

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola
Familiar



TESE

**CARACTERIZAÇÃO DO MICROCLIMA DE AMBIENTE
PROTEGIDO CULTIVADO COM FEIJÃO-VAGEM**

CLÊNIO RENÊ KURZ BÖHMER

PELOTAS, 2008

CLÊNIO RENÊ KURZ BÖHMER

**CARACTERIZAÇÃO DO MICROCLIMA DE AMBIENTE
PROTEGIDO CULTIVADO COM FEIJÃO-VAGEM**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador:

Prof. Dr. Carlos Rogério Mauch – PPGSPAF/FAEM/UFPel

Co-orientador:

Prof^a. Dr^a. Simone Vieira de Assis – PPGMET/UFPel

Pelotas, 2008

Banca examinadora:

Prof. Dr. Carlos Rogério Mauch
PPGSPAF/Faculdade de Agronomia/UFPel (Presidente)

Prof^a. Dr^a. Cláudia Rejane Jacondino de Campos
PPGMET/Faculdade de Meteorologia/UFPel

Prof. Dr. Dágnon da Silva Ribeiro
Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas

Prof^a. Dr^a. Roberta Marins Nogueira Peil
PPGSPAF/Faculdade de Agronomia/UFPel

Dedico este trabalho a meus pais, Bruno e Olinda, e a Rosângila pelo incentivo e estímulo à busca de meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradecimentos

A Deus, por sempre dar-me forças, saúde e sabedoria para conduzir a minha vida.

A Universidade Federal de Pelotas, pela oportunidade de realizar o curso de Pós-Graduação.

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas (CEFET-RS), por liberar-me das atividades docentes para cursar Pós-Graduação, e aos colegas do curso de Eletrotécnica, que apoiaram à realização do curso.

Ao Prof. Dr. Carlos Rogério Mauch, pelas valiosas contribuições na orientação deste trabalho, dedicação, apoio, confiança e amizade.

A Prof^a. Dr^a. Simone Vieira de Assis, pelo apoio, dedicação, confiança, amizade e valiosas contribuições na co-orientação deste trabalho.

A todos os professores e funcionários do curso de Pós-graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, pela dedicação e apoio recebidos.

Aos colegas da Pós-graduação, pelo apoio, estímulo e amizade.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Resumo

BÖHMER, Clênio Renê Kurz. **Caracterização do microclima de ambiente protegido cultivado com feijão-vagem**. 2008. 113f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

O ambiente protegido modifica os elementos meteorológicos no seu interior, com relação ao meio externo. A cultura do feijão-vagem é considerada de alto risco, sendo bastante sensível a condições meteorológicas adversas. O cultivo em ambiente protegido poderá viabilizar a produção na Região Sul em épocas do ano desfavoráveis. Face ao exposto, o presente trabalho objetivou verificar se as condições do microclima do ambiente protegido atendem às necessidades da cultura do feijão-vagem no período de outono. O ambiente protegido foi cultivado com feijão-vagem, 'Macarrão Baixo', sob adubação orgânica, no período de março a junho de 2007 na Universidade Federal de Pelotas. Um sistema de aquisição de dados (*Microlloger*) realizou leituras através de sensores das variáveis meteorológicas no interior do ambiente. Estes dados foram confrontados com os dados da Estação Agroclimatológica de Pelotas (EAPel) - Convênio EMBRAPA/UFPel. A radiação solar global no interior do ambiente protegido foi, em média, 85,07% da radiação solar global no exterior, sendo que em 28 dias ficou abaixo do limite trófico para hortaliças. No interior do ambiente protegido, a média da temperatura do ar foi 18,8°C, ficando dentro dos limites recomendados para a cultura nos períodos de germinação e desenvolvimento vegetativo. No período de floração-frutificação, atingiu valores inferiores ao recomendado. A temperatura média do solo foi de 25,3°C, ficando dentro dos limites recomendados. A umidade relativa do ar apresentou uma média de 89,9% ficando acima do recomendado todos os dias. O saldo de radiação decresceu com a proximidade do inverno, apresentando uma média de 4,1MJ m⁻² dia⁻¹, sendo que 81,7% foi convertido em calor latente de evaporação e 18,3% em calor sensível. O balanço de radiação ficou dividido, em média, entre 7,14MJ m⁻² dia⁻¹ de radiação de ondas curtas e 3,04MJ m⁻² dia⁻¹ de radiação de ondas longas. O albedo da cultura foi variável durante o ciclo, aumentando até o período de frutificação, diminuindo, em seguida, em função da senescência e queda das folhas. A Evapotranspiração de referência média pelo método da FAO e pelo método do tanque Classe A foram 1,21 e 1,50mm dia⁻¹, respectivamente. O consumo hídrico total foi de 80,63mm, com um coeficiente de cultura de 0,79. O ciclo total de cultivo foi de 84 dias, apresentando um rendimento de 6,03Mg ha⁻¹, índice de área foliar máximo de 1,11; com 262,88g de matéria fresca e 34,14g de matéria seca por planta. O rendimento energético da radiação solar global e da radiação solar fotossinteticamente ativa máximos foram 0,2 e 0,5g

MJ⁻¹, respectivamente. O microclima do ambiente protegido atendeu às necessidades da cultura até o final do mês de abril, a partir de maio começaram a ocorrer temperaturas inferiores ao limite recomendado, bem como níveis de radiação solar global incidente inferiores ao limite trófico.

Palavras-chave: Ambiente protegido. Microclima. *Phaseolus vulgaris* L.

Abstract

BÖHMER, Clênio René Kurz. Microclimate characterization of the protected environment cultivated with french-beans. 2008. 113f. Thesis (Doctorate) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas

The protected environment changes the meteorological elements in its interior related to the outward environment. The french-beans culture is considered a high risk one, being so sensitive to adverse meteorological conditions. The cultivation in protected environment may become viable the production in South Region under unfavorable year period. Due to the exposed before, the present paper had the aim of verifying whether the microclimate conditions from the protected environment refer to the french-beans culture in autumn period. The protected environment was cultivated with green beans named “Macarrão Baixo”, from March to June 2007 period in Pelotas Federal University. A data purchasing system (Microllogger) performed readings through meteorological variable sensors in the interior of the environment. These data were compared to the Agroclimatological Station data in Pelotas (EAPel) - EMBRAPA/UFPel convention. The global solar radiation in the interior of the protected environment was 85,07% averaged from the global solar radiation in exterior as well in 28 days became below the trofic limit for vegetables. In the interior of the protected environment, the air temperature average was 18,8°C, being inside of the recommended values for the culture in the germination and vegetative development periods. In the flowering-fructification period, it took inferior values as recommended. The soil medium temperature was 25,3°C, being inside of the recommended values. The air relative humidity presented an 89,9% average, being above the recommended every day. The radiation balance decreased with the winter proximity, presenting a 4,1MJ m⁻² day⁻¹ average, being that 81,7% was converted into latent heat of evaporation and 18,3% in sensitive heat. The radiation balance was divided into an average between 7,14MJ m⁻² day⁻¹ of short wave radiation of and 3,04MJ m⁻² day⁻¹ of long wave radiation. The crop albedo was variable during the cycle, increasing until fructification period and decreasing due to the senescence and leaf dropping. The evapotranspiration in medium reference by FAO method and Pan method they were 1,21 and 1,50mm day⁻¹, respectively. The entire hydric consumption was 80,63mm, which resulted in a 0,79 culture coefficient. The entire cycle of culture was 84 days, presenting a 6,03Mg ha⁻¹, maximum foliar area index of 1,11; with 262,88g fresh matter and 34,14g dry matter for plant. The solar radiation energetic yield and the maximum photosynthetically active solar radiation were 0,2 and 0,5g MJ⁻¹, respectively. The microclimate of the protected environment solved the culture needs until the final of April, as from May began the

occurrence of inferior temperatures to the recommended limit as well the levels of global solar radiation inciding inferior to the trofic limit.

Key words: Protected environment. Microclimate. *Phaseolus vulgaris* L.

Lista de figuras

Figura 1	Radiação solar global incidente no interior do ambiente protegido (Ri), radiação solar global na Estação Agroclimatológica de Pelotas (Rg) e limite trófico (Lt) para hortaliças durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	60
Figura 2	Coeficiente de extinção atmosférica durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	61
Figura 3	Temperatura do ar (T), limite mínimo (Lmín) e limite máximo (Lmáx) no período de emergência do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).....	62
Figura 4	Temperatura do ar (T), limite mínimo (Lmín) e limite máximo (Lmáx) no período de desenvolvimento vegetativo do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).....	63
Figura 5	Temperatura do ar (T), limite mínimo (Lmín) e limite máximo (Lmáx) no período de floração e frutificação do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).....	64
Figura 6	Temperaturas do ar mínima absoluta (Tmín), máxima absoluta (Tmáx) e média diária (Tméd) no interior do ambiente protegido e na Estação Agroclimatológica durante o ciclo do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	66
Figura 7	Temperatura do solo (Ts), limite mínimo (Lsmín) e limite máximo (Lsmáx) no período de emergência do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).....	67
Figura 8	Temperatura do solo (Ts), limite mínimo (Lsmín) e limite máximo (Lsmáx) no período de desenvolvimento vegetativo do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).....	68
Figura 9	Temperatura do solo (Ts), limite mínimo (Lsmín) e limite máximo (Lsmáx) no período de floração e frutificação do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).....	68

Figura 10	Umidade relativa do ar (UR), limite mínimo (URLmín) e limite máximo (URLmáx) no interior do ambiente protegido durante o ciclo do feijão-vagem, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).....	69
Figura 11	Saldo de radiação (Rn), balanço de ondas curtas (BOC) e balanço de ondas longas (BOL), radiação solar incidente sobre o dossel (Ri), radiação solar refletida pelo dossel (Rr) e radiação solar transmitida através do dossel (Rt), durante o ciclo do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	72
Figura 12	Saldo de radiação (Rn), balanço de ondas curtas (BOC), balanço de ondas longas (BOL), radiação solar global incidente (Ri), radiação solar global refletida (Rr) e radiação solar global transmitida através do dossel (Rt), durante um dia de céu claro (18/05/07) e num dia de céu nublado (21/05/07), em ambiente protegido cultivado com feijão-vagem, Pelotas, RS, 2007.....	76
Figura 13	Variação do albedo durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	77
Figura 14	Variação do albedo do feijão-vagem em ambiente protegido, durante um dia de céu claro, Pelotas, RS, 2007.....	78
Figura 15	Variação do albedo do feijão-vagem em ambiente protegido, durante um dia de céu nublado, Pelotas, RS, 2007.....	79
Figura 16	Balanço de energia no interior do ambiente protegido durante o ciclo do feijão-vagem, Pelotas, RS, 2007.....	80
Figura 17	Evapotranspiração de referência (ETo) diária estimada pelo método da FAO Penman-Monteith e pelo método do tanque Classe A no interior do ambiente protegido cultivado com feijão-vagem, Pelotas, RS, 2007.....	82
Figura 18	Índice de área foliar durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	87
Figura 19	Fitomassa fresca, acumulada por planta em gramas durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	89
Figura 20	Fitomassa seca, acumulada por planta em gramas durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	92
Figura 21	Quantidade média colhida por planta durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	94
Figura 22	Rendimento energético da radiação solar (Ei) e da radiação fotossinteticamente ativa (Epar) durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	95

Lista de tabelas

Tabela 1	Umidade relativa mínima absoluta (URmín), umidade relativa máxima absoluta (URmáx) e umidade relativa média do ar no interior do ambiente protegido em cada período do ciclo do feijão-vagem, Pelotas, RS, 2007.....	70
Tabela 2	Saldo de radiação (Rn), radiação solar transmitida através do dossel (Rt), radiação solar refletida pelo dossel (Rr), radiação solar incidente sobre o dossel (Ri), balanço de ondas curtas (BOC) e balanço de ondas longas (BOL) em MJ m ⁻² dia ⁻¹ durante o ciclo do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	73
Tabela 3	Relação entre saldo de radiação (Rn), radiação solar transmitida através do dossel (Rt), radiação solar refletida pelo dossel (Rr), balanço de ondas curtas (BOC), balanço de ondas longas (BOL) e radiação solar incidente sobre o dossel (Ri) durante o ciclo do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	74
Tabela 4	Saldo de radiação (Rn), fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível (MJ m ⁻²) em diferentes ciclos de desenvolvimento da cultura do feijão-vagem, em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007..	81
Tabela 5	Evapotranspiração de referência método FAO, em mm dia ⁻¹ (ETo FAO), evapotranspiração de referência método tanque Classe A em mm dia ⁻¹ (ETo Classe A), percentual que o método Classe A foi superior ao método da FAO, coeficiente médio do tanque Classe A para cada período (Kp) e coeficiente médio do tanque Classe A ajustado (Kpa) para o cultivo de feijão-vagem, em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	82
Tabela 6	Evapotranspiração da cultura em mm dia ⁻¹ (ETc), evapotranspiração de referência em mm dia ⁻¹ (ETo) e coeficiente de cultura (Kc) para o cultivo de feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007...	84
Tabela 7	Código do estágio fenológico, data e duração em dias após a semeadura (DAS) para ocorrer cada fase fenológica da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	86
Tabela 8	Componentes da fitomassa fresca em gramas e percentual do total da parte aérea, por planta, em cada coleta de plantas, durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	90
Tabela 9	Componentes da fitomassa seca em gramas e percentual do total da parte aérea, por planta, durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.....	93

Lista de símbolos

A	área útil da estufa em m^2 ;
AS	área de solo ocupada pela planta em m^2 ;
AF	área foliar em m^2 ;
BOC	balanço de ondas curtas em $MJ m^{-2} dia^{-1}$;
BOL	balanço de ondas longas em $MJ m^{-2} dia^{-1}$;
CS	constante solar em $W m^{-2}$;
Dj	dia juliano;
ea	pressão real do vapor em kPa;
ECA	evaporação do tanque Classe A em $mm dia^{-1}$;
Ei	rendimento energético em função da radiação solar global incidente em $g MJ^{-1}$;
Ep	rendimento energético em função da radiação fotossinteticamente ativa incidente em $g MJ^{-1}$;
es	pressão de saturação do vapor em kPa;
ETc	evapotranspiração da cultura em $mm dia^{-1}$;
ETo	evapotranspiração de referência em $mm dia^{-1}$;
eTu	pressão de saturação do vapor na temperatura de bulbo úmido em kPa;
F	bordadura em metros;
G	fluxo de calor no solo em $MJ m^{-2} dia^{-1}$;
H	fluxo de calor sensível em $MJ m^{-2} dia^{-1}$;
IAF	índice de área foliar;
Kc	coeficiente de cultura;
Kp	coeficiente do tanque classe A;
Kt	coeficiente de extinção atmosférica fora do ambiente protegido;
LE	fluxo de calor latente em $MJ m^{-2} dia^{-1}$;

In	logaritmo natural;
MS	matéria seca acumulada durante o cultivo em g m^{-2} ;
NP	número de plantas;
P	média diária da pressão atmosférica em kPa;
Pv	peso total das vagens colhidas em g;
Ra	rendimento por área em g m^{-2} ;
Rg	radiação solar global na superfície terrestre $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;
Ri	radiação solar global incidente do dossel da cultura em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;
Rn	saldo de radiação em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;
Ro	radiação no topo da atmosfera em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;
Rp	rendimento médio por planta em g planta^{-1} ;
Rr	radiação solar global refletida pela cultura em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;
s	tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água em função da temperatura do ar em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;
T	temperatura do ar (bulbo seco) a 1m de altura em $^\circ\text{C}$;
Tm	temperatura do ar (bulbo seco) média entre os níveis 1 e 2 em $^\circ\text{C}$;
Tu	temperatura do ar (bulbo úmido) a 1m de altura em $^\circ\text{C}$;
UR	umidade relativa do ar média diária a 2m de altura em %;
U2	velocidade média diária do vento a 2m de altura em m s^{-1} ;
α	albedo do cultivo;
β	razão de Bowen;
γ	coeficiente psicrométrico em $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;
δ	declinação solar em graus;
ΔT	diferença entre as temperaturas dos termômetros de bulbo seco instalados nos níveis 1 e 2 em $^\circ\text{C}$;
ΔTu	diferença entre as temperaturas dos termômetros de bulbo úmido instalados nos níveis 1 e 2 em $^\circ\text{C}$;
ϕ	latitude em graus;
ω_s	ângulo horário do por do sol em graus;
ΣRi	somatório da radiação solar global acumulada em MJ m^{-2} ;
$\Sigma PARi$	somatório da radiação PAR incidente acumulada em MJ m^{-2} .

Sumário

1 INTRODUÇÃO	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 A cultura do feijão-vagem	21
2.1.1 Produção e importância econômica da cultura	21
2.1.2 Grupos de cultivares e rendimentos	22
2.1.3 Condução da cultura	24
2.1.4 Exigências climáticas.....	25
2.2 Cultivo em ambiente protegido	28
2.3 Condições ambientais no interior do ambiente protegido.....	31
2.3.1 Radiação solar.....	31
2.3.2 Temperatura do ar	32
2.3.3 Temperatura do solo	34
2.3.4 Umidade relativa do ar	35
2.3.5 Evapotranspiração de referência.....	36
2.3.6 Evaporação no tanque Classe A	38
2.3.7 Evapotranspiração e coeficiente de cultura.....	39
2.3.8 Balanço de radiação e energia.....	40
2.3.9 Rendimento energético	41
3 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 Área experimental	43
3.2 Observações agrometeorológicas	44
3.2.1 Radiação solar global no interior e no exterior do ambiente protegido.....	45
3.2.2 Coeficiente de extinção atmosférica.....	45
3.2.3 Temperatura do ar.....	46
3.2.4 Temperatura do solo	47

3.2.5 Umidade do solo.....	47
3.2.6 Umidade relativa do ar	47
3.2.7 Radiação solar global incidente, refletida e transmitida	48
3.2.8 Saldo de radiação.....	49
3.2.9 Velocidade do vento	49
3.2.10 Evaporação do tanque Classe A	49
3.3 Balanço de radiação.....	49
3.4 Balanço de energia.....	50
3.5 Evapotranspiração de referência.....	52
3.6 Evapotranspiração e coeficiente da cultura.....	53
3.7 Respostas agronômicas	54
3.7.1 Fases fenológicas.....	54
3.7.2 Índice de área foliar	54
3.7.3 Fitomassa fresca	55
3.7.4 Fitomassa seca	55
3.7.5 Rendimento	55
3.7.6 Rendimento energético em função da radiação solar global incidente	56
3.7.7 Rendimento energético em função da radiação fotossinteticamente ativa incidente.....	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.1 Observações agrometeorológicas	58
4.1.1 Radiação solar global no interior e no exterior do ambiente protegido.....	58
4.1.2 Coeficiente de extinção atmosférica.....	60
4.1.3 Temperatura do ar.....	61
4.1.4 Temperatura do solo	67
4.1.5 Umidade relativa do ar	69
4.2 Balanço de radiação.....	71
4.2.1 Balanço de radiação em dias de céu claro e céu nublado	74
4.2.2 Albedo da cultura	77
4.3 Balanço de energia.....	79
4.4 Evapotranspiração de referência	81
4.5 Evapotranspiração e coeficiente de cultura	83
4.6 Respostas agronômicas	85
4.6.1 Fases fenológicas.....	85

4.6.2 Índice de área foliar	87
4.6.3 Fitomassa fresca	88
4.6.4 Fitomassa seca	91
4.6.5 Rendimento	93
4.6.6 Rendimento energético da radiação solar	95
5 CONCLUSÕES	97
6 REFERÊNCIAS	99
APÊNDICES	107

1 INTRODUÇÃO

A radiação solar é, sem dúvida, a principal fonte de energia para o Planeta. O aquecimento da superfície terrestre pela radiação solar desencadeia uma série de fenômenos meteorológicos, dentre eles a circulação geral da atmosfera, as chuvas, as diferenças de temperatura e as diferenças de pressão atmosférica. Ao atravessar a atmosfera, a radiação solar interage com os elementos constituintes da mesma, sofrendo atenuação, difusão e reflexão, com isso, tem sua quantidade, qualidade e direção alteradas, atingindo a superfície terrestre com características diferentes daquelas que apresentava no topo da atmosfera.

