

ESTIMATIVA DE CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO PELA UTILIZAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO-FISIOLÓGICO¹

GILMAR PEZZOPANE PLÁ² e NEI FERNANDES LOPES³

RESUMO - O modelo matemático-fisiológico desenvolvido por Miglioranza (1992) foi empregado para simular o crescimento e a produtividade da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Negrito 897) em regiões de Minas Gerais. Uma estimativa da produção líquida de matéria seca foi feita em bases diárias, ou seja, um balanço entre ganho (fotossíntese) e perda (respiração). As taxas fotossintéticas e respiratórias foram estimadas usando radiação solar global e temperaturas máxima, mínima e média diárias. O modelo mostrou ser adequado para simular o crescimento e produtividade. Em todas as regiões, o período intermediário entre o plantio das "águas" e o da "seca" parece ser o mais indicado para o cultivo, pois o modelo estimou um bom crescimento e uma alta produtividade do feijoeiro. Grande produção de biomassa e de sementes foi obtida por simulação nas condições de Sete Lagoas e Araxá. A relação entre as taxas de produção de matéria seca máxima e potencial variou entre 18 e 22%, em todas as épocas de plantio.

Termos par indexação: *Phaseolus vulgaris*, fotossíntese.

ESTIMATES OF GROWTH AND PRODUCTIVITY OF BEAN BY USING A MATHEMATICAL-PHYSIOLOGICAL MODEL

ABSTRACT - The mathematical-physiological model developed by Miglioranza (1992) was employed to simulate growth and productivity of bean (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Negrito 897) crop for several regions of Minas Gerais State. An estimate of net production of dry matter was made on daily basis, i.e., balance between gain (photosynthesis) and loss (respiration). Photosynthesis and respiration rates were estimate using daily global radiation and maximum, minimum, and mean temperatures. The model was shown to be adequate to simulate growth and productivity. For all regions, the intermediate periode between "rainy" and "dry" seasons was suggested as the most indicate for cultivation, since the model estimates good and high productivity of beans. Great productions of biomass and seeds were obtained by simulation of Sete Lagoas and Araxá conditions. Relationship between maximum and potential dry matter production rates varied from 18 to 22%, for all seasons.

Index terms: *Phaseolus vulgaris*, common bean, photosynthesis.

INTRODUÇÃO

Apesar da complexidade do meio, é possível expressar processos biológicos complexos em modelos matemáticos simplificadores, que mostram as inter-relações planta-meio.

Modelos matemáticos baseados nos processos fisiológicos que permitem a compreensão das causas das respostas das plantas ao meio têm sido desenvolvidos para as principais culturas, sendo denominados "matemático-fisiológicos" (Machado, 1981). Embora apresentem inúmeras vantagens, ainda são pouco utilizados para estimar o crescimento e a produtividade de plantas de interesse econômico no Brasil.

O crescimento de uma comunidade vegetal em dado intervalo de tempo é: $W_t = W_2 - W_1$, onde W_t representa o acúmulo de matéria seca de uma comunidade, a qual possuía uma massa W_1 , no tempo t_1 , e

¹ Aceito para publicação em 21 de janeiro de 1998.

² Eng. Agr., M.Sc., Universidade do Sul de Santa Catarina, Curso de Agronomia, Caixa Postal 241, CEP 88965-000 Santa Rosa do Sul, SC. E-mail: gpla@unisul.rct-sc.br

³ Eng. Agr., D.Sc., Dep. de Botânica, Universidade Federal de Pelotas, Caixa Postal 354, CEP 96010-900 Capão do Leão, RS.

em condições favoráveis cresceu e passou a ter uma massa W_2 , no tempo t_2 .

O crescimento também pode ser estimado pelo balanço entre o ganho, na fotossíntese bruta diária (P_{bd}) e a perda na respiração total (R_t), isto é $W_t = P_{bd} - R_t$. Para o cálculo da taxa de fotossíntese bruta diária (P_{bd}) em $g(W_t).m^{-2}.dia^{-1}$, foi usada a seguinte equação:

$P_{bd} = P_{bmd}.W_f.f(I).f(L).f(IF).f(M).f(T).f(DH)$, sendo P_{bmd} a produção fotossintética bruta máxima diária em $g(W_t).m^{-2}.dia^{-1}$; W_f a matéria seca das folhas em $g(W_t).m^{-2}$; $f(I)$ o fator de ajustamento para a densidade de fluxo de radiação solar global; $f(L)$ o fator de ajustamento de índice de área foliar; $f(IF)$ o fator de ajustamento da idade da folha; $f(M)$ o fator de ajustamento da idade da planta; $f(T)$ o fator de ajustamento da temperatura do ar; e $f(DH)$ o fator de ajustamento da disponibilidade hídrica, utilizando-se os fatores determinados por Miglioranza (1992).

