

ADRIANA ELISABET CONFALONE

**CAPTURE E UTILIZAÇÃO DA RADIAÇÃO NA CULTURA DA SOJA
[*Glycine max* (L.) Merrill] COM E SEM IRRIGAÇÃO EM
DIFERENTES ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de "Magister Scientiae".

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
MARÇO - 1998

BIBLIOTECA
DEPTO. ENGENHARIA AGRÍCOLA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VICOSA

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

C222c
1998

Confalone, Adriana Elisabet, 1962-

Captura e utilização da radiação na cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] com e sem irrigação em diferentes estádios de desenvolvimento / Adriana Elisabet Confalone. -- Viçosa : UFV, 1998.

74p. : il.

Orientador: Luiz Cláudio Costa

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 1997

1. Soja - Estresse hídrico. 2. Soja - Radiação solar. 3. Soja - Crescimento. 4. Soja - Desenvolvimento. 5. Soja - Taxa foliar. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 19.ed. 633.34

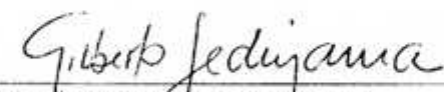
CDD 20.ed. 633.34

ADRIANA ELISABET CONFALONE

CAPTURA E UTILIZAÇÃO DA RADIAÇÃO NA CULTURA DA SOJA
[*Glycine max* (L.) Merrill] COM E SEM IRRIGAÇÃO EM
DIFERENTES ESTÁDIOS DE DESENVOLVIMENTO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do curso de Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de "Magister Scientiae".

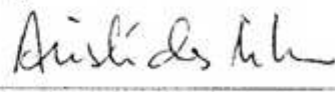
APROVADA: 6 de outubro de 1997.



Prof. Gilberto C. Sediyama
(Conselheiro)



Prof. Marco Antonio Oliva Cano
(Conselheiro)



Prof. Aristides Ribeiro



Prof. Dirceu Teixeira Coelho



Prof. Luiz Cláudio Costa
(Orientador)

Ao Carlos e à Carolina (*in memoriam*), que me permitiram sonhar, por um momento, com uma família.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar o curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES/PEC-PG, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Luiz Cláudio Costa, pela orientação e pela amizade.

Ao professor Gilberto C. Sedyama, pela colaboração e pela amizade.

Ao professor Marco Antônio Oliva Cano, pela orientação, pelas sugestões, pela colaboração e pela amizade.

Aos professores Aristίδes Ribeiro, José Maria Nogueira da Costa, Adil Rainier Alves e Everardo Chartuni Mantovani, pelas sugestões.

Ao professor Dirceu Coelho, pela sincera amizade.

Ao professor Miguel Navarro Dujmovich, pelo ensino da importância da Agrometeorologia.

À professora Patricia Sastre, pelo apoio na análise estatística.

Aos funcionários dos Laboratórios de Física do Solo e Fertilidade de Solos da UFV, pela colaboração e pela amizade.

Aos funcionários do Departamento de Fitotecnia, Gino e seus companheiros, pelo apoio durante a realização do experimento.

Ao funcionários Rogério Mauro Gomide e Assis José e aos demais técnicos e funcionários dos Departamentos de Biologia Vegetal e Fitotecnia da UFV, pelo apoio e pela colaboração.

Aos funcionários e técnicos do Departamento de Engenharia Agrícola, especialmente ao Carlos Henrique, Carlos Antônio e Lucimar, pelo auxílio durante a coleta de dados.

A Edna, Fátima, Fernanda, Maria Célia, José Galinári, Antônio Nicácio Teixeira, Jurandir, José Coelho, Joel, Daniel Mill, Evaristo e demais funcionários do DEA, pela amizade.

Aos técnicos do Centro de Processamento de Dados (CPD), pelo apoio e pela amizade.

Aos colegas Wagner, Alexandre, Raffi, Marcelo Cid, Celinha, Delton, Ana Elisa e Graça e aos demais amigos do curso de Meteorologia Agrícola, pela sincera amizade.

Ao Carlos Rodrigues Pereira, pelo apoio e pela colaboração na montagem e condução do experimento, na discussão dos resultados e na parte final deste trabalho.

A todas as pessoas que conheci nesse país maravilhoso, que me receberam como uma irmã.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ADRIANA ELISABET CONFALONE nasceu em 8 de fevereiro de 1962, em Azul, Estado de Buenos Aires, Argentina.

Cursou o primeiro e segundo grau em Azul, Buenos Aires, Argentina.

Em 1975, graduou-se em Agronomia, pela Universidade Nacional del Centro de La Província de Buenos Aires.

No período de 1975 a 1980, lecionou em escolas de segundo grau na cidade de Esquel, Chubut, Argentina.

De 1980 a 1990, lecionou a disciplina Introducion a la Agronomía, na Universidade Nacional da Patagonia, San Juan Bosco.

De 1990 até o momento, leciona no Departamento de Ecología, na Universidad Nacional del Centro de la Província de Buenos Aires.

Em março de 1995, ingressou no Curso de Mestrado em Meteorologia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil, concluindo-o em março de 1998.

CONTEÚDO

| | Página |
|--|--------|
| LISTA DE QUADROS | viii |
| LISTA DE FIGURAS | x |
| EXTRATO | xii |
| ABSTRACT | xiv |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 5 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 11 |
| 3.1. Radiação solar interceptada | 14 |
| 3.2. Coeficiente de extinção da luz (k) | 15 |
| 3.3. Fração de RFA absorvida pelo dossel | 16 |
| 3.4. Eficiência de utilização da radiação | 16 |
| 3.5. Crescimento do dossel | 17 |
| 3.6. Crescimento da cultura | 18 |
| 4. INTERAÇÕES ENTRE CULTURA E AMBIENTE | 20 |
| 4.1. Introdução | 20 |
| 4.2. Dados meteorológicos durante o período experimental | 20 |
| 4.3. Somas térmicas | 27 |
| 4.4. Conteúdo de umidade do solo | 28 |

| | Página |
|--|--------|
| 4.5. Estresse hídrico na cultura | 32 |
| 4.6. Conclusões | 32 |
| 5. CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DA CULTURA | 34 |
| 5.1. Introdução | 34 |
| 5.2. Desenvolvimento da cultura | 34 |
| 5.3. Evolução do índice de área foliar | 35 |
| 5.4. Produção e expansão de folhas | 39 |
| 5.5. Crescimento da cultura | 44 |
| 5.6. Conclusões | 49 |
| 6. CAPTURA E UTILIZAÇÃO DA LUZ | 50 |
| 6.1. Introdução | 50 |
| 6.2. Radiação solar interceptada | 51 |
| 6.3. Coeficiente de extinção da luz (k) | 54 |
| 6.4. Eficiência de uso da radiação (EUR) | 56 |
| 6.5. Radiação fotossinteticamente ativa (RFA) absorvida pelo dossel | 58 |
| 6.6. Efeito relativo do estresse hídrico sobre os termos da equação de rendimento | 59 |
| 6.7. Conclusões | 60 |
| 7. RESUMO E CONCLUSÕES | 62 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 64 |

LISTA DE QUADROS

| | Página |
|--|---------------|
| 1 Evapotranspiração da cultura (Etc) nos diversos períodos fenológicos | 25 |
| 2 Comparação das médias dos elementos do clima durante o experimento (Exp.) com as médias do decênio (Dec.) 1985-1995 | 27 |
| 3 Equações polinomiais de terceiro grau relacionando o índice de área foliar (IAF) ao tempo térmico (TT) e coeficientes de determinação (R^2) para os distintos tratamentos | 37 |
| 4 Duração da área foliar (DAF), em dias | 38 |
| 5 Taxa de emergência (trifólios.d ⁻¹) e de expansão (cm ² .d ⁻¹) dos diferentes grupos de folhas | 40 |
| 6 Equações da matéria seca acumulada para os diferentes tratamentos, em função do tempo térmico | 45 |
| 7 Taxa de crescimento absoluto (G; g.m ² .d ⁻¹), taxa de crescimento relativo (R; g.g ⁻¹ .d ⁻¹), taxa de assimilação líquida ((E(g.m ⁻² (área foliar).d ⁻¹) e razão de área foliar (F; m ² (área foliar).g ⁻¹ (total da cultura)) nos diferentes períodos fenológicos, nos diferentes tratamentos | 47 |
| 8 Radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MJ.m ⁻²) nos distintos períodos fenológicos | 52 |

| | | |
|----|--|----|
| 9 | Valores de k para as diferentes camadas do dossel e para o dossel completo nos diferentes tratamentos | 55 |
| 10 | Valores de k para os períodos vegetativo, de florescimento e de enchimento de grãos e para o ciclo completo | 55 |
| 11 | Eficiência de uso da radiação (EUR, g.MJ^{-1}) e quantidade de matéria seca acumulada (MS; g.m^{-2}) para todos os tratamentos, em cada período fenológico | 57 |
| 12 | Radiação fotossinteticamente ativa absorvida (MJ.m^{-2}) em distintos períodos | 58 |
| 13 | Eficiência energética da cultura da soja (%) | 59 |
| 14 | Efeito do estresse hídrico sobre os termos da equação de rendimento | 60 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|---|
| 1 | Evolução da temperatura média durante o ciclo da cultura e médias dos diferentes estádios fenológicos: vegetativo (Veg.), florescimento (Flor.) e enchimento de grãos (EGr.) ... 21 |
| 2 | Evolução da radiação solar global e médias para cada estágio fenológico: vegetativo (Veg.), florescimento (Flor.) e enchimento de grãos (EGr.) 23 |
| 3 | Valores de nebulosidade para todo o ciclo da cultura, observados às 9 e às 15 horas 24 |
| 4 | Valores da precipitação e da ETc diária (mm) ao longo do ciclo da cultura 25 |
| 5 | Umidade do solo no dia 31 de janeiro (54 DAS), em todos os tratamentos, nas diferentes profundidades (final da fase vegetativa) 29 |
| 6 | Umidade do solo no dia 8 de fevereiro (62 DAS), em todos os tratamentos, nas diferentes profundidades (fase de florescimento) 29 |
| 7 | Umidade do solo no dia 17 de fevereiro (71 DAS), em todos os tratamentos, nas diferentes profundidades (fase de florescimento) 30 |

| | | |
|----|--|----|
| 8 | Umidade do solo no dia 21 de fevereiro (75 DAS), em todos os tratamentos, nas diferentes profundidades (fase de enchimento de grãos) | 30 |
| 9 | Umidade do solo no dia 8 de março (91 DAS), em todos os tratamentos, nas diferentes profundidades (fase de enchimento de grãos) | 31 |
| 10 | Curva característica de retenção de umidade no solo do local do experimento | 31 |
| 11 | Potencial osmótico dos tratamentos irrigados (Irr) e não-irrigados (nIrr), nos distintos estádios fenológicos | 32 |
| 12 | Evolução dos IAF e desvios para cada um de seus valores, em cada tratamento, durante todo o ciclo da cultura | 35 |
| 13 | Ajuste das curvas de IAF, em função do tempo térmico (TT) | 37 |
| 14 | Área máxima por trifólio, para os diferentes tratamentos | 40 |
| 15 | Expansão dos trifólios 1 e 2, nos diferentes tratamentos | 41 |
| 16 | Expansão dos trifólios de 3 a 6, nos diferentes tratamentos | 42 |
| 17 | Expansão dos trifólios de 7 a 13, nos diferentes tratamentos | 42 |
| 18 | Área foliar específica ($m^2.g^{-1}$) ao longo do ciclo da cultura, para todos os tratamentos | 44 |
| 19 | Evolução da matéria seca total, em função do tempo térmico | 45 |
| 20 | Variação sazonal da radiação interceptada para os diferentes tratamentos | 51 |
| 21 | Relação entre índice de área foliar (IAF) e radiação interceptada (%), para os diferentes tratamentos | 53 |

EXTRATO

CONFALONE, Adriana Elisabet, M.S., Universidade Federal de Viçosa, março de 1998. **Captura e utilização da radiação na cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill] com e sem irrigação em diferentes estádios de desenvolvimento.** Orientador: Luiz Cláudio Costa. Conselheiros: Gilberto Chohaku Sedyama e Marco Antonio Oliva Cano.

Objetivando avaliar o comportamento da cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill], variedade Capinópolis, sob estresse hídrico, foi conduzido um experimento de campo na área experimental Vila Chaves, na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. Neste experimento, foram estudadas as variações na eficiência de utilização da radiação, observando o comportamento da cultura em relação à captura e utilização da radiação em condições de estresse hídrico, aplicado durante os estádios vegetativo, de florescimento e de enchimento de grãos. No período vegetativo, o estresse hídrico provocou uma redução no índice de área foliar, cujos valores atingiram de 5,5 a 3,6, para o tratamento irrigado e o não-irrigado, respectivamente. Houve ocorrência de perda da radiação, provocada pelo fechamento lento do dossel, e conseqüente diminuição da matéria seca, nos tratamentos estressados. Esse estresse intensificou-se ao longo do ciclo, no tratamento não-irrigado. O tratamento que começou a ser irrigado no período de florescimento apresentou grande recuperação dos elementos de captura de

radiação. A perda de radiação observada nos tratamentos que estavam sob estresse hídrico foi compensada por um aumento na eficiência de utilização da radiação. Nos outros períodos fenológicos, essa compensação foi parcial. Os valores da eficiência de utilização da radiação variaram entre 1,73 e 2,87, dependendo do tratamento e do período fenológico. Quando a cultura foi irrigada, a eficiência de utilização da radiação permaneceu relativamente constante, devendo-se ressaltar que na fase vegetativa ocorreram os maiores aumentos dessa eficiência. Não foram encontradas diferenças significativas quanto a modificações na estrutura do dossel, nos tratamentos não-irrigados, mas houve tendência a menores valores do coeficiente de extinção da luz, o que provocou melhor distribuição da luz dentro do dossel.

ABSTRACT

CONFALONE, Adriana Elisabet, M.S., Universidade Federal de Viçosa, March 1998. **Capture and utilization of radiation in soybean crop (*Glycine max* (L.) Merrill) with and without irrigation in different development stadiums.** Adviser: Luiz Cláudio Costa. Committee Members: Gilberto Chohaku Sedyama and Marco Antonio Oliva Cano.

In order to evaluate the behavior of soybean (*Glycine max* (L.) Merrill), Capinópolis variety under water deficit conditions, a field experiment was carried out in Vila Chaves experimental area, at the Universidade Federal de Viçosa. The changes in radiation efficiency utilization were studied by observing the crop behavior in relation to the capture and utilization of radiation under water stress applied during the vegetative, flowering and grain fulfillment stages. At the vegetative period, the water stress caused a reduction in the leaf area index whose values reached from 5.5 to 3.6 for both irrigated and non-irrigated treatments, respectively. A radiation loss occurred due to a slow canopy closure which caused a decrease in the dry matter of the treatments under stress. The water stress intensified along the vegetative cycle in the non-irrigated treatment. The treatment which began to be irrigated in the flowering period presented a great recuperation of the radiation capturing elements. The radiation loss observed in the treatments under water stress was compensated

by an increase in the radiation utilization efficiency. In the other phenological periods, this compensation was partial. The values of the radiation utilization efficiency ranged from 1.73 to 2.87 depending on both treatment and the phenological period. When cropping was irrigated, the radiation utilization efficiency remained relatively constant. This efficiency was particularly verified during the vegetative period. It was observed no significative differences for modifications in the canopy structure in the non-irrigated treatments, but the light extinction coefficient showed a tendency to lower values causing a better light distribution within the canopy.

1. INTRODUÇÃO

As atividades agrícolas estão enfrentando, neste final de século, dois grandes desafios. O primeiro consiste em atender à crescente demanda por alimentos, resultante do grande aumento populacional. Em termos globais, a população mundial, que era de cerca de 1,5 bilhão no início do século, passou para cerca de 5,6 bilhões de pessoas nos dias atuais. O segundo desafio consiste em atender à tal demanda de uma forma sustentável, ou seja, aumentar a produtividade, preocupando-se com a conservação dos recursos naturais.

A solução desses problemas requer definições de técnicas de manejo das atividades agrícolas, que permitam o aumento da produtividade, rentabilidade e sustentabilidade do sistema produtivo agrícola.

A complexidade das variáveis envolvidas no sistema produtivo agrícola exige que as definições das técnicas de manejo, que consideram os aspectos citados anteriormente, passem pela realização de estudos integrados e interdisciplinares.

Dentre os vários aspectos que afetam o sistema produtivo agrícola e que necessitam ser estudados de uma forma integrada e multidisciplinar, a interação entre clima e cultura é um dos mais importantes, principalmente em um país como o Brasil, que, pela sua grande extensão, está sempre sujeito às mais variadas adversidades climáticas.

No relacionamento da planta com o clima, uma das interações mais importantes é a entre cultura e radiação. De forma simplificada, pode-se admitir que a produtividade de uma cultura depende de sua eficiência em capturar e utilizar a radiação. Assim, há vários anos vêm sendo realizados estudos sobre a interação entre cultura e radiação, visando analisar a variação na produtividade agrícola.

Analisando vários estudos, MONTEITH (1977) integrou os resultados em um conceito que ele denominou de eficiência de utilização da radiação (EUR). Este conceito baseia-se na alta correlação existente entre radiação interceptada e matéria seca produzida pela cultura. Em seu trabalho, o autor calculou que, em média, para as diversas culturas, a matéria seca é acumulada a uma taxa de $1,4 \text{ g.MJ}^{-1}$ de radiação global interceptada.

A teoria proposta por ele tem demonstrado, ao longo dos anos, ser uma ferramenta extremamente útil na definição de práticas de manejo que levem a cultura a obter maior eficiência no uso da radiação e, conseqüentemente, à uma maior produtividade.

A EUR é um componente muito útil para modelar o crescimento e o rendimento das culturas, pois permite que a estimativa seja feita em diferentes condições ambientais (ARKEBAUER et al., 1992). Estudos mostram que a EUR tem sido aplicada com sucesso na avaliação do rendimento de diversas culturas, como a soja (SPAETH et al., 1987), o milho (JONES e KINIRY, 1986; MUCHOW et al., 1991) e o trigo (AMIR e SINCLAIR, 1991).

No entanto, vale ressaltar que a maioria desses experimentos foi conduzida em condições de clima temperado, sendo poucas as informações disponíveis para condições tropicais (ANDREANI et al., 1991).

Sabendo-se que a exposição das culturas a qualquer tipo de estresse ambiental pode alterar o valor da EUR (MUCHOW, 1985), é essencial que os estudos da EUR sejam realizados em condições tropicais, nas quais as culturas estão sujeitas a diferentes tipos de estresse, sendo o estresse hídrico um dos mais importantes.

Em virtude do efeito diferencial sobre a eficiência de captura e utilização da radiação, e dependendo da fase fenológica em que ocorre, o

estresse hídrico pode produzir maior ou menor efeito sobre a produtividade (SIONIT e KRAMER, 1977).

A deficiência de água no solo é um fator de grande importância, que pode modificar o crescimento das plantas e seu rendimento (SHIBLES et al., 1975; ROSENBERG et al., 1983). À medida que o solo seca, com igual demanda atmosférica, o potencial de água da folha vai diminuindo (SLATYER, 1967), até provocar o fechamento dos estômatos. Entretanto, plantas com boa provisão de água no solo podem passar por períodos mais ou menos prolongados de deficiência hídrica, em que o potencial de água da folha alcança baixos valores, o que pode provocar transtornos fisiológicos (KRAMER, 1983).

HSIAO (1973) classificou estresse suave como uma diminuição do potencial hídrico nas folhas, de -0,1 a -0,8 MPa, com redução do conteúdo relativo de água de 8 a 10%; estresse moderado como sendo a redução do potencial hídrico entre -1,2 e -1,5 MPa, com redução do conteúdo de água entre 10 e 20%; e estresse severo como uma redução do potencial hídrico superior a -1,5 MPa, com redução do conteúdo de água em mais de 20%.

Tem-se comprovado que com potenciais de água entre -0,2 e -0,4 MPa ocorrem diminuições do alargamento celular, e entre -0,8 e -1,1 MPa ocorrem fechamento dos estômatos e, portanto, diminuição da fotossíntese (BOYER, 1970; HSIAO, 1973). COX e JOLIFF (1987) estabeleceram o valor crítico de -1,0 MPa para a soja, a partir do qual iniciaria o fechamento estomatal, com conseqüente diminuição da fotossíntese.

A soja é uma leguminosa de grande importância econômica, cultivada em trópicos e subtropicais, sob condições ambientais muito variáveis e predominantemente sem irrigação. Na maioria das vezes, ela está sujeita a estresse hídrico, com maior ou menor intensidade, o que pode afetar seus mecanismos de captura e utilização da radiação nos diferentes estádios de desenvolvimento (MUCHOW et al., 1993). Assim, a análise de variação da EUR, em resposta ao estresse hídrico, é extremamente importante para o conhecimento das variações na eficiência de utilização dos recursos naturais pela cultura (ARKEBAEUR et al., 1992).

Por causa da escassez de estudos mais detalhados sobre essa relação, no Brasil, este estudo é relevante nas condições ambientais brasileiras.

A variedade de soja Capinópolis, utilizada neste experimento, foi lançada recentemente, portanto, pouco se sabe a respeito de suas interações com o clima, de maneira mais minuciosa.