Na superfície terrestre, a radiação solar tem uma relação direta com a vida das plantas e dos animais. O crescimento e desenvolvimento de uma determinada cultura está diretamente relacionado com a capacidade da mesma em absorver e transformar a radiação solar em fitomassa. Ao atingir a superfície vegetal, a radiação solar pode ser absorvida, refletida ou transmitida através da planta. A parcela refletida não participa efetivamente dos processos biológicos, restando a parte absorvida e transmitida para participar desses processos.

A quantidade de energia radiante disponível na superfície é o saldo de radiação. As medidas de saldo de radiação em comunidades vegetais proporcionam a caracterização dos estados de conforto térmico, conforto hídrico e reações biofísicas e bioquímicas. Esses processos têm importância fundamental no entendimento das reações genótipo-ambiente, os quais determinarão a produção e a produtividade da cultura (SOUZA, 1996).

O ambiente protegido com filme plástico, em função de seu formato, dimensões, orientação geográfica, material de cobertura e manejo, modifica os fluxos radiativos no seu interior em relação ao exterior, criando um microclima diferenciado em relação ao meio externo. Através de um manejo adequado, o cultivo

em ambiente protegido objetiva criar e manter um microclima adequado ao cultivo de plantas, independente da estação do ano.

O cultivo em ambiente protegido, geralmente vinculado à agricultura familiar, objetiva conquistar um mercado diferenciado, bem como, um valor mais elevado para o produto, compensando desta forma o maior custo da estrutura de proteção. Além desta vantagem, os produtos colhidos podem apresentar melhor qualidade, as plantas consomem menos água, diminui-se a lixiviação dos nutrientes, melhora-se o aproveitamento da radiação solar, há um aumento significativo da temperatura interna do ar e do solo (MARTINS et al., 1999).

A adubação orgânica proporciona bons índices de produtividade. Segundo Aldrighi (2000), a adubação orgânica apresenta-se como uma técnica de custo reduzido no fornecimento de nutrientes necessário ao desenvolvimento das culturas, uma vez que, dentre os fatores de produção, a adubação, pode representar de 20% a 30% do custo.

A cultura do feijão-vagem é considerada de alto risco, sendo bastante sensível às condições meteorológicas adversas. No período de outono a radiação solar interna ao ambiente protegido pode se tornar limitante, ficando abaixo do limite trófico da cultura. Além disso, as baixas temperaturas podem aumentar o período reprodutivo e de diminuir o rendimento, quando comparado a épocas do ano mais favoráveis, conforme verificado por Aldrighi (2000).

Embora sendo menos produtivas, as variedades de crescimento determinado apresentam algumas vantagens econômicas: não necessitam de tutoramento, diminuindo os custos com mão-de-obra e com material; ocupam a área de produção por menos tempo, já que o ciclo de produção é menor; diminuindo custos com irrigação, manejo da estufa, colheita etc. Além disso, Barbosa et al. (2001), recomendam o feijão-vagem de crescimento determinado para rotação de culturas em ambiente protegido. Deve-se semear em seguida a uma cultura de tomateiro ou pepino. Para melhor aproveitamento do efeito residual, o ideal é semear no mesmo sulco de plantio da cultura anterior.

Salienta-se que não foram encontrados registros de experimentos em ambiente protegido com feijão-vagem de porte rasteiro em Pelotas, RS. Apenas foram realizados dois experimentos com a cultivar Macarrão Favorito AG 480, de crescimento indeterminado (Oliveira, 1992; Aldrighi, 2000).

Face ao exposto, o presente trabalho objetivou avaliar o microclima no ambiente protegido cultivado com feijão-vagem 'Macarrão Baixo' no período de outono. Pode-se destacar os seguintes objetivos específicos:

- avaliar as respostas agronômicas da cultura (fases fenológicas, índice de área foliar, fitomassa fresca, fitomassa seca e rendimento) em ambiente protegido;
- comparar as medidas agrometeorológicas do interior do ambiente protegido com as do exterior;
- avaliar os componentes do balanço de energia ao longo do ciclo da cultura;
- descrever os fluxos de radiação (radiação de onda curta, radiação de onda longa e refletividade do cultivo) ao longo do ciclo da cultura;
- analisar o rendimento energético da radiação solar;
- estimar a evapotranspiração de referência e da cultura do feijão-vagem;
- verificar se as condições do microclima do ambiente protegido no período de março a junho atendem às necessidades da cultura do feijão-vagem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura do feijão-vagem

O feijão-vagem é uma hortaliça de importância mundial, constituindo-se em uma boa fonte de proteínas, para a nutrição humana. Originária da América Central, foi levada para Europa no século XVI, e daí foi difundida para outros continentes. Pertence à família 'Fabaceae', seus frutos são vagens de formato afilado, dentro dos quais se desenvolvem as sementes. A exploração comercial tem por finalidade o aproveitamento das vagens produzidas pela planta em seu estado imaturo. Nesse estágio, as vagens são utilizadas na alimentação de várias formas, podendo ser industrializadas ou consumidas "in natura", o que o diferencia dos outros feijões (BARBOSA et al., 2001; FILGUEIRA, 2003; EMBRAPA HORTALIÇAS, 2007).

A folha do feijão-vagem é composta de 3 folíolos grandes, em formato de coração, sendo dois laterais e um no centro; as flores são hermafroditas e autoférteis; as raízes são superficiais no solo e têm a capacidade de fixar o nitrogênio do ar, graças à formação de nódulos, provocada pela ação de uma bactéria do gênero *Rhizobium* (KUROZAWA, 2007).

O feijão-vagem é rico em fibras, tem apreciável quantidade de vitaminas B1 e B2, além de apresentar, em quantidades menores, fósforo, flúor, potássio, cálcio, ferro, vitaminas A e C (EMBRAPA HORTALIÇAS, 2007).

2.1.1 Produção e importância econômica da cultura

De acordo com o Censo Agropecuário de 1996 a produção brasileira do feijão-vagem foi de 70.007Mg, o que representou um valor de R\$ 28.020.240,18. O maior produtor nacional é a região Sudeste com 51.494Mg, seguida da região Sul,

com 11.834Mg. A produção do estado do Rio Grande do Sul foi de 4.025Mg, representando 5,7% da produção nacional (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2007)

A variação de preço de atacado no Rio Grande do Sul, no primeiro dia útil de cada mês do ano, em Porto Alegre, teve um crescimento de janeiro a julho de 2006 - o máximo foi de R\$ 2,50Kg⁻¹ e ocorreu no mês de julho. No período de julho a dezembro do mesmo ano, ocorreu um decréscimo no preço, sendo o valor mínimo de R\$ 0,80Kg⁻¹ em dezembro (CENTRAIS DE ABASTECIMENTO DO RIO GRANDE DO SUL S.A., 2007).

2.1.2 Grupos de cultivares e rendimentos

De acordo com Barbosa et al. (2001), as cultivares comerciais de feijão-vagem podem ser classificadas de acordo com o formato das vagens nos seguintes grupos:

- Grupo Macarrão: apresenta hábito de crescimento indeterminado, ultrapassando 2,5m de altura, o que exige tutoramento. As vagens apresentam seção circular com formato cilíndrico e sementes brancas, quando secas; têm um número médio de seis sementes por fruto e um teor de fibrosidade muito alto (o que permite aproveitar o fruto por completo).
- Grupo Manteiga: hábito de crescimento indeterminado, possui vagens com formato achatado e sementes com coloração creme-clara ou branca, quando secas; o grupo apresenta número médio de oito sementes por fruto e teor de fibrosidade mais elevado.
- Grupo Macarrão Rasteiro (Anão): as plantas têm crescimento determinado, com caule ereto e de baixa altura, atingindo 50cm, no máximo. Esse grupo apresenta uma desvantagem: a produtividade é sensivelmente menor em relação à cultura tutorada, já que a colheita é concentrada; as vagens são do tipo macarrão, e as sementes, brancas.

No Brasil, a cultura do feijão-vagem é conduzida tradicionalmente pela agricultura familiar utilizando-se em maior quantidade as variedades de crescimento indeterminado com tutoramento (PEIXOTO et al., 1993). A Empresa Pernambucana

de Pesquisa Agropecuária (2006) também salienta este aspecto no Nordeste brasileiro.

No que se refere à produtividade, Filgueira (2003) cita que o rendimento do feijão-vagem de hábito de crescimento indeterminado varia de 10 até 16Mg ha⁻¹ no Brasil, já Barbosa et al. (2001) afirmam que estas variedades podem atingir valores de produtividade acima de 20Mg ha⁻¹.

Peixoto et al. (2002) testaram a estabilidade e a adaptabilidade de 15 genótipos e feijão-vagem de crescimento indeterminado em relação a oito ambientes em diferentes anos: Anápolis-GO (1996), Morrinhos-GO (1996), Urutaí-Go (1996), Anápolis-GO (1996/97), Anápolis-GO (1997), Jabotical-SP (1997), Anápolis-GO (1998) e Areia-PB (1999). Constatou-se que produção média variou de 9,55Mg ha⁻¹, em Anápolis-GO (1996/97) a 26,62Mg ha⁻¹, em Areia-PB (1999).

Em ambiente protegido, tipo estufa plástica, túnel alto com 320m² de área, em Pelotas, RS, Aldrighi (2000), no estudo com o feijão-vagem “Macarrão Favorito”, de crescimento indeterminado, obteve-se rendimentos médios de 2,6 e 7,2Kg m⁻², nos períodos de março a junho e de outubro a março, respectivamente. Segundo o autor, valores muito superiores aos encontrados no Brasil, tanto em estufa quanto em ambiente aberto.

Gálvez (1990), ao analisar a produtividade do feijão-vagem de crescimento determinado cultivado em ambiente protegido, no período de 19 de setembro a 10 de dezembro de 1988, em Almeria, Espanha, obteve rendimentos que variaram entre 11,35 a 12,06Mg ha⁻¹, dependendo da densidade de plantio: 21 plantas m⁻² ou 15 plantas m⁻², respectivamente. A duração do ciclo de cultivo foi de 82 dias.

Souza (1996) para um cultivo de feijão-vagem de crescimento determinado em Botucatu, SP, no período de outubro a dezembro de 1994, obteve uma produção de 20Mg ha⁻¹ e 25,7Mg ha⁻¹ em ambiente aberto e protegido, respectivamente.

As variedades de crescimento determinado apresentam a desvantagem de apresentarem uma menor produção. De acordo com a Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (2006), a produção das variedades de crescimento determinado é aproximadamente a metade das variedades de crescimento indeterminado.

Embora sendo menos produtivas, as variedades de crescimento determinado apresentam algumas vantagens: não necessitam de tutoramento;

ocupam a área de cultivo por menos tempo, pois possuem um ciclo de produção menor em relação a variedades de hábito de crescimento indeterminado. Estas vantagens podem levar a um aumento na rentabilidade do produtor, já que os custos com mão-de-obra, materiais etc. são menores.

Segundo Barbosa et al. (2001), além das vantagens econômicas, o feijão-vagem de crescimento determinado é indicado para rotação de culturas em ambiente protegido. Recomenda-se semear em seguida a uma cultura de tomateiro ou pepino. Para melhor aproveitamento do efeito residual, o ideal é semear no mesmo sulco de plantio da cultura anterior.

A rotação de culturas pode melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo; auxilia o controle de plantas daninhas, doenças e pragas; repõe matéria orgânica e protege o solo da ação dos agentes climáticos (EMBRAPA, 2008).

2.1.3 Condução da cultura

O feijão-vagem é uma hortaliça de semeadura direta, não tolera o transplantio. Semeiam-se duas a três sementes em cada cova ou no sulco de plantio, no espaçamento de 1,0 a 1,2m entre linhas e 0,2 a 0,5m entre plantas, para as cultivares de crescimento indeterminado. Para as cultivares de crescimento determinado recomenda-se espaçamento menor, variando de 0,5 a 0,9m entre linhas e 0,15 a 0,5m entre plantas. A profundidade de semeadura oscila entre 4 e 7cm, conforme a textura do terreno, mais ou menos compacta, e a maior ou menor umidade natural do solo. O trato indispensável é o tutoramento da planta de crescimento indeterminado, exigindo tratos culturais onerosos, razão pela qual seu custo de produção por área é mais alto, o que é compensado pela maior produtividade. De 10 a 20 dias após a emergência, faz-se o desbaste e deixam-se apenas duas plantas em cada cova. Deve-se procurar manter 80% de água útil nas raízes, obtendo-se maior produtividade e vagens de melhor qualidade. A cultura normalmente deverá ser mantida livre das plantas concorrentes, pois é muito sensível à competição (BARBOSA et al., 2001).

A colheita do feijão-vagem inicia de 60 a 70 dias após a semeadura direta, para as cultivares de porte alto, prolongando-se por 30 dias ou mais; as de porte baixo são colhidas com 55 a 60 dias, sendo o período produtivo de 15 dias, no

máximo. As vagens são colhidas imaturas, com sementes pouco desenvolvidas, sendo o ponto ideal de colheita quando as vagens atingirem o máximo desenvolvimento, porém antes de tornarem-se fibrosas e com sementes salientes. Na prática, conhece-se esse ponto quando as pontas são facilmente quebradas. Colheitas freqüentes elevam a produtividade, razão pela qual não se deve deixar vagens passadas presas às plantas. A colheita no Brasil é manual e sua produtividade é variável (BARBOSA et al., 2001).

2.1.4 Exigências climáticas

a) Radiação solar

A taxa fotossintética de uma cultura depende não somente da distribuição de radiação solar nas diferentes camadas de folhas, como também do total absorvido em cada camada. O total de radiação solar que é interceptado e eventualmente absorvido por uma camada de folhas está diretamente relacionado com o ângulo foliar, declinação solar, distribuição espectral da radiação e estruturação das folhas no dossel. A cultura do feijoeiro, quando exposta à baixa quantidade de radiação solar, apresenta decréscimo no índice de área foliar, concorrendo para uma menor área de interceptação de energia com efeito em todo seu metabolismo fisiológico. Por outro lado, em condições de alta radiação solar, os índices foliares serão maiores. Porém, isso não significa que haverá um aumento no rendimento da cultura, pois maior produção de grãos está diretamente relacionada à eficiência fotossintética da cultivar. O valor de saturação de radiação solar varia com a idade e o tipo da planta. De uma forma geral, pode-se citar que regiões que apresentam valores de radiação solar em torno de $150\text{-}250\text{W m}^{-2}$ podem ser consideradas como ideais para o desenvolvimento do feijoeiro. Acima de 400W m^{-2} , a taxa de fotossíntese é praticamente constante (SILVANDO; STEINMETZ, 2008).

Em experimento realizado em Londrina, no período de setembro a novembro de 1998, Souza et al. (2001) concluíram que as plantas de feijão-vagem crescidas em ambiente com apenas 50% de sombreamento apresentaram redução do número médio de vagens por planta, mas isso não resultou em diminuição do peso médio das vagens, nem alteração da textura das mesmas.

b) Temperatura do ar

O feijão-vagem é uma cultura de larga adaptação a climas quentes, dentro de uma faixa térmica ampla de 18 a 30°C. Em temperaturas superiores a 35°C, há deficiência de polinização, o que resulta em vagens deformadas e queda significativa na produtividade. Por outro lado, é intolerante a baixas temperaturas (menor que 15°C) e à geada. As baixas temperaturas limitantes ao cultivo durante o inverno ocasionam baixa germinação e desenvolvimento retardado das plantas. Em regiões tropicais de baixa altitude, é viável a semeadura ao longo do ano. Em outras, de maior altitude, as semeaduras de inverno devem ser evitadas. A alternativa é o cultivo em estufa, durante o inverno, em rotação com outras culturas, como o tomate (BARBOSA et al., 2001).

Para Maroto (2000), o feijão-vagem é uma planta exigente em calor, tendo um desenvolvimento ótimo entre 18 e 25°C. Variações térmicas muito intensas, sobretudo abaixo de 10 a 12°C, além de afetar o crescimento da planta, podem induzir a formação de anomalias na frutificação. Temperaturas entre 8 e 10°C provocam a parada do crescimento.

De acordo com a Embrapa Rondônia (2008), a temperatura média ideal para o desenvolvimento da cultura do feijão comum varia de 18 a 24°C, durante o dia e de 15 a 21°C, durante a noite.

Cermeño (1977) apresenta os limites de temperatura do ar para o crescimento e desenvolvimento do feijão-vagem de acordo com a fase fenológica:

- Congelamento da planta: 1°C;
- Suspensão do desenvolvimento: 8 a 10°C;
- Germinação: mínima de 12°C, ótima: 15 a 25°C, máxima 30°C;
- Desenvolvimento vegetativo: mínima de 10 a 12°C, ótima: 18 a 30°C, máxima 35 a 40°C;
- Floração: mínima de 12 a 15°C, ótima: 15 a 25°C, máxima 30 a 40°C.

c) Temperatura do solo

A planta só atingirá um desenvolvimento ótimo se o solo estiver na temperatura adequada. O calor do solo não só facilita as funções vitais realizadas

pelas raízes, como também permite a proliferação microbiana, que influencia na degradação ou decomposição dos compostos minerais da matéria orgânica. A solubilidade dos sais do solo também varia com a temperatura, sendo ótima para determinados valores térmicos (CERMEÑO, 1977).

Os subperíodos correspondentes à semeadura-emergência e ao crescimento inicial são os mais afetados pela temperatura do solo, sobretudo quando ocorrem grandes oscilações em partes superficiais deste. Em cultura de hortaliças como tomate, berinjela, pimentão e melão, a temperatura de solo mais adequada está entre 15 e 20°C. Há, também, uma temperatura de solo necessária para que exista atividade vegetal mínima. Para o feijão, tomate e melão esta temperatura é de 12°C, enquanto que para a couve de 5°C (RISSER et al., 1978).

A temperatura do solo é um dos fatores que podem afetar a germinação e, conseqüentemente, a emergência das plântulas. Dentre eles, a temperatura pode ser o fator mais importante, uma vez que na maioria das vezes o produtor não tem total controle sobre ela. Temperaturas muito baixas ou muito altas podem alterar tanto a velocidade quanto à porcentagem final de germinação. Em geral, as temperaturas baixas reduzem a velocidade de germinação, enquanto as altas aumentam. Em condições extremas de temperatura, a germinação poderá não ocorrer, e, em alguns casos, a semente é levada à condição de dormência. Para o feijão-vagem a temperatura do solo ótima para a germinação está entre 20 e 30°C, sendo 16°C o valor mínimo e 35°C o valor máximo (NASCIMENTO, 2007).

d) Umidade relativa do ar

A baixa umidade relativa do ar associada a altas temperaturas pode reduzir o pegamento e a retenção de vagens, sobretudo quando ocorrem ventos fortes; por outro lado, condições de alta umidade relativa do ar favorecem o aparecimento de doenças foliares, que podem causar sérios prejuízos à lavoura (EMBRAPA RONDÔNIA, 2008).