Considerando-se as perdas, representadas pela respiração de crescimento e de manutenção, tem-se a seguinte equação desenvolvida por Thornley (1970, 1976): $R_t = (1 - Y_G)P_b + M_R Y_G W_T$, em que R_t corresponde à respiração total, em $g(W_t).m^{-2}.dia^{-1}$; Y_G a eficiência de conversão de crescimento, em $g(W_t).g^{-1}$ de W_t de substrato; P_b , a produção fotossintética bruta, em $g(W_t).m^{-2}.dia^{-1}$; M_R , o coeficiente de manutenção, em $g.g^{-1}.dia^{-1}$; e W_t , o acúmulo de matéria seca de uma comunidade de plantas, em $g.m^{-2}$. Novamente os coeficientes utilizados foram obtidos por Miglioranza (1992).

O presente trabalho objetivou estimar o crescimento e a produtividade da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), em diferentes regiões de Minas Gerais, utilizando-se radiação solar global e temperaturas máxima, mínima e média, por meio do modelo matemático-fisiológico desenvolvido para o feijoeiro cv. Negrito 897, por Miglioranza (1992).

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo matemático-fisiológico para simular o crescimento do feijoeiro cv. Negrito 897, desenvolvido por Miglioranza (1992) foi testado com dados de campo obtidos por Brandes et al. (1972) com população de 250 mil plantas/ha de feijão cv. Rico 23.

Foram utilizados dados meteorológicos médios diários de um período de dez anos (normais), de temperatura máxima, média e mínima e de radiação solar global. Os dados de radiação solar global diária foram obtidos a partir dos dados de insolação, utilizando-se a equação de Angstrom (1924), citada por Alves et al. (1981): $I/I_0 = a + b.n/N$, onde I representa a radiação solar global diária sobre a superfície horizontal do solo; I_0 , a radiação solar global no "topo da atmosfera"; n , a duração do brilho solar observado, em horas; N , a duração astronômica do período diurno, em horas; a e b , coeficientes empíricos, obtidos por análise de regressão linear para determinada localidade.

As localidades estudadas foram Lavras, Viçosa, Uberaba, Araxá, Capinópolis, Sete Lagoas, Governador Valadares e Montes Claros, respectivamente situadas nas regiões Sul, Mata, Triângulo e Alto Paranaíba, Metalúrgica, Rio Doce e Alto São Francisco. Cabe salientar que a região do Triângulo e Alto Paranaíba contempla as cidades de Uberaba, Araxá e Capinópolis. As condições de disponibilidade hídrica e de nutrientes no solo foram consideradas ótimas para o desenvolvimento da cultura do feijoeiro. O crescimento e a produtividade foram estimados para as seguintes épocas de cultivo: 1) época das "águas", de 15 de outubro (plantio) a 5 de janeiro (colheita); 2) época intermediária à das "águas" e da "seca", de 1ª de janeiro (plantio) a 20 de março (colheita); 3) época da "seca", de 15 de fevereiro (plantio) a 5 de maio (colheita).

Aos dados de matéria seca total (W_t) foi ajustada equação logística de crescimento (Richards, 1969), utilizando-se um programa interativo para minimizar a variância residual. A equação usada foi $W_t = W_m/(1+A.e^{-Bt})$, sendo W_t , a produção de matéria seca total, em $g.m^{-2}$; W_m , a estimativa assintótica de crescimento máximo; t , os dias de crescimento; A e B , constantes de ajustamento; e e a base de logaritmos naturais, respectivamente. Aos dados obtidos nas localidades representativas das regiões de Minas Gerais estudadas, dentro de cada época de cultivo, foram ajustadas curvas logísticas de crescimento. A taxa de produção de matéria seca máxima (C_{tm}) foi estimada empregando-se as derivadas das equações ajustadas ao peso de matéria seca (W_t) em relação ao tempo (Radford, 1967; Richards, 1969). As taxas de produção potencial de matéria seca (C_p) foram determinadas utilizando-se a seguinte equação: $C_p = 0,06.R_g/\delta$, em que R_g é radiação solar global média diária, em $cal.cm^{-2}.dia^{-1}$; δ , o valor calorífico da planta de feijão ($\delta = 3,8 kcal.g^{-1}$ de matéria seca), segundo determinação realizada por Pflanz (1964), citados por Kvet et al. (1971); e o 0,06, a eficiência potencial de conversão de energia solar ($\xi = 6\%$ ou 0,06).

Também foram determinados os valores instantâneos da eficiência de conversão de energia solar (ξ), por meio da seguinte equação: $\xi\% = (100.C_t.d)/(R_g)$ na qual R_g representa o valor médio diário de radiação solar incidente no topo do dossel do feijoeiro, registrado nos cinco últimos dias anteriores ao C_{tm} correspondente. O valor calorífico (d) foi de 3,8 $kcal.g^{-1}$ de matéria seca.