Considerando a otimização do uso dos recursos naturais como essencial na luta contra os desafios para aumentar a produtividade de grãos, preservando o ambiente, o objetivo deste trabalho consistiu em verificar, com base no exposto anteriormente, as variações na eficiência de utilização da radiação pela cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill], variedade Capinópolis, sob estresse hídrico, em diferentes fases fenológicas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Os estudos quantitativos do crescimento de plantas têm sido baseados em relações entre recursos de captura e produção de matéria seca, há mais de 70 anos. A primeira dessas relações foi derivada por BLACKMAN (1919). Diferentes conceitos, como taxa relativa de crescimento, taxa de assimilação líquida, razão de área foliar e duração da área foliar, têm sido desenvolvidos e vêm sendo utilizados ao longo dos anos, para analisar as variações ontogenéticas no crescimento de plantas. Embora não existam dúvidas de que o uso de tais relações prestou uma grande contribuição para o entendimento dos fatores que afetam o crescimento de plantas, por outro lado, algumas limitações devem ser consideradas. O primeiro aspecto é que, à medida que a planta cresce e expande sua área foliar, as relações consideradas anteriormente vão perdendo a sensibilidade de representar diferentes mecanismos que influenciam o crescimento. O segundo aspecto é o fato de que as relações não oferecem nenhuma informação sobre quais os fatores ambientais que estariam induzindo a planta a obter um determinado tipo de resposta (HUNT, 1982).

Até a década de 50, muitas pesquisas foram conduzidas por meio da análise da forma pela qual a luz é convertida em energia química dentro das folhas. Entretanto, pouca atenção foi dada ao estudo da interceptação e absorção de luz pelas culturas.

MONSI e SAEKI (1953), utilizando uma simplificação da lei de Beer (proposta para a atmosfera), descreveram a forma como a radiação solar penetra em um dossel. Eles propuseram um modelo de iluminação do dossel, definindo que a quantidade de luz em um determinado nível diminui exponencialmente com aumentos do IAF, ou

$$T = S \cdot \exp(-k \cdot \text{IAF}) \quad \text{Equação 1}$$

em que

T e S = densidades de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa abaixo e acima do dossel vegetativo, respectivamente ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$);

k = coeficiente de extinção da luz no dossel (adimensional); e

IAF = índice de área foliar (adimensional).

Assim sendo, a intensidade de tal extinção depende de uma série de características do dossel e das folhas, que podem ser representadas de forma simplificada pelo coeficiente de extinção (k). Os valores médios do coeficiente de extinção estão entre 0,3 e 0,5 para o dossel de folhas eretas e entre 0,7 e 1 para o dossel de folhas horizontais (SAEKI, 1960).

Por causa da grande influência das características do dossel na extinção da luz, vários estudos vêm sendo realizados no sentido de analisar a arquitetura do dossel em relação à interceptação da luz. Em virtude das diferenças no comportamento das folhas, quanto à absorvidade nas diferentes faixas do espectro, é de se esperar que haja também uma diferença entre a extinção da radiação fotossinteticamente ativa, ou seja, na faixa entre 400 e 700 nm (RFA), e a da radiação global (R_g), em um dossel.

BROUGHAM (1956) determinou que, quando a área total das folhas fosse igual à área do solo, a transmissividade média seria de 74%, para culturas com folhas eretas, e de 50%, para culturas com folhas horizontais.

O ângulo ótimo de inclinação da folha foi determinado como uma função da intensidade de luz (WARREN, 1960).

Muitos estudos evidenciaram que o arranjo ideal para o uso eficiente da luz é aquele em que 13% das folhas mais baixas de uma planta estão entre

0 e 30°, em relação ao plano horizontal; 37% das folhas, as intermediárias, entre 30 e 60°, e os 50% restantes, da parte superior, entre 60 e 90° (NICHIPROVICH, 1962).

Em seqüência aos estudos sobre a distribuição da luz no dossel, vários trabalhos foram conduzidos, objetivando analisar a relação entre radiação interceptada e matéria seca produzida. Tais estudos confirmaram que a biomassa das culturas é efetivamente proporcional à quantidade de radiação interceptada pelo dossel. Esta relação tem sido demonstrada para diferentes culturas, como, por exemplo, a soja (SHIBLES e WEBER, 1965), o milho (WILLIAMS et al., 1965) e o algodão (BAKER e MEYER, 1966).

Uma conseqüência importante desses trabalhos foi a melhoria da análise tradicional de crescimento, com a introdução de um conceito, segundo o qual o crescimento das culturas pode ser expresso como uma função da quantidade de radiação interceptada na estação de crescimento. Desta forma, a quantidade de matéria seca produzida por uma cultura pode ser expressa como o produto de três fatores: o recurso (radiação) disponível por unidade de área; a quantidade de recurso capturado por unidade de recurso disponível (eficiência da captura do recurso); e a taxa de produção de matéria seca por unidade de recurso capturado (eficiência de utilização do recurso) (MONTEITH, 1994b). Assim,

$$dW/dt = e.f.S \qquad \text{Equação 2}$$

em que

W = quantidade de matéria seca produzida pelas plantas (g);

S = densidade de fluxo de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) que chega à cultura ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$);

e = eficiência de conversão de RFA em matéria seca (g.MJ^{-1}); e

f = fração da radiação interceptada (%).

A razão entre biomassa produzida e quantidade de radiação interceptada, ou eficiência de conversão de radiação em matéria seca, tem sido denominada eficiência de utilização da radiação (MONTEITH, 1977). No

entanto, torna-se necessário esclarecer que essa razão não deve ser compreendida como uma definição de eficiência, uma vez que a eficiência no sentido mais estrito da engenharia apresentaria como valor máximo 1,0 (RUSSEL et al., 1989; CORLETT et al., 1992).

Estimativas da EUR para diversas culturas, crescendo em condições adequadas de níveis de água e nutrientes no solo, têm sido relatadas como permanecendo constantes durante todo o ciclo de crescimento (MONTEITH, 1972; GALLAGER e BISCOE, 1978; SCOTT e WILCOCKSON, 1978; SINCLAIR, 1991).

Os experimentos conduzidos nessas condições têm fornecido valores médios de EUR em torno de 1 a 1,6 g.MJ⁻¹, com as espécies C₃ no extremo inferior e as espécies C₄ no extremo superior (MONTEITH, 1993).

Entretanto, conforme outros estudos, a EUR varia de acordo com as condições ambientais (MUCHOW et al., 1993), como foi demonstrado com a temperatura (HUNT, 1982; ANDRADE et al., 1993), a radiação (RUSSELL et al., 1989) e o déficit de pressão de vapor (SQUIRE et al., 1984).

Considerando que as condições ambientais podem afetar, de forma diferente, a habilidade dos mecanismos da planta, envolvidos na captura e utilização da radiação, pode-se afirmar que a EUR varia em resposta às condições ambientais e apresenta uma grande consistência fisiológica (ARKEBAUER et al., 1992).

As medições de interceptação da radiação vêm sendo utilizadas para comparar ou analisar o rendimento de diferentes cultivares, nas mesmas condições ambientais (ROSENTHAL e GERIK, 1991). Como exemplos podem ser citados os estudos sobre a dependência que a EUR tem do estágio fenológico, em girassol (TRAPANI et al., 1992), e sobre a determinação da influência do espaçamento e da geometria das fileiras na produção de biomassa e no rendimento da cultura do sorgo (STEINER, 1986).

Resultados de vários estudos mostram que as diversas formas de estresse influenciam mais a captura de radiação que a eficiência de sua utilização. Esses resultados foram encontrados para diversos tipos de estresse, como hídrico, estresse por doenças (WAGGONER e BERGER,

1987), por deficiência de nitrogênio (GREEN, 1987) e por poluição atmosférica (UNSWORTH et al., 1984).

SINCLAIR e HORIE (1989) demonstraram que a EUR depende do conteúdo de nitrogênio das folhas. Resultados semelhantes foram encontrados para as culturas de milho e sorgo (MUCHOW, 1988) e de amendoim e soja (SINCLAIR e SHIRAIWA, 1993).

As variações observadas nos valores da EUR, em resposta ao déficit hídrico, são fruto de complexas variações em diversos componentes da cultura, como, por exemplo, a taxa de troca de CO₂, a taxa de expansão celular e a taxa do movimento de água no solo (TURNER et al., 1985; DAVIES et al., 1990). É exatamente esta capacidade da EUR em integrar interações tão complexas, de forma consistente, que a torna um modelo potente para explicar a produtividade das culturas (MUCHOW et al., 1991; ARKEBAEUR et al., 1992; SINCLAIR et al., 1992).

É importante observar que os valores da EUR dependem diretamente de medidas, ou estimativas, da radiação interceptada e da matéria seca. Tal fato exige atenção no sentido de que erros amostrais não afetem as comparações sobre o efeito do ambiente na EUR (PRINCE, 1991). Outro fato que pode implicar erro conceitual sobre a EUR consiste em considerar apenas a matéria seca da parte aérea, o que pode mascarar os resultados, pois não leva em consideração a possibilidade de alteração na translocação de substratos para as raízes (GALLO et al., 1993). Outra dificuldade na determinação exata da biomassa, por unidade de superfície de solo, é a variabilidade entre plantas, o que aumenta o erro experimental (DAUGHTRY e HOLLINGER, 1984).

Recentemente, vêm surgindo controvérsias sobre a confiabilidade da utilização da relação entre radiação interceptada e matéria seca produzida pelas plantas (DEMETRIADES-SHAH et al., 1992; MONTEITH, 1994b). Em parte, essa discussão é causada pela falta de estudos, considerando as variações da EUR durante o desenvolvimento das culturas (COSTA et al., 1997).

O uso de dados cumulativos para estimativas de EUR tem sido criticado (RUSSELL et al., 1989; DEMETRIADES-SHAH et al., 1992). Em

particular, DEMETRIADES-SHAH et al. (1992) argumentaram que uma análise mais apropriada dos dados deveria utilizar taxas relativas de produção de matéria seca, o que indica que a matéria seca não está correlacionada à radiação interceptada.

As conclusões do trabalho de WHEELER et al. (1993) fornecem uma alternativa a tais questões. De acordo com essas conclusões, a correlação entre o aumento no peso seco e a radiação interceptada pode ocultar uma possível variação da EUR no tempo, e a omissão deste efeito ontogenético provocaria a falta de correlação significativa entre as duas variáveis.

É interessante, ainda, observar que a análise do comportamento das culturas, em resposta às variações ambientais, pode levar a resultados conflitantes, quando se utilizam métodos diferentes como o método tradicional ou o método da radiação (COSTA et al., 1997).

Com o crescimento do dossel, são modificadas não somente as condições ambientais mas, também, a estrutura física do dossel, a idade das folhas e a distribuição dos fotoassimilados entre as diversas partes da planta. Essas mudanças alteram a eficiência com que a luz é capturada e utilizada pelas plantas (COSTA et al., 1996).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido no período de dezembro de 1995 a abril de 1996, na Estação Experimental Vila Chaves, localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, em área de topografia plana, cujo solo é classificado como Podzólico Amarelo-Vermelho Câmbico, fase terraço (COSTA, 1973). As análises química e física revelaram um solo de fertilidade média e textura argilosa. O solo foi adubado com 30 kg de K_2O /ha e 60 kg de P_2O_5 /ha, na forma de cloreto de potássio (KCl) e superfosfato simples (SS), respectivamente.

A variedade de soja (*Glycine max* L. [Merrill]) semeada foi a Capinópolis, caracterizada por crescimento determinado e ciclo precoce e que, em geral, apresenta satisfatória estabilidade de produtividade de grãos (SEDIYAMA et al., 1995).

A semente foi tratada com fungicida e inoculada com cepa 2.930 de *Bradrhizobium japonicum*. A emergência se produziu aos quatro dias após a semeadura

A semeadura foi realizada no dia 8/12/1995, à alta densidade de 100 sementes por metro quadrado, em parcelas de 6,0 m de largura por 10,5 m de comprimento, contendo 15 fileiras cada e espaçamento de 0,7 m entre fileiras. Aos 16 dias após a semeadura (DAS), realizou-se o desbaste, até a cultura atingir a densidade de 22 plantas por metro quadrado.

O delineamento utilizado foi o em parcelas subdivididas com dois blocos casualizados, contendo cinco unidades experimentais por bloco. Os principais tratamentos foram constituídos por estresse nas diferentes fases e os tratamentos secundários, às épocas de amostragem ao longo do ciclo da cultura. Para diminuir o efeito entre os tratamentos principais, um espaço de 3,0 m entre parcelas e 3,5 m entre blocos foi deixado como bordadura.

A variedade utilizada foi submetida a cinco tratamentos, aplicados após o período de instalação completa da cultura no campo, ou seja, no dia 8/1/1996, os quais foram distribuídos nas parcelas de cada bloco, por sorteio. Os tratamentos consistiram de parcelas complementadas e não-complementadas por irrigação, da seguinte forma:

1. irrigado durante todo o período em que a cultura permaneceu no campo (IPTP);
2. não-irrigado na fase vegetativa (NIFV);
3. não-irrigado no período de florescimento (NIFF);
4. não-irrigado no período de enchimento de grãos (NIFG); e
5. não-irrigado durante todo o período (NITP).

Para determinar o final de um estágio e o início de outro, utilizou-se o sistema de classificação de estádios de desenvolvimento proposto por FHER e CAVINESS (1977).

O final da fase vegetativa e o início do estágio de florescimento foram determinados quando foi verificada a ocorrência de 50 % de plantas na parcela com pelo menos uma flor aberta (R1). O final do estágio de florescimento e o início do estágio de enchimento de grãos foram determinados quando foi observada a ocorrência de 50% de plantas na parcela com sementes de 3 mm de comprimento, localizada em um dos quatro nós superiores do caule principal (R5).

Nos diferentes tratamentos, o nível de estresse foi estimado pela medida do potencial osmótico, por meio do suco celular extraído de folhas (última folha totalmente expandida), e medido em um refratômetro de mesa (SLAVIK, 1991).

O conteúdo de umidade do solo foi medido por uma sonda de nêutrons, nas profundidades 0,10, 0,20, 0,40, 0,65 e 0,90 m.

Para complementar a precipitação pluvial, utilizou-se um sistema de irrigação por microaspersão (Santeno Irrigações do Nordeste S.A.), cujas linhas laterais se distanciavam 1,4 m entre si. Esse sistema de irrigação funcionou com uma pressão de serviço em torno de 2 Kgf.cm² (0,08 litro por minuto, por metro), o que garantiu a uniformidade de aplicação e a distribuição bem localizada.

A lâmina de água aplicada foi calculada ao considerar a evapotranspiração de referência diária, calculada por meio do tanque classe A e multiplicada por um coeficiente da cultura (Kc), tendo sido utilizados os valores recomendados pela Food and Agriculture Organization-FAO (DOORENBOS e PRUITT, 1977), para obtenção dos valores da evapotranspiração da cultura (ETc). Nos estádios em que a cultura estava sob irrigação, os tratamentos foram mantidos próximo à capacidade de campo, com a reposição da ETc no final de cada dia.

Os dados meteorológicos de temperatura do ar (máxima, mínima e média), precipitação e umidade relativa foram obtidos diariamente em uma estação instalada próximo ao campo experimental. Os dados de brilho solar e nebulosidade foram obtidos na estação climatológica principal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), conveniado com a Universidade Federal de Viçosa. Foram considerados somente os dados de nebulosidade diurna (9 e 15 horas), pela sua influência sobre a radiação global.

A pressão de vapor parcial (*e*) foi calculada mediante a utilização dos valores de pressão de vapor de saturação (*e_s*) e dos valores de umidade relativa. Os valores de *e_s* foram obtidos por meio da equação proposta por TETENS (1930).

Os dados diários de radiação solar global foram obtidos pelo método proposto por ÅNGSTRÖM (1924) e modificado por PRESCOTT (1940), isto é:

$$R_g = R_o.(a + b.n/N) \quad \text{Equação 3}$$

em que

R_g = irradiância solar global diária sobre uma superfície horizontal, ao nível do solo (MJ.m⁻²);

R_o = irradiância solar global diária no topo da atmosfera (MJ.m^{-2});
 a , b = coeficientes empíricos, obtidos por análise de regressão linear,
para uma determinada localidade;
 n = duração do brilho solar observado (h); e
 N = duração astronômica do período diurno (h).

Foram considerados os coeficientes a e b mensais, calculados para Viçosa, segundo ALVES et al. (1981).

A partir dos valores diário da R_g , estimados pelo modelo de Ångström e Prescott, de 1940, e dos valores de RFA incidente, obtidos ao meio dia solar por meio de um ceptômetro, estimou-se a radiação fotossinteticamente ativa diária incidente (S), multiplicando-se a R_g pela relação RFA/RG . Essa relação foi estimada por uma regressão entre os valores de RFA incidente (medidos ao meio dia solar) e os valores diários de R_g (estimados pela equação de Ångström e Prescott, de 1940). As medições de RFA ao meio dia solar integram o valor da RFA diária incidente; esta aproximação foi demonstrada como apropriada, em diversas observações experimentais (TOLLENAAR e BRUULSEMA, 1988; DAUGHTRY et al., 1992).

Para análise dos dados, utilizou-se o pacote estatístico Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Foi feita a análise de variância, tendo as médias sido comparadas pelo teste de Duncan.

3.1. Radiação solar interceptada

As medições da RFA foram efetuadas por meio de um ceptômetro (DeltaT - Devices), a cada dois dias, ao meio dia solar. Foram efetuadas dez medições, em diferentes pontos dentro da parcela, em quatro diferentes níveis no dossel, ou seja: superior, inferior e dois níveis intermediários. Também, foram efetuadas medições de RFA refletida pelo dossel e pelo solo, orientando os sensores do ceptômetro contra a cultura e o solo, respectivamente.

A quantidade de radiação solar interceptada (F) ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) pelo dossel foi calculada como

$$F = s - T$$

Equação 4

em que

s = RFA incidente (imediatamente acima do dossel ($\mu\text{m m}^{-2} \text{s}^{-1}$)); e

T = radiação transmitida à parte inferior do dossel ($\mu\text{m m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

A fração de radiação interceptada (f) foi obtida ao dividir o segundo termo da equação 12 pela radiação incidente (s).

A quantidade de RFA diária interceptada foi calculada ao multiplicar a radiação fotossinteticamente ativa diária incidente (S) pela fração interceptada.

3.2. Coeficiente de extinção da luz (k)

Para obtenção dos valores de k no dossel, este foi dividido em três camadas, em torno de 25 cm cada uma, medindo-se a radiação interceptada e o IAF de cada uma delas. Os valores de k foram determinados como o quociente entre a transmissividade e o IAF correspondente a cada camada do dossel e para cada uma das datas de medições de IAF, calculando-se a média dos períodos fenológicos.

Utilizando a equação de MONSI e SAEKI (1953), estimou-se o coeficiente de extinção da radiação (k), por meio da seguinte equação:

$$k = - \ln T / \ln s \cdot \text{IAF}$$

Equação 5

em que

T e s = fluxos de radiação fotossinteticamente ativa abaixo e acima do dossel vegetativo ($\mu\text{m.m}^{-2} .\text{s}^{-1}$);

k = coeficiente de extinção da luz no dossel (adimensional); e

IAF = índice de área foliar (adimensional).

3.3. Fração de RFA absorvida pelo dossel

A fração de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (fa) foi calculada pela seguinte equação:

$$fa = 1 - t - r + t \cdot r_s \quad \text{Equação 6}$$

em que

t = fração de radiação incidente transmitida pelo dossel;

r = fração de radiação incidente refletida pelo dossel; e

r_s = reflectância da superfície do solo.

3.4. Eficiência de utilização da radiação

A relação de Monteith (MONTEITH, 1977) entre a radiação interceptada por uma cultura e seu peso seco acumulado foi utilizada para estimar o valor da EUR para cada tratamento, nas diferentes fases de desenvolvimento. Os valores da EUR foram estimados, para cada tratamento, por meio de regressão linear entre matéria seca e RFA acumulada. As equações foram forçadas a passar pela origem.

A eficiência de utilização da radiação foi calculada como

$$EUR = W / \sum f \cdot S \quad \text{Equação 7}$$

em que

W = variação na fitomassa de cada tratamento, no período de sete dias (g);

f = fração interceptada durante este intervalo (%); e

S = RFA diária incidente (J.m⁻²).

O valor da EUR, para cada fase fenológica, foi determinado a partir da regressão linear entre a fitomassa e a RFA capturada e acumulada ao longo da estação de crescimento. As equações de regressão dos distintos

tratamentos foram comparadas pelo teste de identidade de modelo (GRAYBILL, 1976).

3.5. Crescimento do dossel

A cada sete dias foram efetuadas medições da área foliar, utilizando-se um medidor eletrônico (Modelo LI - 3100, LI-COR, Inc.). As áreas das folhas foram determinadas a partir de cada folha do caule principal e para o conjunto de folhas de cada ramificação. A emergência das folhas do caule principal também foi acompanhada a cada dois dias. Uma folha foi considerada emergida quando atingiu o comprimento de 1 cm, estando ainda os folíolos colados ao caule.

A duração da área foliar (DAF), em dias, indica a persistência da superfície assimilatória da cultura, empregando-se a relação entre IAF e tempo. A DAF foi determinada pela equação

$$DAF = (IAF_1 + IAF_2) \cdot (t_2 - t_1) / 2 \quad \text{Equação 8}$$

em que

IAF_1 , IAF_2 = índice de área foliar no momento de aplicação dos tratamentos e no momento de IAF máximo, respectivamente; e

t_1 , t_2 = tempo, em dias, relativo ao momento de aplicação dos tratamentos e no momento de IAF máximo, respectivamente.

Também foi determinada a área foliar específica (AFE; $m^2 \cdot g^{-1}$), utilizando-se a seguinte equação:

$$AFE = A/W_f \quad \text{Equação 9}$$

em que

A = área foliar da planta (m^2); e

W_f = peso das folhas (g).