Para o feijão cultivado em ambiente protegido, a umidade relativa do ar ótima deve variar entre 60 a 75% (CERMEÑO, 1977).

e) Umidade do solo

O feijoeiro é classificado como planta sensível, tanto quanto à deficiência hídrica quanto ao excesso de água no solo. A necessidade de água para a cultura varia com o seu estágio de desenvolvimento. O consumo de água aumenta de um valor mínimo na germinação até um valor máximo na floração e na formação de vagens, decrescendo a partir do início da maturação (NÓBREGA et al., 2001).

Estudos realizados por Singh (1989) apud Vieira et al. (1998) verificaram que a irrigação mostra um efeito linear no número de folhas e área foliar do feijão-vagem, e um efeito cúbico na produção de vagens, apresentando 24,6 folhas por planta e 3.835cm² de área foliar por planta, para uma irrigação baseada em 100% da evaporação do tanque Classe A, o que significou um potencial de água no solo de -12kPa, ocorrendo uma produção máxima de vagens a um potencial de água no solo de -21kPa.

Fiegenbaum et al. (1991), ao analisar a influência do déficit hídrico em três cultivares de feijão durante o período de floração em Pelotas, RS, verificou que houve redução no crescimento das plantas, no tamanho das vagens, no número de vagens, no de sementes por planta e no número de sementes por vagem.

Recomendações da Embrapa Arroz e Feijão (2007) indicam que o feijão deve ser irrigado toda vez que o potencial mátrico do solo medido por tensiômetro instalado na região do sistema radicular (15cm) alcance -33kPa. A leitura do tensiômetro a uma profundidade de 15cm representa a tensão mátrica média de um perfil de solo de 0 a 30cm.

2.2 Cultivo em ambiente protegido

O uso de estufas teve suas origens na antigüidade. As primeiras estufas modernas foram construídas na Itália, no século XVI, para abrigar plantas exóticas que exploradores traziam dos trópicos. A partir daí o conceito de estufas se espalhou para a Holanda e Inglaterra. Gradativamente, o uso do ambiente protegido difundiu-se nas regiões de clima frio, passando pelas tropicais e chegando às desérticas. Atualmente as maiores áreas protegidas encontram-se na China, Japão, Espanha, Itália, Holanda e Bélgica. No Brasil, a técnica começou a ser adotada no cultivo de flores no estado de São Paulo, principalmente por imigrantes holandeses

e japoneses, na década de 80. Nos anos 90, apesar dos esforços de difusão das tecnologias junto aos produtores, a expectativa de um grande crescimento do cultivo em ambiente protegido não se confirmou. Pelo contrário, havia a necessidade de uma continuidade no trabalho de pesquisa e extensão para dar respaldo permanente aos produtores rurais. O uso do plástico na agricultura brasileira ainda é pequeno e o potencial é grande, principalmente no setor hortícola, devido à capacidade tecnológica e produtiva do campo. Os variados climas presentes no país requerem o uso de estufas em quase todos os estados (BLISKA JR., 2007).

No Rio Grande do Sul, a utilização de estufas com cobertura e laterais de plástico transparente como o polietileno de baixa densidade (PEBD) é uma técnica de uso crescente na proteção às baixas temperaturas e na criação de condições de cultivo em épocas não recomendadas (FARIAS, 1991).

O clima é um fator que influencia a produção de hortaliças. Em certas épocas do ano, as chuvas demasiadas danificam as culturas e criam condições favoráveis para o aparecimento de doenças. Por outro lado, as baixas temperaturas e os ventos acabam prolongando o ciclo das mesmas. Para auxiliar na resolução desse entrave podemos lançar mão do cultivo protegido, que se caracteriza pela construção de uma estrutura para a proteção das plantas contra os agentes meteorológicos, permitindo a passagem da luz, já que essa é essencial à realização da fotossíntese. Este é um sistema de produção agrícola especializado que possibilita certo controle das condições edafoclimáticas como: temperatura, umidade do ar, radiação, solo, vento e composição atmosférica (PURQUERIO; TIVELLI, 2008).

De acordo com o Instituto Agrônomo do Paraná (2006), as estufas ou casas de vegetação são ambientes fechados ou semifechados, dentro dos quais é possível criar e manter um microclima ideal para o cultivo de plantas, independentemente da estação do ano. As estufas são construídas com estrutura de madeira ou metálica, revestidas por plástico ou vidro.

O cultivo em ambiente protegido pode resultar nas seguintes vantagens:

- a) controle artificial das condições climáticas (temperatura, umidade relativa, luminosidade, concentração de CO₂ e outras);
- b) manutenção da produção constante durante todo o ano;
- c) maior facilidade para controle de pragas, doenças e plantas concorrentes;

- d) criação de ambiente mais agradável, tornando as atividades desenvolvidas pelos trabalhadores mais rápidas e eficientes;
- e) maior uniformidade e qualidade dos produtos;
- f) possibilidade de associar outros tratamentos, como injeção de CO₂, hidroponia, aeroponia, suplementação luminosa e alteração de temperatura, antecipando ou retardando a produção, conforme a demanda;
- g) proteção a danos causados por intempéries e pela ação direta dos raios solares.

Segundo o Instituto Agrônomo do Paraná (2006), no Brasil, Holambra foi a cidade pioneira no uso de estruturas metálicas, recobertas por filmes plásticos. Nesse sistema, a produção de flores e plantas rende o dobro do que o cultivo a céu aberto ou, no mínimo, de 40% a 50% a mais. Além disso, as flores cultivadas em ambiente protegido duram mais: de seis a sete meses, em vasos. Agricultores de Santa Cruz do Sul, no Rio Grande do Sul, a exemplo dos de Holambra, passaram a cultivar flores em ambiente protegido, assim como fazem seus concorrentes em todo o Brasil.

Para Toledo (2006), a utilização do ambiente protegido, elevou sensivelmente a tecnificação e a produtividade em cultivos de hortaliças. O plantio convencional de pimentão, que ainda é realizado em muitas propriedades, rende perto de 30 toneladas de frutos por hectare, contra 180 toneladas do cultivo protegido. Performances como essa ajudaram a sedimentar a plasticultura em importantes pólos produtores, como o de São Paulo, um dos mais tradicionais do país, situado no chamado Cinturão Verde em torno da capital do Estado e o do Distrito Federal, centrado principalmente nos núcleos de Taquara e Pípiripau. O uso do ambiente protegido vem ainda possibilitando a obtenção de alguns tipos de hortaliças até então tidas como artigos "importados" de outras regiões, como na Amazônia. Em Iranduba, nas vizinhanças de Manaus, a Embrapa vem auxiliando o governo amazonense na implantação de um projeto de 16 hectares para o cultivo protegido de hortaliças, com financiamento do Fundo Constitucional da Amazônia. A plasticultura permitiu que muitos horticultores elevassem seus níveis de rendimento, possibilitando o acesso à maior escala de produção numa área restrita.

2.3 Condições ambientais no interior do ambiente protegido

O conhecimento do microclima em casas de vegetação e sua interação com os vários elementos do sistema são essenciais para o seu manejo, mantendo condições ótimas para a produção das culturas.

2.3.1 Radiação solar

A radiação solar é um dos principais elementos alterados pelo uso de coberturas plásticas. Estudos realizados por Farias et al. (1993 a), no Campus da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), em 11 dias no período de primavera, em estufa tipo “capela”, coberta com PEBD de 0,1mm de espessura, indicam que 83% da radiação solar global verificada externamente penetra para o interior da estufa, variando este percentual de 65 a 90%. Em dia de céu limpo, em média, 45% da radiação solar global interna correspondeu à radiação difusa, ao passo que, externamente, este percentual foi de 24%, evidenciando o efeito dispersante da cobertura plástica.

Segundo Prados (1986), apud Postinger (1995), o aumento da radiação difusa é bastante desejável, por esta ser mais eficiente para a fotossíntese, pois é multidirecional e penetra melhor no dossel vegetal.

Para Minguez (1994), a radiação solar difusa produz uma maior resposta fotossintética do dossel em função do maior poder de penetração e a uma distribuição mais uniforme dentro da comunidade vegetal.

A radiação solar que penetra no interior da estufa é parcialmente absorvida pelo solo, pelas plantas e pelos objetos presentes neste meio (estruturas metálicas, moirões, vigas de madeira etc.), sendo parte convertida em energia térmica (radiação de onda longa). Esta radiação térmica é irradiada para o espaço e, ao atingir algum material opaco (como a cobertura plástica), fica, em parte, retida neste ambiente, proporcionando uma elevação na temperatura do ar. Este fenômeno é conhecido como “efeito estufa” (TAPIA, 1981 apud FARIAS et al., 1993 a).

Beckmann (2004), cultivando tomate, ao analisar a radiação solar global no mesmo ambiente protegido deste experimento na Universidade Federal de Pelotas, no período de fevereiro a junho de 2003, observou uma transmitância média durante o período de cultivo de 76%, variando entre 63 e 93%. A radiação solar global

incidente no interior do ambiente protegido apresentou um valor médio de $8,5\text{MJ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$, variando de $0,35$ a $18,94\text{MJ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$.

Cultivando abobrinha italiana no período de setembro a dezembro de 2006 no mesmo local deste experimento, Ribeiro (2008) verificou que o valor médio da radiação solar global externa, durante o período de cultivo foi de $19,4\text{MJ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$, variando entre o mínimo de $2,3\text{MJ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$ e o máximo de $28,6\text{MJ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$, enquanto que no ambiente interno, o valor médio foi $14,6\text{MJ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$, variando entre o valor mínimo de $1,6\text{MJ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$ e o máximo de $21,4\text{MJ m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$, resultando em uma transmitância média do plástico de 75%, variando de 67% até 84%.

2.3.2 Temperatura do ar

Analisando-se as normais climatológicas (BOLETIM DA ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA DE PELOTAS, 2007) na região de Pelotas, RS, no período outono inverno, pode-se verificar que ocorrem temperaturas do ar mínimas prejudiciais ao cultivo de feijão-vagem.

O ambiente protegido, estufa plástica, tem se demonstrado eficiente no aumento da temperatura mínima do ar em seu interior. Resultados de experimentos realizados no campus da UFPel demonstram que as temperaturas mínimas e máximas do ar são, em média, no interior do ambiente protegido, superiores ao ambiente externo.

Ao analisar a temperatura do ar no interior de três diferentes tipos de estufas plásticas (Capela, Túnel Alto e Santiago) em Santa Maria e São Pedro do Sul, RS, Buriol et al. (1993) concluíram que, em todas, a temperatura mínima média do interior foi superior a do ambiente externo. Quando a abertura das estufas para ventilação foi menor, as diferenças entre a temperatura externa e a interna foi maior, evidenciando que a vedação das estruturas é um dos principais fatores responsáveis pela redução das perdas energéticas do interior para o ambiente externo. O controle da ventilação fez com que a diferença entre a temperatura interna e externa oscilasse entre $0,8^{\circ}\text{C}$ e $2,3^{\circ}\text{C}$. Apesar da diferença média entre o interior da estufa e o ambiente externo ser positiva, ocorreram muitos dias que a diferença foi negativa, ou seja, a temperatura mínima do ar do ambiente externo foi maior do que a do interior da estufa, fenômeno denominado de "inversão térmica". Esta situação se verifica em dias com ventos fortes que renovam constantemente a

camada de ar junto à superfície do ambiente externo evitando que a temperatura mínima do ar seja muito baixa. Já no interior de estufas, se bem vedadas, não ocorre uma renovação similar ao ambiente externo, verifica-se um progressivo e ininterrupto esfriamento do ar devido às perdas energéticas por radiação e por condução-convecção através do plástico. A ação do vento sobre as paredes externas da estufa impede a formação de uma camada de vapor d'água condensada na face interna do plástico, o que contribui para que as perdas por radiação do interior da estufa sejam elevadas. Outro aspecto que deve ser ressaltado é que, quando esta situação se verifica, as temperaturas mínimas do ar tanto do interior como do exterior da estufa são relativamente elevadas e não existem condições para ocorrência de geadas radiativas.

Para Farias et al. (1993 b) a pequena diferença entre as temperaturas mínimas registradas no ambiente protegido e as temperaturas mínimas registradas no ambiente externo é resultante do fato de que as temperaturas mínimas geralmente ocorrem à noite, onde o efeito da cobertura de polietileno é pouco sentido, em virtude de deixar passar em torno de 80% da radiação de onda longa emitida pelos elementos presentes no interior do ambiente.

Aldrighi (2000), ao comparar os dados temperatura do ar do interior de um ambiente protegido cultivado com feijão-vagem Macarrão Favorito com o ambiente externo no Campus da Universidade Federal de Pelotas, em duas épocas do ano, verificou que a média semanal das temperaturas máximas diárias no interior foram superiores às do ambiente externo, exceto em uma semana (diferença negativa entre o interior e o exterior). Também pôde observar que no período de cultivo de março a junho a diferença entre o ambiente interno e o externo foi maior. Observou-se variações entre 1,3 a 7,9°C no período de outubro a março e entre -3,7 a 11,6°C, no período de março a junho. Quanto às temperaturas mínimas, em média, também foram mais elevadas que no ambiente externo, entretanto, em alguns dias, a temperatura do ar no ambiente interno ficou abaixo a do ambiente externo em ambas as épocas de plantio. Observou-se uma diferença variando de 0,1 a 2,1°C entre o ambiente interno e o externo no período de outubro a março e uma diferença variando entre -2,1 a 1,2°C no período de março a junho. Segundo o autor as temperaturas mínimas não diferiram muito do ambiente interno para o externo, ocorrendo o contrário com as temperaturas máximas. As temperaturas mínimas,

tanto no ambiente externo como no ambiente interno, levaram a um aumento do ciclo do feijão-vagem cultivado de março a junho.

Aldrighi (2004), no campus da UFPel, em estufa plástica tipo “túnel alto” com 8m de largura e 40m de comprimento, cultivando berinjela no período de fevereiro a julho de 2001, pôde verificar a ocorrência de geadas no ambiente externo, entretanto no ambiente interno não ocorreu, demonstrando a eficiência da proteção no cultivo.

Beckmann (2004), ao analisar as temperaturas mínimas em um ambiente protegido cultivado com tomate no campus da Universidade Federal de Pelotas, no período de fevereiro a junho de 2003, observou, durante 54,3% dos dias, que a temperatura média para o período de fevereiro a junho ficou abaixo do intervalo adequado para o desenvolvimento da cultura que é entre 20 e 24°C. Além disso, em 16 dias a temperatura atingiu valores inferiores a 10°C.

Ribeiro (2008), cultivando abobrinha italiana no período de setembro a dezembro de 2006 na mesma estufa em questão, verificou que a temperatura do ar no interior do ambiente protegido, em média, sempre foi superior à do ambiente externo, variando de 0,4 a 4,5°C. A temperatura média diária do ar no período de cultivo foi de 21,3°C no ambiente interno e de 19,4°C no ambiente externo; no ambiente interno, variou entre 16,7°C e 28,1°C, enquanto que, no ambiente externo, variou entre 13,0°C e 26,6°C. O ambiente protegido proporcionou em relação ao ambiente externo um ganho térmico de 1,9°C na média das temperaturas diárias. A temperatura máxima absoluta interna foi superior à externa, sendo que a diferença entre as médias foi de 4,8°C. A diferença entre as mesmas variou de 1,0 a 9,9°C. O valor médio da temperatura máxima no período de cultivo foi de 29,5°C no ambiente interno, e de 24,7°C no ambiente externo. A temperatura mínima absoluta interna foi superior à externa, em média, em 0,2°C. A diferença entre as mesmas variou de 2,4°C e de -2,5°C. O valor médio da temperatura mínima no período de cultivo foi de 15,1°C no ambiente interno e de 14,9°C no ambiente externo.

2.3.3 Temperatura do solo

A temperatura do solo também é afetada pelo efeito estufa sendo mais elevada dentro do ambiente protegido devido ao menor volume de ar e a menor renovação do ar junto à superfície do solo, o que ocasiona menor transferência de

energia na forma de calor latente e calor sensível em comparação com o meio externo, o que provoca maior fluxo de calor para o solo e, conseqüentemente, maior aquecimento do solo no interior do ambiente.

Schneider et al. (1993) mediram a temperatura do solo no interior de estufas de polietileno transparente aditivado de baixa densidade, com espessura de 100 μ m, instaladas no Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria, e a temperatura no ambiente externo. A temperatura do solo foi medida diariamente, nos horários de 9, 15 e 21h. Os resultados evidenciam que, em média, os valores de temperatura do solo sempre foram mais elevados no interior das estufas, independente da profundidade de medida, ano e horário de observação; constataram que nos dias mais frios a diferença de temperatura, entre os dois ambientes, foi mais elevada. Também observaram que o manejo da estufa altera o momento de ocorrência das temperaturas máximas do solo.

Em um experimento com pimentão, em Botucatu, SP, Silva et al. (2003) observaram a temperatura do solo no interior do ambiente protegido, estufa plástica com espessura de 100 μ m, teto em arco, área de 120m². Os autores concluíram que as temperaturas do solo mínima, média e máxima, em média, foram superiores na condição de ambiente protegido, apesar da intensidade da radiação solar ser menor que a verificada na condição de campo.

2.3.4 Umidade relativa do ar

Os valores de umidade relativa do ar (UR) no interior dos ambientes protegidos são muito variáveis, sendo inversamente proporcionais aos valores de temperatura do ar (FARIAS et al., 1993 b). Desta forma, com o aumento da temperatura, durante o dia, a umidade relativa do ar diminui no interior do ambiente, tornando-se praticamente igual ou inferior à observada externamente. Porém, durante a noite, a umidade relativa aumenta bastante chegando a 100%, devido à queda da temperatura e a retenção de vapor d'água pela cobertura plástica. A umidade relativa do ar pode variar no período de 24 horas de 30%, durante o dia, a 100%, durante a noite (MARTINS et al., 1999).

Aldrighi (2000) para o feijão-vagem "Macarrão Favorito", de crescimento indeterminado, cultivado em estufa tipo túnel alto, com 320m² de área, no Campus

da UFPel, no período de março a junho, obteve valores de UR mínima, máxima e média de 66, 100 e 91,79%, respectivamente. Estes valores foram superiores aos medidos no ambiente externo.

Strassburger (2007), em estufa localizada ao lado da utilizada neste trabalho, com cultivo de abóbora italiana, nos períodos de primavera-verão e verão-outono, obteve, para ambos os períodos de cultivo, 98% de umidade relativa do ar média das máximas. A média das mínimas, foi 45,6% (variando de 30% a 80%) no experimento de primavera-verão e 60,3% (variando de 44% a 80%) no experimento de verão-outono.

Ribeiro (2008), cultivando abobrinha italiana, verificou que a média diária da umidade relativa do ar no interior do ambiente protegido no período de cultivo foi de 83%, variando entre 73% e 96%. Os valores médios das umidades relativas do ar máxima e mínima durante o período de cultivo foram de 97% e 58%, respectivamente. A máxima variou entre 93,7% e 100%, e a mínima, entre 38,4% e 93,3%. No ambiente externo, a média diária da umidade relativa durante o período de cultivo foi de 77,4%, variando entre 55% e 96%.

2.3.5 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração representa os processos conjuntos de evaporação e transpiração que ocorrem naturalmente em uma determinada cultura. A transferência da água para a atmosfera ocorre por evaporação da água do solo e por transpiração das plantas. No interior do ambiente protegido, em relação ao ambiente externo, a evapotranspiração é menor. Este fato ocorre em função da diminuição da radiação solar no interior do ambiente protegido, e conseqüentemente do saldo de radiação, além da ventilação interna, geralmente ser menor do que no ambiente externo a UR ser mais alta.