Para determinar a produção de sementes (W_s) foi empregada a equação desenvolvida por Almeida et al. (1988b): $W_s = -0,2288 + 0,3961W_t$, em que W_s e W_t são as matérias secas de sementes e total (acumulada da emergência à colheita), respectivamente em $g.m^{-2}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Validade do modelo

O modelo matemático-fisiológico para simular o acúmulo de matéria seca (W_t), desenvolvido por Miglioranza (1992) para a cultura do feijoeiro, cultivar Negrito 897, mostrou-se consistente quanto à simulação do crescimento de plantas da cultivar Rico 23 (Fig. 1).

A discrepância entre as curvas de W_t ajustadas para os valores experimentais e simulados no modelo de Miglioranza (1992), foi, possivelmente, em virtude da comparação entre diferentes cultivares de feijão.

Condições meteorológicas

A radiação solar global acumulada, durante os ciclos de cultivos das "águas" e a intermediária, foi crescente em direção ao norte de Minas Gerais, ou seja, com a diminuição da latitude, (Tabela 1). A radi-

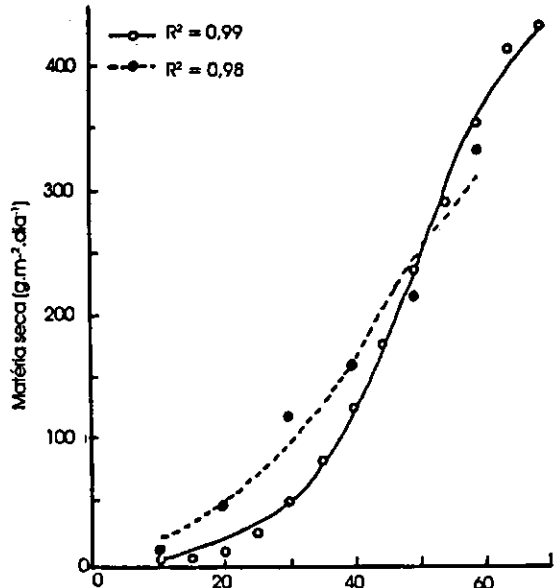


FIG. 1. Matéria seca acumulada no feijoeiro, cujos dados foram estimados pelo modelo de Miglioranza (1992) (o). Curva de simulação ajustada (—) para cv. Negrito 897 e valores experimentais (•) obtidos por Brandes et al. (1972) e curva ajustada a valores reais (---) para cv. Rico 23.

TABELA 1. Radiação solar global acumulada ($cal.cm^{-2}$) e médias das temperaturas máxima, mínima e média ($^{\circ}C$) nas épocas de cultivo das "águas" (15/10 a 05/01); intermediária (01/01 a 20/03); e da "seca" (15/02 a 05/05), em diversos locais do Estado de Minas Gerais.

| Local | | Épocas de cultivo | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------------------|-------------------|------|------|------|---------------|------|------|------|---------------|------|------|------|
| | | 15/10 - 05/01 | | | | 01/01 - 20/03 | | | | 15/02 - 05/05 | | | |
| | | Rad. | Tmáx | Tmín | Tméd | Rad. | Tmáx | Tmín | Tméd | Rad. | Tmáx | Tmín | Tméd |
| Lavras | (21°14'S 45°00'W) | 29202 | 27 | 17 | 22 | 30996 | 28 | 17 | 22 | 29383 | 27 | 17 | 21 |
| Viçosa | (20°45'S 42°52'W) | 29028 | 27 | 18 | 22 | 31104 | 29 | 18 | 22 | 28080 | 27 | 17 | 21 |
| Uberaba | (19°45'S 47°55'W) | 32800 | 30 | 19 | 24 | 31760 | 30 | 19 | 25 | 30959 | 30 | 18 | 24 |
| Araxá | (19°35'S 46°56'W) | 31248 | 27 | 16 | 21 | 32636 | 28 | 17 | 22 | 29760 | 27 | 16 | 22 |
| Sete Lagoas | (19°27'S 44°15'W) | 31360 | 29 | 18 | 23 | 35690 | 30 | 18 | 24 | 31440 | 29 | 17 | 23 |
| Gov. Valadares | (18°51'S 41°56'W) | 28160 | 30 | 20 | 25 | 32724 | 33 | 21 | 27 | 28512 | 31 | 20 | 26 |
| Capinópolis | (18°41'S 49°34'W) | 31680 | 30 | 20 | 25 | 32841 | 30 | 20 | 24 | 30160 | 30 | 20 | 25 |
| Montes Claros | (16°42'S 43°51'W) | 29680 | 30 | 19 | 24 | 33129 | 31 | 19 | 25 | 30560 | 30 | 19 | 24 |

ação global acumulada de localidades como Viçosa e Lavras, situadas mais ao sul do Estado, foi inferior à esperada, em comparação com a de Montes Claros, situada ao norte, provavelmente em virtude da maior nebulosidade em Viçosa e Lavras. Sete Lagoas apresentou maior radiação acumulada, nessas épocas de cultivo, possivelmente em razão da baixa nebulosidade.