3.6. Crescimento da cultura

Semanalmente, foram coletadas dez plantas de cada parcela, em uma área sorteada de um total de 24 subunidades da unidade experimental. Para retirar as plantas do solo, foram feitas trincheiras em torno do sistema radicular, garantindo, assim, a obtenção de um sistema radicular o mais completo possível. O solo foi retirado das raízes, por meio de lavagem. Após a coleta, as plantas foram separadas em raiz, caule, folhas, flores, vagens e grãos, sendo depois colocadas em estufa a 100°C, durante 2 horas, e a 75°C, por mais 72 horas seguidas, e pesadas em balança de precisão. Todas as medidas foram efetuadas, individualmente, para cada planta do conjunto e, posteriormente, foi obtida a média dos dados. A produção final de grãos foi estimada pela amostragem de 10 m de fileira por unidade experimental. O índice de colheita foi estimado como uma proporção da matéria seca total, destinada aos grãos.

A taxa de crescimento absoluto (TCA) (g.dia^{-1}) e a taxa de crescimento relativo (TCR) ($\text{g.g}^{-1}.\text{dia}^{-1}$), para cada tratamento, foram calculadas como

$$\text{TCA} = (W_2 - W_1) / (t_2 - t_1) \quad \text{Equação 10}$$

$$\text{TCR} = (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1) \quad \text{Equação 11}$$

em que

W_1, W_2 = pesos secos (g);

t_1, t_2 = tempo (dia); e

\ln = logaritmo neperiano.

A taxa de assimilação líquida (TAL) ($\text{g (matéria seca total).m}^{-2}$ (área foliar). d^{-1}) média no tempo considerado e a razão de área foliar (RAF) (m^{-2} (área foliar). g^{-1} (matéria seca total)) média foram calculadas como

$$\text{TAL} = (W_2 - W_1) (\ln \text{IAF}_2 - \ln \text{IAF}_1) / (\text{IAF}_2 - \text{IAF}_1) (t_2 - t_1) \quad \text{Equação 12}$$

$$RAF = (IAF_2 - IAF_1)(\ln W_2 - \ln W_1) / (W_2 - W_1)(\ln IAF_2 - \ln IAF_1)$$

Equação 13

em que

W_1, W_2 = pesos secos relativos aos instantes das coletas nos tempos 1 e 2 considerados; e

IAF_1, IAF_2 = índices de área foliar relativos aos instantes das coletas no tempos 1 e 2 considerados.

4. INTERAÇÕES ENTRE CULTURA E AMBIENTE

4.1. Introdução

A interação entre os processos físicos do ambiente e os processos fisiológicos das plantas determina a produtividade de uma cultura.

O entendimento de qualquer processo agrometeorológico tem como exigência primária a análise do comportamento dos elementos meteorológicos.

Neste capítulo, será apresentada a caracterização das condições ambientais de temperatura do ar, umidade do solo, precipitação pluvial e radiação solar, no período compreendido entre a semeadura e a maturação, 8/12/95 a 4/4/96, da variedade de soja Capinópolis, assim como a resposta desta cultura a essas condições.

4.2. Dados meteorológicos durante o período experimental

A Figura 1 ilustra a variação da temperatura média diária desde a semeadura até o estágio de maturação, em função dos dias após a semeadura.

A temperatura média diária do ar apresentou tendência de aumento a partir da emergência, tendo apresentado valor médio de 22,9°C para todo o período.

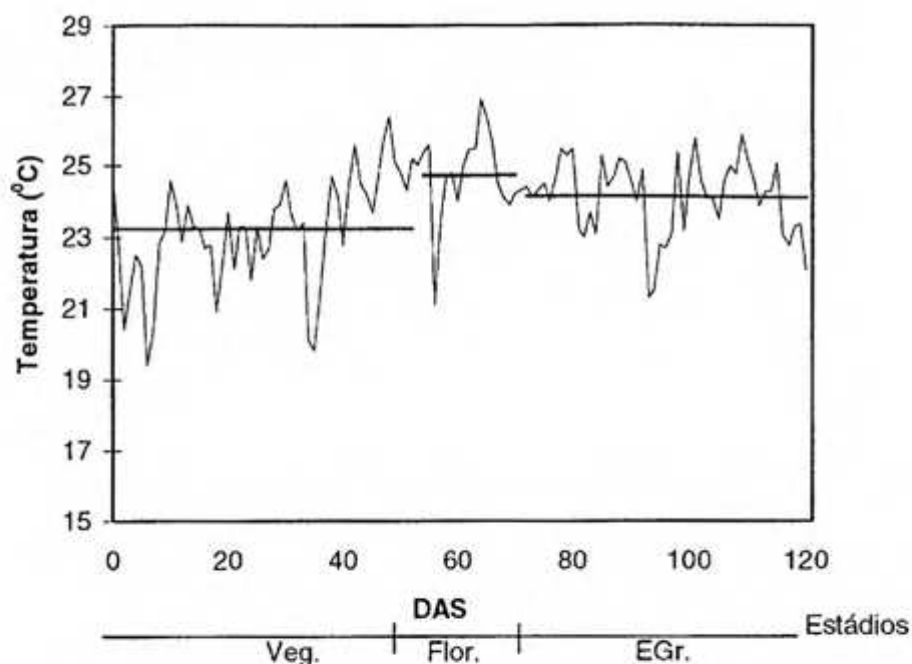


Figura 1 - Evolução da temperatura média durante o ciclo da cultura e médias dos diferentes estádios fenológicos: vegetativo (Veg.), florescimento (Flor.) e enchimento de grãos (EGr.).

A temperatura máxima absoluta do período ($33,8^{\circ}\text{C}$) ocorreu aos 62 dias após a emergência (DAE), quando as plantas estavam no período de florescimento, enquanto a temperatura mínima do período ($14,0^{\circ}\text{C}$) ocorreu no final do ciclo, aos 117 DAE.

As temperaturas máximas apresentaram valores de 28, 31 e 30°C nos três períodos, para cada um dos estádios fenológicos. As temperaturas mínimas apresentaram valores de 19, 19 e 24°C e as temperaturas médias, valores de 23, 25 e 24°C , para cada período fenológico.

Os dados registrados de temperatura média estiveram próximos aos valores normais da região. A cultura esteve, durante todo seu período, sob uma faixa de temperatura considerada boa para o seu desenvolvimento, embora a temperatura ótima para seu rendimento máximo seja 30°C (BROWN, 1960). Normalmente, temperaturas superiores a 40°C reduzem acentuadamente a produção fotossintética (HEW et al., 1969; MANN e JAWORSKI, 1970).

Embora existam trabalhos que demonstrem que a temperatura-base, ou zero de crescimento, para soja seja de 15°C (PASCALE et al., 1963), considerou-se, neste trabalho, uma temperatura mínima de 10°C para o crescimento (HOWELL, 1960; PASCALE, 1969), já que é a temperatura mais amplamente utilizada na literatura

Considera-se que as regiões que apresentam uma disponibilidade térmica menor que 600 graus-dia, para todo o ciclo, são inaptas para a soja. Essas regiões correspondem, aproximadamente, àquelas em que a média da temperatura do mês mais quente é menor que 20°C. Por outro lado, as regiões que dispõem de uma soma de temperatura entre 600 e 2.400 graus-dia são as que apresentam os agroclimas térmicos mais aptos para soja (BERLATO e GONÇALVES, 1978).

A radiação solar global diária (Rg) variou de 9,8 a 23,8 MJ.m⁻², tendo apresentado um valor médio de 15,78 MJ.m⁻² para a fase vegetativa (desde emergência até o dia 50 após a mesma), 19,55 MJ.m⁻² para a fase de florescimento (entre os 51 e 68 DAE) e 17,37 MJ.m⁻² para a fase de enchimento de grãos (de 69 a 110 DAE) (Figura 2).

No período de implantação da cultura, durante a fase vegetativa, pôde-se observar que a radiação solar global esteve quase sempre abaixo da média daquela fase, o que não aconteceu depois do dia 37 após semeadura. Estes valores baixos, ocorridos no período de implantação da cultura, foram causados pela alta nebulosidade (Figura 3), característica dessa época. Durante o período de florescimento, observou-se menor ocorrência de nuvens, o que permitiu os mais altos valores de Rg. No período de enchimento de grãos, houve uma queda na média de Rg, em virtude da maior declinação solar, nessa época do ano.

Os valores da precipitação e da ETc diária durante o ciclo da cultura estão representados na Figura 4. O período de 19 dias, compreendido entre os dias 35 e 53 DAE, foi caracterizado pela ausência total de chuvas. A partir de 11/2 (61 DAE), as chuvas tornaram-se mais freqüentes.

Os totais de precipitação foram de 403 mm na fase vegetativa, 86 mm no período de florescimento e 70 mm no período de enchimento de grãos, com um total de 600 mm para todo o ciclo, o que, de certa forma, atende às

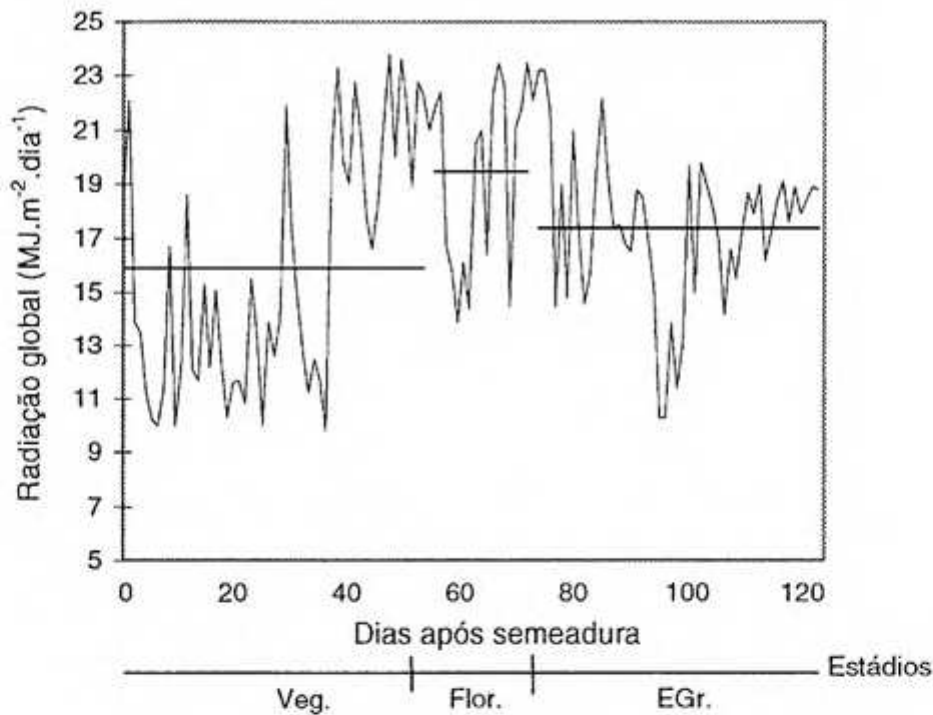
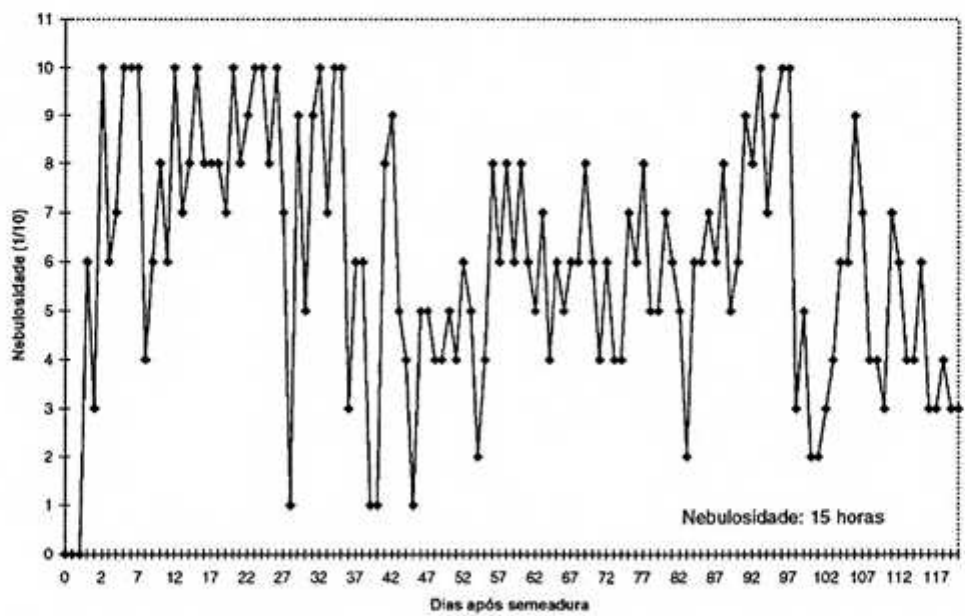
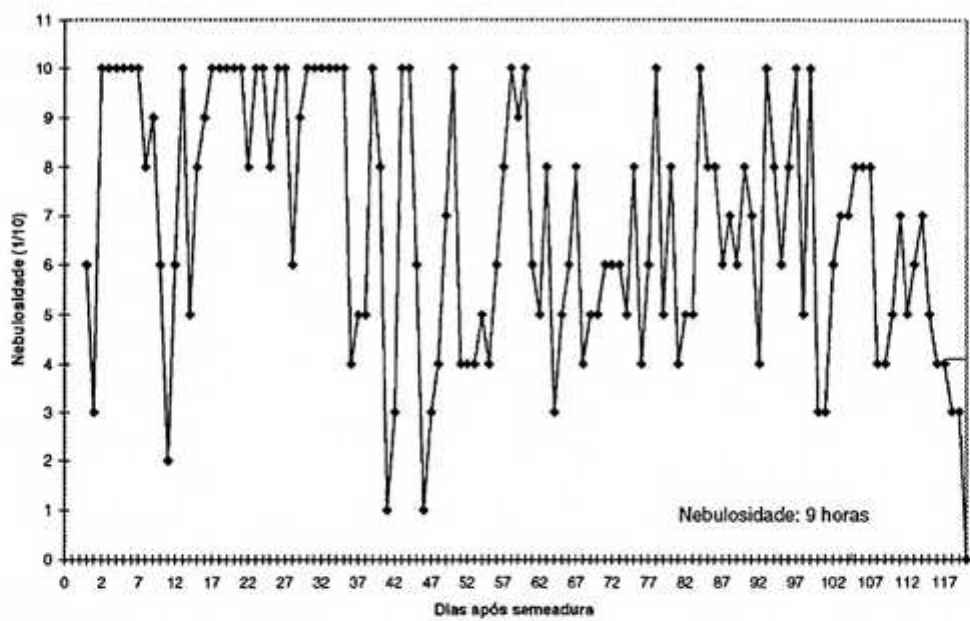


Figura 2 - Evolução da radiação solar global e as médias para cada estágio fenológico: vegetativo (Veg.), florescimento (Flor.) e enchimento de grãos (EGr.).

exigências hídricas da cultura da soja, conforme verificado por CARTER e HARTWIG (1962), que encontraram um consumo de água que variava entre 508 e 762 mm.

Apesar de o total de água fornecido para a cultura, durante todo o ciclo, ter sido teoricamente suficiente, essa precipitação foi irregularmente distribuída, ou seja, o fornecimento esteve concentrado no período inicial do ciclo da cultura, em que cerca de 60 % da água de todo o período foi agregada à cultura e os outros 40% foram complementados por chuvas esparsas no restante do ciclo (Figura 4).

O consumo estacional de água da soja é um dado fundamental para a suplementação de água por meio da irrigação, bem como o conhecimento do consumo de água nos diversos subperíodos do ciclo da planta, para ajustar as épocas de semeadura em função das disponibilidades hídricas da região (Figura 4).



Estádios

Veg. Flor. EGr.

Figura 3 - Valores de nebulosidade para todo o ciclo da cultura, observados às 9 e às 15 horas.

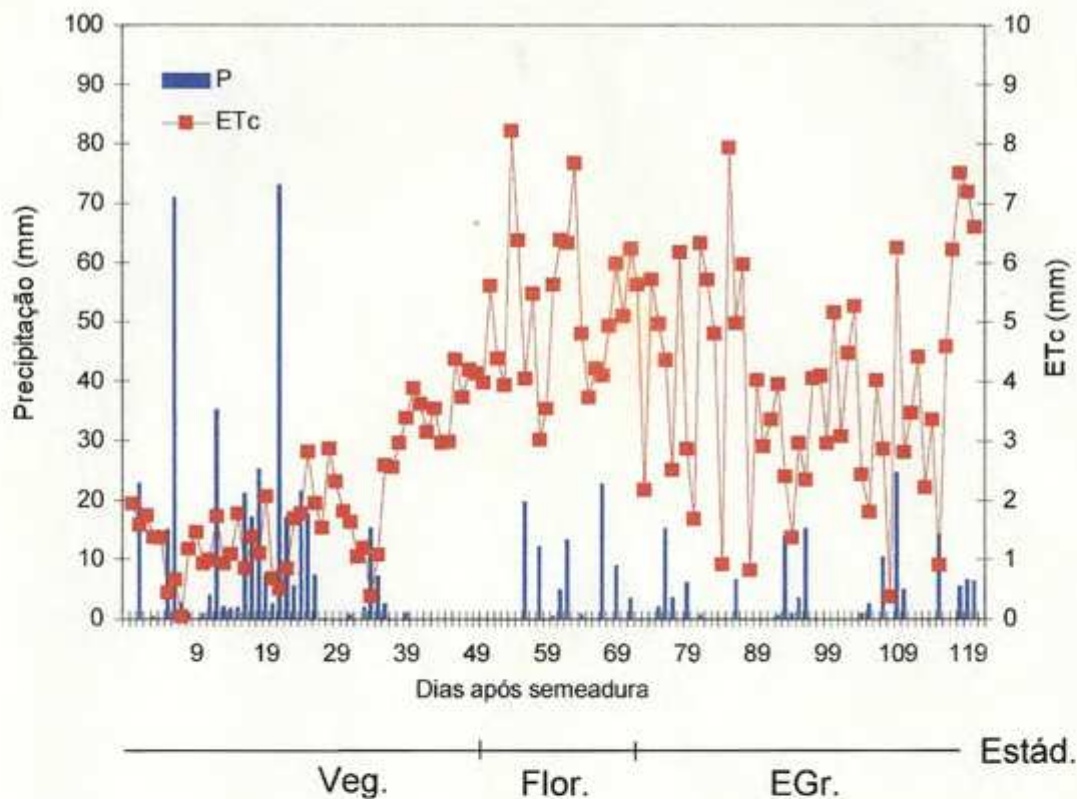


Figura 4 - Valores da precipitação e da ETc diária (mm) ao longo do ciclo da cultura.

A evapotranspiração total durante todo o ciclo variou de 95,2 a 184,8 mm, com um total de 402,5 mm. O consumo médio diário foi de 4 mm d^{-1} (Quadro 1).

Quadro 1 – Precipitação (P) e Evapotranspiração da cultura (ETc) nos diversos períodos fenológicos

| Períodos | Número de Dias | ETc Total (mm) | Precipitação (mm) |
|---------------------|----------------|----------------|-------------------|
| Vegetativo | 54 | 122,4 | 403 |
| Florescimento | 19 | 95,2 | 86 |
| Enchimento de grãos | 41 | 184,8 | 70 |
| Ciclo total | 115 | 402,5 | 600 |

O consumo médio diário mais alto ocorreu no período de florescimento.

Logo, conclui-se que a necessidade hídrica da variedade Capinópolis pode variar em torno de 400 mm, durante todo o ciclo, se distribuídos com boa regularidade.

Segundo JENSEN (1973), nas culturas bem supridas de água, nos Estados Unidos e no Canadá, o valor mais alto encontrado de evapotranspiração foi de 4,1 mm.d⁻¹, em média, para todo o ciclo da cultura. Em condições de climas diferentes, o valor de consumo de água pode ser muito variável. CARTER e HARTWIG (1962) encontraram uma variação de 508 a 762 mm. Nas condições da região da Depressão Central do Rio Grande do Sul, a evapotranspiração total teve uma média de 840 mm para todo o ciclo, com um consumo diário de 5,8 mm (BERLATO e BERGAMASCHI, 1977).

A umidade relativa do ar apresentou valor médio de 83% para a fase vegetativa, e para a fase reprodutiva os valores médios foram de 77 e 80%, para os períodos de florescimento e enchimento de grãos, respectivamente, com uma média de 80% para todo o ciclo. Estes valores de umidade relativa estão dentro dos valores que permitem um ótimo crescimento da cultura.

A baixa umidade atmosférica pode afetar a fotossíntese e reduzir o número de vagens pelo aborto floral, típico em regiões áridas (WHIGAM et al., 1978). Os valores de déficit de pressão de vapor foram de 11, 13 e 12 hPa, para os períodos vegetativo, de florescimento e de enchimento de grãos, respectivamente.

Com o objetivo de facilitar a visualização das características das condições meteorológicas durante o experimento, comparou-se a média climática para os meses de duração do experimento com os dados mensais médios do decênio 1985-1995 (Quadro 2).

Pelos resultados do Quadro 2, pode-se observar que durante o período do experimento, com exceção do mês de dezembro, houve maior disponibilidade de radiação em todos os meses. Quanto à precipitação, os meses de janeiro, fevereiro e março apresentaram valores inferiores aos do

Quadro 2 - Comparação das médias dos elementos do clima durante o experimento (Exp.) com as médias do decêndio (Dec.) 1985-1995

| Meses | Radiação (MJ.m ⁻² .d ⁻¹) | | Precipitação (mm.d ⁻¹) | | Temperatura (°C) | |
|-------|--|------|---------------------------------------|-------|---------------------|------|
| | Exp. | Dec. | Exp. | Dec. | Exp. | Dec. |
| Dez. | 14,0 | 15,2 | 342,0 | 239,0 | 21,7 | 21,9 |
| Jan. | 18,0 | 16,6 | 85,0 | 129,0 | 23,0 | 22,6 |
| Fev. | 19,1 | 17,4 | 73,0 | 120,0 | 23,5 | 22,7 |
| Mar. | 16,5 | 16,1 | 99,0 | 141,0 | 23,0 | 22,2 |
| Abr. | 14,6 | 13,7 | 95,0 | 74,0 | 20,1 | 20,8 |

decêndio. Os valores de temperatura média foram um pouco superiores aos do período 1985-1995, nos meses de janeiro, fevereiro e março.