A taxa de evaporação de uma superfície de referência, que ocorre sem restrições de água se conhece como evapotranspiração de cultivo de referência e se denomina ETo. O conceito de evapotranspiração de referência foi introduzido com o objetivo de estudar a demanda evaporativa da atmosfera, independente do tipo e de desenvolvimento do cultivo e das práticas de manejo. Devido a abundância de água, os fatores de solo não interferem na determinação da ETo. É possível comparar

valores de ETo medidos ou estimados em diferentes localidades e em diferentes épocas do ano (ALLEN et al., 1998).

Farias et al. (1994) cultivaram feijão-vagem de crescimento indeterminado em estufa plástica do tipo "capela", com área de 500m² (10 x 50m) e volume aproximado de 1275m³, disposta no sentido norte-sul, com estrutura de madeira (eucalipto) e cobertura de filme de polietileno transparente de baixa densidade (PEBD), com aditivo antiultravioleta e espessura de 0,1mm no Campus da UFPel no período de setembro de 1989 a janeiro de 1990. Neste período foi avaliado a evapotranspiração de referência (ETo) pelos métodos de Penman e do tanque Classe A no interior do ambiente protegido. A ETo estimada para o exterior pelo método de Penman foi sempre superior à verificada no interior, tendo-se encontrado uma ETo, no exterior, de 617,9mm, com média de 5,8mm dia⁻¹, ao passo que no interior, estimou-se a ETo em 439,5mm, ficando a média em 4,1mm dia⁻¹. Comparando-se os resultados obtidos entre os dois ambientes, verificou-se que a ETo no interior correspondeu a 71% da verificada no exterior da estufa plástica. Com o tanque Classe A, obteve-se no exterior uma ETo total de 450,2mm, com média de 4,2mm dia⁻¹. Com o tanque reduzido no interior da estufa, empregando-se o Kp igual a 1,0 obteve-se uma ETo total de 348,1mm e média de 3,3mm dia⁻¹, o que representava cerca de 77% da ETo verificada no exterior. Com o tanque Classe A, foi obtido no interior, uma ETo total de 243,9mm, com média de 2,3mm dia⁻¹, correspondente a 54% da verificada no ambiente externo.

Experimento realizado por Martins e Gonzalez (1995) com feijão-vagem na Faculdade de Agronomia da Universidade Politécnica de Madri, Espanha, durante a primavera, estufa tipo túnel alto, com uma área de superfície de solo coberta de 8,5 x 13,30m, altura máxima superior de 3,10m, estrutura de ferro galvanizado, filme plástico tipo EVA com ventilação e calefação, orientação Norte-Sul, demonstrou que a evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman no interior da estufa variou entre 50 a 60% da evapotranspiração de referência do ambiente externo. A temperatura no interior do ambiente protegido foi mantida entre 12 e 30°C.

Segundo Martins et al. (1999), diversos trabalhos de pesquisa, realizados em vários países, mostram que o consumo hídrico de espécies cultivadas em ambientes protegidos é de 20 a 40% inferior em relação ao cultivo a céu aberto, o

que pode representar uma grande vantagem, já que a água disponível para a agricultura tende a diminuir.

2.3.6 Evaporação no tanque Classe A

O tanque Classe A é um reservatório cujo o nível da água pode ser continuamente medido com precisão. A diferença entre as alturas dos níveis da água em dias consecutivos indica o total evaporado no período. Em função da facilidade de realizar as medições, os valores de evaporação são relacionados com a evapotranspiração de referência e com a evapotranspiração das culturas, cuja medição direta é difícil de ser feita e é onerosa. A evapotranspiração estimada pelo método do tanque Classe A pode ser um dos métodos utilizados para a determinação da necessidade de irrigação da cultura.

A evaporação no tanque Classe A proporciona uma medida do efeito integrado da radiação, vento, temperatura e umidade sobre o processo evaporativo de uma superfície livre com água. Mesmo que o tanque Classe A responda de uma maneira similar aos mesmos fatores climáticos que afetam a transpiração da cultura, vários fatores produzem diferenças significativas entre a perda de água de uma superfície livre evaporante e de uma superfície cultivada (ALLEN et al., 1998).

O tanque Classe A é de pequena dimensão, com paredes laterais expostas diretamente à radiação solar. A água no tanque não sofre impedimento ao processo evaporativo, estando sempre disponível, mesmo durante os períodos secos. Portanto, o valor da evaporação medido no tanque é exagerado em relação à perda efetiva de água da cultura, mesmo ela estando em condições ótimas de suprimento de água do solo. Logo, o valor diário do tanque precisa ser corrigido por um fator de ajuste, denominado de coeficiente do tanque para se ter a evapotranspiração (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

O evaporímetro tanque Classe A é um método de medida da evaporação da água numa superfície livre, amplamente utilizado para estimar a evapotranspiração, com o intuito de fornecer água e suprir deficiências hídricas em culturas agrícolas (CUNHA; ESCOBEDO, 2003).

2.3.7 Evapotranspiração e coeficiente de cultura

Os principais métodos de estimativa da evapotranspiração foram desenvolvidos tomando-se como padrão uma superfície vegetada por plantas de pequeno porte, geralmente a grama, que cobre toda a superfície do solo. Entretanto, essa condição raramente é representativa das condições de uma cultura comercial onde, o plantio em linhas ou em covas, faz com que o terreno seja parcialmente coberto na maior parte do tempo do cultivo. Em algumas culturas, a cobertura do terreno nunca é completa, e dependendo da situação, a evapotranspiração da cultura (ET_c) pode ser menor, igual ou maior que a ET_o . Da necessidade de converter ET_o em ET_c surgiu o conceito de coeficiente de cultura (K_c), isto é, um fator que multiplicado pela ET_o resulta na ET_c (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997).

De acordo com a FAO (ALLEN et al., 1998), para o feijão-vagem temos K_c inicial igual a 0,5, intermediário 1,05, e no final do ciclo, 0,9, salientando que a cobertura plástica do solo pode reduzir a evapotranspiração da cultura entre 10 a 30%.

Curi e Campelo Jr (2001), ao compararem o consumo hídrico do feijoeiro medido por lisímetro de pesagem com a evapotranspiração de referência no período de setembro a novembro de 1998, na Fazenda Experimental da Universidade Federal do Mato Grosso no município de Santo Antônio do Laverger, concluíram que o coeficiente da cultura variou de 0,37 a 1,79, de acordo com o estágio de desenvolvimento, tendo um valor médio de 1,18.

Silveira e Stone (2008) recomendam para o feijoeiro cultivado no sistema convencional os seguintes valores de K_c , de acordo com o estágio de desenvolvimento: germinação ao início da floração 0,69; floração 1,28; desenvolvimento de vagens à maturação 1,04.

Em ambiente protegido, estufa plástica, túnel alto, com 320m² de área, em Pelotas no Campus da UFPel, Duarte et al. (2001), para o feijão-vagem “Macarrão Favorito” de crescimento indeterminado, no período de outubro de 1997 a março de 1998, obtiveram em média uma ET_c de 504,8mm para o ciclo completo, variando de 430 a 578,3mm, conforme as doses de adubação.

De acordo com Farias (1991) é necessário valores variáveis de 300 a 500mm para que as plantas do feijão-vagem de crescimento indeterminado atinjam um bom rendimento.

Para feijão-vagem de crescimento determinado, no período de 19 de setembro a 10 de dezembro de 1988, Gálvez (1990), em Almeria, Espanha, obteve uma E_{Tc} de 88mm, com K_c variando de 0,3 a 0,8.

2.3.8 Balanço de radiação e energia

Para que se possa estudar um sistema sob qualquer ponto de vista, é necessário caracterizá-lo de maneira adequada. O balanço de energia e radiação permite a caracterização dos fluxos energéticos nos cultivos. A essência do balanço de energia está na afirmação de que a diferença entre a energia que entra e a energia que sai de um sistema é a energia captada ou utilizada por ele. No caso do ambiente protegido a energia captada pelo sistema será usada com a finalidade de crescimento e desenvolvimento da plantas (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

O balanço de radiação representa as fontes e sumidouros de energia que afetam as condições meteorológicas e o clima do planeta. O fluxo total de radiação incidente na superfície da terra, chamado de radiação global, é composto por uma componente direta e uma componente difusa. A distribuição da radiação solar é que determina a maioria dos fenômenos no sistema terra-atmosfera (SOUZA; ESCOBEDO, 1997).

No interior do ambiente protegido, a temperatura do ar está ligada ao balanço de energia, que irá depender do tamanho do abrigo, tipo de plástico e das condições meteorológicas locais (BURIOL et al., 1993). Durante o dia, devido à radiação líquida positiva, a superfície aquece a parcela de ar próxima a ela, desencadeando um processo convectivo. A cobertura plástica somada a esse processo convectivo faz com que as temperaturas máximas atingem valores bem superiores aos observados no exterior dos abrigos (SENTELHAS; SANTOS, 1995). À medida que o sol vai se pondo, o balanço de energia vai se tornando negativo e, devido a transmissividade do plástico à radiação de onda longa, há uma perda noturna de energia que faz com que a temperatura do ar no interior do ambiente protegido sofra uma queda acentuada, tendendo a temperatura mínima ser igual ou

ligeiramente superior à do ambiente externo (PEZZOPANE et al., 1995). Porém, em noites claras, a ausência de ventos no interior do ambiente protegido pode baixar a temperatura a valores inferiores a externa, provocando a inversão térmica.

Dentro do ambiente protegido, o dossel da cultura é o elemento mais importante, pois afeta diretamente o microclima e este a própria cultura (fotossíntese, transpiração e crescimento) sendo de grande interesse os processos de troca de energia com o meio.

Cunha et al. (2001) determinaram através da razão de Bowen, o balanço de energia em pimenteiro, sob cultivo protegido e a campo. O cultivo protegido apresentou menor disponibilidade do saldo de radiação, menor variação do fluxo de calor no solo e maiores fluxos de calor sensível, o que favoreceu o maior crescimento, desenvolvimento e produtividade da cultura, nessa condição.

A energia usada nos processos físico-químicos que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera é proveniente da radiação solar. Portanto, é importante o conhecimento da partição dos componentes do balanço de energia sobre a cultura, principalmente o saldo de radiação e os fluxos de calor sensível e latente, para estudos, como por exemplo, das perdas de água da superfície para a atmosfera (evapotranspiração).

2.3.9 Rendimento energético

O rendimento energético representa o aproveitamento da radiação fotossinteticamente ativa interceptada por cada espécie, ou seja, a eficiência da planta em transformar energia solar em energia química (SANTOS et al., 2003).

O rendimento energético em um determinado período, pode ser calculado pela razão entre a matéria seca acumulada e a integral da radiação solar. No cálculo, pode ser utilizado a radiação solar global ou a radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR), incidente ou absorvida pela cultura, desde que indicado na metodologia utilizada (BAILLE, 1998).

Cultivando feijão-vagem, em ambiente protegido, no período de outubro a dezembro de 1994, em Botucatu, SP, Souza (1996) obteve 1218,91g m⁻² de matéria seca acumulada na parte aérea e um saldo de radiação acumulado de 582MJ m⁻² dia⁻¹. Considerando que, em média, a relação entre o saldo de radiação e a radiação solar global incidente foi de 0,66, pode-se estimar que o rendimento energético foi

de $1,38\text{g MJ}^{-1}$ (considerando a matéria seca acumulada na parte aérea e a radiação solar global incidente).

Em Viçosa, MG, no período de outubro de 2000 a fevereiro de 2001, Santos et al. (2003), obtiveram um rendimento energético de $1,96\text{g MJ}^{-1}$ e $1,83\text{g MJ}^{-1}$ para o feijão e de $2,28\text{g MJ}^{-1}$ e $2,53\text{g MJ}^{-1}$ para a soja, antes do florescimento e depois do florescimento, respectivamente, ambos em cultivo a campo com densidade de 5 plantas m^{-2} . Foi utilizado no cálculo matéria seca (folhas, raízes, caules e partes reprodutivas) e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada.

Aldrighi (2004), cultivando berinjela em ambiente protegido no período de fevereiro a junho, em Pelotas, RS, observou um aumento do rendimento energético da radiação fotossinteticamente ativa até 3 de abril ($0,85\text{g MJ}^{-1}$), diminuindo até o final do ciclo de cultivo ($0,62\text{g MJ}^{-1}$). Segundo o autor, fato relacionado às baixas temperaturas e a diminuição da radiação solar global incidente, as quais diminuíram a fitomassa seca das folhas, prejudicando o aparelho fotossintetizador.

Canteri e Godoy (2005), cultivando feijão 'Carioca' de hábito de crescimento indeterminado, em Castro, PR, a campo, de janeiro a abril, obtiveram um rendimento energético de $0,44$ e $0,45\text{g MJ}^{-1}$ para as parcelas sem aplicação de fungicidas e de $0,46\text{g MJ}^{-1}$ para as parcelas com fungicida. Salienta-se que o cálculo foi realizado a partir da radiação solar global absorvida.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental

O experimento foi conduzido de 19 de março a 11 de junho de 2007, na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), localizada no município do Capão do Leão, RS. O clima da região é definido como Cfa, na classificação de Köppen, isto é, clima temperado, inverno frio e úmido, verão quente e chuvas bem distribuídas. O solo onde foi instalado o experimento é classificado como Planossolo Háplico Eutrófico Solódico (EMBRAPA, 2006).

Foi utilizado para a condução da cultura um ambiente protegido com teto em arco apresentando 10m de largura por 18m de comprimento (180m²), altura do pé-direito 3,0m e centro com 4,5m, orientado no sentido Leste/Oeste. O tipo de filme plástico utilizado para cobertura da estufa foi o polietileno de baixa densidade (PEBD) aditivado anti-UV, com espessura de 150µm.

O interior da estufa foi dividido em 15 parcelas experimentais (canteiros) com dimensões de 1,0 x 4,5m (4,5m²), com uma distância entre canteiros (passeio) de 0,6m; foi utilizada a adubação orgânica com vermicomposto bovino (húmus) e calagem, as quais foram realizadas de acordo as recomendações da Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solos (ROLAS, 2004) para a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), levando-se em consideração a análise química do solo e do vermicomposto. As parcelas foram cobertas com filme plástico preto “*mulching*”, com espessura de 10µm, visando a diminuir a ocorrência de infestação por plantas concorrentes.

Foi utilizada a cultivar Macarrão Baixo. O espaçamento utilizado foi de

0,30m entre plantas e 0,5m entre linhas, com 2 linhas por parcela, resultando em 30 plantas por parcela. A área de solo ocupada por cada planta foi de $0,24\text{m}^2$, resultando em uma densidade de 4,17 plantas por m^2 . Neste cálculo foi considerado que cada planta utilizou a metade da distância entre as parcelas (metade do passeio), isto é, 0,3m. O sistema de irrigação utilizado foi do tipo localizado (por gotejamento). A umidade do solo foi mantida próxima à capacidade de campo, ou seja, entre -10 e -33kPa, monitorada por um tensiômetro de coluna de mercúrio instalado a uma profundidade de 15cm.

Na parcela central, foi construído um evapotranspirômetro com 4,5m de comprimento, 1m de largura e 0,6m de profundidade, isolado do solo com filme plástico em suas paredes e fundo, correspondendo ao tamanho das demais parcelas. No evapotranspirômetro foi determinada a evapotranspiração máxima através do consumo hídrico.

A colheita foi realizada antes que as sementes se tornassem perceptíveis pelo lado de fora das vagens.

3.2 Observações agrometeorológicas

Foram monitorados vários parâmetros meteorológicos mediante sensores específicos com registro automático de aquisição de dados, com vistas à caracterização do ambiente no interior da estufa. A fim de comparações, estes dados foram confrontados com os do ambiente externo, sendo utilizados os dados meteorológicos da Estação Agroclimatológica de Pelotas (EAPel) - Convênio EMBRAPA/UFPel (BOLETIM DA ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA DE PELOTAS, 2007), distante aproximadamente 500m do local do experimento.

Na região central da estufa, foi instalado um sistema de aquisição de dados, tipo *microllogger*, Datalogger Modelo CR21 XL - Campbell, com multiplexador acoplado Modelo AM416 Campbell Scientific (32 canais). O registro da medição de cada sensor foi realizado a cada dez segundos e armazenado o valor médio a cada 15 minutos.

Com o propósito de facilitar a análise dos resultados dividiu-se o ciclo de cultivo em três períodos: o período de emergência que compreende os estádios fenológicos V0 e o primeiro dia do estágio V1; o de desenvolvimento vegetativo que representa os estádios fenológicos V1 (a partir de 24/03 - 5 dias após a semeadura)

até o V4; e o do ciclo reprodutivo que vai do estágio fenológico R5 até o final do cultivo.

3.2.1 Radiação solar global no interior e no exterior do ambiente protegido

Os totais diários de radiação solar global incidente no interior do ambiente protegido, medidos por tubo solarímetro, foram comparados com os totais diários de radiação solar global, medidos na Estação Agroclimatológica de Pelotas (BOLETIM DA ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA DE PELOTAS, 2007), a fim de estimar a atenuação na radiação solar causada pelo plástico da cobertura da estufa.

Também foram comparados os valores diários de radiação solar global incidentes no interior do ambiente protegido e na Estação Agroclimatológica de Pelotas com o limite trófico de hortaliças de verão, isto é, $8,4 \text{ MJ m}^{-2}$ (FAO, 1990).

3.2.2 Coeficiente de extinção atmosférica

O coeficiente de extinção atmosférica relaciona a radiação solar na superfície terrestre com a radiação solar no topo da atmosfera. Os dias em que $K_t > 0,6$ são considerados como de céu claro; quando $K_t < 0,4$ são considerados dias nublados; quando K_t variar de 0,4 a 0,6, o dia é considerado parcialmente nublado (SILVA NETO, 2006). Em dias de céu nublado, a radiação solar global é composta por uma grande parte de radiação difusa, em dias claros, este valor diminui para aproximadamente 20%.

$$K_t = \frac{R_g}{R_o} \quad (1)$$

Onde:

K_t - coeficiente de extinção atmosférica fora do ambiente protegido;

R_o - radiação no topo da atmosfera em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;

R_g - radiação solar global na superfície terrestre $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Os valores de R_g foram obtidos no boletim Estação Agroclimatológica de Pelotas (BOLETIM DA ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA DE PELOTAS, 2007).

De acordo com o desenvolvimento matemático apresentado em Vianello e Alves (2002), o valor diário da R_o é calculado, em MJ m^{-2} , pela seguinte expressão:

$$R_o = \frac{24 \cdot 3600 \text{ CS}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \text{ Dj}}{365}\right) \right] \cdot \left[\cos \phi \cos \delta \cos \omega_s + \left(\frac{2 \pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta\right) \right] \quad (2)$$

Onde:

CS - constante solar, em W m^{-2} , segundo a OMM (Organização Meteorológica Mundial) indicam um valor médio de 1367 W m^{-2} ;

Dj - dia juliano;

ϕ - latitude em graus;

δ - declinação solar em graus;

ω_s - ângulo horário do por do sol em graus.

A declinação solar foi obtida através de:

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(\frac{284 + \text{Dj}}{365} 360^\circ\right) \quad (3)$$

O ângulo horário do pôr-do-sol, em graus, foi expresso pela equação:

$$\omega_s = \arccos(-\text{tg} \phi \text{tg} \delta) \quad (4)$$

3.2.3 Temperatura do ar

A temperatura do ar foi monitorada continuamente durante todo o trabalho experimental, através de dois sensores de medida da temperatura do ar Campbell Scientific - Modelo 107 (bulbo seco - ventilação natural) e de dois sensores de medida da temperatura do ar Campbell Scientific - Modelo 107 (bulbo úmido - ventilação natural), instalados a 1m e a 2m de altura, no centro do ambiente (Apêndice - Figura 2C). Foram verificados os valores mínimos e máximos diurno e noturno, além do valor médio diário. A caracterização do período noturno foi determinada pelas medições da radiação solar global incidente no dossel da cultura.