As localidades que apresentaram menores níveis de radiação, como Lavras, Viçosa e Governador Valadares, situam-se em terrenos montanhosos, recebendo menor número de horas de luz diariamente (Resende, 1986).

Na época da "seca", a radiação solar global acumulada cresceu do sul para o norte de Minas Gerais. Governador Valadares apresentou radiação solar global acumulada considerada baixa para a região onde está localizada, provavelmente em decorrência da alta nebulosidade nessa época do ano (Tabela 1).

A época intermediária, por ser o pleno verão, foi a que apresentou maiores valores de radiação solar acumulada.

As médias de radiação solar diária, a partir da qual se chegou à radiação solar acumulada, são condizentes com a demonstrada nos mapas de caracterização climática do Estado de Minas Gerais (Antunes, 1986).

Nas três épocas de cultivo, as temperaturas máxima, mínima e média apresentaram tendência geral de aumentar do sul para o norte (Tabela 1).

Acúmulo de matéria seca

Os valores máximos teóricos de matéria seca total (W_t) variaram de 344 a 416 na época das "águas"; de 395 a 456 na época intermediária; e de 304 a 425 g.m⁻² na época da "seca" (Tabela 2). Esses valores teóricos de W_t estão na faixa dos obtidos por Resende et al. (1981) e Miglioranza (1992), mas superiores ao máximo de 300 g.m⁻², encontrados por Araújo et al. (1987) e Stone et al. (1988).

Em todas as épocas, os maiores valores teóricos de W_t foram obtidos em Lavras, Viçosa, Araxá e Sete Lagoas, não ocorrendo praticamente diferenças entre essas localidades, seguidas por Montes Claros, Uberaba, Capinópolis e Governador Valadares (Tabela 2). Os maiores valores de W_t ocorreram provavelmente em virtude de uma associação adequada nos níveis de radiação solar e temperatura do ar (Tabela 2), com conseqüente aumento de W_t . Por sua vez, o acúmulo de W_t , simulado para as plantas de feijoeiro crescidas em Uberaba, Capinópolis, Montes Claros e Governador Valadares, foi menor do que o das outras localidades, mesmo com maior nível de

TABELA 2. Produção teórica de matéria seca total (W_t) (g.m⁻²) e matéria seca de sementes (W_s) (kg.ha⁻¹), nas épocas de cultivo das "águas" (15/10 a 05/01); intermediária (01/01 a 20/03); e da "seca" (15/02 a 05/05), em diversos locais do Estado de Minas Gerais.

| Local | | Épocas de cultivo | | | | | |
|----------------|-------------------|-------------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|
| | | 15/10 - 05/01 | | 01/01 - 20/03 | | 15/02 - 05/05 | |
| | | W_t | W_s | W_t | W_s | W_t | W_s |
| Lavras | (21°14'S 45°00'W) | 416 | 1647 | 449 | 1777 | 417 | 1649 |
| Viçosa | (20°45'S 42°52'W) | 413 | 1633 | 450 | 1779 | 414 | 1637 |
| Uberaba | (19°45'S 47°55'W) | 404 | 1596 | 402 | 1591 | 381 | 1506 |
| Araxá | (19°35'S 46°56'W) | 415 | 1642 | 452 | 1789 | 425 | 1681 |
| Sete Lagoas | (19°27'S 44°15'W) | 413 | 1635 | 456 | 1805 | 424 | 1678 |
| Gov. Valadares | (18°51'S 41°56'W) | 344 | 1361 | 395 | 1562 | 340 | 1345 |
| Capinópolis | (18°41'S 49°34'W) | 390 | 1544 | 408 | 1612 | 371 | 1467 |
| Montes Claros | (16°42'S 43°51'W) | 372 | 1471 | 424 | 1678 | 397 | 1570 |

radiação solar, porém comprometidas por temperaturas noturnas elevadas. Normalmente, altas temperaturas estimulam a taxa respiratória, reduzindo, conseqüentemente, o acúmulo de matéria seca (Lopes et al. 1983).

Enquanto a radiação solar elevada promove o crescimento vegetativo e aumenta a produção do feijoeiro, sob baixas densidades do fluxo radiante o crescimento e a produção são reprimidas drasticamente (Heisey & Milner, 1965; Magalhães & Montojos, 1971; Almeida et al., 1988a).

Acúmulo de matéria seca de sementes

Normalmente há correlação linear positiva entre a matéria seca total do feijoeiro (W_t) e a matéria seca de sementes de feijão (W_s), como encontrado por Almeida et al. (1988b).

Em todas as épocas de cultivo, as localidades de Lavras, Viçosa, Araxá e Sete Lagoas foram as que apresentaram os maiores valores de acúmulo teórico de matéria seca de sementes, seguidas de Montes Claros, Uberaba, Capinópolis e Governador Valadares (Tabela 2). A produção teórica de matéria seca de sementes foi diretamente influenciada pelo acúmulo estimado de matéria seca total, sendo o acúmulo de matéria seca função da radiação solar global e da temperatura. Os valores de matéria seca de sementes variaram entre 1.361 e 1.642 kg/ha na época das "águas"; de 1.562 a 1.805 kg/ha na época intermediária; e de 1.345 a 1.681 kg/ha na época da "seca".