4.3. Somas térmicas

O método da soma de temperatura ou de graus-dia tem sido muito usado para prever as fases fenológicas das culturas. Este método se apóia na premissa de que a planta necessita de uma certa soma de temperatura para completar seu ciclo vital e de que esta soma seria uma constante, independente da época de semeadura ou do local. Ademais, o método pressupõe uma temperatura mínima (temperatura-base) de desenvolvimento, acima da qual as temperaturas são acumuladas (HOWELL, 1960).

Os tratamentos não mostraram diferenças quanto às somas térmicas, para alcançar as diferentes fases fenológicas. Foram necessários 687 graus-dia para finalizar a fase vegetativa, aos 49 DAE. No final do período de florescimento, aos 68 DAE, foram alcançados 946 graus-dia, e no final do período de enchimento de grãos, aos 110 DAE, 1.495 graus-dia.

4.4. Conteúdo de umidade do solo

Nas Figuras de 5 a 9, pode-se observar o teor de umidade do solo ao longo do ciclo da cultura. Ao analisar, comparativamente, o conteúdo de umidade com a curva característica de retenção de água do solo do campo experimental (Figura 10), pode-se observar que em todos os tratamentos, na camada de 65 cm de profundidade, o solo esteve com teor de água próximo à capacidade de campo (CC). As maiores variações entre parcelas ficaram restritas às camadas de 10, 20 e 40 cm.

O tratamento IPTP sempre esteve com teor de umidade elevado em todos os níveis, tendo as maiores variações ocorrido na camada de 10 cm (Figuras de 5 a 9), cujos teores de umidade chegaram a afastar-se da CC (Figuras de 7 a 9). Tal fato, possivelmente, foi devido a uma diminuição na eficiência de aplicação de água, pelo sistema de irrigação utilizado, agravado pela concentração radicular na superfície do solo, que aumentou a retirada de água nesse perfil.

O tratamento NIFV chegou no final da fase vegetativa com baixo teor de umidade em todas as camadas analisadas, em relação aos tratamentos irrigados (Figura 5). Ao ser irrigado, o teor de água deste tratamento tendeu a se aproximar do teor de água dos tratamentos irrigados, apesar de apresentar, em todas as camadas, uma tendência a ter sempre teores menores, provavelmente em razão da melhor distribuição radicular em níveis mais profundos, que implicou maior retirada de água de todo o perfil do solo (Figuras de 6 a 9).

O NIFF sofreu pouca variação no conteúdo de água do solo ao longo de todo seu ciclo, provavelmente pela ocorrência de chuvas (Figuras de 5 a 9).

O tratamento NIFG teve seu teor de água no solo afetado somente no final do ciclo (Figura 9).

O tratamento NITP teve os menores teores de água do início ao fim do cultivo, chegando a indicar tendências de teores abaixo do ponto de murcha permanente na camada de 10 cm, no final do ciclo (Figura 9).

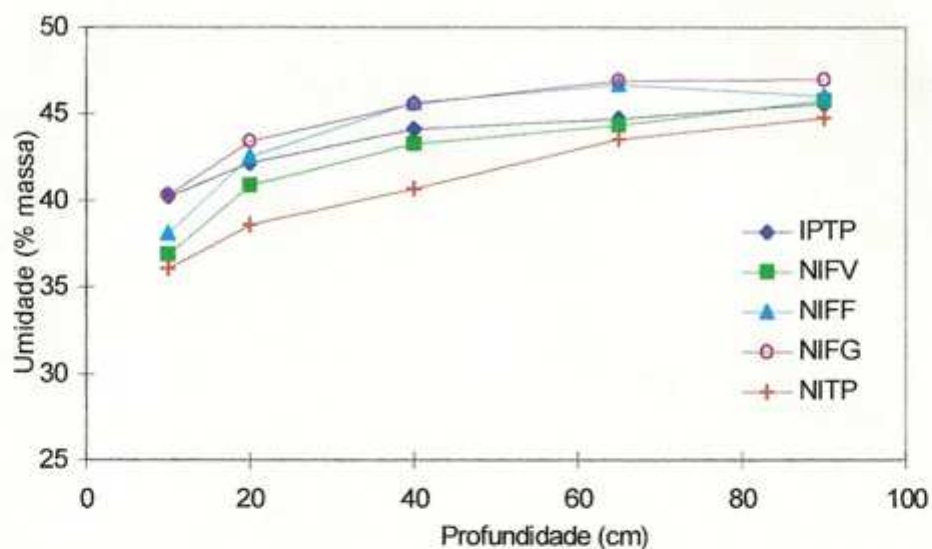


Figura 5 - Umidade do solo no dia 31 de janeiro (54 DAS), em todos os tratamentos, nas diferentes profundidades (final da fase vegetativa).

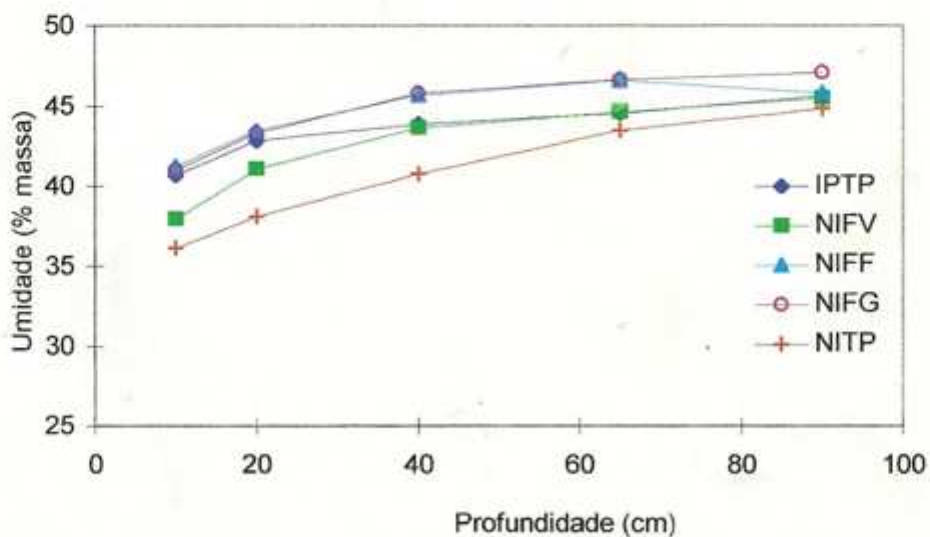


Figura 6 - Umidade do solo no dia 8 de fevereiro (62 DAS), em todos os tratamentos, nas diferentes profundidades (fase de florescimento).

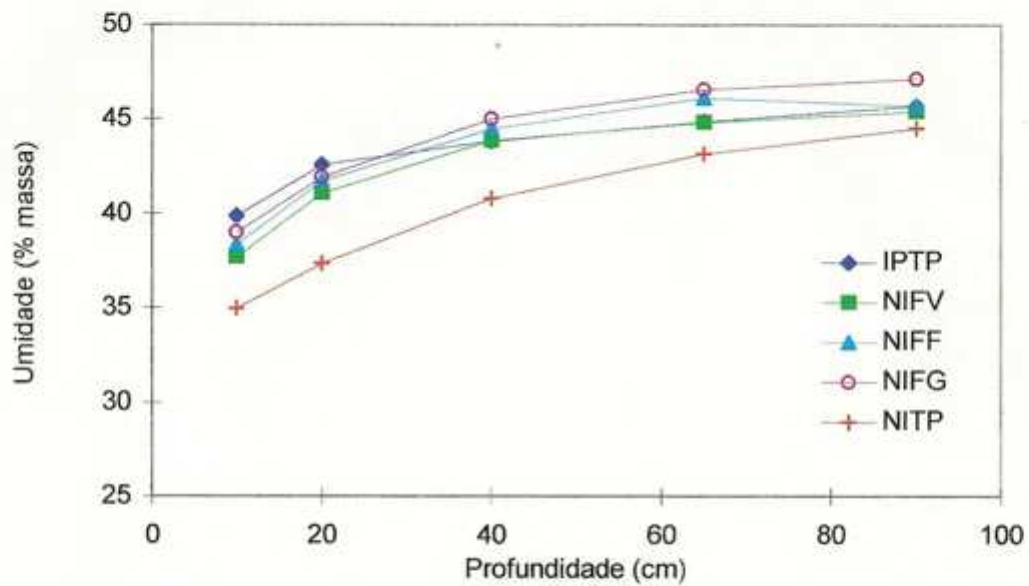


Figura 7 - Umidade do solo no dia 17 de fevereiro (71 DAS), em todos os tratamentos, nas diferentes profundidades (fase de florescimento).

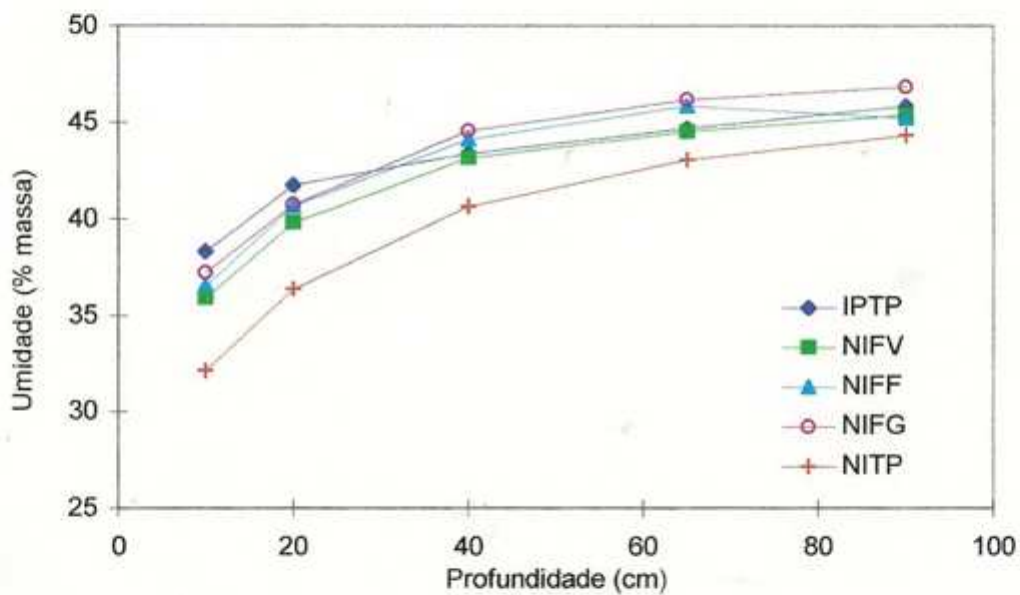


Figura 8 - Umidade do solo no dia 21 de fevereiro (75 DAS), em todos os tratamentos, nas diferentes profundidades (fase de enchimento de grãos).

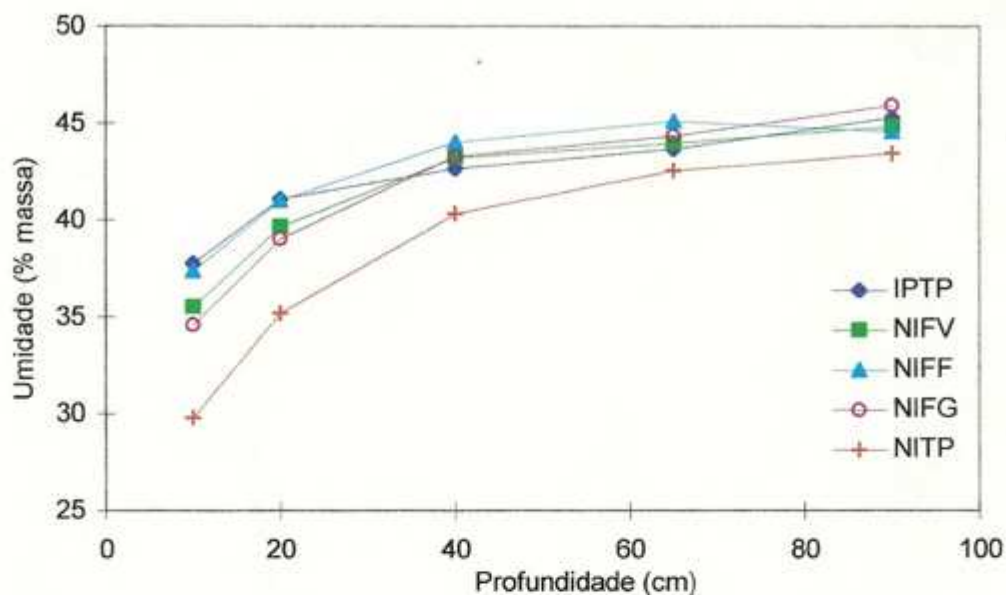


Figura 9 - Umidade do solo no dia 8 de março (91 DAS), em todos os tratamentos, nas diferentes profundidades (fase de enchimento de grãos).

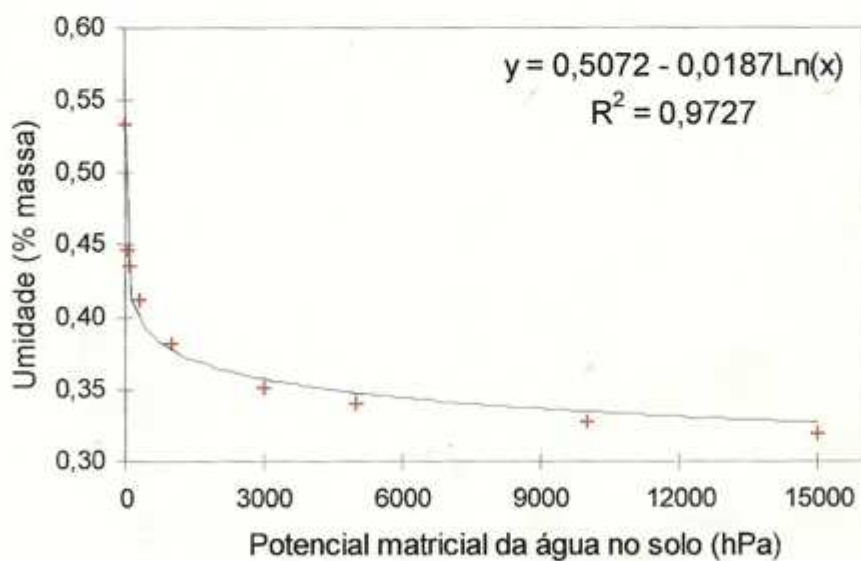


Figura 10 - Curva característica de retenção de umidade no solo do local do experimento.

4.5. Estresse hídrico na cultura

O resultado do potencial osmótico das folhas mostrou que durante todo o ciclo da cultura houve tendência a menores valores para os tratamentos não-irrigados (Figura 11). Observa-se, ainda, que os menores valores foram registrados nas fases de florescimento e enchimento de grãos.

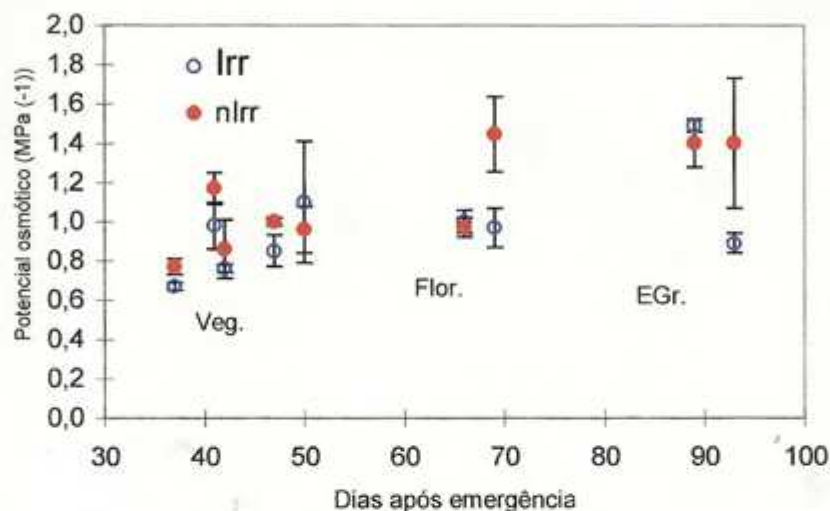


Figura 11 - Potencial osmótico dos tratamentos irrigados (Irr) e não-irrigados (nlrr), nos distintos estádios fenológicos.

4.6. Conclusões

A falta de complemento de irrigação afetou a umidade do solo e, portanto, a quantidade de água disponível para a cultura da soja, nos tratamentos estressados.

A temperatura do ar variou dentro de uma faixa considerada satisfatória para o crescimento e desenvolvimento da cultura, em todos os períodos fenológicos.

As variações de umidade do solo ficaram restritas às camadas de 10, 20 e 40 cm, ocorrendo de forma mais evidente nos tratamentos sob deficiência hídrica.

Houve tendência a menores valores de potencial osmótico, nas folhas, para os tratamentos não-irrigados.

Pode-se dizer que durante os meses do ensaio as condições meteorológicas foram propícias à ocorrência de estresse ambiental na cultura de soja, em relação aos dados correspondentes ao decênio 1985-1995.

5. CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DA CULTURA

5.1. Introdução

Neste capítulo, serão mostrados e discutidos os efeitos dos diferentes tratamentos sobre o crescimento e o desenvolvimento da cultura da soja.

Os resultados serão apresentados mediante a consideração da resposta da cultura no que se refere ao desenvolvimento, à área foliar e à matéria seca, nas diferentes fases fenológicas.

5.2. Desenvolvimento da cultura

Os estádios vegetativo, de florescimento e de enchimento de grãos tiveram, para todos os tratamentos, uma duração de 54, 19 e 41 dias, respectivamente. A fase vegetativa estendeu-se de 8 de dezembro a 1º de fevereiro (54 DAS), a fase de florescimento foi de 1º de fevereiro a 20 de fevereiro (74 DAS) e a fase de enchimento de grãos foi de 20 de fevereiro a 1º de abril (115 DAS).

A cultura da soja não apresentou variação em sua fenologia, para nenhum dos tratamentos aplicados, tendo alcançado os estádios da chave de Fehr e Caviness em uma mesma data.

5.3. Evolução do índice de área foliar

Embora tenha ocorrido uma clara tendência ao maior IAF, nos tratamentos irrigados, somente foram encontradas diferenças significativas no IAF dos distintos tratamentos a 15%, possivelmente por causa do pequeno número de repetições e dos erros de amostragem (Figura 12).

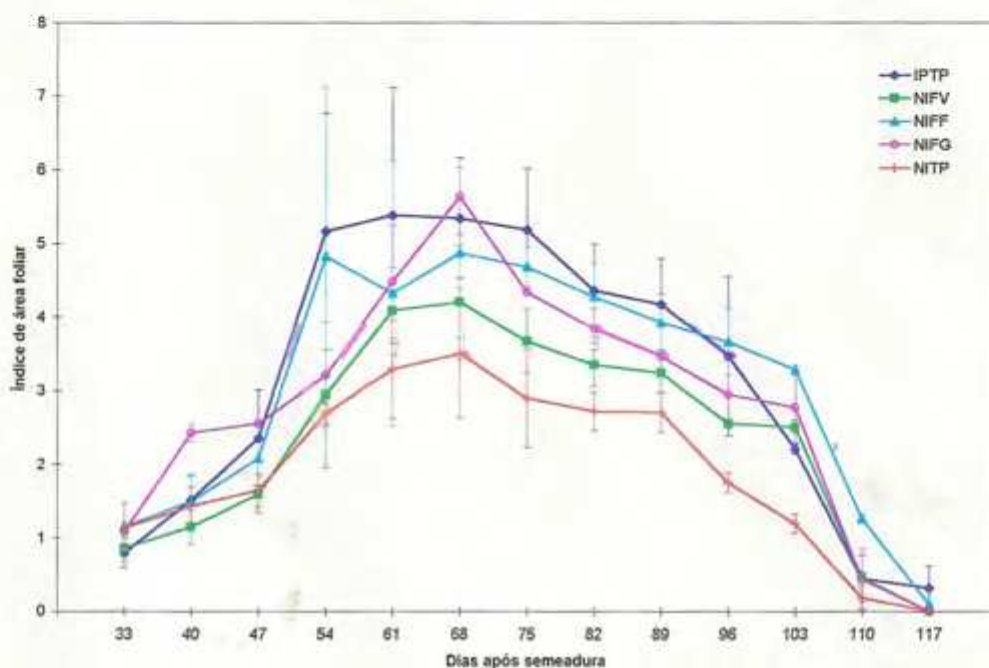


Figura 12 - Evolução dos IAF e desvios para cada um de seus valores, em cada tratamento, durante todo o ciclo da cultura.

Os valores de IAF máximos alcançados foram: 5,5 para o tratamento IPTP; 4,7 para o NIFV; 4,4 para o NIFF; 4,9 para o NIFG, e 3,6 para o NITP. A partir de 40 DAE (557 graus-dia), as diferenças começaram a evidenciar-se, tendo, então, sido possível separar, pelo teste de Duncan, dois grupos: o dos tratamentos que estavam sendo irrigados (IPTP, NIFF e NIFG) e os não-irrigados (NITP e NIFV). A partir do início da fase de florescimento (55 DAE), quando foi iniciada a irrigação do tratamento NIFV e interrompida a do tratamento NIFF, somente se observaram diferenças significativas entre o tratamento NITP e os demais. Esse resultado é um indício de que as plantas

do tratamento NIFV recuperaram sua área foliar em nível dos tratamentos irrigados, enquanto a ausência de irrigação na fase de florescimento não alterou a área foliar das plantas do tratamento NIFF, em virtude da formação completa da parte aérea das plantas deste tratamento até o final da fase vegetativa (Figura 17).

