58	41
N ₁ AD ₃	34	34	30
N ₂ AD ₁	39	38	51
N ₂ AD ₂	39	48	45
N ₂ AD ₃	53	34	46

Tabela 39. Matéria seca total da parte aérea (g/vaso) no fatorial N x AD

Tratamentos	Repetições		
	1	2	3
N ₀ AD ₁	26,58	24,23	27,46
N ₀ AD ₂	28,90	27,35	28,54
N ₀ AD ₃	19,07	21,86	21,16
N ₁ AD ₁	49,16	43,35	41,12
N ₁ AD ₂	40,37	41,53	41,27
N ₁ AD ₃	36,20	32,38	32,60
N ₂ AD ₁	42,51	48,03	42,77
N ₂ AD ₂	45,87	39,53	44,00
N ₂ AD ₃	38,54	34,79	34,15

Tabela 40. Matéria seca dos grãos (g/vaso) no fatorial N x AD

Tratamentos	Repetições		
	1	2	3
N ₀ AD ₁	12,58	12,23	12,46
N ₀ AD ₂	13,90	11,35	11,54
N ₀ AD ₃	8,07	10,56	10,16
N ₁ AD ₁	16,66	17,35	15,82
N ₁ AD ₂	16,87	19,23	13,27
N ₁ AD ₃	11,20	11,38	9,04
N ₂ AD ₁	14,51	15,03	12,37
N ₂ AD ₂	9,67	12,33	9,50
N ₂ AD ₃	11,54	9,79	10,66

Tabela 41. Peso de 100 graos no fatorial N x AD

Tratamentos	Repetições		
	1	2	3
N ₀ AD ₁	3,06	3,13	2,49
N ₀ AD ₂	3,03	2,82	3,14
N ₀ AD ₃	3,03	2,88	2,77
N ₁ AD ₁	2,50	2,80	2,94
N ₁ AD ₂	3,00	2,99	2,49
N ₁ AD ₃	2,57	2,81	2,51
N ₂ AD ₁	2,67	3,03	2,43
N ₂ AD ₂	2,07	2,56	2,11
N ₂ AD ₃	2,19	2,36	2,11