Esses valores são condizentes com os obtidos por Chagas et al. (1983) e Vieira et al. (1983).

Sob menores níveis de luz, a produção de sementes é reduzida em razão da baixa taxa assimilatória líquida, o que ocasionaria menor produção de carboidratos e, conseqüentemente, menor número de vagens (Lopes et al., 1983).

Stobbe et al. (1966) verificaram que feijoeiros submetidos a temperaturas próximas a 35°C sofrem abortamento quase total de vagens. De acordo com Mack & Singh (1969), as altas temperaturas, ao estimularem a respiração, reduzem os teores de amido e açúcares, sendo possivelmente a causa do baixo pegamento e da baixa retenção de vagens. Além disso, temperaturas elevadas ocasionam sensível diminuição na capacidade de produção do feijoeiro, pois o excesso de calor não só diminui a percentagem de flores que vingam, como também faz decrescer o número de sementes por vagens.

Produção de matéria seca total

As taxas teóricas de produção de matéria seca máxima (C_{tm}), em todas as localidades, foram maiores na época de cultivo intermediária, seguida da época das "águas" e da "seca" (Tabela 3). Esse resultado estaria diretamente relacionado com os altos níveis de radiação solar ocorrido na época intermediária, sendo os valores de radiação solar global maiores, em relação ao plantio das "águas" e da "seca", em todas as localidades.

TABELA 3. Taxa teórica de produção de matéria seca potencial (C_{tp}), taxa de produção de matéria seca máxima (C_{tm}) ($g \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$) e relação C_{tm}/C_{tp} (%) em épocas de cultivo das "águas" (15/10 a 05/01); intermediária (01/01 a 20/03); e da "seca" (15/02 a 05/05), em diversos locais do Estado de Minas Gerais.

| Local | Épocas de cultivo | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------------------|----------|-----------------|---------------|----------|-----------------|---------------|----------|-----------------|
| | 15/10 - 05/01 | | | 01/01 - 20/03 | | | 15/02 - 05/05 | | |
| | C_{tp} | C_{tm} | C_{tm}/C_{tp} | C_{tp} | C_{tm} | C_{tm}/C_{tp} | C_{tp} | C_{tm} | C_{tm}/C_{tp} |
| Lavras (21°14'S 45°00'W) | 58 | 11,8 | 21 | 60 | 12,8 | 22 | 56 | 11,9 | 21 |
| Viçosa (20°45'S 42°52'W) | 56 | 11,8 | 21 | 61 | 12,9 | 21 | 55 | 11,7 | 22 |
| Uberaba (19°45'S 47°55'W) | 63 | 11,9 | 19 | 63 | 12,2 | 19 | 59 | 11,3 | 19 |
| Araxá (19°35'S 46°56'W) | 59 | 11,9 | 20 | 63 | 13,0 | 21 | 59 | 12,1 | 20 |
| Sete Lagoas (19°27'S 44°15'W) | 62 | 12,8 | 21 | 68 | 13,2 | 19 | 62 | 12,1 | 19 |
| Gov. Valadares (18°51'S 41°56'W) | 56 | 10,2 | 18 | 64 | 11,5 | 19 | 56 | 9,9 | 18 |
| Capinópolis (18°41'S 49°34'W) | 63 | 11,7 | 19 | 63 | 12,1 | 19 | 60 | 11,1 | 18 |
| Montes Claros (16°42'S 43°51'W) | 59 | 10,7 | 19 | 65 | 12,3 | 18 | 60 | 11,5 | 20 |

No cultivo das "águas", a C_{im} teórica máxima calculada variou de 10,2 a 12,8; na intermediária, de 11,5 a 13,2; e na época da "seca", de 9,9 a 12,1 $g.m^{-2}.dia^{-1}$ (Tabela 3).

Valores observados de C_{im} máximos encontrados, estimados para a cultura do feijoeiro foram de 10,0, obtidos em Goiânia (Stone et al., 1988); 13,9, em Sete Lagoas (Pazzetti et al., 1993); e 19,0 $g.m^{-2}.dia^{-1}$, em Viçosa (Brandes et al., 1973), com ocorrência entre 40 e 60 dias após a emergência, corroborando os resultados do presente trabalho.