Considerando que um IAF de 3 corresponde ao de fechamento do dossel, observou-se que os tratamentos que estavam sendo irrigados obtiveram um IAF desse valor próximo a 50 DAE, enquanto o tratamento NITP alcançou tal valor aos 61 DAE, ou seja, apresentou um atraso de 11 dias. O tratamento NIFV, que desde os 50 DAE estava sendo irrigado, alcançou um IAF de 3 aos 55 DAE, apresentando grande recuperação ao ser irrigado.

Uma equação polinomial de terceiro grau foi utilizada para expressar as variações do índice de área foliar, em função do tempo térmico (Figura 13).

Os coeficientes das equações de regressão são apresentados no Quadro 3.

O IAF foi muito baixo durante o estabelecimento da cultura, aumentando lentamente, de forma linear, na fase vegetativa, até alcançar seu valor máximo em torno de 949 graus-dia (68 DAE). Posteriormente, o IAF decresceu, em virtude da queda das folhas, até alcançar os valores de 0,5 (IPTP) e 0,2 (NITP), no final do período de enchimento de grãos (Figura 12).

Diferentes valores de IAF máximo, para o cultivo da soja, são encontrados na literatura, os quais variam entre 2,4 e 9, dependendo da variedade e morfologia da planta, das condições ambientais e das técnicas culturais aplicadas. No entanto, os valores mais característicos para a cultura de soja, cultivada em boas condições pedoclimáticas, oscilam entre 3,5 e 7 (DE JUAN VALERO et al., 1993).

No Brasil, foram encontrados valores que variaram entre 2,5 e 4 (GAZZONI e MINOR, 1974); MELGES et al. (1989) também encontraram valores nessa faixa de variação.

Por causa da característica de sua arquitetura foliar, em que prevalece o amontoamento das folhas na parte superior do dossel, impedindo uma boa

Quadro 3 - Equações polinomiais de terceiro grau relacionando o índice de área foliar (IAF) ao tempo térmico (TT) e coeficientes de determinação (R^2) para os distintos tratamentos

| Tratamentos | Equações | R^2 |
|-------------------|---|-------|
| IPTP ¹ | $IAF = -2E-07 (TT)^3 + 3E-04 (TT)^2 - 0,1983 (TT) + 39,765$ | 0,96 |
| NIFV ² | $IAF = -1E-09(TT)^3 + 1E-05(TT)^2 - 0,0046 (TT) + 0,8811$ | 0,99 |
| NIFF ³ | $IAF = -1E-07(TT)^3 + 3E-04(TT)^2 - 0,1581 (TT) + 32,537$ | 0,91 |
| NIFG ⁴ | $IAF = -5E-08(TT)^3 + 1E-04(TT)^2 - 0,0736 (TT) + 16,173$ | 0,98 |
| NITP ⁵ | $IAF = -1E-07(TT)^3 + 2E-04(TT)^2 - 0,1348 (TT) + 28,829$ | 0,99 |

Nota: os coeficientes de regressão (b1, b2 e b3) são significativos a 5 %, pelo teste F.

¹ irrigado por todo o período.

² não-irrigado na fase vegetativa.

³ não-irrigado no período de florescimento.

⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.

⁵ não-irrigado por todo o período.

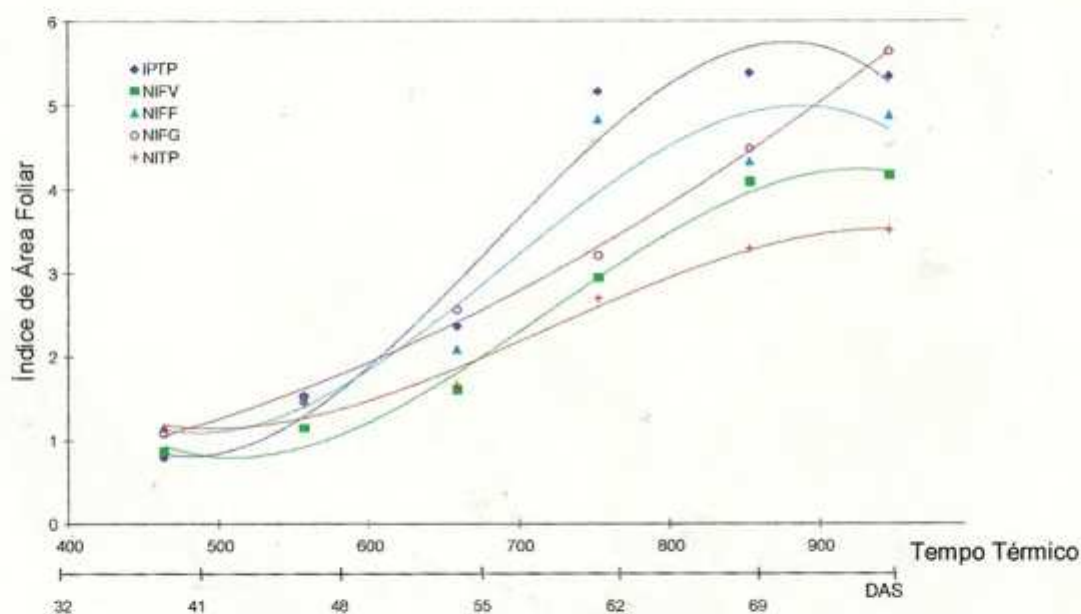


Figura 13 - Ajuste das curvas de IAF, em função do tempo térmico (TT).

distribuição da luz para as folhas inferiores, como também pela sua condição de planta C_3 , a cultura da soja não é favorecida pelo valor elevado de IAF.

A duração da área foliar (DAF), que é uma indicadora da persistência da superfície assimilatória de uma cultura (BEADLE, 1985), foi calculada para cada fase fenológica (Quadro 4).

Quadro 4 - Duração da área foliar (DAF), em dias

| Períodos | Tratamentos | | | | |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | IPTP ¹ | NIFV ² | NIFF ³ | NIFG ⁴ | NITP ⁵ |
| Vegetativo | 22 | 17 | 22 | 23 | 18 |
| Florescimento | 74 | 54 | 63 | 62 | 43 |
| Enchimento de grãos | 103 | 72 | 97 | 83 | 57 |
| Ciclo completo | 199 | 143 | 182 | 168 | 118 |

¹ irrigado por todo o período.

² não-irrigado na fase vegetativa.

³ não-irrigado no período de florescimento.

⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.

⁵ não-irrigado por todo o período.

Os resultados evidenciaram que, na fase vegetativa, a DAF dos tratamentos sem irrigação (NITP e NIFV) apresentou menores valores que a dos tratamentos irrigados. No entanto, tais diferenças não são estatisticamente significativas a 5%.

Durante o período de florescimento, somente o tratamento NITP apresentou valores de DAF significativamente menores que os dos demais. Nesse período fenológico, os valores da DAF do NITP foram cerca de 42 % inferiores aos do IPTP. A redução no NIFV foi de 27%, enquanto os outros tratamentos apresentaram redução de 16 %. Na fase de enchimento de grãos, as reduções em relação ao tratamento IPTP foram de 45, 27 e 15% para os tratamentos NITP, NIFV e NIFG, respectivamente.

Considerando todo o ciclo da cultura, os valores finais de DAF estiveram entre 118 (NITP) e 199 dias (IPTP). DE JUAN VALERO et al. (1993) obtiveram valores de 279 e 492 dias, dependendo do cultivar, da densidade de semeadura e do ano do experimento. DANUSO et al., (1987) encontraram valores de 180 dias.

Pode-se observar que o tratamento IPTP apresentou valores de DAF mais altos em, praticamente, todas as fases. O estresse aplicado na fase vegetativa (NIFV) influenciou os valores de DAF nas outras fases, enquanto o NITP apresentou tendências a menores valores de DAF.

5.4. Produção e expansão de folhas

Ao longo do tempo, não foram encontradas diferenças entre os diversos tratamentos para produção de novas folhas, que apareceram, em média, uma a cada quatro dias. Para determinar as taxas de expansão e aparição das folhas, foram consideradas as médias de três grupos de folhas do caule principal, para cada tratamento: grupo 1 (trifólio 1 e trifólio 2), grupo 2 (trifólios de 3 a 6) e grupo 3 (trifólios de 7 a 13). Os trifólios 1 e 2 apareceram, em média, a cada 5,5 dias; nos trifólios 3 a 6, a aparição ocorreu a cada 4,5 dias; e a média de emergência dos trifólios de 7 a 13 foi 3,3 dias. Em geral, as folhas expandem durante 18,3 dias (Figura 14). No Quadro 5, estão apresentadas as taxas de emergência e expansão das folhas.

A Figura 14 ilustra a máxima expansão atingida por cada grupo de folhas. Até o trifólio 6, não foram percebidas diferenças entre os tratamentos, as quais começam a evidenciar a partir da folha 7.

Não foram encontradas diferenças significativas, em nível de 5% na expansão dos trifólios 1 e 2 (Figura 15). Foi definida uma equação de ajuste da área foliar em função de dias após emergência:

$$y = 0,005 x^3 - 0,5145 x^2 + 16,47 x - 118,28, \text{ com } R^2 = 0,93 \quad \text{Equação 14}$$

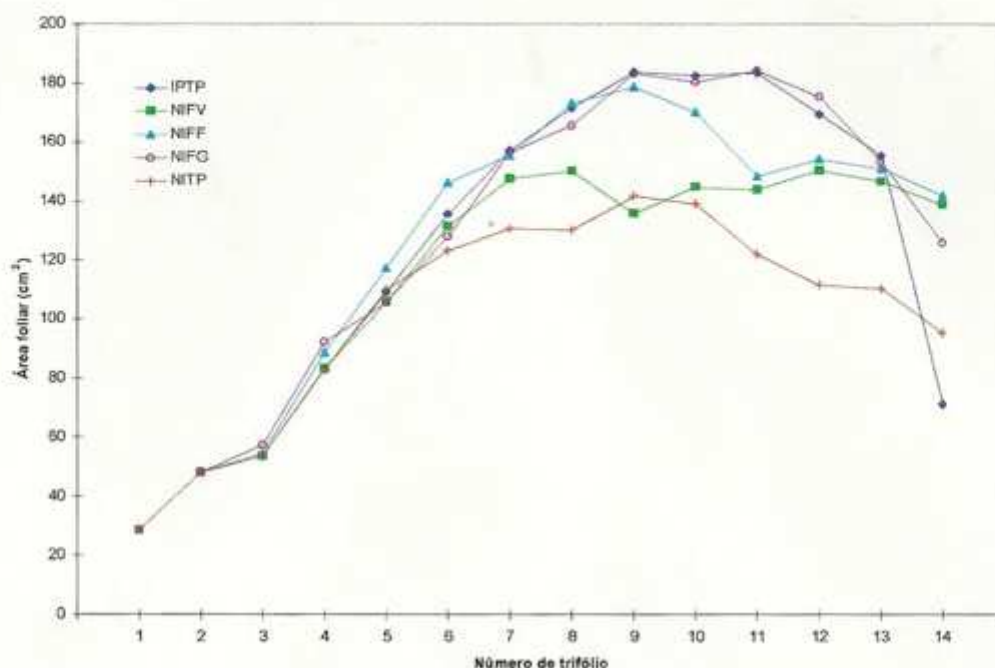


Figura 14 - Área máxima por trifólio, para os diferentes tratamentos

Quadro 5 - Taxa de emergência (trifólios.d⁻¹) e de expansão (cm².d⁻¹) dos diferentes grupos de folhas

| | Trifólios | IPTP ¹ | NIFV ² | NIFF ³ | NIFG ⁴ | NITP ⁵ |
|------------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Taxa de aparição | Grupo 1 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| | Grupo 2 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,07 |
| | Grupo 3 | 0,33 | 0,30 | 0,28 | 0,30 | 0,28 |
| Taxa de expansão | Grupo 1 | 7,26 | 7,26 | 7,32 | 7,52 | 7,26 |
| | Grupo 2 | 6,47 | 6,24 | 7,46 | 7,09 | 7,32 |
| | Grupo 3 | 8,40 | 6,24 | 7,92 | 7,94 | 4,71 |

¹ irrigado por todo o período.

² não-irrigado na fase vegetativa.

³ não-irrigado no período de florescimento.

⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.

⁵ não-irrigado por todo o período.

Grupo 1 = grupo formados pelos trifólios 1 e 2.

Grupo 2 = grupo formados pelos trifólios 3 a 6.

Grupo 3 = grupo formados pelos trifólios 7 a 13.

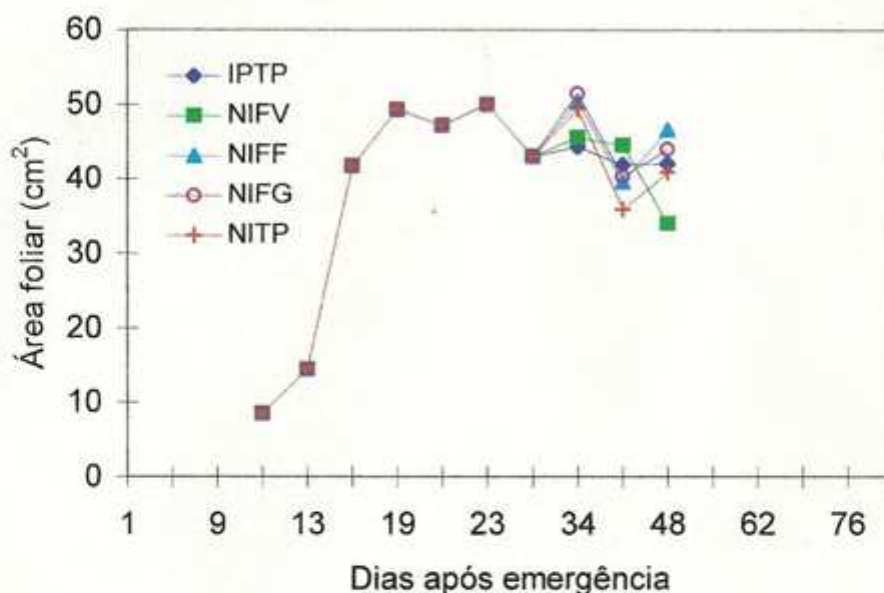


Figura 15 - Expansão dos trifólios 1 e 2, nos diferentes tratamentos.

Quanto à expansão dos trifólios de 3 a 6 (Figura 16), tampouco foram encontradas diferenças significativas. A equação de ajuste foi

$$y = 0,0018 x^3 + 0,1564 x^2 - 0,8883 x - 19,304, \text{ com } R^2 = 0,98$$

Equação 15

Comparando o efeito do estresse hídrico sobre a expansão de folhas, MUCHOW et al. (1986) também não encontraram diferenças na expansão dos trifólios de 1 a 4, embora tenham encontrado tendência à maior taxa de expansão entre os trifólios 5 e 6 dos tratamentos irrigados, em relação aos não-irrigados.

Observa-se que a expansão não foi modificada com o estresse da fase vegetativa, tendo ocorrido somente tendência à menor expansão foliar nos tratamentos não-irrigados (NITP e NIFV) (Figura 16).

Foram encontradas somente diferenças significativas, em nível de 5%, para o tratamento NITP, em relação aos demais. As equações de regressão para a expansão dos trifólios de 7 a 13 foram definidas para o tratamento NITP e para os demais tratamentos:

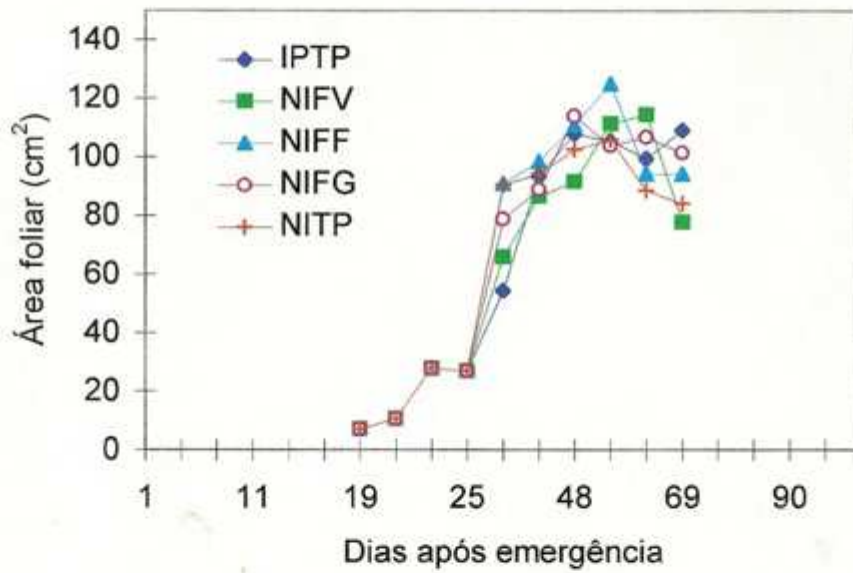


Figura 16 - Expansão dos trifólios de 3 a 6, nos diferentes tratamentos.

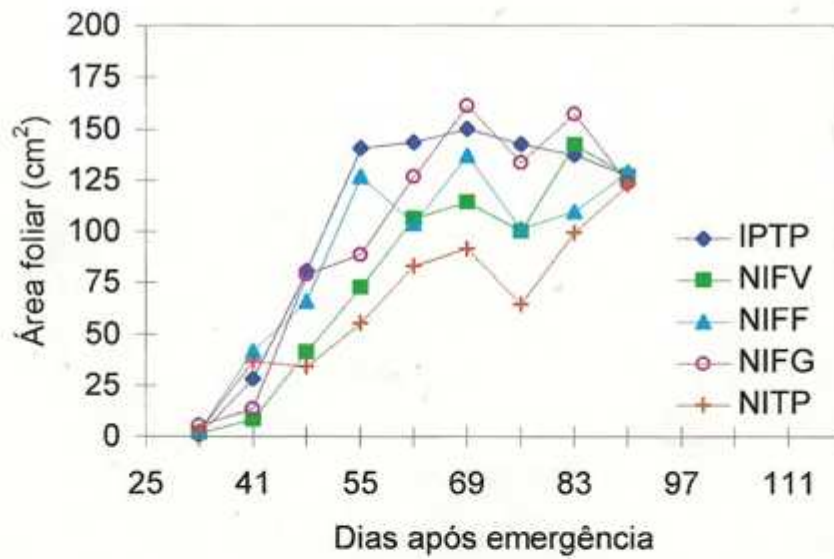


Figura 17 - Expansão dos trifólios de 7 a 13, nos diferentes tratamentos.

Tratamentos irrigados :

$$y = 0,0008x^3 - 0,1626x^2 + 18,868x - 474,74 ; R^2 = 0,96 \quad \text{Equação 16}$$

Tratamento não-irrigado :

$$y = 0,0013x^3 - 0,2477x^2 + 17,095x - 342,81 ; R^2 = 0,90 \quad \text{Equação 17}$$

O tratamento não-irrigado apresentou, durante todo o período, as taxas mais baixas de expansão foliar, diferenciando-se significativamente, em nível de 5%, dos demais tratamentos, desde os 55 DAE até os 83 DAE. Embora não tenha apresentado diferenças significativas, o tratamento NIFV mostrou tendência à menor taxa de expansão que os outros tratamentos, ou seja, o estresse aplicado na fase vegetativa influenciou a expansão desde o trifólio 7 até os demais subseqüentes.

A expansão desse grupo de folhas iniciou na fase vegetativa, prolongando-se até o início do período de enchimento de grãos. Observou-se que a expansão foliar, nos tratamentos irrigados durante a fase vegetativa (IPTP, NIFF e NIFG), ocorreu em taxas maiores, tendo sido concluída no final desta mesma fase. Os tratamentos estressados na fase vegetativa, entretanto, apresentaram menor taxa de expansão foliar, que se prolongou até o início da fase de enchimento de grãos.

Tal fato ocorreu em virtude de as plantas desses tratamentos terem passado por estresse hídrico, agravado por alta temperatura e insolação (Figuras 1, 2 e 3).

Este estudo mostrou a sensibilidade da taxa de expansão das folhas da soja, crescendo sob estresse hídrico. Resultados similares foram encontrados por MUCHOW et al. (1986).

A área foliar específica (AFE) (Figura 18) apresentou tendência a declinar ao longo do ciclo de cultivo, ou seja, as folhas de todos os tratamentos tenderam a tornar-se mais grossas com o decorrer do tempo.

Assim, as folhas emitidas no início do ciclo tenderam a ser mais finas, ou possuir menos massa por unidade de área.

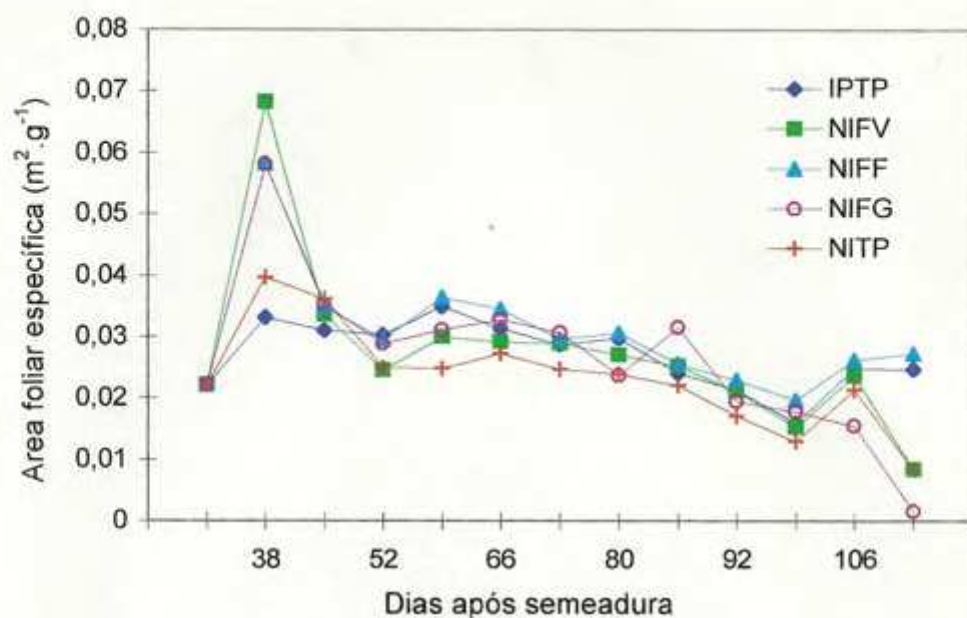


Figura 18 - Área foliar específica ($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$) ao longo do ciclo da cultura, para todos os tratamentos.