No horário em que a mesma atingiu zero, considerou-se o início da noite, quando o valor da mesma tornou a ser maior que zero considerou-se o começo do dia.

Durante o ciclo da cultura os valores medidos foram comparados com as necessidades de temperaturas mínima e máxima sugeridas por Cermeño (1977).

3.2.4 Temperatura do solo

A temperatura do solo foi monitorada continuamente através de um sensor Campbell Scientific - Modelo 107, à profundidade de 15cm. Da mesma forma que na temperatura do ar, foram verificados os valores mínimos e máximos diurno, noturno, além do valor médio diário. Durante o período de emergência os valores medidos foram comparados com os limites de temperatura mínima e máxima sugeridas por Nascimento (2007); durante o período de desenvolvimento vegetativo e floração-frutificação os valores medidos foram comparados com os limites de temperatura mínima sugerido por Risser et al. (1978) e máxima, sugerido por Nascimento (2007).

3.2.5 Umidade do solo

Para monitoramento contínuo da umidade do solo foi instalado um tensiômetro de coluna de mercúrio na parcela que continha o evapotranspirômetro, a 15cm de profundidade, na zona do sistema radicular.

3.2.6 Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar (UR) foi estimada a partir das medições da temperatura do ar obtidas através dos sensores de bulbo úmido e bulbo seco instalados a 1m de altura no centro do ambiente. Essas temperaturas foram aplicadas nas seguintes equações:

$$UR = 100 (ea / es) \quad (5)$$

$$es = 0,6108 e^{[(17,27 T)/(237,3+T)]} \quad (6)$$

$$e_a = e_{Tu} - 0,0008 P (T - T_u) \quad (7)$$

$$e_{Tu} = 0,6108 e^{\frac{[17,27 T_u]}{(237,3+T_u)}} \quad (8)$$

Onde:

e_s - pressão de saturação do vapor em kPa;

e_a - pressão real do vapor em kPa;

e_{Tu} - pressão de saturação do vapor na temperatura de bulbo úmido em kPa;

T - temperatura do ar (bulbo seco) a 1m de altura em °C;

T_u - temperatura do ar (bulbo úmido) a 1m de altura em °C;

P - média diária da pressão atmosférica em kPa.

3.2.7 Radiação solar global incidente, refletida e transmitida

A radiação solar global incidente (R_i) sobre a cultura foi medida através de um tubo solarímetro colocado a 1,2m de altura acima da superfície do canteiro (Apêndice - Figura 3C). A radiação solar global refletida (R_r) foi medida por um tubo solarímetro da mesma forma que o utilizado para medir a radiação solar global incidente, porém com o elemento sensor voltado para baixo. A radiação solar global transmitida (R_t) foi medida por um tubo solarímetro a 0,1m de altura do canteiro. Valores médios de radiação a cada 15min foram integralizados ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Tais tubos foram construídos artesanalmente, conforme modelo proposto por Steinmetz e Miori (1997), e calibrados com o auxílio de um tubo solarímetro de fabricação industrial marca Delta T, modelo TSL e de um piranômetro de cúpula dupla, marca Kipp & Zonen, modelo CM 6B.

3.2.8 Saldo de radiação

Foi utilizado um saldo-radiômetro da marca REBS, modelo Q7, colocado no centro da estufa a 1,2m de altura da superfície do canteiro (Apêndice - Figura 1C).

Os valores horários médios foram integralizados por dia, da mesma forma que a radiação solar global incidente em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

3.2.9 Velocidade do vento

A velocidade do vento dentro do ambiente foi medida continuamente através de uma anemômetro MET-ONE, Modelo 014A, instalado a 2m de altura da superfície do solo, no centro do ambiente (Apêndice - Figura 4C).

3.2.10 Evaporação do tanque Classe A

Dados diários de evaporação (mm dia^{-1}), foram obtidos em tanque Classe A, instalado no interior da estufa. A medição do nível da água foi feita através de um parafuso micrométrico com precisão de 0,02mm.

3.3 Balanço de radiação

O balanço de radiação, que compreende o balanço de ondas curtas (BOC), o balanço de ondas longas (BOL) e o albedo (α), foi obtido através dos dados medidos de radiação solar global incidente no dossel (R_i), radiação solar global refletida pela cultura (R_r) e pelo saldo de radiação (R_n), através das seguintes equações:

$$\text{BOC} = (1-\alpha) R_i \quad (9)$$

$$\alpha = R_r/R_i \quad (10)$$

$$\text{BOL} = R_n - [(1-\alpha) R_i] \quad (11)$$

Onde:

BOC - balanço de ondas curtas em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;

BOL - balanço de ondas longas em $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;

α - albedo do cultivo (adimensional);

Ri - radiação solar global incidente no dossel da cultura em MJ m⁻² dia⁻¹;

Rn - saldo de radiação em MJ m⁻² dia⁻¹;

Rr - radiação solar global refletida pela cultura em MJ m⁻² dia⁻¹.

3.4 Balanço de energia

O balanço de energia foi determinado através da razão de Bowen (1926) apud Cunha et al. (2001), método utilizado para quantificação dos fluxos de calor latente e sensível na camada de ar próxima ao dossel da cultura, sendo a equação geral do balanço de energia igual a:

$$R_n = H + LE + G \quad (12)$$

Onde:

H - fluxo de calor sensível em MJ m⁻² dia⁻¹;

LE - fluxo de calor latente em MJ m⁻² dia⁻¹;

G - fluxo de calor no solo em MJ m⁻² dia⁻¹.

No cálculo do balanço de energia, os fluxos que chegam foram positivos e os que saem, negativos. Considerou-se o topo da cultura e a superfície do solo, o limite superior e inferior, respectivamente.

A razão de Bowen foi utilizada para a estimativa dos valores de H e LE, através de medições de gradientes psicrométricos na cultura em níveis 1 e 2, através de dois sensores de temperatura do ar (bulbo seco) e de dois sensores de bulbo úmido, com uma distância de 1m entre os níveis, sendo o nível 1 instalado a 1m da superfície do solo e o nível 2 a 2m, e seguindo as equações:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{1}{\left(\frac{s+\gamma}{\gamma}\right)\left(\frac{\Delta T_u}{\Delta T}\right)^{-1}} \quad (13)$$

$$LE = -\frac{R_n - G}{(1 + \beta)} \quad (14)$$

$$H = \beta LE \quad (15)$$

$$\gamma = 0,665 \cdot 10^{-3} P \quad (16)$$

$$s = \frac{4018 \left(0,6108 e^{\frac{[(17,27 T_m)/(237,3+T_m)]}{(T_m + 237,3)^2}} \right)}{(T_m + 237,3)^2} \quad (17)$$

Onde:

β - razão de Bowen;

s - tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água em função da temperatura do ar em kPa °C⁻¹;

γ - coeficiente psicrométrico em kPa °C⁻¹;

P - média diária da pressão atmosférica em k Pa;

T_m - temperatura do ar (bulbo seco) média entre os níveis 1 e 2 em °C;

ΔT_u - diferença entre as temperaturas dos termômetros de bulbo úmido instalados nos níveis 1 e 2 em °C;

ΔT - diferença entre as temperaturas dos termômetros de bulbo seco instalados nos níveis 1 e 2 em °C.

Pode ocorrer no início da manhã e no final da tarde que a diferença dos valores da temperatura entre os dois níveis seja zero. Este caso leva a uma indeterminação no cálculo de β naquele horário. Conforme demonstrado em Righi (2004) este valor pode ser eliminado e substituído pela interpolação do anterior e posterior sem prejuízo ao balanço diário de energia.

O saldo de radiação (R_n) foi obtido através da medida do saldo radiômetro. O fluxo de calor no solo (G), conforme Pereira, Villa Nova e Sediyaama (1997) e Allen et al. (1998), foi desprezado na escala diária.

3.5 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência (E_{To}) obtida pelo método do tanque Classe A foi comparada àquela calculada pelo método padrão FAO Penman-

Monteith, a fim de calibrar o coeficiente do tanque (K_p) para o local, época e condições do experimento.

Para o método do tanque Classe A temos:

$$E_{To} = K_p ECA \quad (18)$$

Onde:

E_{To} - evapotranspiração de referência em mm dia^{-1} ;

K_p - coeficiente do tanque Classe A;

ECA - evaporação do tanque Classe A em mm dia^{-1} .

O coeficiente K_p , que apresenta variação em função da área tampão (bordadura) do tanque, velocidade do vento a 2m de altura e umidade relativa do ar próxima a essa superfície livre de água, foi calculado pelo método recomendado pela Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO (ALLEN et al., 1998), através da expressão:

$$k_p = 0,108 - 0,0286 U_2 + 0,0422 \ln(F) + 0,1434 \ln(UR) - 0,000631 [\ln(F)]^2 \ln(UR) \quad (19)$$

Onde:

F - bordadura em metros (4m);

U_2 - velocidade média diária do vento a 2m de altura em m s^{-1} ;

UR - umidade relativa do ar, média diária, a 2m de altura em %;

ln - logaritmo natural.

A equação FAO Penman-Monteith foi derivada a partir da equação original de Penman-Monteith e das equações de resistência aerodinâmica de cultivo. De acordo com Allen et al. (1998), este é o método padrão para a determinação da evapotranspiração de referência.

$$E_{To} = \frac{0,408 s (R_n - G) + \frac{\gamma 900 U_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (20)$$

Obs.: Os termos da equação foram definidos nos itens anteriores. Neste caso, para o cálculo, foram utilizadas as médias diárias de valores a 2m de altura.

O coeficiente do tanque Classe A, ajustado para o ambiente protegido, cultivado com feijão-vagem (kpa), foi obtido dividindo-se a evapotranspiração de referência, calculada pelo método da FAO, pela evaporação no tanque Classe A.

3.6 Evapotranspiração e coeficiente de cultura

O consumo hídrico foi avaliado em função do potencial mátrico do solo, medido por um tensiômetro de coluna de mercúrio. No momento anterior à sementeira, o solo foi irrigado até atingir o potencial mátrico de -10kPa, ponto superior da capacidade de campo. Com a análise física do solo, foi possível traçar a curva característica de retenção da água. Assim, cada potencial mátrico medido pelo tensiômetro indicou um percentual de água no solo. Sempre que as medidas do tensiômetro indicavam uma redução do potencial mátrico era calculada a quantidade de água a ser irrigada para que se alcançasse -10kPa. Em função da vazão dos gotejadores, a quantidade de água foi convertida em tempo de irrigação. Para fins práticos, as irrigações mantiveram o potencial mátrico entre -10 e -13kPa. Considerando o evapotranspirômetro onde foi instalado o tensiômetro um reservatório fechado (fundo e superfície cobertos com plástico), o consumo hídrico passou a representar a evapotranspiração da cultura sem restrição.

O coeficiente da cultura foi determinado por:

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (21)$$

Onde:

ET_o - evapotranspiração de referência em mm dia⁻¹;

ET_c - evapotranspiração da cultura em mm dia⁻¹;

K_c - coeficiente de cultura.

3.7 Respostas agronômicas

As respostas agronômicas foram verificadas nas seguintes datas: 13 e 23 de abril; 2, 7, 14 e 28 de maio; 11 de junho. Nestas datas foram coletadas 9 plantas, as quais foram levadas para análises em laboratório, através do método destrutivo, isto é, separadas as folhas, caule, botões, flores e vagens. Estas plantas foram utilizadas para determinar a área foliar, peso de matéria fresca e peso de matéria seca.

3.7.1 Fases fenológicas

As fases fenológicas foram observadas a fim de se avaliar o desenvolvimento das plantas de acordo com a aproximação da escala fenológica de Fernandez et al. (1982), apud Vieira (1991). Considerou-se ocorrido o evento fenológico quando aproximadamente 50% das plantas se encontravam nesse estágio. O código V é usado para o período vegetativo e o código R para o período reprodutivo, conforme segue:

- V0 - data do plantio;
- V1 - emergência das plantas;
- V2 - folhas primárias completamente expandidas;
- V3 - primeira folha trifoliolada completamente aberta;
- V4 - terceira folha trifoliolada completamente aberta;
- R5 - aparecimento do primeiro botão floral;
- R6 - aparecimento da primeira flor aberta;
- R7 - aparecimento da primeira vagem;
- R8 - desenvolvimento de sementes (vagem com comprimento máximo);
- R9 - Início da maturação (primeira vagem apresenta mudança de cor).

3.7.2 Índice de área foliar

A área foliar foi medida com base na média das plantas coletadas através de um integrador de área foliar marca LI-COR, modelo 3100.

Em função da área foliar, o índice foi calculado com a fórmula seguinte:

$$IAF = \frac{AF}{AS} \quad (22)$$

Onde:

IAF - índice de área foliar;

AF - área foliar em m²;

AS - área de solo ocupada pela planta em m².

3.7.3 Fitomassa fresca

A fitomassa fresca média por planta em gramas, foi estimada a partir das plantas coletadas, cujas folhas, caule e vagens foram separadas e feita a pesagem em balança de precisão.

3.7.4 Fitomassa seca

Determinou-se a fitomassa seca média por planta em gramas, através das mesmas plantas coletadas para a estimativa da fitomassa fresca. As partes da planta (folhas, caule e vagens) foram armazenadas em sacos de papel e levadas à estufa com ventilação forçada a aproximadamente 65°C, até o peso se tornar constante. Após a secagem, foi feita a pesagem em balança de precisão.

3.7.5 Rendimento

Para avaliar o rendimento médio da cultura por planta foi feito o seguinte cálculo:

$$Rp = \frac{Pv}{NP} \quad (23)$$

Onde:

Rp - rendimento médio por planta em g planta⁻¹;

Pv - peso total das vagens colhidas em g;

NP - número de plantas.

Para avaliar o rendimento da cultura por área foi feito o seguinte cálculo:

$$Ra = Rp NA \quad (24)$$

Onde:

Ra - rendimento por área em $g m^{-2}$;

Rp - rendimento médio por planta em $g planta^{-1}$;

NA - número de plantas por m^2 .

3.7.6 Rendimento energético em função da radiação solar global incidente

$$Ei = \frac{MS}{\sum Ri} \quad (25)$$

Onde:

Ei - rendimento energético em função da radiação solar global incidente em $g MJ^{-1}$;

MS - matéria seca acumulada na parte aérea durante o cultivo em $g m^{-2}$;

$\sum Ri$ - somatório da radiação solar global incidente acumulada em $MJ m^{-2}$.

3.7.7 Rendimento energético em função da radiação fotossinteticamente ativa incidente

$$Ep = \frac{MS}{\sum PARi} \quad (26)$$

Onde:

Ep - rendimento energético em função da radiação fotossinteticamente ativa incidente em $g MJ^{-1}$;

MS - matéria seca acumulada na parte aérea durante o cultivo em $g m^{-2}$;

ΣPAR_i - somatório da radiação fotossinteticamente ativa incidente acumulada em MJ m^{-2} .

A PAR_i , durante o cultivo, foi calculada a partir da relação obtida por Beckmann (2004), para o mesmo local.

$$\Sigma \text{PAR}_i = 0,4 \cdot \Sigma R_i \quad (27)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Observações agrometeorológicas

4.1.1 Radiação solar global no interior e no exterior do ambiente protegido

O comportamento da radiação solar global incidente no interior do ambiente protegido (R_i) e no ambiente externo (R_g) pode ser verificado através da Figura 1. Notou-se que durante o cultivo, em média, a R_i foi 85,07% do valor da R_g , variando de 73,78% a 97,72%. Também pôde-se observar que, em alguns dias, as curvas apresentavam uma grande diferença entre os valores e, em outros, os valores são muito próximos. Dias com valores muito próximos estão relacionados com nebulosidade e precipitação, predominando a radiação solar difusa. Já em dias de céu claro, quando predominava a radiação solar direta, o efeito redutor causado pelo plástico da estufa foi mais intenso. Isto ocorreu porque parte da radiação direta foi bloqueada pelo teto da estufa, enquanto a radiação difusa (proveniente de todas as direções) penetrava no interior do ambiente pelas laterais e portas que permaneceram abertas durante o período diurno.

Para ambiente protegido (estufa plástica tipo capela), no período de 10 a 21 de novembro, cultivado com feijão-vagem em Pelotas, RS, Farias (1993 a) obteve para a mesma relação, um valor de 83% variando de 65 a 90%.

Souza e Escobedo (1997) em um cultivo de feijão-vagem em ambiente protegido (estufa tipo semi-arco) coberto com filme de polietileno, em Botucatu, SP, concluíram que a relação R_i/R_g , em média, para o período de 15 de outubro a 22 de dezembro de 1994, foi de 63%.

Beckmann et al. (2006), cultivando tomate em estufa plástica com cobertura em arco, em Pelotas, RS, no período de janeiro a junho, obtiveram uma relação de 76% entre a radiação solar global no interior do ambiente e a radiação solar global medida na Estação Agrometeorológica de Pelotas, variando entre 63 a 93%. Estes autores comprovaram que a maior diferença entre a radiação solar global no interior e no exterior ocorre em dias de céu claro.

Comparando-se os valores de Ri e Rg com o limite trófico, pôde-se verificar que os mesmos foram menores em 33,3% e 22,6% dos dias, respectivamente. No período vegetativo Ri ficou abaixo do limite em 8 dias e Rg 2 dias; no período reprodutivo Ri ficou abaixo do limite em 20 dias e Rg 17 dias.

Em percentuais, considerando-se o número de dias de cada período e o número de dias em que Ri ficou abaixo do limite trófico, nota-se que em 24,2% dos dias no período vegetativo e em 39,2% dos dias do período reprodutivo Ri ficou abaixo do limite trófico. Rg teve um comportamento semelhante, isto é, maior no período reprodutivo (33,3%) que no período vegetativo (6,1%). Portanto, o maior percentual de dias com Ri e Rg inferiores ao limite trófico ocorreram no período próximo do inverno.

Os valores de Ri e Rg, além de diminuírem com a proximidade do inverno, tiveram uma relação direta com as condições de nebulosidade. Os dias em que os valores ficaram abaixo do limite trófico são aqueles em que o céu estava nublado ou parcialmente nublado. Além das condições de nebulosidade, Buriol et al. (2005) também destaca o grande número de dias com nevoeiro nos meses de maio e julho, no Rio Grande do Sul, como fator causador de dias com valores de radiação solar global inferior ao limite trófico para hortaliças de verão no interior de ambiente protegido.

Valores de Ri inferiores ao limite trófico para hortaliças de verão em ambiente protegido no período de outono em Pelotas, RS, já foram verificados, por outros pesquisadores: Aldrighi (2004) e Beckmann et al. (2006).