Em todas as épocas de cultivo, os maiores valores de C_{im} foram verificados nas localidades de Lavras, Viçosa, Araxá e Sete Lagoas, embora na época das "águas" Uberaba também apresentou alto C_{im} . Depois, vieram as localidades de Montes Claros, Capinópolis e Governador Valadares, com menores valores de C_{im} (Tabela 3). Os valores de C_{im} obtidos em Viçosa, Lavras e Araxá poderiam estar associados a menores temperaturas, principalmente as noturnas, que reduzem a respiração, mas compensando a menor densidade de fluxo radiante, em localidades com menores níveis de radiação e de temperatura (Tabelas 1 e 3). Por outro lado, a alta taxa teórica de produção de matéria seca em Sete Lagoas está associada aos altos níveis de radiação solar, e consequentemente a altas taxas de fotossíntese, anulando a ação de altas temperaturas do ar presentes, que ocasionariam aumento na taxa respiratória total.

Em Uberaba, Capinópolis e Montes Claros, os menores valores de C_{im} provavelmente devem-se às altas temperaturas do ar, uma vez que os níveis de radiação solar são considerados adequados para uma boa taxa fotossintética.

Finalmente, o crescimento simulado do feijoeiro em Governador Valadares apresentou o menor C_{im} , nas três épocas de cultivo. Tal resultado estaria associado a altas temperaturas do ar e menores níveis de radiação solar, o que concorreria para sua redução (Tabelas 1 e 3).

Como as altas temperaturas tendem a aumentar a respiração e diminuir a fotossíntese líquida, a C_{im} , que é derivada de W_1 ($W_1 = P_b - R_1$), sofrerá redução com o efeito das altas temperatura. Segundo Penning de Vries & Van Laar (1982), a temperatura é o fator climático que mais influencia a taxa respiratória, afetando também a fotossíntese líquida.

As taxas teóricas de produção de matéria seca potencial (C_{tp}), as quais representam o máximo teórico de produção de matéria seca total que pode ocorrer numa localidade, variaram entre 56 e 63 na época das "águas"; 60 e 68 na época intermediária; e 55 e 62 $g.m^{-2}.dia^{-1}$ na época da "seca" (Tabela 3).

Em todas as localidades, os maiores valores de C_{tp} foram obtidos na época intermediária de cultivo, seguidos pelos da época das "águas" e da "seca", em consequência do nível de radiação solar incidente.

A relação entre as taxas teórica de produção de matéria seca máxima (C_{im}) e potencial (C_{tp}), representando a percentagem de aproveitamento do potencial máximo de produção de determinada localidade, variou de 18 a 21% na época da "águas"; de 18 a 22% nas épocas intermediária e da "seca" (Tabela 3). Portanto, o C_{im} esteve muito aquém da taxa potencial máxima de produção de matéria seca (C_{tp}) das localidades estudadas.

Eficiência de conversão de energia solar

A eficiência de conversão de energia solar (ξ) em todas as localidades foi maior na época da "seca", seguida das "águas" e intermediária, as quais foram inversamente proporcionais aos níveis de radiação solar global ocorridos nessas épocas de cultivo (Tabela 4), ou seja, quanto maior os níveis de radiação menor a eficiência de conversão de energia solar. Isso vai ao encontro do descrito por Loomis & Williams (1963); Lopes et al. (1986) e Almeida et al. (1988b), que afirmam que a conversão de energia solar aumenta com a diminuição da densidade de fluxo radiante. Os índices de conversão de energia solar foram ascendentes até em torno de 50 a 58 dias após a emergência (DAE), declinando logo após esse período (Fig. 2).

Coulson (1985) explica que o aumento da eficiência de conversão de energia solar possivelmente, ocorre em virtude do incremento na atividade dos drenos. Para Lopes et al. (1986), a queda da eficiência de conversão de energia solar ocorre pelo envelhecimento dos tecidos foliares, o que pode explicar o comportamento da conversão de energia solar nas diferentes épocas de plantio neste trabalho.

TABELA 4. Eficiência de conversão da energia solar (ξ) em % nas épocas de cultivo das "águas" (15/10 a 05/01); intermediária (01/01 a 20/03); e da "seca" (15/02 a 05/05), em diversos locais do Estado de Minas Gerais.

| Local | | Épocas de cultivo | | |
|----------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|
| | | 15/10 - 05/01 | 01/01 - 20/03 | 15/02 - 05/05 |
| | | ξ | ξ | ξ |
| Lavras | (21°14'S 45°00'W) | 1,28 | 1,15 | 1,30 |
| Viçosa | (20°45'S 42°52'W) | 1,33 | 1,19 | 1,38 |
| Uberaba | (19°45'S 47°55'W) | 1,21 | 1,08 | 1,23 |
| Araxá | (19°35'S 46°56'W) | 1,24 | 1,24 | 1,42 |
| Sete Lagoas | (19°27'S 44°15'W) | 1,22 | 1,15 | 1,27 |
| Gov. Valadares | (18°51'S 41°56'W) | 1,08 | 1,06 | 1,17 |
| Capinópolis | (18°41'S 49°34'W) | 1,15 | 1,03 | 1,15 |
| Montes Claros | (16°42'S 43°51'W) | 1,19 | 1,09 | 1,17 |