O tratamento NIFV, na fase vegetativa, tendeu a apresentar valores que se aproximavam dos valores de NITP, ao passo que na fase reprodutiva ele tendeu a aproximar-se de IPTP.

O tratamento NITP, na fase reprodutiva, mostrou tendência para valores menores de AFE, ao passo que os demais tratamentos tenderam a apresentar valores mais elevados, não apresentando tendência clara de diferença entre si. Tal situação foi evidente durante toda a fase (Figura 18).

5.5. Crescimento da cultura

As variações da matéria seca total (incluindo raízes) por unidade de área cultivada, em função do tempo térmico, para os distintos tratamentos, são apresentadas na Figura 19.

Um polinômio de terceiro grau foi ajustado aos dados de matéria seca, para os diferentes tratamentos (Quadro 6). Em geral, as diferenças de matéria seca não foram significativas até os 40 DAE. A partir daí, dois grupos diferenciaram-se, em níveis de 15%, isto é, o grupo dos tratamentos irrigados

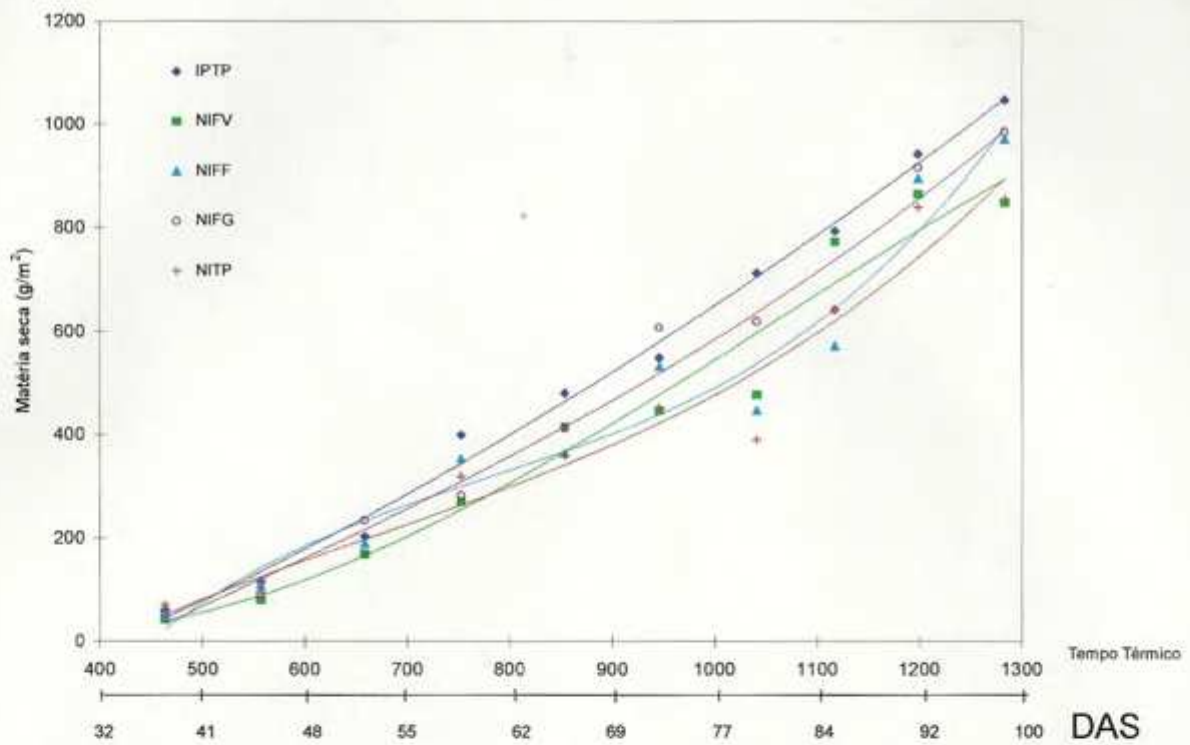


Figura 19 - Evolução da matéria seca total, em função do tempo térmico.

Quadro 6 - Equações da matéria seca acumulada para os diferentes tratamentos, em função do tempo térmico

| Tratamentos | Equações | R ² |
|-------------------|--|----------------|
| IPTP ¹ | MS = -6E-08(TT) ³ + 0,0005(TT) ² - 0,4816(TT) + 280,87 | 0,994 |
| NIFV ² | MS = -8E-07(TT) ³ + 0,0026(TT) ² - 1,5226(TT) + 262,9 | 0,963 |
| NIFF ³ | MS = 3E-06(TT) ³ + 0,0064(TT) ² + 5,6324(TT) - 1486,7 | 0,954 |
| NIFG ⁴ | MS = -4E-07(TT) ³ + 0,0005(TT) ² - 1,1512(TT) - 427,57 | 0,988 |
| NITP ⁵ | MS = 1E-06(TT) ³ + 0,0022(TT) ² - 2,18449(TT) + 592,58 | 0,951 |

Nota: os coeficientes de regressão (b1, b2 e b3) são significativos a 5%, pelo teste F.

- ¹ irrigado por todo o período.
- ² não-irrigado na fase vegetativa.
- ³ não-irrigado no período de florescimento.
- ⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.
- ⁵ não-irrigado por todo o período.

(IPTP, NIFF e NIFG) e o grupo dos não-irrigados (NITP e NIFV).

Durante o período de florescimento, foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, diferenciando-se três grupos: o NITP, o IPTP e o grupo que inclui NIFF, NIFV e NIFG. Após os 81 DAE, não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos.

Durante todo o ciclo, o tratamento NITP apresentou um acúmulo de matéria seca muito inferior ao dos outros tratamentos. Estes resultados mostram tendências concordantes com outros trabalhos (MARTINS, 1984; MUCHOW et al., 1986).

A partição de matéria seca não apresentou diferença significativa em nenhuma das partes da cultura estudada. Observou-se que os tratamentos não-irrigados na fase vegetativa (NITP e NIFV) apresentaram tendência de alocar mais fotoassimilados para as folhas, em relação aos outros tratamentos analisados (IPTP, NIFF e NIFG), os quais apresentaram tendência à maior alocação para o caule.

Na fase de florescimento, no tratamento NIFV, observou-se maior partição para as folhas, no sentido de recompor o aparelho fotossintético. O NITP continuou apresentando alta translocação de fotoassimilados para as folhas, porém houve destacada partição no sentido de maior emissão de flores em relação aos outros, seguido pelo NIFF e NIFV. Quanto maior o estresse, maior foi a tendência de alocação de fotoassimilados para a estrutura reprodutiva.

No período fenológico de enchimento de grãos, conforme o esperado, a partição ficou toda direcionada para os grãos, em detrimento do restante da planta (para maiores detalhes da partição de assimilados, ver PEREIRA, 1997).

A produtividade final de grãos foi de 3,30, 3,51, 2,66, 3,12 e 2,07 t/ha, para os tratamentos IPTP, NIFV, NIFF, NIFG e NITP, respectivamente. A produtividade de grãos seguiu, rigorosamente, a partição final para os grãos (índice de colheita), que atingiu os valores 31, 33, 24, 28 e 26%, para os tratamentos IPTP, NIFV, NIFF, NIFG e NITP, respectivamente. Estes resultados evidenciam que o estresse hídrico afetou a partição final de grãos,

sendo benéfico a essa característica, quando ocorreu na fase vegetativa, e prejudicial quando ocorreu no período de florescimento.

Os valores calculados de taxa absoluta de crescimento (G ; $g.m^2.d^{-1}$), taxa de crescimento relativo (R ; $g.g^{-1}.d^{-1}$) e taxa de assimilação líquida (E ($g.m^{-2}$ (área foliar). d^{-1}) e a razão de área foliar (F ; m^2 (área foliar). g^{-1} (total da cultura)) estão apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 - Taxa de crescimento absoluto (G ; $g.m^2.d^{-1}$), taxa de crescimento relativo (R ; $g.g^{-1}.d^{-1}$), taxa de assimilação líquida (E ($g.m^{-2}$ (área foliar). d^{-1}) e razão de área foliar (F ; m^2 (área foliar). g^{-1} (total da cultura)) nos diferentes períodos fenológicas, nos diferentes tratamentos

| Períodos | | IPTP ¹ | NIFV ² | NIFF ³ | NIFG ⁴ | NITP ⁵ |
|---------------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Vegetativo | E | 7,076 | 5,102 | 6,290 | 7,535 | 5,099 |
| | F | 0,012 | 0,012 | 0,015 | 0,014 | 0,012 |
| | G | 10,140 | 8,970 | 9,840 | 12,930 | 7,120 |
| | R | 0,100 | 0,062 | 0,094 | 0,104 | 0,063 |
| Florescimento | E | 2,042 | 3,567 | 2,637 | 2,363 | 3,069 |
| | F | 0,011 | 0,010 | 0,011 | 0,010 | 0,008 |
| | G | 16,440 | 13,260 | 16,320 | 17,750 | 9,980 |
| | R | 0,023 | 0,036 | 0,029 | 0,055 | 0,025 |
| Enchimento de grãos | E | 1,681 | 7,747 | 5,605 | 1,384 | 8,880 |
| | F | 0,003 | 0,002 | 0,004 | 0,003 | 0,002 |
| | G | 4,980 | 10,590 | 10,150 | 2,220 | 6,130 |
| | R | 0,018 | 0,018 | 0,022 | 0,003 | 0,016 |

² não-irrigado na fase vegetativa.

³ não-irrigado no período de florescimento.

⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.

⁵ não-irrigado por todo o período.

E = taxa de assimilação líquida.

F = razão de área foliar.

G = taxa de crescimento absoluto.

R = taxa de crescimento relativo.

Na fase vegetativa, a E dos tratamentos não-irrigados diminuiu 28% e o F aumentou somente 1,5%, em relação ao IPTP, ou seja, o estresse hídrico reduziu o componente fisiológico, embora não tenha afetado os componentes morfológicos.

Por outro lado, nos períodos de florescimento e enchimento de grãos, os tratamentos não-irrigados apresentaram tendência a maiores valores de E que os tratamentos irrigados. Ao mesmo tempo, não se observou diferença entre os valores de F entre os tratamentos irrigados e não-irrigados, para esses períodos.

É interessante observar que o tratamento no qual a imposição de estresse hídrico ocorreu no período vegetativo (NIFV) apresentou os valores de E e F, nos períodos seguintes (quando estava sob irrigação), bem próximos aos valores apresentados pelo tratamento não-irrigado (NITP).

A G apresentou valores máximos, para todos os tratamentos, no período de florescimento, ou seja, na fase de crescimento linear. Observa-se que todos os tratamentos apresentaram queda na G, no período de enchimento de grãos, e que esta queda foi mais acentuada nos tratamentos mais irrigados. Estes resultados estão coerentes com aqueles obtidos em outras investigações. SHIBLES et al. (1975) encontraram valores da G de $13 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ para valores de IAF entre 4,5 e 5,5. MARTINS (1984) obteve valores variáveis, segundo o tratamento hídrico, entre 4,5 e $13,1 \text{ g.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$. DANUSO et al. (1987) obtiveram uma G de $17 \text{ g. m}^{-2}.\text{d}^{-1}$.

Ao contrário, os valores de R foram maiores na fase vegetativa, de crescimento exponencial, decrescendo em todos os tratamentos ao longo do ciclo da cultura. Os valores de R, na fase vegetativa, concordam com relatados por DE JUAN VALERO et al. (1993), que encontraram valores entre 0,06 e $1,10 \text{ g.g}^{-1}.\text{d}^{-1}$. CLAWSON et al. (1986) obtiveram valores que oscilavam, segundo as variedades de soja, entre 0,8 e $0,100 \text{ g.g}^{-1}.\text{d}^{-1}$ na fase vegetativa.

Nos tratamentos submetidos ao estresse hídrico, nos períodos vegetativo e de florescimento (NITP, NIFV e NIFF), observa-se um aumento da E no período de enchimento de grãos, em relação ao de florescimento, o que poderia ser consequência da redução no IAF por causa da perda das folhas ou por causa de uma resposta do sistema fotossintético, somada ao aumento da demanda de assimilados, produzida pelo rápido crescimento dos grãos (KOLLER et al., 1970; SHIBLES et al., 1975; DANUSO et al., 1987).

5.6. Conclusões

Ao tratamento NITP, corresponderam os mais baixos valores de IAF, durante todo o ciclo da cultura. Observou-se redução de área foliar nos tratamentos que não eram irrigados durante o período vegetativo (NIFV e NITP), com uma forte redução na taxa de crescimento relativo durante esta fase.

Após o fechamento do dossel, no período de florescimento, os altos valores de IAF geraram inconsistências nas relações entre as variáveis ambientais e a taxa de crescimento das culturas, sustentadas pelo método tradicional de crescimento.

O tratamento NITP apresentou um atraso, em relação ao IPTP, para o fechamento do dossel.

A área foliar específica foi menor nos tratamentos estressados.

A duração da área foliar foi afetada pelos tratamentos, tendo sido menor no tratamento estressado por todo o período.

No período vegetativo, a taxa de assimilação líquida sofreu diminuição em relação à razão de área foliar, ou seja, o estresse reduziu os componentes fisiológicos, embora os componentes morfológicos não tenham sido afetados. Ao contrário, na fase reprodutiva, tanto no período de florescimento como de enchimento de grãos, a razão de área foliar foi mais alta nos tratamentos não-irrigados, ou seja, os componentes fisiológicos não foram afetados pelos tratamentos.

A emergência de novas folhas não foi afetada pelos tratamentos de estresse, enquanto as taxas de expansão foliar o foram, embora tendo sido os maiores efeitos encontrados no tratamento NITP.

A produção de matéria seca total foi menor nos tratamentos estressados.

O desenvolvimento da cultura não foi afetado pelo estresse.

Os tratamentos NIFF e NIFG não apresentaram diferenças em relação ao IPTP, para a maioria das características avaliadas.

6. CAPTURA E UTILIZAÇÃO DA LUZ

6.1. Introdução

Os altos valores de IAF podem gerar inconsistências no estabelecimento de relações entre as variáveis ambientais e a taxa de crescimento das culturas (RUSSELL et al., 1989; GOUDRIAN e MONTEITH, 1990). O método da radiação constitui uma alternativa para descrever o crescimento das culturas, com base no pressuposto de que o crescimento é um processo de transformação de energia radiante em energia química, pelo dossel (MONTEITH, 1969, 1977; GALLAGER e BISCOE, 1978; HAY e WALKER, 1989; COSTA et al., 1996). Nos últimos tempos, as variações que ocorrem na habilidade das culturas em interceptar e utilizar a radiação durante seu crescimento vêm merecendo grande atenção da comunidade científica (MONTEITH, 1994b). Tais estudos visam a compreensão do efeito do clima sobre os componentes morfológicos e fisiológicos, que determinam o crescimento das culturas (COSTA et al., 1997).

Neste capítulo, serão analisadas, por meio do método da radiação, as modificações que ocorrem nos mecanismos de captura e utilização da radiação da cultura da soja, sob estresse hídrico, nas diferentes fases fenológicas.

6.2. Radiação solar interceptada

A variação sazonal da fração de radiação interceptada pelos distintos tratamentos é apresentada na Figura 20. Foram encontradas diferenças significativas, em nível de 5%, a partir dos 33 DAE, quando os tratamentos não-irrigados (IPTP e NIFV) apresentaram os mais baixos valores de interceptação, na fase vegetativa. Os tratamentos irrigados apresentaram, no final da fase vegetativa, uma interceptação de aproximadamente 95 % da radiação incidente.

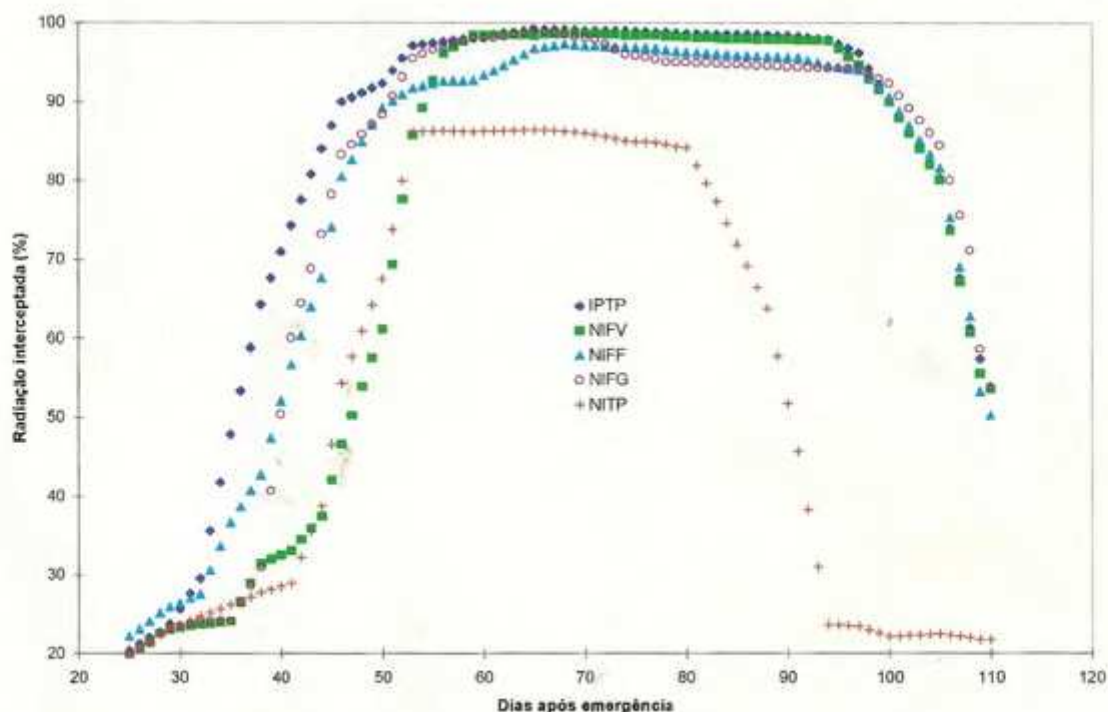


Figura 20 - Variação sazonal da radiação interceptada para os diferentes tratamentos.

A partir do período de florescimento, o NITP apresentou uma interceptação da ordem de 80%, enquanto todos os tratamentos, inclusive o NIFV, alcançaram valores de interceptação em torno de 95 %.

O estresse hídrico afetou a interceptação de radiação em virtude de seu efeito sobre o IAF e sobre a duração da área foliar (BOYER, 1970; TAKAMI et al., 1982).

No Quadro 8, estão apresentados os valores da radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MJ.m^{-2}) para cada tratamento, em cada período fenológico.

Quadro 8 - Radiação fotossinteticamente ativa interceptada (MJ.m^{-2}) nos distintos períodos fenológicos

| Períodos | Tratamentos | | | | |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | IPTP ¹ | NIFV ² | NIFF ³ | NIFG ⁴ | NITP ⁵ |
| Vegetativo | 127,42 | 74,82 | 105,86 | 135,55 | 72,98 |
| Florescimento | 202,83 | 170,13 | 189,11 | 200,55 | 141,49 |
| Enchimento de grãos | 280,62 | 299,26 | 258,01 | 199,19 | 142,81 |
| Ciclo completo | 610,87 | 544,21 | 552,98 | 535,29 | 357,28 |

¹ irrigado por todo o período.

² não-irrigado na fase vegetativa.

³ não-irrigado no período de florescimento.

⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.

⁵ não-irrigado por todo o período.

Os resultados evidenciam que os tratamentos não-irrigados na fase vegetativa interceptaram cerca de 45% de radiação a menos que os irrigados. Na fase de florescimento, o tratamento NITP diminuiu em 33% a capacidade de interceptar radiação, em relação ao IPTP. O tratamento NIFF, que nesta fase deixou de ser irrigado, sofreu uma perda de apenas 12,58 MJ.m^{-2} , ou seja, 6% a menos que o tratamento IPTP. Estes resultados mostram a influência do estresse acumulado na fase vegetativa sobre o tratamento NITP. Na fase de enchimento de grãos, o NITP interceptou 49% a menos que o IPTP, ou seja, 137,81 MJ.m^{-2} menos. O tratamento NIFG, que neste período estava sob estresse, diminuiu em 29% a interceptação, em relação aos irrigados. Esta perda de radiação, produzida pelo fechamento lento do dossel, nos tratamentos não-irrigados, provocou diminuição da produtividade, que no tratamento NITP foi evidente. O tratamento NIFV, embora tenha apresentado perda na capacidade de interceptar radiação, compensou essa perda com um

aumento na eficiência de utilização, conseguindo recuperar o sistema fotossintético, o que permitiu o aumento da produção de matéria seca.

Nos períodos vegetativo e de florescimento, o IPTP apresentou maior interceptação de radiação que os demais tratamentos. O NITP reduziu muito os valores de radiação interceptada, em todas as fases.

A relação entre IAF e radiação interceptada, para os distintos tratamentos, é apresentada na Figura 21.