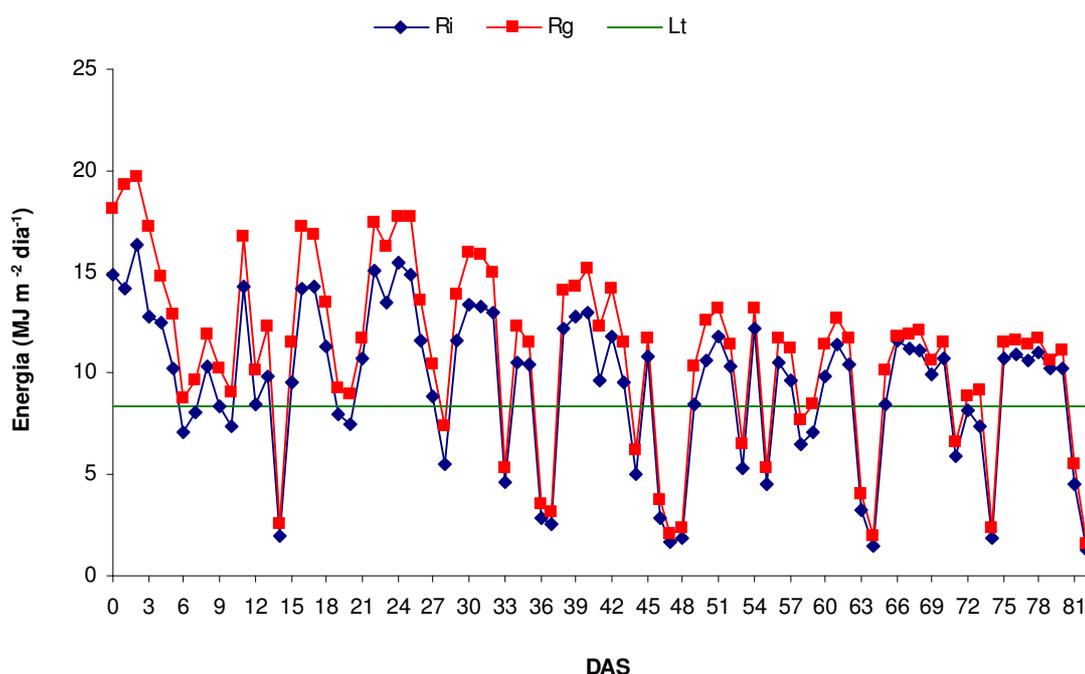


Figura 1 – Radiação solar global incidente no interior do ambiente protegido (Ri), radiação solar global na Estação Agroclimatológica de Pelotas (Rg) e limite trófico (Lt) para hortaliças durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

4.1.2 Coeficiente de extinção atmosférica

Na Figura 2, observa-se a variação do coeficiente de extinção atmosférica durante todo o ciclo da cultura do feijão-vagem. No período, os valores mínimo, máximo e médio foram 0,09, 0,66 e 0,46, respectivamente.

Percentualmente podemos afirmar que durante o ciclo da cultura, 34,5% dos dias foram de céu nublado, 40,5% dos dias foram de céu parcialmente nublado e 25% dos dias foram de céu claro.

No período vegetativo foram dias 12 nublados, 15 parcialmente nublados e 6 dias claros; no reprodutivo foram 17 dias nublados, 19 dias parcialmente nublados e 15 dias claros. A proximidade do inverno, aliada a quantidade de dias nublados e parcialmente nublados levou Ri a valores inferiores ao limite trófico das hortaliças de verão em vários dias.

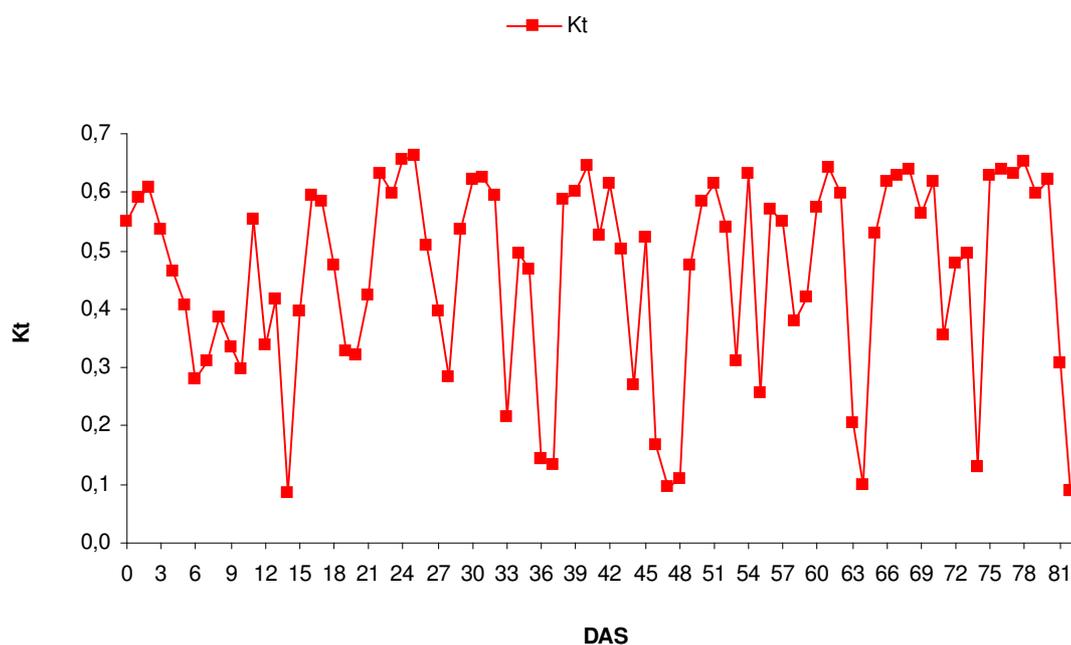


Figura 2 – Coeficiente de extinção atmosférica durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

A cidade de Pelotas, por se localizar bem ao Sul do País, está sujeita a baixas temperaturas durante a estação fria, apresentando grande quantidade de dias nublados e parcialmente nublados, durante todo o ano, o que é perfeitamente explicado pelas freqüentes incursões de sistemas meteorológicos tipo frentes frias, linhas de instabilidade, etc. O índice de limpidez atmosférica média mensal não apresenta níveis muito altos, com média anual em torno de 0,47, concordando com a média obtida neste experimento (MARQUES et al, 2000; SACCO; ASSIS, 2003; SILVEIRA et al, 2000).

4.1.3 Temperatura do ar

Observando-se a Figura 3, verifica-se que durante o período de emergência a temperatura do ar, a 1m de altura do canteiro, ficou acima do limite mínimo para o feijão-vagem. Entretanto, a temperatura máxima no interior do ambiente protegido ultrapassou o valor do limite máximo de 30°C, em alguns períodos, o que totalizou 14h15min de um total de 120h. Portanto, em 11,88% do tempo, a temperatura do ar no interior do ambiente protegido esteve acima do limite máximo sugerido por Cermeño (1977). A temperatura média nesse período foi de 24,5°C.

De acordo com as observações diárias do cultivo, as altas temperaturas dentro do ambiente protegido não causaram nenhum prejuízo à emergência, ficando o tempo de emergência dentro do esperado. O mesmo comportamento foi observado por Aldrighi (2000) para um cultivo de feijão-vagem em ambiente protegido na mesma época do ano em Pelotas, RS.

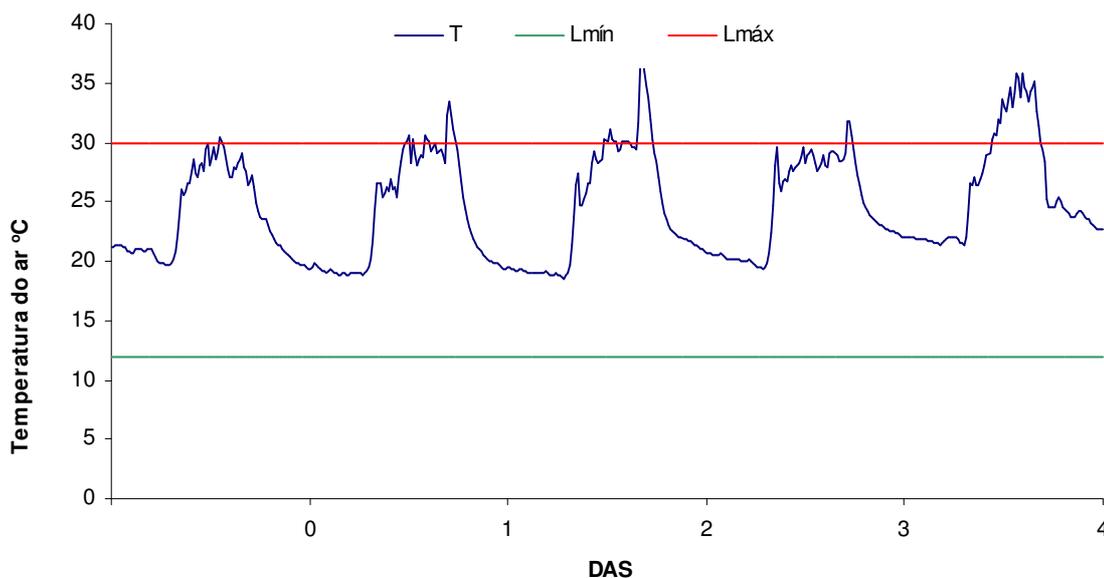


Figura 3 - Temperatura do ar (T), limite mínimo (Lmín) e limite máximo (Lmáx) no período de emergência do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).

De acordo com os valores observados na Figura 4, verificou-se, no período de desenvolvimento vegetativo, que as temperaturas não ultrapassaram os valores limites (10 a 40°C). Apenas em um dia (30 de março – 11 DAS), a temperatura do ar, atingiu o valor do limite máximo e em outro (13 de abril – 25 DAS), o valor mínimo. A temperatura média, neste período, foi de 23,4°C.

Aldrighi (2000) observou uma variação de temperatura entre 19 a 37°C para o mesmo período, em Pelotas, RS, portanto também entre os valores críticos sugeridos por Cermeño (1977). As temperaturas do ar neste período foram favoráveis à cultura, não interferindo na duração do ciclo, visto que o período reprodutivo começou em 21 de abril (33 DAS), concordando com Souza (1996), que obteve o mesmo tempo de duração do ciclo vegetativo com feijão-vagem, rasteiro, em ambiente protegido na primavera.

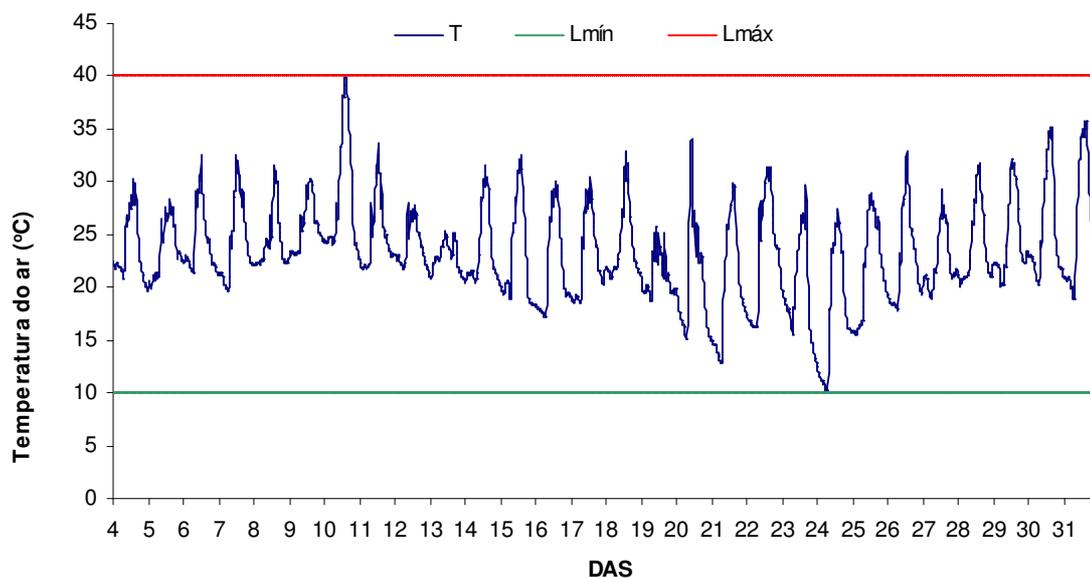


Figura 4 - Temperatura do ar (T), limite mínimo (Lmín) e limite máximo (Lmáx) no período de desenvolvimento vegetativo do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).

Durante o período de floração e frutificação (Figura 5), os valores de temperatura observados no interior do ambiente protegido não ultrapassaram o limite máximo de 40°C sugerido por Cermeño (1977), entretanto por diversas vezes ficaram abaixo do limite mínimo de 12°C. Observou-se, neste período, um total de 1224h e que os valores de temperatura ficaram abaixo do valor mínimo crítico durante 367h à noite e 25h18min durante o dia, o que corresponde a 29,98 e 2,06% do tempo, respectivamente. A temperatura média nesse intervalo de tempo foi de 15,7°C.

Temperaturas abaixo de 12°C começaram a ocorrer após 38 DAS (26 de abril), isto é, entre o final do estágio fenológico R6 (23 de abril - aparecimento da primeira flor aberta) e começo do estágio R7 (28 de abril - aparecimento da primeira vagem). Comparando-se com o experimento realizado por Souza (1996) na primavera, verificou-se que até essa data, os tempos duração dos estádios correspondentes entre ambos são semelhantes. Em seguida, a ocorrência de baixas temperaturas, coincidem com o aumento do tempo de duração de cada estágio fenológico. Os tempos de duração de R7 e R8 foram 26 e 18 dias, respectivamente,

bem superiores aos observados na primavera por Souza (1996): 19 e 9 dias, respectivamente.

Temperaturas abaixo de 12°C também foram observadas por Aldrighi (2000) para a mesma época do ano em Pelotas. Segundo o autor as baixas temperaturas levaram a uma menor duração do tempo de colheita e a uma menor produtividade quando comparado a um cultivo de feijão-vagem no período de primavera-verão.

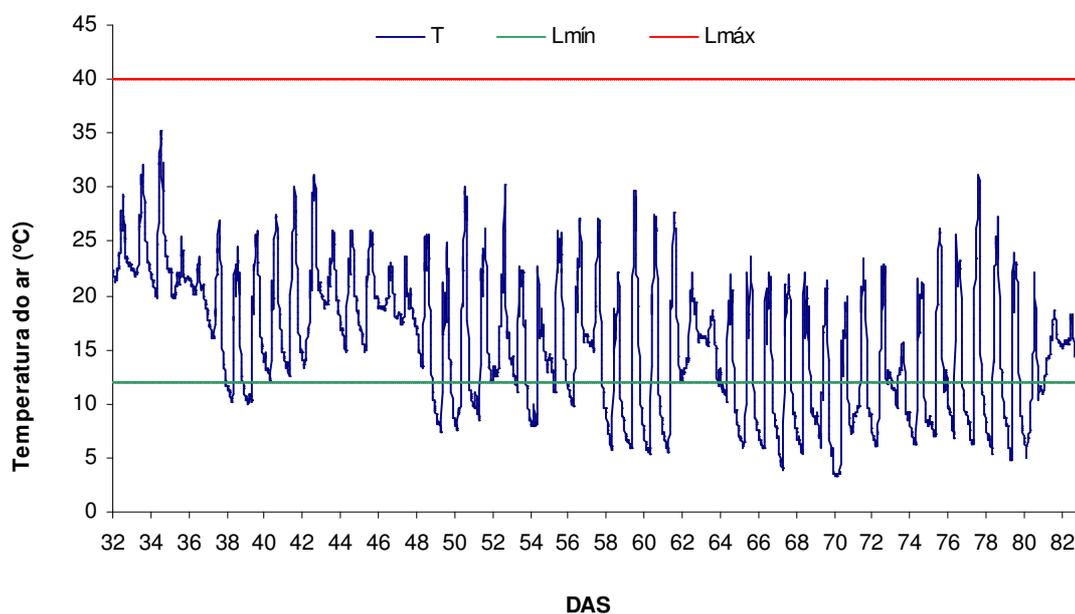


Figura 5 – Temperatura do ar (T), limite mínimo (Lmín) e limite máximo (Lmáx) no período de floração e frutificação do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).

Analisando-se as temperaturas do ar máximas absolutas (Figura 6A), mínimas absolutas (Figura 6B) e médias diárias (Figura 6C), na Estação Agroclimatológica e no ambiente interno da estufa plástica, durante todo o ciclo de cultivo, fica evidenciado a alteração de temperatura provocada pelo ambiente protegido, conforme já demonstrado por outros pesquisadores (SCHALLENBERGER, 2005; DUARTE, 2006) em Itajaí, SC.

As temperaturas máxima absoluta e média diária no interior do ambiente protegido sempre foram superiores as temperaturas registradas na Estação Agroclimatológica, entretanto, a temperatura mínima, em alguns dias, ficou abaixo dos valores. Em 24 dias, ou seja, 28,5% de um total de 84 dias, a temperatura

mínima registrada no interior do ambiente protegido ficou abaixo da mínima registrada na Estação.

A média diária, a média das máximas absolutas e a média das mínimas absolutas, para a estufa, foram 18,8, 27,6 e 13,5°C, respectivamente; na Estação Agroclimatológica foram 16,9, 22,5 e 13,1°C, respectivamente.

Constatou-se que o efeito do ambiente protegido é mais evidente nas temperaturas máximas. As temperaturas mínimas não diferiram muito entre a Estação Agroclimatológica e o ambiente interno à estufa plástica. Para Farias et al. (1993 b) a pequena diferença entre as temperaturas mínimas registradas no ambiente protegido e as temperaturas mínimas registradas no ambiente externo é resultante do fato de que as temperaturas mínimas geralmente ocorrem à noite, quando o efeito da cobertura de polietileno é pouco sentido, em virtude de deixar passar em torno de 80% da radiação de onda longa emitida pelos elementos presentes no interior do ambiente.

Apesar da diferença entre a média das temperaturas mínimas absolutas no ambiente interno e a média das temperaturas mínima absolutas no exterior da estufa ser positiva, ocorreu, em muitos dias, que a diferença entre elas foi negativa, ou seja, a temperatura mínima do ar do ambiente externo era maior do que a do interior da estufa, fenômeno denominado de "inversão térmica". De acordo com Buriol et al. (1993), esta situação se verifica em dias com ventos fortes que renovam, constantemente, a camada de ar junto à superfície do ambiente externo, evitando que a temperatura mínima do ar seja muito baixa. Já no interior da estufa, como não ocorre uma renovação similar ao ambiente externo, ocorre um progressivo e ininterrupto esfriamento do ar, devido às perdas energéticas por radiação e por condução-convecção, através do plástico.