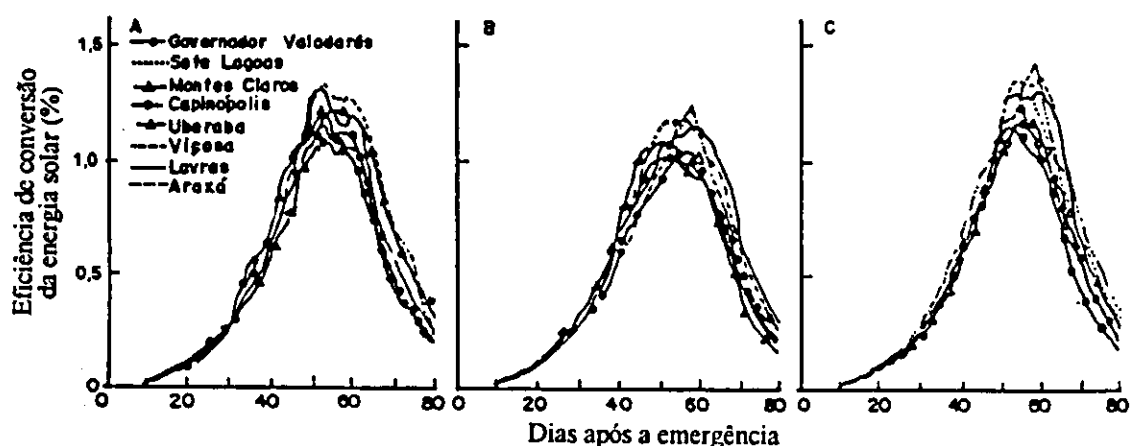


FIG. 2. Eficiência de conversão de energia solar da cultura do feijoeiro para as épocas de cultivo da "águas" (15/10 a 05/01) - A -; intermediária (01/01 a 20/03) - B -; e da "seca" (15/02 a 05/05) - C -, em diversos locais do Estado de Minas Gerais

A eficiência máxima de conversão de energia solar variou de 1,08 a 1,33 na época das "águas"; de 1,03 a 1,24 na época intermediária; e de 1,15 a 1,38 na época da "seca" (Tabela 4). Valores máximos de eficiência de conversão de energia solar em feijão situam-se entre 1,0 e 3,0, enquanto os valores médios variam entre 0,03 e 0,64% (Magalhães & Montojos, 1971; Brandes et al., 1972; Coulson, 1985; Lopes et al., 1986; Araújo et al., 1987; Almeida et al., 1988b).

Os maiores valores de eficiência de conversão de energia solar nas três épocas de cultivo foram verificados nas localidades de Lavras, Viçosa, Araxá e Sete Lagoas, vindo a seguir Uberaba, Governador Valadares e Montes Claros (Fig. 2 e Tabela 4). Os altos valores de conversão de energia solar no caso de Lavras e Viçosa estariam relacionados com menores níveis de radiação, enquanto em Araxá e Sete Lagoas os altos valores são consequência, possi-

velmente, das altas taxas de produção de matéria seca máxima [$\xi = (100 C_{tm} \delta) / (R_a)$].

CONCLUSÕES

1. O modelo matemático-fisiológico para simular o crescimento e a produtividade da cultura do feijoeiro, com base numa estimativa da produção líquida de matéria seca, mostra-se bastante consistente em todas as localidades nas três épocas de cultivo testadas.