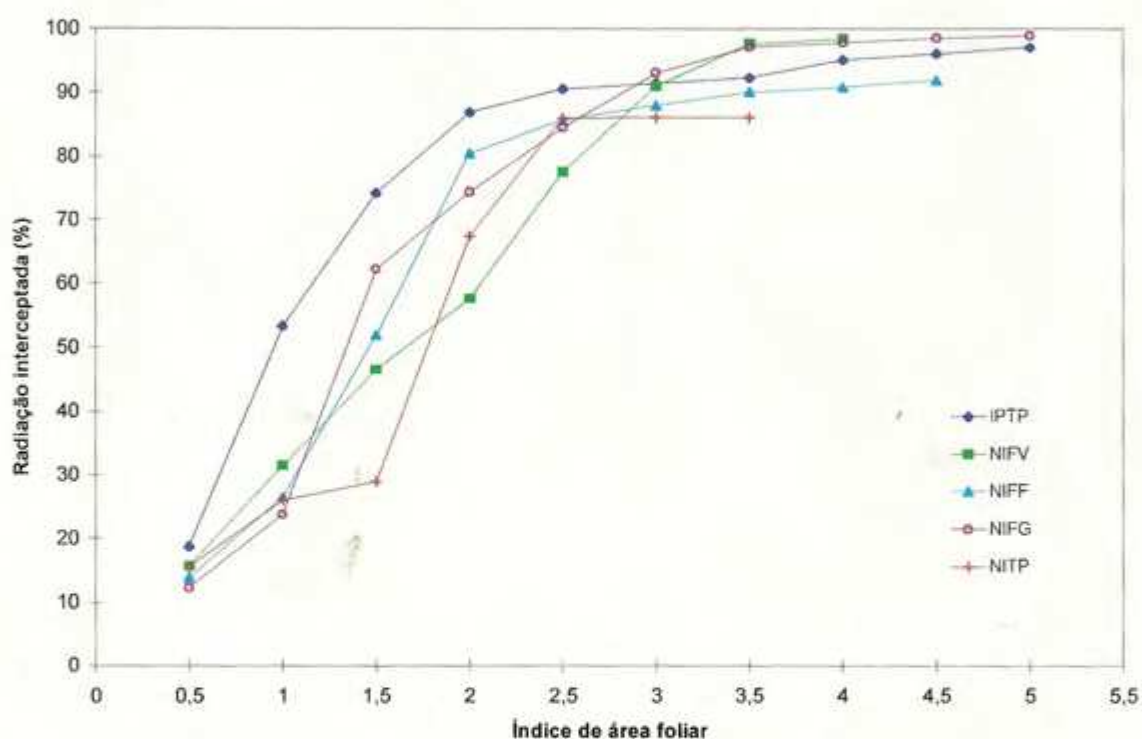


Figura 21 - Relação entre índice de área foliar (IAF) e radiação interceptada (%), para os diferentes tratamentos.

O tratamento IPTP conseguiu interceptar cerca de 90 % da radiação incidente, com um IAF de 2,4, que foi alcançado aos 47 DAE. Observa-se que a percentagem de interceptação aumentou com o aumento de IAF até um valor crítico de 3,4, sendo este valor inferior ao IAF crítico de 4,0 e ao de 4,4 mencionado por SHIBLES e WEBER (1966), geralmente atingido no final da fase vegetativa. O subsequente aumento do IAF, em virtude somente da expansão foliar, desde que se trata de uma variedade de crescimento

determinado, provocou uma interceptação de 99% da radiação incidente, com um IAF máximo de 5,5, que foi atingido aos 60 DAE, na fase de florescimento.

Nos tratamentos NIFF e NIFG, que foram irrigados na fase vegetativa, os IAF críticos de 4,8 e 3,7, respectivamente, foram alcançados aos 63 e 54 DAE. O tratamento NIFF necessitou de maior número de dias e maiores valores de IAF para interceptar cerca de 95 % da radiação incidente, o que pode ser um indicativo de estresse hídrico sofrido pelas plantas, nesse tratamento.

O tratamento NIFV, que no final da fase vegetativa interceptava somente 86% da radiação incidente, conseguiu atingir cerca de 97% de interceptação, com um IAF de 3,2 aos 57 DAE, logo após sua irrigação ser iniciada. Tal crescimento evidencia a resposta da cultura à irrigação.

O tratamento NITP conseguiu interceptar apenas cerca de 85% da radiação incidente, com um IAF máximo a 3,5, aos 56 DAE.

Pode-se observar o efeito do estresse hídrico, que produziu um atraso considerável, em dias, na interceptação de 95 % da radiação incidente. O tratamento NITP não conseguiu alcançar o IAF crítico.

6.3. Coeficiente de extinção da luz (k)

É importante conhecer não somente a quantidade de radiação interceptada pelo dossel, mas também a distribuição da radiação em suas diversas camadas.

Os valores de k, encontrados para as distintas variedades de soja, variaram entre 0,45 e 0,96 (AZAM-ALI et al., 1994)

Não foram encontradas diferenças significativas entre os valores de k, nas diferentes camadas do dossel (Quadro 9), como também durante os diferentes períodos da cultura (Quadro 10). No entanto, observa-se que os tratamentos não-irrigados durante a fase vegetativa apresentaram valores de k mais baixos que os demais. Da mesma forma, os valores de k, para todos os tratamentos, tenderam a apresentar valores mais baixos, durante a fase de florescimento, e aumento durante o período de enchimento de grãos.

Quadro 9 - Valores de k para as diferentes camadas do dossel e para o dossel completo, nos diferentes tratamentos

| Tratamentos | k das Camadas do Dossel | | | |
|-------------------|-------------------------|-------|----------|-----------------|
| | Inferior | Média | Superior | Dossel Completo |
| IPTP ¹ | 0,76 | 0,79 | 0,99 | 0,85 |
| NIFV ² | 0,62 | 0,63 | 0,90 | 0,72 |
| NIFF ³ | 0,70 | 0,73 | 0,99 | 0,81 |
| NIFG ⁴ | 0,81 | 0,85 | 0,91 | 0,86 |
| NITP ⁵ | 0,68 | 0,70 | 0,88 | 0,75 |

¹ irrigado por todo o período.

² não-irrigado na fase vegetativa.

³ não-irrigado no período de florescimento.

⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.

⁵ não-irrigado por todo o período.

Quadro 10 - Valores de k para os períodos vegetativo, de florescimento e de enchimento de grãos e para o ciclo completo

| Tratamentos | k dos Períodos | | | |
|-------------------|----------------|---------------|---------------------|----------------|
| | Vegetativo | Florescimento | Enchimento de Grãos | Ciclo Completo |
| IPTP ¹ | 0,80 | 0,75 | 0,90 | 0,82 |
| NIFV ² | 0,65 | 0,69 | 0,78 | 0,71 |
| NIFF ³ | 0,78 | 0,64 | 0,99 | 0,80 |
| NIFG ⁴ | 0,79 | 0,74 | 0,83 | 0,79 |
| NITP ⁵ | 0,64 | 0,56 | 0,75 | 0,65 |

¹ irrigado por todo o período.

² não-irrigado na fase vegetativa.

³ não-irrigado no período de florescimento.

⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.

⁵ não-irrigado por todo o período.

6.4. Eficiência de uso da radiação (EUR)

Os resultados de EUR são apresentados no Quadro 11.

Os valores de EUR, encontrados neste experimento, variaram de 1,73 até 2,87 g.MJ⁻¹, dependendo do estágio de desenvolvimento e do tratamento hídrico. Para o tratamento irrigado, o valor de EUR médio foi 1,74 g.MJ⁻¹, encontrando-se dentro da faixa de valores relatados na literatura. O valor de EUR médio, para soja, determinado por WARREN (1971), foi 1,3 g.MJ⁻¹, enquanto outros autores encontraram valores de EUR que variavam entre 0,9 e 2,67 g.MJ⁻¹ (NAKASEKO e GOTOH, 1983; MUCHOW et al., 1993), em culturas sem estresse hídrico. Os valores mais baixos, entre 0,72 e 0,60 g.MJ⁻¹, foram encontrados por WEBER (1966) e MUCHOW (1985), respectivamente, e foram atribuídos ao baixo teor de nitrogênio nas folhas (SINCLAIR, 1986). É ainda importante destacar que esses valores foram calculados para limitadas colheitas de biomassa, ou para medidas de interceptação calculadas como função do IAF e do coeficiente de extinção, ou seja, sem medidas diretas (MUCHOW et al., 1991).

Os resultados evidenciam que a EUR permaneceu praticamente constante nas diferentes fases fenológicas da cultura, crescendo em condições hídricas não-limitantes. Resultados similares foram encontrados por MONTEITH e ELSTON (1983) e MUCHOW et al. (1993). Segundo estes autores, em condições hídricas e nutricionais não-limitantes e de ausência de doenças, a EUR não apresenta variações ao longo do ciclo da cultura. Também, não foram encontradas, pelo teste de identidade de modelos, diferenças entre as fases dos tratamentos NIFF e NIFG. Somente os tratamentos NITP e NIFV mostraram diferenças entre as fases, não obstante apresentassem tendência a maiores valores de EUR, quando estressados.

Na fase vegetativa, os tratamentos que estavam sob estresse hídrico (NIFV e NITP) diferenciaram-se dos demais. No período de florescimento, somente o NITP diferenciou-se dos demais tratamentos, enquanto no período de enchimento de grãos não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos, ao passo que o tratamento NIFG apresentou aumento na EUR.

Quadro 11 - Eficiência de uso da radiação (EUR, g.MJ⁻¹) e quantidade de matéria seca acumulada (MS;g.m⁻²) para todos os tratamentos, em cada período fenológico

| Tratamento | Período | Matéria Seca (g m ⁻²) | EUR (g MJ ⁻¹) |
|-------------------|---------------------|------------------------------------|---------------------------|
| IPTP ¹ | Vegetativo | 202,97 | 1,73 |
| | Florescimento | 345,12 | 1,76 |
| | Enchimento de grãos | 402,28 | 1,73 |
| NIFV ² | Vegetativo | 166,79 | 2,86 |
| | Florescimento | 278,49 | 1,76 |
| | Enchimento de grãos | 611,89 | 1,68 |
| NIFF ³ | Vegetativo | 188,37 | 1,74 |
| | Florescimento | 342,65 | 1,86 |
| | Enchimento de grãos | 614,88 | 1,75 |
| NIFG ⁴ | Vegetativo | 233,31 | 1,78 |
| | Florescimento | 372,65 | 1,80 |
| | Enchimento de grãos | 326,79 | 1,85 |
| NITP ⁵ | Vegetativo | 167,38 | 2,87 |
| | Florescimento | 283,49 | 2,04 |
| | Enchimento de grãos | 407,17 | 1,90 |

¹ irrigado por todo o período.

² não-irrigado na fase vegetativa.

³ não-irrigado no período de florescimento.

⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.

⁵ não-irrigado por todo o período.

É importante ressaltar ainda que, na fase vegetativa, a EUR foi 40% maior nos tratamentos não-irrigados (NITP e NIFV) (Quadro 11), ao passo que a capacidade de captura da radiação diminuiu na mesma percentagem (Quadro 8).

Os resultados evidenciaram que, quando exposta ao estresse hídrico durante a fase vegetativa, a soja tende a maximizar a eficiência de utilização da radiação e a cultura consegue compensar a perda do poder de captura (menor área) por meio de um aumento na utilização. Para as outras fases, a compensação é parcial, provavelmente pela diferença no custo de produção dos diferentes componentes da matéria seca (lipídeos e proteínas) da fase reprodutiva e, assim, a cultura não consegue compensar a perda do poder de captura, observando-se uma diminuição da EUR em relação à fase vegetativa.

6.5. Radiação fotossinteticamente ativa (RFA) absorvida pelo dossel

Na análise da relação entre luz e produtividade, a quantidade de radiação absorvida pelo dossel é mais importante que a quantidade de radiação interceptada pelo dossel. No Quadro 12, estão apresentados os valores de RFA absorvida, ou seja, considerando a reflexão e a transmissão em cada fase fenológica.

Quadro 12 - Radiação fotossinteticamente ativa absorvida (MJ.m^{-2}) em distintos períodos

| Períodos | Tratamentos | | | | |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | IPTP ¹ | NIFV ² | NIFF ³ | NIFG ⁴ | NITP ⁵ |
| Vegetativo | 123,23 | 70,86 | 102,89 | 97,55 | 68,68 |
| Florescimento | 193,94 | 172,13 | 181,51 | 191,56 | 159,45 |
| Enchimento de grãos | 279,3 | 358,77 | 346,81 | 250,89 | 143,18 |

¹ irrigado por todo o período.

² não-irrigado na fase vegetativa.

³ não-irrigado no período de florescimento.

⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.

⁵ não-irrigado por todo o período.

Pode-se observar que, conforme esperado, os resultados seguem a mesma tendência apresentada no Quadro 8.

A eficiência de utilização da radiação como energia foi obtida ao considerar a taxa de crescimento absoluto (TCA) em cada período, a radiação absorvida e um valor calorífico médio da energia que contém os diferentes componentes da planta, em relação à sua composição bioquímica de $17,5 \text{ kJ.g}^{-1}$, para cada uma das fases.

Neste trabalho, o processo de produção de matéria seca é considerado um processo energético, ou seja, para cada quantidade de energia produzida é possível calcular a eficiência energética do sistema. Assim, um valor calorífico de $17,5 \text{ KJ.g}^{-1}$ foi considerado para a cultura da soja, sendo os resultados apresentados no Quadro 13.

Quadro 13 - Eficiência energética da cultura da soja (%)

| Períodos | Tratamentos | | | | |
|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | IPTP ¹ | NIFV ² | NIFF ³ | NIFG ⁴ | NITP ⁵ |
| Vegetativo | 7,77 | 11,96 | 9,04 | 12,52 | 9,88 |
| Florescimento | 2,81 | 2,56 | 2,99 | 3,10 | 2,17 |
| Enchimento de grãos | 1,28 | 2,12 | 2,10 | 0,63 | 3,16 |

¹ irrigado por todo o período.

² não-irrigado na fase vegetativa.

³ não-irrigado no período de florescimento.

⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.

⁵ não-irrigado por todo o período.

Em todos os tratamentos, as eficiências foram maiores na fase vegetativa, decrescendo na fase reprodutiva. A diminuição da eficiência da soja, nos períodos de florescimento e enchimento de grãos, tem sido relatada em outros trabalhos (VIETOR et al., 1977; THIAGARAJAH et al., 1981).

Os tratamentos não-irrigados tenderam a ser mais eficientes, durante todo o ciclo, que os tratamentos irrigados.

As variações na temperatura e no fluxo de radiação incidente, entre as fases de desenvolvimento, podem ter causado as diferenças na eficiência de conversão, pois a temperatura afeta a fotossíntese e a respiração do dossel (VIETOR e MUSGRAVE, 1979). Os cinco tratamentos examinados neste trabalho não variaram significativamente entre si, quanto à eficiência de conversão.

6.6. Efeito relativo do estresse hídrico sobre os termos da equação de rendimento

O rendimento em grãos de uma cultura (Y) pode ser expresso como o produto entre os seguintes termos: radiação interceptada (S. f), eficiência de conversão dessa radiação capturada em matéria seca (EUR) e índice de colheita (h), que expressa a porção de matéria seca de interesse econômico.

No Quadro 14, podem ser observados os diferentes termos da equação de rendimento, com o objetivo de visualizar os efeitos relativos do estresse hídrico.

Quadro 14 - Efeito do estresse hídrico sobre os termos da equação de rendimento

| Tratamentos | EUR ^a (g MJ ⁻¹) | Radiação Interceptada (Sf) | Índice de Colheita (h) |
|-------------------|--|----------------------------|------------------------|
| IPTP ¹ | 100 | 100 | 100 |
| NIFV ² | 117 | 89 | 106 |
| NIFF ³ | 103 | 91 | 77 |
| NIFG ⁴ | 104 | 88 | 90 |
| NITP ⁵ | 132 | 58 | 84 |

¹ irrigado por todo o período.

² não-irrigado na fase vegetativa.

³ não-irrigado no período de florescimento.

⁴ não-irrigado no período de enchimento de grãos.

⁵ não-irrigado por todo o período.

^a Eficiência de utilização de radiação.

Somente no tratamento NIFV o índice de colheita aumentou. Nos demais tratamentos houve aumento da EUR, o que correspondeu à diminuição na interceptação da radiação, embora em proporções diferentes.

6.7. Conclusões

No período vegetativo, o estresse hídrico provocou perda de radiação por causa do fechamento lento do dossel, tendo ocorrido, ainda, diminuição na produção de matéria seca dos tratamentos sob estresse. Este estresse intensificou-se ao longo do ciclo, no tratamento NITP. O tratamento NIFV compensou a perda de captura, na fase vegetativa, com um aumento na EUR, o qual, ao ser irrigado, conseguiu recuperar seu sistema fotossintético, alcançando os maiores valores de produtividade.

Nos períodos vegetativo e de florescimento, o IPTP apresentou maior interceptação de radiação que os outros tratamentos. O NITP reduziu muito os valores de radiação interceptada, em todas as fases.

Os valores de k não foram estatisticamente diferentes nos períodos fenológicos e nos distintos tratamentos, o que indica que não houve alteração na arquitetura do dossel em resposta ao estresse hídrico.

A eficiência de uso da radiação permaneceu relativamente constante nas diferentes fases fenológicas da cultura, em condições ótimas, embora diferenças notáveis tenham ocorrido nos tratamentos não-irrigados, durante a fase vegetativa.

O método da radiação evidenciou que, quando exposta a estresse hídrico, a soja tende a maximizar a EUR. Uma diminuição do poder de captura é compensada por um aumento na utilização. Na fase reprodutiva, a compensação não acontece, provavelmente por causa da alta exigência energética para a formação de proteína e óleo, principais constituintes dos grãos.

Os resultados encontrados na fase vegetativa contradizem aqueles encontrados ao utilizar o método clássico (4.5.). Estudos são necessários a fim de ampliar os conhecimentos sobre a taxa assimilatória líquida e a eficiência de utilização da radiação com valores crescentes de índice de área foliar.

7. RESUMO E CONCLUSÕES

A cultura da soja [*Glycine max* (L.) Merrill], variedade Capinópolis, quando submetida a estresse hídrico, apresenta variações na eficiência de utilização da radiação, tendendo a aumentar essa eficiência.

Na fase vegetativa, o estresse hídrico provocou diminuições na área foliar, o que influenciou os valores de índice de área foliar da fase reprodutiva. O estresse, nessa fase, também afetou o acúmulo de matéria seca total.

O estresse hídrico afetou a quantidade de radiação capturada pela cultura, a taxa de expansão foliar e a duração de área foliar.

A variedade estudada apresentou grande capacidade de recuperação dos mecanismos de captura de radiação, quando irrigada após estresse da fase vegetativa. A cultura compensou a perda do poder de captura com um aumento na eficiência de utilização, nessa fase.

Os tratamentos estressados na fase reprodutiva (NIFF e NIFG) não apresentaram grande perda do poder de captura.

A eficiência de utilização da radiação permite prever as conseqüências da seca sobre o rendimento, como também quantificar os efeitos do déficit hídrico e avaliar o crescimento e o rendimento potenciais da variedade Capinópolis.

Os resultados variáveis da eficiência de utilização da radiação permitem uma melhor compreensão das conseqüências da seca sobre o

rendimento das culturas. Este componente pode ser utilizado em modelagem de crescimento e rendimento da soja.

A eficiência de utilização da radiação é dependente de funções que descrevem os diferentes efeitos fisiológicos, por exemplo, da deficiência de água no solo. Portanto, a eficiência de utilização da radiação pode ser associada, diretamente, a algum índice de estresse hídrico, tornando-se um modelo potente para explicar a produtividade das culturas sob condições de estresse.

São necessários mais estudos que verifiquem o impacto do estresse hídrico sobre os componentes de captura e utilização da energia, para implementar modelos que estimem a produção de matéria seca a partir da radiação capturada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, A.R., VIANELLO, R.L., SEDIYAMA, G.C. Estimativa da radiação solar global diária a partir de dados de insolação, para Viçosa, Minas Gerais. **Rev. Exper.**, Viçosa-MG, v.10, p.211-222, 1981.
- AMIR, J., SINCLAIR, T.R. A model of the temperature and solar- radiation effects on spring wheat growth and yield. **Field Crop Res.**, Amsterdam, v.28 p.47-58, 1991.
- ANDRADE, F.H.,UHART, S.A., CIRILO, A. Temperature affect radiation use efficiency in maize. **Field Crops Res.**, Amsterdam, v.32, p.17-25, 1993.
- ANDREANI, J.M., ANDRADE, F.H., SUERO, C.H. et al. Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and its components, **Agronomie**, Paris, v.11, p.737-746, 1991.
- ÅNGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. **Q.J. Meteor.**, Quaterly Journal of the Royal Meteorological Society, London, v.50, p.121-126, 1924.
- ARKEBAUER, T.J., WEISS, A., SINCLAIR, T.R. et al. In defense of radiation use efficiency: a response to Demetriades-Shah, T.H., Fuchs, M., Kanemasu, E.T. and Flitcroft, I. **Agric. For. Meteorol.**, Amsterdam, v.68, p.221-227, 1992.
- AZAM-ALI, S.N., CROUT, N.M.J., BRADLEY, R.G. Perspectives in modeling resource capture by crops In: MONTEITH, J.L., SCOTT, R.K., UNSWORTH, M.H (Eds.) **Resource capture by crops**. Nottingham, Nottingham University Press, 1994, p.125-148.