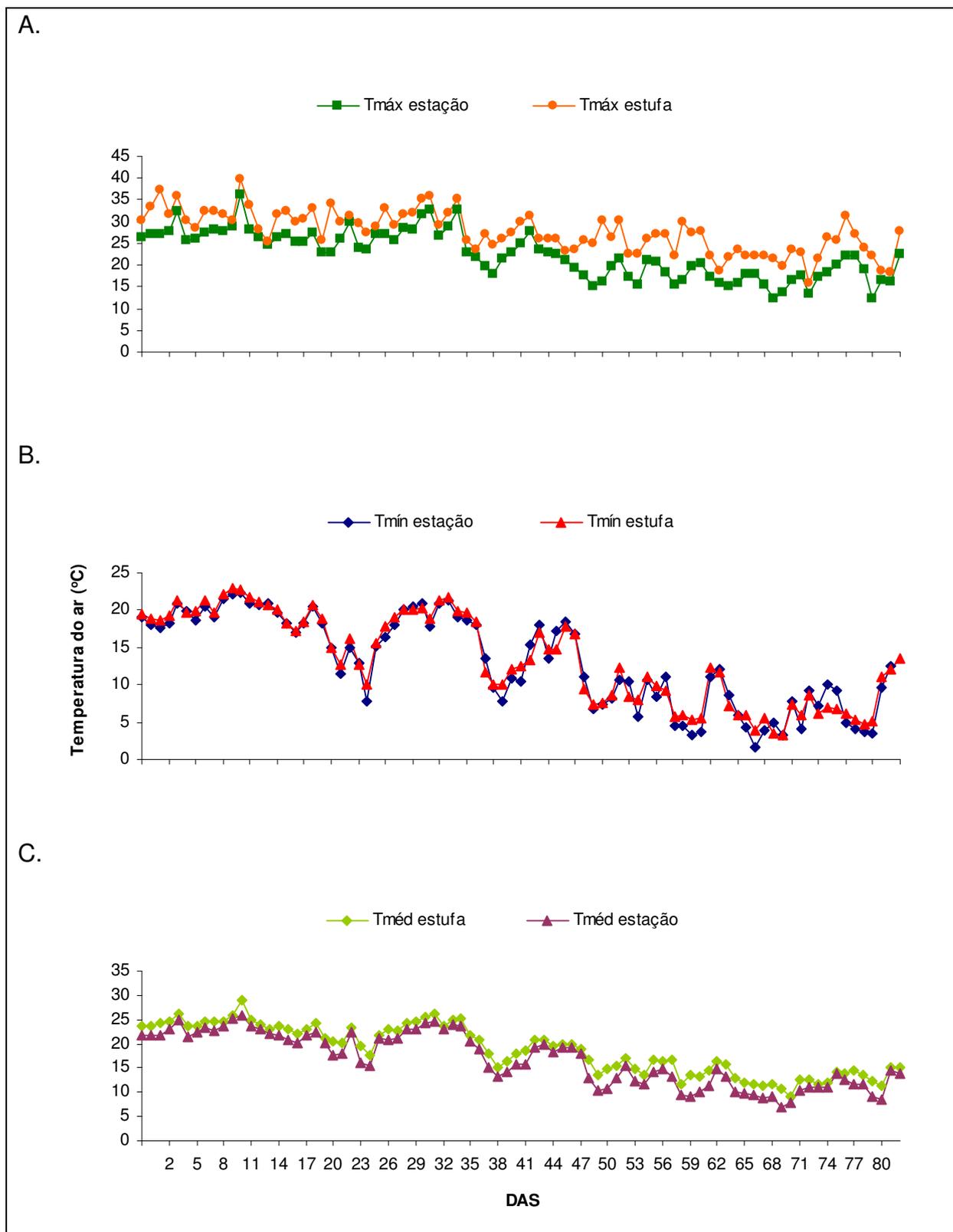


Figura 6 - Temperaturas do ar mínima absoluta ($T_{mín}$), máxima absoluta ($T_{máx}$) e média diária ($T_{méd}$) no interior do ambiente protegido e na Estação Agroclimatológica durante o ciclo do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

4.1.4 Temperatura do solo

Observando-se a Figura 7, verificou-se que durante o período de emergência a temperatura do solo ficou entre os valores críticos para o feijão-vagem. As temperaturas mínima e a máxima do solo foram $26,9^{\circ}\text{C}$ e 32°C , respectivamente, portanto, estão entre os valores críticos sugeridos por Nascimento (2007). A temperatura média do solo, neste período, foi de $29,1^{\circ}\text{C}$.

De acordo com os valores observados na Figura 8, verificou-se que no período de desenvolvimento vegetativo, as temperaturas do solo, não ultrapassaram os valores limites críticos. As temperaturas mínima, máxima e média neste período foram de $24,8$, $29,4$ e $27,2^{\circ}\text{C}$.

Durante o período de floração e frutificação (Figura 9) os valores de temperatura do solo observados no ambiente protegido não ultrapassaram os valores críticos. A temperatura média neste período foi de $19,5^{\circ}\text{C}$. Os valores oscilaram entre um mínimo de $15,1^{\circ}\text{C}$ e um máximo de $17,7^{\circ}\text{C}$.

Diferente da temperatura do ar, notou-se que a temperatura do solo se manteve entre os limites críticos sugeridos pelos pesquisadores. Fato, provavelmente, relacionado à cobertura do solo pelo “*mulching*” preto.

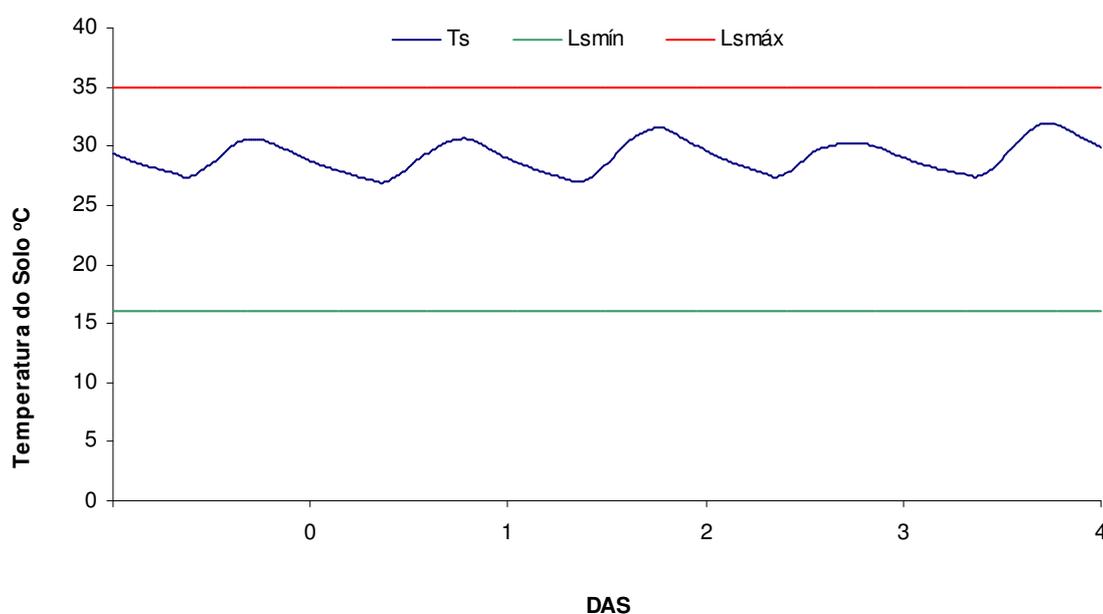


Figura 7 - Temperatura do solo (Ts), limite mínimo (Lsmín) e limite máximo (Lsmáx) no período de emergência do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).

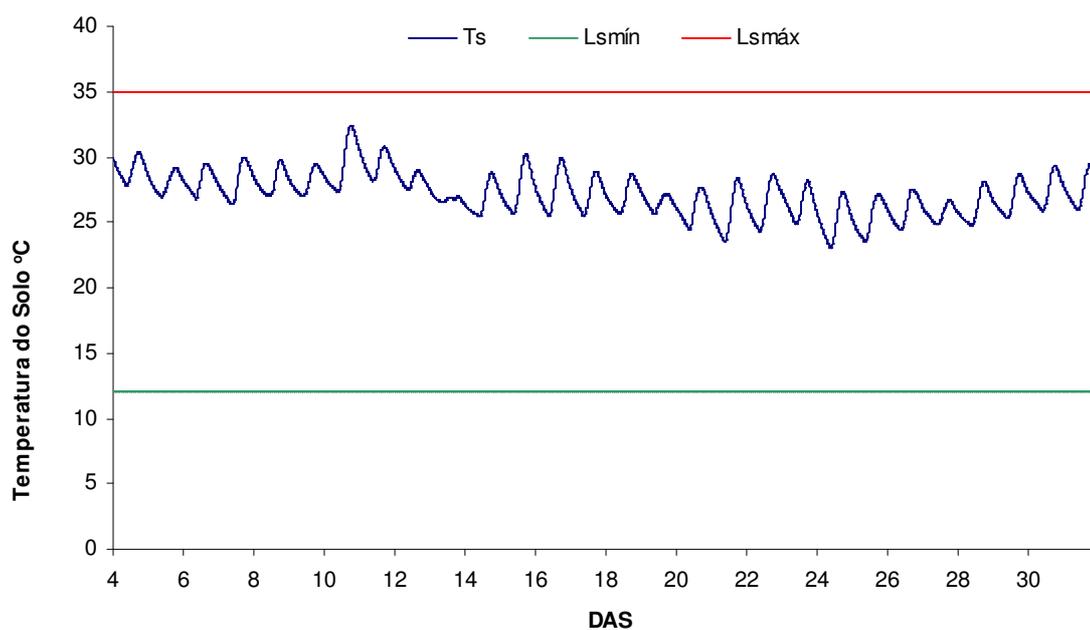


Figura 8 - Temperatura do solo (Ts), limite mínimo (Lsmín) e limite máximo (Lsmáx) no período de desenvolvimento vegetativo do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).

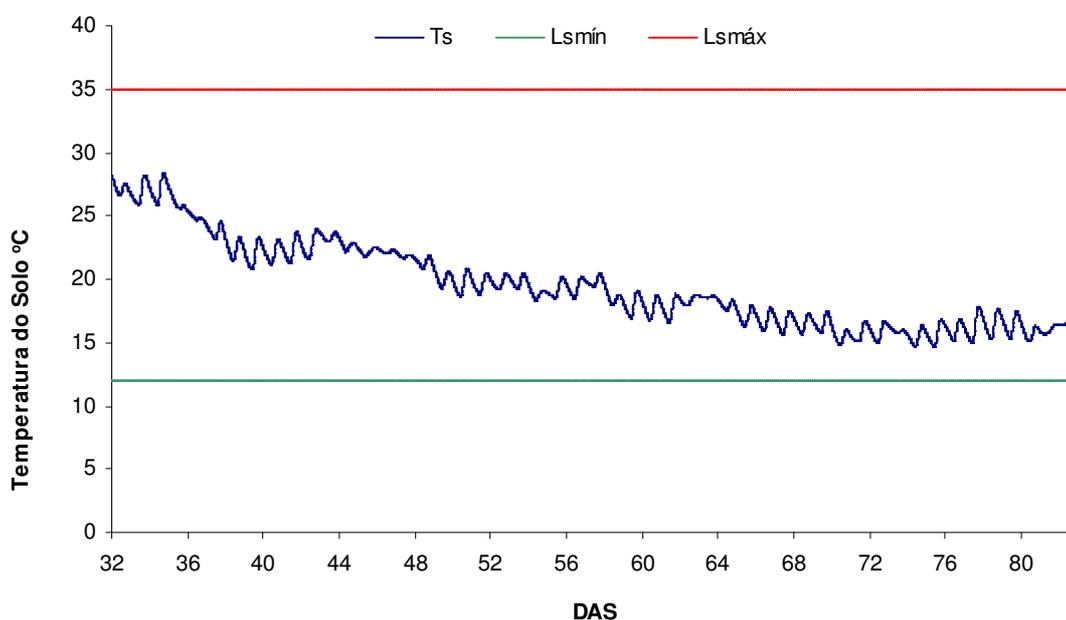


Figura 9 – Temperatura do solo (Ts), limite mínimo (Lsmín) e limite máximo (Lsmáx) no período de floração e frutificação do feijão-vagem cultivado em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).

Pires et al. (2004), realizando dois experimentos com morangueiro, um em cultivo protegido (estufa plástica tipo capela com 7m de largura e 50m de comprimento) e outro a céu aberto em Atibaia, SP, observaram que, sob plástico preto, no cultivo protegido, a temperatura máxima do solo atingiu valores maiores que os observados a campo aberto, sendo a maior diferença de 4,0°C e, em média, 2,2°C, no período. Portanto, o aumento de temperatura do solo proporcionado pelo “mulching” contribuiu para que as temperaturas solo ficassem entre os limites sugeridos para a cultura.

4.1.5 Umidade relativa do ar

Através da Figura 10, pôde-se verificar que a umidade relativa do ar ultrapassou o valor do limite crítico de 75%, em todos os dias, ficando abaixo do valor do limite mínimo de 60%, apenas em um dia (21 de março – 2 DAS). Os valores mínimo, máximo e médio registrados durante o ciclo da cultura foram de 59,88, 100 e 91,71%.

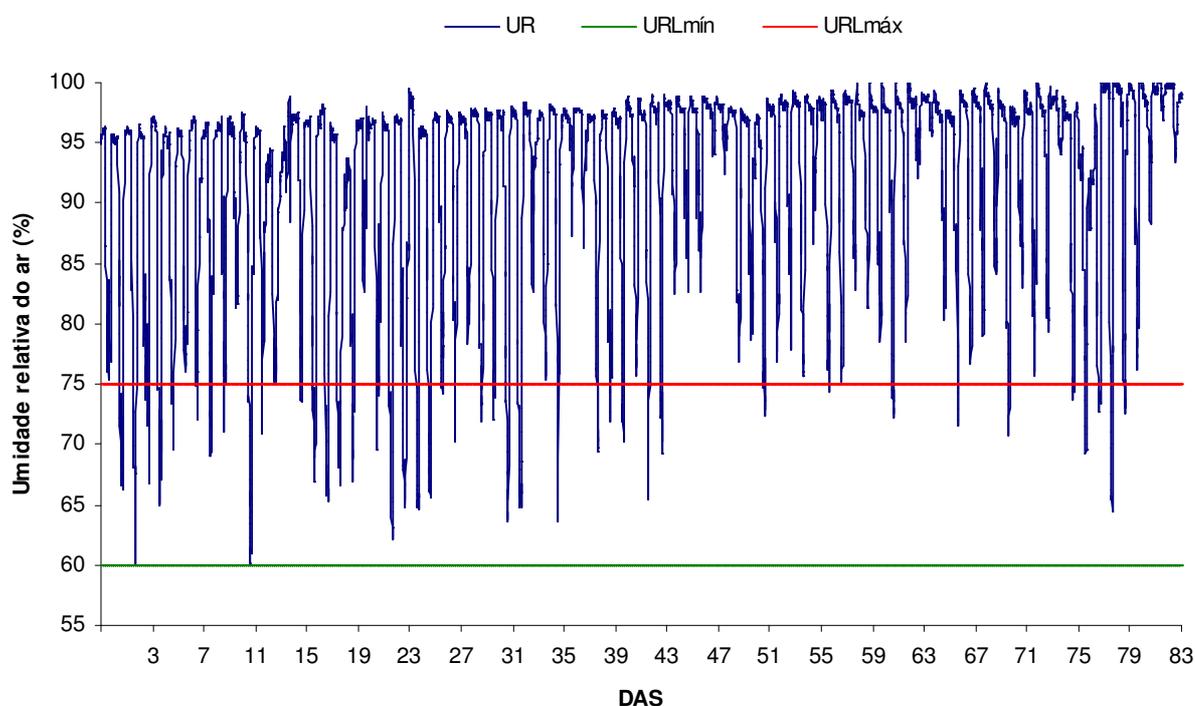


Figura 10 – Umidade relativa do ar (UR), limite mínimo (URLmín) e limite máximo (URLmáx) no interior do ambiente protegido durante o ciclo do feijão-vagem, Pelotas, RS, 2007 (médias de 15min).

No período de emergência, a umidade relativa do ar esteve acima do valor crítico, durante 81,04% do tempo, sendo que 55,83% à noite e 25,21% ao dia. No desenvolvimento vegetativo, a UR ficou acima do valor crítico em 84,52% do tempo, sendo que 55,82% foi à noite e 28,70% durante o dia. Na floração e frutificação, em 96,75% do tempo, a UR esteve acima do valor crítico, sendo 62,05% à noite e 34,70% de dia. O percentual maior à noite, relaciona-se diretamente com a temperatura do ar, já que a mesma apresenta-se em declínio neste período. Também verificou-se o aumento dos percentuais com o final do ciclo do cultivo o que está relacionado com as baixas temperaturas ocorridas com a proximidade do inverno. Além disso, em dias chuvosos, também se verificaram altos valores de umidade relativa do ar durante todo o dia conforme pôde ser observado em 2 de abril, 5 de maio e 9 de junho, por exemplo.

A Tabela 1 mostra que os valores de umidade relativa do ar aumentaram com o tempo de desenvolvimento da cultura. Somente no último período do ciclo, com a aproximação do inverno e a conseqüente queda acentuada da temperatura do ar a umidade relativa do ar chegou a 100%, o que não aconteceu nos períodos anteriores onde ocorreram temperaturas mais elevadas.

Tabela 1 – Umidade relativa mínima absoluta (UR_{mín}), umidade relativa máxima absoluta (UR_{máx}) e umidade relativa média do ar no interior do ambiente protegido em cada período do ciclo do feijão-vagem, Pelotas, RS, 2007.

	U _{mín} (%)	U _{máx} (%)	UR média (%)
Emergência	59,88	97,18	87,05
Desenvolvimento Vegetativo	60,17	99,59	88,98
Floração Frutificação	63,55	100,00	93,70

Aldrighi (2000), cultivando feijão-vagem em ambiente protegido, em Pelotas, na mesma época do ano, também obteve valores semelhantes de UR para todo o ciclo da cultura, quando a mínima, máxima e média foram de 66, 100 e 91,79%, respectivamente.

4.2 Balanço de radiação

Através da Figura 11, observa-se que a tendência da radiação solar global incidente sobre o cultivo (R_i) foi diminuir com a aproximação do inverno. Esta diminuição da radiação incidente faz com que ocorra o mesmo com os demais componentes do balanço de radiação.

No dia 21 de março (2 DAS), ocorreu o máximo valor de radiação solar incidente no interior do ambiente protegido, o que proporcionou também o máximo saldo de radiação, o máximo de radiação solar transmitida e o máximo valor do balanço de ondas curtas. O valor mínimo de radiação solar incidente no interior ocorreu no dia 9 de junho (82 DAS), porém não coincidindo com a data em que se verificou o valor mínimo para os demais componentes do balanço de radiação. Valores baixos de R_i estão relacionados a dias com alta nebulosidade e com precipitação, como ocorreu em 4 de maio (46 DAS), quando o BOL se tornou positivo. O valor positivo indica que, o ganho superou as perdas. Nesse dia, provavelmente, a alta UR do ar ocasionou a condensação de vapor no teto da estufa que impediu a perda de energia por onda longa, aumentando a contra- radiação atmosférica (por reflexão no teto e por aumento do calor sensível) fazendo-a superior às perdas do cultivo.

Os valores mínimo, máximo, médio e o total do ciclo, em MJ m^{-2} , dos componentes do balanço de radiação são apresentados na Tabela 2.

Aldrighi (2004), cultivando berinjela em um ambiente protegido, no mesmo local deste experimento, obteve um valor médio de $7,53\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para a radiação solar global incidente no interior da estufa, nos meses de fevereiro a julho. O autor observou a diminuição da média mensal da radiação solar global com a aproximação do inverno, o que aumentou o ciclo de cultivo em relação ao esperado.

Comportamento semelhante também foi observado por Beckmann (2004), cultivando tomate no mesmo local deste experimento. Ao analisar a radiação solar global no interior do ambiente protegido, obteve um valor médio de $8,5\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ no período de 28/02/2003 a 12/06/2003. Com a aproximação do inverno os valores de radiação solar global foram diminuindo o que provavelmente influenciou na baixa produção de matéria seca.