2. A grande vantagem do emprego desse modelo é o pequeno número de variáveis utilizadas, ou seja, radiação solar global e temperaturas máxima, mínima e média diárias.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A.A.F. de; LOPES, N.F.; OLIVA, M.A.; BARROS, R.S. Desenvolvimento e partição de assimilados em *Phaseolus vulgaris* submetidos a três doses de nitrogênio e três níveis de luz. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.23, n.8, p.837-847, ago. 1988a.
- ALMEIDA, A.A.F. de; LOPES, N.F.; OLIVA, M.A.; BARROS, R.S. Doses de nitrogênio e densidade de luz no crescimento do feijoeiro e na conversão de energia solar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.23, n.8, p.849-859, ago. 1988b.
- 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. *Experientiae*, Viçosa, v.27, p.211-222, 1981.
- ANTUNES, F.Z. Caracterização climática do Estado de Minas Gerais. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.12, n.138, p.9-13, 1986.
- ARAÚJO, G.A.A.; FONTES, L.A.N.; LOPES, N.F.; GALVÃO, J.D.; SEDIYAMA, G.C. Crescimento e conversão de energia solar em sistemas de cultivo associados e exclusivos de milho e feijão. II. Feijão das "águas". *Revista Ceres*, Viçosa, v.34, p.42-63, 1987.
- BRANDES, D.; MAESTRI, M.; VIEIRA, C.; GOMES, F.R. Efeito da população de plantas e da época de plantio no crescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). II. Análise de crescimento. *Experientiae*, Viçosa, v.15, p.1-21, 1973.
- BRANDES, D.; VIEIRA, C.; MAESTRI, M.; GOMES, F.R. Efeitos da população de plantas e da época de plantio no crescimento morfológico e produção de matéria seca. *Experientiae*, Viçosa, v.24, p.1-49, 1972.
- CHAGAS, J.M.; VIERA, C.; BARTHOLO, G.F. Comportamento da cultura do feijão *Phaseolus vulgaris* L.) no outono/inverno em Minas Gerais. *Revista Ceres*, Viçosa, v.30, p.224-231, 1983.
- COULSON, C.L. Radiant energy conversion in three cultivars of *Phaseolus vulgaris* L. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.35, p.21-29, 1985.
- HEISEY, W.M.; MILNER, H.W. Physiology of ecological races and species. *Annual Review of Plant Physiology*, Palo Alto, v.16, p.203-216, 1965.
- KVET, J.; ONDOC, J.P.; NECAS, J.; JARVIS, P.G. Methods of growth analysis. In: SESTAK, Z.; CATSKY, J.; JARVIS, P.G. (Eds.). *Plant photosynthetic production: manual of methods*. The Hague: Dr. W. Junk N.W. Pub, 1971. p.343-391.
- LOOMIS, R.S.; WILLIAMS, W.A. Maximum crop productivity: an estimate. *Crop Science*, Madison, v.3, p.67-72, 1963.
- LOPES, N.F.; OLIVA, M.A.; CARDOSO, M.J.; GOMES, M.M.S.; SOUSA, V.F. Crescimento e conversão de energia solar em *Phaseolus vulgaris* L. submetidos a três densidades de fluxo radiante e dois regimes hídricos. *Revista Ceres*, Viçosa, v.33, p.142-64, 1986.
- LOPES, N.F.; OLIVA, M.A.; MELGES, E.; FURTADO, M.H.; FREITAS, J.G. Crescimento, morfologia, partição de assimilados e produção de matéria seca do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) submetidos a três níveis de densidade de fluxo radiante. *Revista Ceres*, Viçosa, v.30, p.451-462, 1983.
- MACHADO, E.C. Um modelo matemático-fisiológico para simular a acúmulo de matéria seca na cultura de cana-de-açúcar (*Sacharum* sp.). Campinas: Unicamp, 1981. 115p. Tese de Mestrado.
- MACK, H.J.; SINGH, J.N. Effects of light and temperature on yield and carbohydrate composition of snap beans. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v.94, p.60-62, 1969.

- MAGALHÃES, A.C.; MONTOJOS, J.C. Effect of solar radiation on the growth parameters and yield of two varieties of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Turrialba*, San José, v.21, p.165-168, 1971.
- MIGLIORANZA, E. Modelo matemático-fisiológico para simular o crescimento e a produtividade da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Viçosa: UFV, 1992. 184p. Tese de Doutorado.
- PAZZETTI, G.A.; OLIVA, M.A.; LOPES, N.F. Aplicação da termometria ao infravermelho na irrigação do feijoeiro: crescimento e produtividade. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.28, n.12, p.1371-1377, dez. 1993.
- RADFORD, P.J. Growth analysis formulae: their use and abuse. *Crop Science*, Madison, v.7, p.171-175, 1967.
- RESENDE, M. Clima do solo: suas relações com o ambiente agrícola. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.12, n.138, p.43-59, 1986.
- RESENDE, M.; HENDERSON, D.W.; FERERES, E. Frequência de irrigação, desenvolvimento e produção de feijão kidney. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.16, n.3, p.363-370, maio/jun. 1981.
- RICHARDS, F.J. The quantitative analysis of growth. In: STERWARDS, F.C. (Ed.). *Plant physiology: a treatise*. New York: Academic Press, 1969. v.1, p.3-76.
- STOBBE, E.H.; ORMROD, D.P.; WOOLEY, C.J. Blossing and fruit set patterns in *Phaseolus vulgaris* L. as influenced by temperature. *Canadian Journal of Botany*, Ottawa, v.44, p.813-819, 1966.
- STONE, L.F.; PORTES, T. de A.; MOREIRA, J.A.A. Efeitos da tensão de água do solo sobre a produtividade e crescimento do feijoeiro. II. Crescimento. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.23, n.5, p.503-510, maio 1988.
- THORNLEY, J.H.M. *Mathematical model in plant physiology: a quantitative approach to problems in plant crop physiology*. London: Academic Press, 1976. 318p.
- THORNLEY, J.H.M. Respiration, growth and maintenance in plants. *Nature*, London, v.227, p.304-305, 1970.
- VIEIRA, C.; SILVA, C.C.; CHAGAS, J.M.; ARAÚJO, G.A. de A. Comportamento de cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) na Zona da Mata de Minas Gerais - III. *Revista Ceres*, Viçosa, v.30, p.133-150, 1983.
- VRIES, F.W.T.P. de; VAN LAAR, H.H. *Simulation of plant growth and crop production*. Wageningen: Pudoc, 1982. 308p.