- BAKER, D.N., MEYER, R.E., Influence of stand geometry on light interception and net photosynthesis in cotton, **Crop Sci.**, New York, v.6, p.15-19, 1966.
- BEADLE, C.L. Plant growth analysis. In: COOMBS, J., HALL, D.O, LONG, S.P. et al. (Eds.) **Techniques in bioproductivity and photosynthesis**, Oxford, s.n. p.20-25, 1985.
- BERLATO, M.A., BERGAMASCHI, H. Consumo de água da soja. In: REUNIÃO CONJUNTA DE PESQUISA DA SOJA RS/SC, 1977, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: IPAGRO, 1977. p.57-60.
- BERLATO, M.A., GONÇALVES, H.M. **Efeito da temperatura no desenvolvimento da soja *Glycine max* (L) Merr.**, 1978 (Mimeo.).
- BLACKMAN, V.H. The compound interest law and plant growth. **Ann.Bot.**, London, v.33, p.353-360, 1919.
- BOARD, J.E., HARVILLE, B.G. Soybean yield component responses to a light interception gradient during the reproductive period, **Crop Sci.**, New York, v.33, p.772-777, 1993.
- BOYER, J.S. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. **Plant Physiol**, Rockville, v.46, p.233-235, 1970.
- BRIGGS, G.E., KID, F., WEST, C. A quantitative analysis of plant growth. Part I. **Ann. Appl. Biol**, New York, v.7, p.103-123, 1920.
- BROUGHAM, R.W The relationship between the critical leaf area, total chlorophyll content, and maximum growth rate of some pasture and crop plants. **Annals of Botany**, London, v. 24, p. 463-473, 1956.
- BROWN, D.M. Soybean ecology. I. Development- temperature relationships from controlled environment studies. **Agr. J.**, Madison, v.52, p.493-496, 1960.
- CARTER, J.L., HARTWIG, E.E. The management of soybean. **Adv. Agr.**, New York, v.14, p.359-412, 1962.
- CLAWSON, K.L., SPEEHT, J.E., BLAD, B.L. Growth analysis of soybean isolines differing in pubesce density. **Agron J.**, Madison, v.78, p.164-172, 1886.

- CORLETT, J.E., ONG, C.K., BLACK, C.R. et al. Above and below ground interactions in a leucaena/millet alley cropping system. I. Experimental design, instrumentation and diurnal trends. **Agric. and Forest Met.**, Amsterdam, v.60, p.53-72, 1992.
- COSTA, L.C., MORISON, J., DENNETT, M. Effects of the weather on growth and radiation intercepted by faba bean, **Pesq. Agrop. Bras.**, Brasília, v.32, p.277-281, 1997.
- COSTA, L.C., MORRISON, J., DENNETT, M. Carbon balance of growing faba bean and its effect on crop growth: experimental and modelling approaches. **Rev. Bras. Agromet.**, Santa Maria, v.4, p.11-17, 1996.
- COSTA, L.M. **Caracterização das propriedades físicas e químicas dos solos de terraços pluviais na região de Viçosa e sua interpretação para uso agrícola.** Viçosa-MG: UFV, 1973. 55p. Dissertação (Mestrado em Solos) - Universidade Federal de Viçosa, 1973.
- COX, W.J., JOLIFF, G.D. Crop-water relations of sunflower and soybean under irrigated and dryland conditions. **Crop Sci.**, New York, v.27, p.553-557, 1987.
- DANUSO, F., DELLE VEDOVE, G., GELLEN, M. Stratificazione e riduzioni dell'apparato fogliare in relazione all'accrescimento di soia, mais e girasole. **Riv. di Agron.**, Roma, v.21, p.179-190, 1987.
- DAUGHTRY, C.S.T, HOLLINGER, S.E. Costs of measuring leaf area index of corn. **Agron J.**, Madison, v.76, p.836-841, 1984.
- DAUGHTRY, C.S.T., GALLO, K.P. , GOWARD, S.N. et al. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. **Remote Sens. Environ.**, New York, v.39, p.141-152, 1992.
- DAVIES, W.J., MANSFIELD, T.A., HETHERINGTON, A.M., Sensing of soil water status and the regulation of plant growth and development. **Plant, Cell Environment.**, Oxford, v.13, p.709-719, 1990.
- DE JUAN VALERO J.A., MARTIN DE SANTA OLALLA F.J., FABEIRO CORTES C. Análisis de crecimiento en soja (Glycine max (L.) Merrill) sometida a diferentes tratamientos hídricos. **ITEA**, Buenos Aires, v.89, p.145-165, 1993.
- DEMETRIADES-SHAH, T.H., FUCHS, M., KANEMASU, E.T. et al. A note of caution concerning the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. **Agric. Forest. Meteorol.**, Amsterdam, v.58, p.193-207, 1992.

- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. **Necesidad de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 1977. 194 p. (Serie riego y Drenaje).
- EGLI, D.B. Alterations in plant growth and dry matter distribution in soybean, **Agron. J.**, Madison, v.80, p.86-90, 1988.
- EVANS, G.C. **The quantitative analysis of plant growth**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1972. 456p.
- FEHR, W.R., CAVINESS, C.E. **Stages of soybean development**, Ames: Iowa Agric. Exp. Station, 1977. 80 p. (Spec. Rep.).
- GALLAGER, J.N., BISCOE, P.V. Radiation absorption, growth and yield of cereals. **J. Agric. Sci.**, New Delhi, v.91, p.47-60, 1978.
- GALLO, K.P., DAUGHTRY, C.S.T.; WIEGAND, C.L. Errors in measuring absorbed radiation and computing crop radiation use efficiency. **Agron. J.**, Madison, v.85, p.1222-1228, 1993.
- GAZZONI, D.L., MINOR, H.C. Efeito de três níveis de desfolhamento em quatro estádios de desenvolvimento sobre a produção e qualidade do grão de duas variedades de soja. In: REUNIÃO CONJUNTA DE PESQUISA DE SOJA, 51, 1974, Porto Alegre. **Anais...**, Porto Alegre: Cortez, 1974. p.35-37.
- GOUDRIAN, J. Potential production process. In: PENIN DE VRIES, F.W.T., VAN LAAR, H.H. (Eds.) **Simulation plant growth and crop productions**. Pudoc, wageningen, 1982. p.98-113 (Simulation Monographs).
- GOUDRIAN, J.; MONTEITH, J.L. A mathematical function for crop growth based on and leaf area expansion. **Annals of Botany**, London, v.66, p.695-701, 1990.
- GRAYBILL, F.A. **Theory and application of the linear model**. Belmont: Duxbury Press, 1976. 704 p.
- GREEN, C.F. Nitrogen nutrition and wheat growth in relation to absorbed radiation. **Agric. and Forest Meteo.**, Amsterdam, v.41, p.207-248, 1987.
- GREENWOOD, D.J., CLEAVER, T.J., LOQUENS, S.H.H. et al. Relationship between plant weight and growing period for vegetable crops in the United Kingdom. **Annals of Botany**, London, v.41, p.987-997, 1977.
- GREGORY, F.G. The effect of climatic conditions on the growth of barley. **Annals of Botany**, London, v.40, p.1-26, 1926.

- HAY, R.K., WALKER, A.J. **An introduction to the physiology of crop yield**, London: Longman Scientific & Technical, 1989, 465p.
- HEW, G.S., KROTKOV, G., CANVIN, D.T. Effects of temperature on photosynthesis and CO₂ evolution in light and darkness of green leaves. **Plant. Physiol**, Rockville, v.44, p.671-677, 1969.
- HOWELL, R.W. Physiology of the soybean. **Advances Agron.**, New York, v.12, p.265-310, 1960.
- HSIAO, T.C. Plant responses to water stress. **Ann. Rev. Plant Physiol.**, New York, v.24, p.519-570, 1973.
- HUNT, R. **Plant growth curves**. The functional approach to plant growth analysis. New York: Edward Arnold, 1982, 248p.
- JENSEN, M.E. (Ed.) **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineer, 1973, 215p.
- JONES, C.A, KINIRY, J.R. **CERES-Maize**: a simulation model of maize growth and development. Texas: Texas A&M University Press, College Station, TX, 1986. 82p.
- KOLLER, H.R., NYQUIST, W.E., CHORUSH, I.S. Growth analysis of the soybean canopy. **Crop Sci.**, New York, v.10, p.407-412, 1970.
- KRAMER, P.J. **Water relations of plants**. New York: Academic Press, 1983. 489p.
- MANN, J.D., JAWORSKI, E.G. Comparison of stresses which may limit soybean yields. **Crop Sci.**, New York, v.10, p.620-624, 1970.
- MARTINS, S.R. **Respuestas fisiológicas y agronómicas de la soja (*Glycine max* (L) Merrill) al déficit hídrico. El agua como función de producción**. Madrid: MAPA-INIA, 1984. 72p.
- MELGES, E., LOPES N.F., OLIVA, M.A. influência do sombreamento artificial nas condições microclimáticas na cultura da soja. **Pesq. Agrop. Bras.**, Brasília, v.24, p.857-863, 1989.
- MONSI, M., SAEKI, T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Japan. **J. Bot.**, London, v.14, p.22-52, 1953.

- MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philos. Trans. R. Soc.*, London, v.281, p.227-294, 1977.
- MONTEITH, J.L. Light interception and radiative exchange in crop stands. In: EASTIN, J.D., HASKINS, F.A., SULLIVAN, C.Y, VAN BAVEL C.H. (Eds.) **Physiological aspects of crop yield**. Madison: American Society of Agronomy, 1969. p.89-111.
- MONTEITH, J.L. Principles of resource capture by crop stands. In: MONTEITH, J.L., SCOTT, R.K., UNSWORTH, M.H.(Eds.) **Resource capture by crops**. Nottingham: Nottingham University Press, 1994a. p.1-15.
- MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. off Appl., Ecology*, London, v.9, p.747-766, 1972 .
- MONTEITH, J.L. **Using tube solarimeters to measure radiation intercepted by crop canopies and to analyse stand growth**. Cambridge: DELTA-T DEVICES, 1993. 11p.
- MONTEITH, J.L. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agric. For. Meteorol.*, Amsterdam, v.68, p.220- 231, 1994b.
- MONTEITH, J.L., ELSTON, J. Performance and productivity in the field. In: DALE, J.E., MILTHORPE, F.L. (Eds.) **The growth and functioning of leaves**. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. p.499-518.
- MONTEITH, J.L., UNSWORTH. **Principles of environmental physics**. 2.ed. London: Edward Arnold, 1990. 245p.
- MUCHOW, R.C. An analysis of the effects of water deficits on grain legumes grown in a semi-arid tropical environment in terms of radiation interception and its efficiency of use. *Field Crops Res*, Amsterdam, v.11, p.309-323, 1985.
- MUCHOW, R.C. Effect of water and nitrogen supply on radiation interception and biomass accumulation of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) in a semi-arid tropical environments. *Field Crops Res.*, Amsterdam, v.28, p.281-293, 1988.
- MUCHOW, R.C., SINCLAIR, T.R., BENNET, J.M. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. *Agron. J.*, Madison, v.82, p.338-343, 1991.

- MUCHOW, R.C., SINCLAIR, T.R., BENNETT, J.M. et al. Response of leaf growth, leaf nitrogen, and stomatal conductance to water deficits during vegetative growth of field-grown soybean, **Crop Sci.**, New York, v.26, p.1190-1195, 1986.
- MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J., PENGELLY, B.C. Radiation-use efficiency of soybean, mungbean and cowpea under different environmental conditions. **Field Crops Res.**, Amsterdam, v.32, p.1- 6, 1993.
- NAKASEKO, N., GOTOH, K. Comparative studies on dry matter production, plant type and productivity in soybean, azuki bean, and kidney bean. **Jpa. J. Crop Sci.**, Tokyo, v.52, p.49-58, 1983.
- NICHIPROVICH, A.A. Properties of plant crops as an optical system. **Soviet Plant Physiology**, Moscow, v.8, p.428-435, 1962.
- PASCALÉ, A.J. Tipos agroclimáticos para el cultivo de soja en la Argentina. **Rev. Fac. Agron. Vet.**, Buenos Aires, v.17, p.31-48, 1969.
- PASCALÉ, A.J., ESCALES, A., REMUSSI, C. et al. Reacción de distintas variedades de soja a los factores bioclimáticos de Buenos Aires. **Rev. de la Fac. de Agron y Vet.**, Buenos Aires, v.15, p.29-54, 1963.
- PEREIRA, R.C. **Crescimento e desenvolvimento da cultura da soja [Glycine max (L.) Merrill], sob deficiência hídrica.** Viçosa-MG: UFV, 1998. 97p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1977.
- PRESCOTT, J.A. Evaporation from water surface in relation to solar radiation. **Trans. R. Soc. Aust.**, Adelaide, v.46, p.114-118, 1940.
- PRINCE, S.D. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. **Int. J. Remote Sens.**, London, v.12, p.1313-1330, 1991.
- ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L., VERMA, S.B. **Microclimate: the biological environment.** New York: John Wiley & Sons, 1983. 495p.
- ROSENTHAL, W.D., GERIK, T.J. Radiation use among cotton cultivars. **Agron. J.**, Madison, v.83, p.655-658, 1991.
- RUSSEL, G., JARVIS, P.G., MONTEITH, J.L. Absorption by canopies and stand growth. In: RUSSEL, G., MARSCHALL, B., JARVIS, P.G. (Eds.) **Plant canopies: their growth, form and function.** Cambridge: Cambridge University Press, 1989. p.21-39.

- SAEKI, T. Interrelationships between leaf amount, light distribution, and total photosynthesis in a plant community. **The Bot. Mag.**, London, v.73, p.55-63, 1960.
- SAS INSTITUTE. **SAS/STAT user's guide**: Release 6.03. ed. SAS Ins., New York: Cary, 1996. 55p.
- SCOTT H.D., BATCHELOR J.T. Dry weight and leaf area production rates of irrigated determinate soybeans. **Agron. J.**, Madison, v.71, p.776-782, 1979.
- SCOTT, R.K., WILCOCKSON, S.J. Application of physiological and agronomic principles to the development of the potato industry. In: HARRIS, P.M. (Ed.) **The potato crop.**, London: Chapman and Hall, 1978. p.678-704
- SEDIYAMA, T., GOMES, J.L.L., TEIXEIRA, R.C. et al. '**Capinópolis**' (UFV-16) **Comportamento em Minas Gerais**. Viçosa-MG: UFV, 1995. 6p.(Folder).
- SHIBLES R.M. **Soybean** In: EVANS, L.T. (Ed.) **Crop Physiology**. London: Cambridge University Press, 1975. p.151-189.
- SHIBLES, R.M., ANDERSON, I.C., GIBSON, A.H. Soybean. In: EVANS L.T. (Ed.) **Crop physiology**. London: Cambridge University Press, 1975. p.151-190.
- SHIBLES, R.M., WEBER, C.R. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. **Crop Science**, New York, v.5, p.53-56, 1966.
- SHIBLES, R.M., WEBER, C.R. Leaf area, solar radiation interception, and dry matter production by various soybean planting patterns. **Crop Science**, New York, v.6, p.55-59, 1965.
- SIBMA, L. Growth of closed green crop surfaces in the Netherlands. **Neth. J. of Agric. Sci.**, Amsterdam, v.16, p.211-216, 1968.
- SINCLAIR, T.R. Canopy carbon assimilation and crop radiation-use efficiency Dependence on leaf nitrogen content. In: BOOTE, K.J., LOOMIS, R.S. (Eds.) **Modeling crop photosynthesis from biochemistry to canopy**. New York: Crop Sci. Society of America. 1991. p.95-107. (CSSA Special Publication n.19).
- SINCLAIR, T.R. Soybean yield in Argentina in response to weather variation among cropping seasons. **Field Crops Res.**, Amsterdam, v.30, p.1-11, 1992.

- SINCLAIR, T.R. Water and nitrogen limitations in soybean grain production. I. Model development. **Field Crop Res.**, Amsterdam, v.15, p.125-141, 1986.
- SINCLAIR, T.R., HORIE, T. Crop physiology & metabolism. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Sci.**, New York, v.29, p.90-98, 1989.
- SINCLAIR, T.R., SHIRAIWA, T., HAMMER, G.L., Variation in crop radiation use efficiency in response to increased proportion of diffuse radiation. **Crop Sci.**, New York, v.32, p.281-284, 1992.
- SINCLAIR, T.R., SHIRAIWA, T. Soybean radiation use efficiency as influenced by non-uniform specific leaf nitrogen distribution and diffuse radiation. **Crop Sci.**, New York, v.34, p.234-237, 1993.
- SIONIT, N., KRAMER, P.J. Effect of water stress during different stages of growth of soybean. **Agron. J.**, Madison, v.69, p.274-278, 1977.
- SLATYER, R.O. **Plant- water relationship**. London: Academic Press, 1967, 366p.
- SLAVIK, B. **Methods of studying plant water relations**. Prague: Academy Publishing Company, 1991. 565p.
- SPAETH, S.C., SINCLAIR, T.R., OHNUMA, J.C. et al. Temperature, radiation and duration dependence of high soybean yields: Measurements and simulation. **Field Crop Res.**, Amsterdam, v.16, p.297-307, 1987.
- SQUIRE, G.R., MARSHALL, B., TERRY, A.C. et al. Response to temperature in a stand of pearl millet. VI. Light interception and drymatter production. **J. Exp. Bot.**, Wellesbourne, v.35, p.599-610, 1984.
- STEINER, J. Dryland sorghum water use, light interception and growth responses to planting geometry. **Agron. J.**, Madison, v.78, p.720-726, 1986.
- SZEICZ, G., MONTEITH, J., SANTOS, J. Tube solarimeter to measure radiation among plants. **J. Appl. Ecol.**, New Jersey, v.1, p.169-174, 1964.
- TAKAMI, S., TURNER, N.C., RAWSON H.M., Leaf expansion of four sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivars in relation to water deficit. II. Diurnal patterns during stress and recovery. **Plant and Cell environment**, Amsterdam, v.4, p.399-407, 1982.
- TETENS, O. Über einige meteorologische Begriffe. **Z. Geophys.**, New York, v.6, p.297-309, 1930.

- THIAGARAJAH, M.R., HUNT, L.A., MAHON, J.D. Effects of position and age of leaf photosynthesis. **Can. J. Bot.**, Leipzig, v.59 p.28-33, 1981.
- TOLLENAAR, M., BRUULSEMA, T.S. Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf area expansion. **Agron. J.**, Madison, v.80, p.580-585, 1988.
- TRAPANI, N., HALL, A.J., SADRAS V.O. et al. Ontogenetic changes in radiation use efficiency of sunflower (*Helianthus annuus L.*) crops. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.29, p.301-336, 1992.
- TURNER N.C. Stomatal behavior and water status of maize, sorghum and tobacco under field conditions: II. At low soil water potential. **Plant Physiol.**, Rockville, v.53, p.360-365, 1974.
- TURNER, N.C., SCHULZE, E., COLLAN, T. The responses of stomata and leaf gas exchange to vapor pressure deficits and soil water content. II. In the mesophytic herbaceous species, *Heliantus annus*. **Oecologia**, Berlin, v.65, p.348-355, 1985.
- UNSWORTH, M.H. LESSER, V.M., SADRAS, V.O, et al. Radiation interception and the growth of soybeans exposed to ozone in open-top field chambers. **J. Applied Ecology**, Peterborough, v.21, p.1059-1079, 1984.
- VARLET-GRANCHER, C.R., BONHOMME, M., CHARTIER, M., et al. Efficiencie de la conversion de l'energie solaire par un couvert végétal. **Acta Oecol. Plant.**, Paris, v.3, p.3-26, 1982.
- VIANELLO, R.L., ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações** Viçosa-MG: UFV, 1991. 449p.
- VIETOR, D.M., ARIYANAYAGAM, R.P. , MUSGRAVE, R.B. Photosynthetic selection of *Zea mays L.* I. Plant age and leaf position. **Crop Sci.**, New York, v.17, p.567-573, 1977.
- VIETOR, D.M., MUSGRAVE, R.B. Photosynthetic selection of *Zea mays L.* II. Relationship between CO₂ exchange and dry matter accumulation. **Crop Sci**, New York, v.19, p.70-75, 1979.
- WAGGONER, P.E., BERGER, R.D. Defoliation, disease and growth. **Phytopathology**, St. Paul, v.77, p.393-398, 1987.
- WARREN, J.W. Inclined point quadrats. **New Phytol.**, Cambridge, v.59, p.1-8, 1960.

- WARREN, J.W. **Maximum yield potential**. In: Transition from extensive or intensive agriculture with fertilizers. In: COLLOQUIUM INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 7, 1971, Berne. **Proceedings...** Berne: IPI, 1971, p.105-115.
- WARREN, J.W. Ecological data on dry-matter production by plants and plant communities. In: BRADLEY, E.F., DENMEAD, O.T. (Eds.) **The collection and processing of field data**. New York: Interscience Publishers, 1967, p.77-123.
- WATSON, D.J. Comparative physiological studies on the growth of field crops I. Variation in net assimilation rate and leaf area. **Annals of Botany**, London, v.11, p.41-76, 1947.
- WEBER, C.R. Effects of defoliation and topping simulating hail injury to soybeans. **Agron. J.**, Madison, v.47, p.262-266, 1966.
- WHEELER, T.R., HADLEY, P., ELLIS, R.H. et al. Changes in row and radiation use by lettuce crops in relation to temperature and ontogeny. **Agric. For. Meteorol.**, Amsterdam, v.66, p.173-186, 1993.
- WHIGHAM, D.K., MINOR, H.C., CARMER, S.G. Effects of environment and management on soybean performance in the tropics. **Agron. J.**, Madison, v.70, p.587-592, 1978.
- WILLIAMS, W.A., LOOMIS, R.S., LEPLEY, C.R. Vegetative growth of corn as affected by population density. I. Productivity in relation to interception of solar radiation. **Crop Sci.**, New York, v.5, p.211-215, 1965.