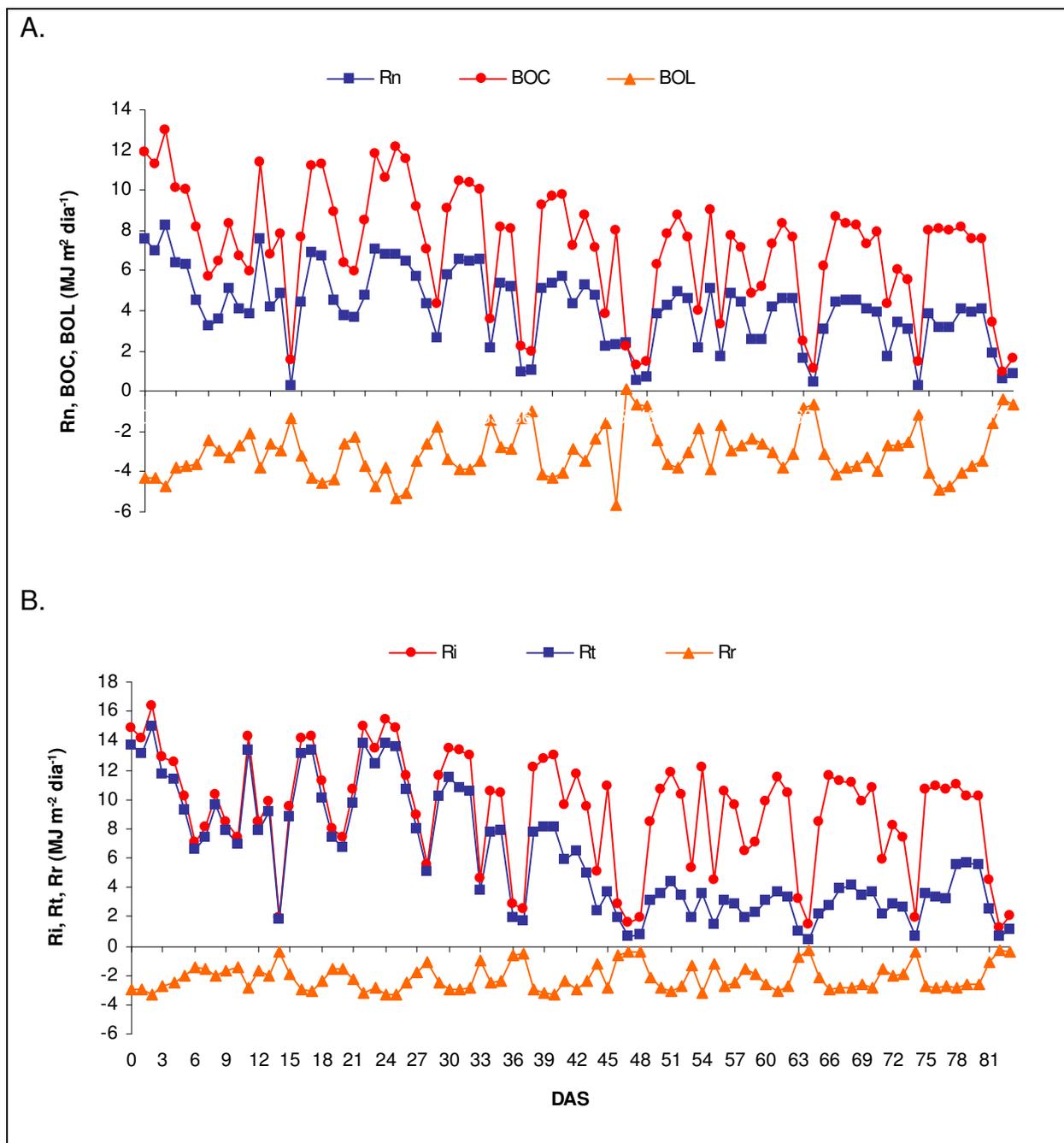


Figura 11 – Saldo de radiação (Rn), balanço de ondas curtas (BOC) e balanço de ondas longas (BOL), radiação solar incidente sobre o dossel (Ri), radiação solar refletida pelo dossel (Rr) e radiação solar transmitida através do dossel (Rt), durante o ciclo do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

Tabela 2 – Saldo de radiação (Rn), radiação solar transmitida através do dossel (Rt), radiação solar refletida pelo dossel (Rr), radiação solar incidente sobre o dossel (Ri), balanço de ondas curtas (BOC) e balanço de ondas longas (BOL) em MJ m⁻² dia⁻¹ durante o ciclo do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

	Rn	Rt	Rr	Ri	BOC	BOL
mínimo	0,27	0,41	-3,35	1,25	0,99	-5,64
máximo	8,21	14,92	-0,26	16,31	12,96	0,14
média	4,10	6,06	-2,17	9,31	7,14	-3,04
Total	344,72	509,38	-181,88	781,72	599,84	-255,12

Na Tabela 3, observa-se a diminuição na relação Rn/Ri, Rt/Ri e BOC/Ri e um aumento na relação Rr/Ri e BOL/Ri no decorrer do ciclo da cultura, fato semelhante ao ocorrido em um experimento com a cultura do feijão-vagem, no período de outubro a dezembro em Botucatu, SP, realizado por Souza e Escobedo (1997). Segundo os autores estes fatos estão relacionados com o aumento da área foliar que, por sua vez, aumenta a perda por reflexão e, conseqüentemente, a perda da radiação de ondas curtas. A maior área foliar diminui os espaços entre as linhas e entre as plantas, aumentando a área de reflexão da radiação solar e diminuindo a radiação solar transmitida para o solo. Durante o experimento, foram observadas, em média, as seguintes relações: Rn/Ri=66% e BOL/Ri=-10%.

Cabe salientar que no início do cultivo a relação Rt/Ri é aproximadamente 100% (emergência e início do desenvolvimento vegetativo), sendo que a radiação que chega no tubo solarímetro superior, que capta a radiação solar global incidente (Ri), praticamente igual a radiação solar que chega no solo (Rt). Pequenas diferenças de valor ocorrem em função da altura e do sombreamento causado pela estrutura de sustentação da estufa e dos instrumentos. Apenas com o passar do tempo as plantas crescem e começam a sombrear o tubo inferior, fazendo com que no ciclo de floração e frutificação a relação Rt/Ri seja, em média 54%. Percentualmente a soma Rr/Ri e Rt/Ri é maior do que 100% no início, já que Rt e Ri são praticamente iguais. A radiação refletida no início do cultivo é representada pela reflexão do solo (passeios) e do “mulching” (canteiros), os quais ficam abaixo do

sensor que capta a R_t . Certo tempo após a emergência a reflexão das plantas passa a contribuir com a relação R_r/R_i , aumentando até 24%. Nota-se que nesta fase a reflexão (dossel) fica acima do sensor que capta a R_t , passando o somatório R_r/R_i com R_t/R_i ser menor que 100%.

Tabela 3 – Relação entre saldo de radiação (R_n), radiação solar transmitida através do dossel (R_t), radiação solar refletida pelo dossel (R_r), balanço de ondas curtas (BOC), balanço de ondas longas (BOL) e radiação solar incidente sobre o dossel (R_i) durante o ciclo do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

	R_n/R_i	R_t/R_i	R_r/R_i	BOC/ R_i	BOL/ R_i
Emergência	50%	92%	20%	80%	30%
Desenvolvimento Vegetativo	47%	92%	20%	80%	32%
Floração Frutificação	42%	54%	24%	76%	33%
Média	46%	79%	21%	78%	32%

Os resultados foram semelhantes aos de Schiedeck (2002), que ao cultivar meloeiro, em ambiente protegido, em Pelotas, RS, no período de fevereiro a abril, obteve uma diminuição das relações R_n/R_i (média de 53%) e BOC/ R_i (média de 76%); também houve um aumento durante o ciclo de cultivo da relação BOL/ R_i (média de 21%).

Cultivando abóbora italiana, no mesmo ambiente protegido deste experimento, Ribeiro (2008), obteve para a relação BOC/ R_i um comportamento semelhante, isto é, uma diminuição durante o ciclo da cultura, comportamento relacionado ao aumento do albedo que está diretamente relacionado com o aumento da área foliar. Para a relação BOL/ R_i , também foi observado uma diminuição ao longo do ciclo, fato explicado pelas diferentes épocas de cultivo. O feijão-vagem foi cultivado no outono, e a abobrinha, na primavera.

4.2.1 Balanço de radiação em dias de céu claro e céu nublado

Os componentes do balanço de radiação analisados no período diurno, entre 8h30min e 17h, Figura 12, mostram como a cobertura do céu influencia os mesmos. Os valores máximos de R_n , BOC e BOL foram de 298,1, 388,5 e -117,2W

m^{-2} , respectivamente, com céu claro (18/05/07) e 119,1, 145,3 e $-26,2\text{W m}^{-2}$, respectivamente, com céu nublado (21/05/07). Proporcionalmente, nota-se que o BOL foi mais influenciado pela cobertura de nuvens que os demais componentes. Os valores negativos do BOL, durante o período diurno, representam que a contra-irradiação atmosférica foi inferior à perda de energia pela cultura e pelo solo (RIBEIRO, 2008).

A radiação solar global incidente, a refletida e a transmitida também foram afetadas pela cobertura do céu. Os valores máximos de R_i , R_r e R_t atingiram um valor de 514,3, -125,8 e $182,8\text{W m}^{-2}$, respectivamente, com céu claro, e 190,4, -45,3 e $54,3\text{W m}^{-2}$, respectivamente, com céu nublado.

No dia 18/05/07, notou-se um decréscimo na radiação solar global incidente às 11h e depois entre 12h45min e 13h45min, o que está relacionado à presença de algumas nuvens nestes períodos. Como consequência, houve um decréscimo mais acentuado no R_n e no BOC. As curvas dos demais componentes não sofreram tão intensamente tal influência.

Quanto às perdas de energia através do dossel da cultura no período diurno, pôde-se verificar que a radiação solar global refletida é aproximadamente equivalente ao balanço de ondas longas. Comportamento semelhante foi observado por Souza e Escobedo (1997) no cultivo de feijão-vagem, em ambiente protegido.

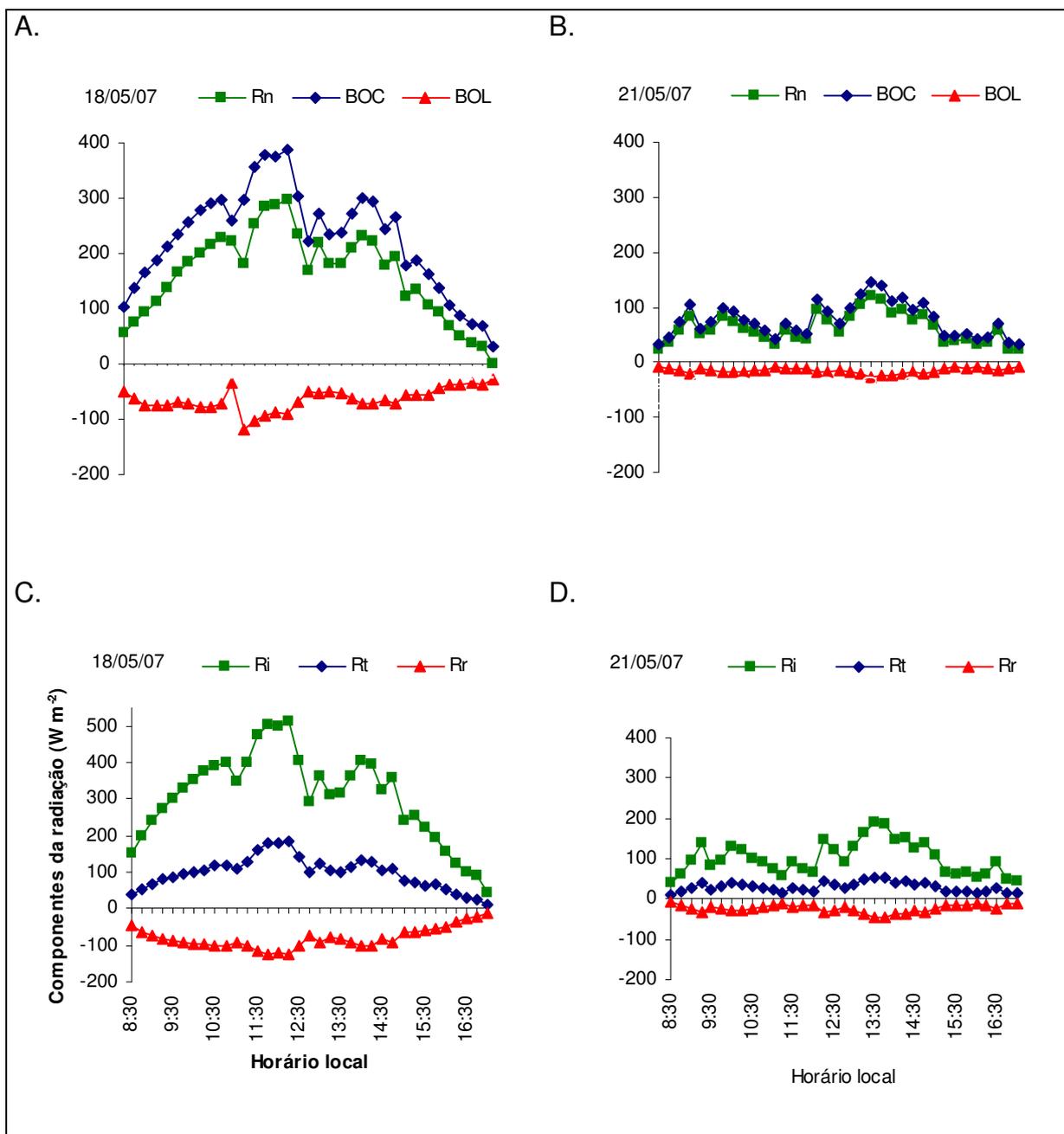


Figura 12 - Saldo de radiação (Rn), balanço de ondas curtas (BOC), balanço de ondas longas (BOL), radiação solar global incidente (Ri), radiação solar global refletida (Rr) e radiação solar global transmitida através do dossel (Rt), durante um dia de céu claro (18/05/07) e num dia de céu nublado (21/05/07), em ambiente protegido cultivado com feijão-vagem, Pelotas, RS, 2007.

4.2.2 Albedo da cultura

A Figura 13 mostra a variação do albedo do feijão-vagem durante todo o ciclo da cultura. Observa-se que no início do ciclo o albedo é menor, aumentando posteriormente e com tendência a diminuir no final do ciclo da cultura. O seu valor mínimo, na fase inicial de desenvolvimento da cultura, está relacionado ao baixo índice de área foliar, predominando o valor de albedo representado pela cor preta do “*mulching*” que reflete pouco a radiação solar incidente.

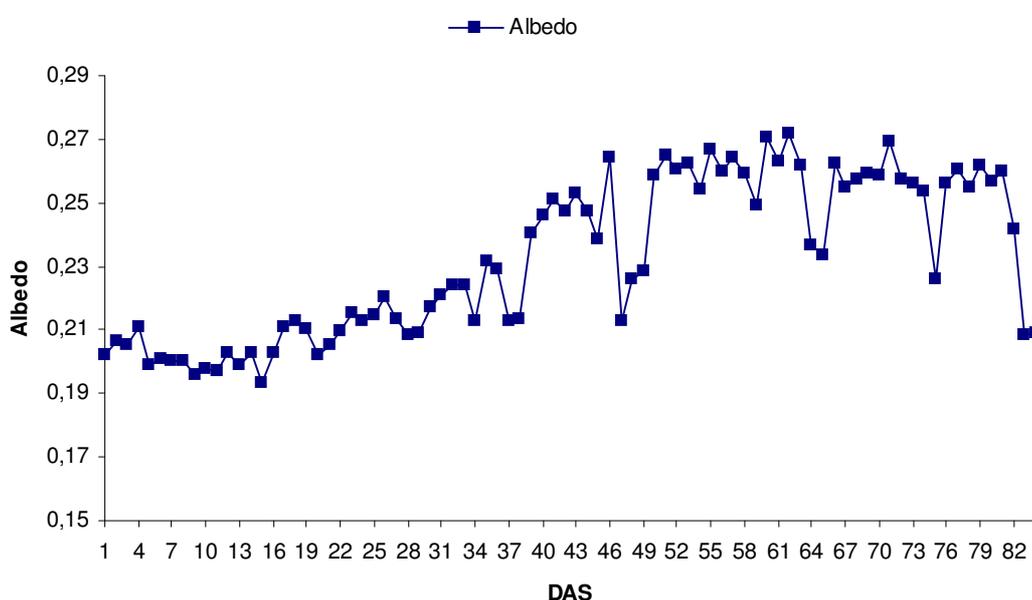
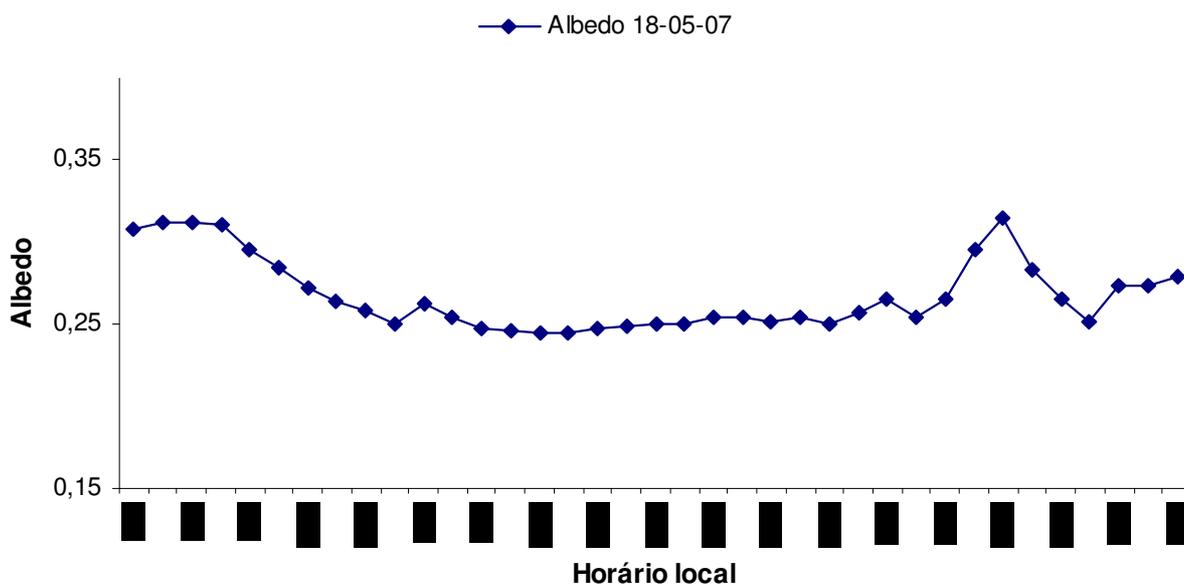


Figura 13 – Variação do albedo durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

No decorrer do desenvolvimento das plantas, com o aumento da área foliar, o albedo passa a ser determinado pelas características da cultura e no final do ciclo, com a senescência e a queda de folhas, tende a diminuir. O valor médio do albedo para o ciclo total foi de 0,23, variando entre 0,19 no dia 2 de abril (14 DAS) e 0,27 no dia 19 de maio (61 DAS). Para a mesma cultura em ambiente protegido, Souza (1996), no período de outubro a dezembro, obteve um albedo mínimo de 0,20 no início do ciclo e um máximo de 0,24, em período posterior, tendendo a diminuir na fase reprodutiva.

Durante um dia de céu claro (18-05-07), Figura 14, observou-se que os maiores valores de albedo encontraram-se em dois períodos: no início da manhã e no final da tarde, o que é perfeitamente explicável pelo fato de os raios solares incidirem na cultura em um ângulo próximo de 90° em relação a normal do local, isto é, praticamente tangente à superfície, o que aumenta a fração da radiação solar que é refletida, conforme descrito por Galvani et al. (2000). Ainda nessa figura, observa-se que houve uma diminuição do albedo após as 16h, o que foi provocado momentaneamente, pela presença de nuvens que resultam na predominância da radiação solar difusa, com conseqüente alteração no albedo da cultura. O valor do albedo calculado em função dos totais diários de radiação solar global e radiação solar refletida pela cultura foi de 0,26, com um valor instantâneo mínimo de 0,24 ocorrido entre às 12h e 12h 15min e o valor instantâneo máximo foi de 0,31 entre às 8h 30min e 9h 15min.



que explica a menor variação do albedo em relação a um dia de céu claro. Nesse dia, o albedo calculado em função dos totais diários de radiação solar global incidente e refletida foi de 0,24, com valor instantâneo mínimo de 0,22, às 8h30min e valor máximo de 0,27 às 17h30min.

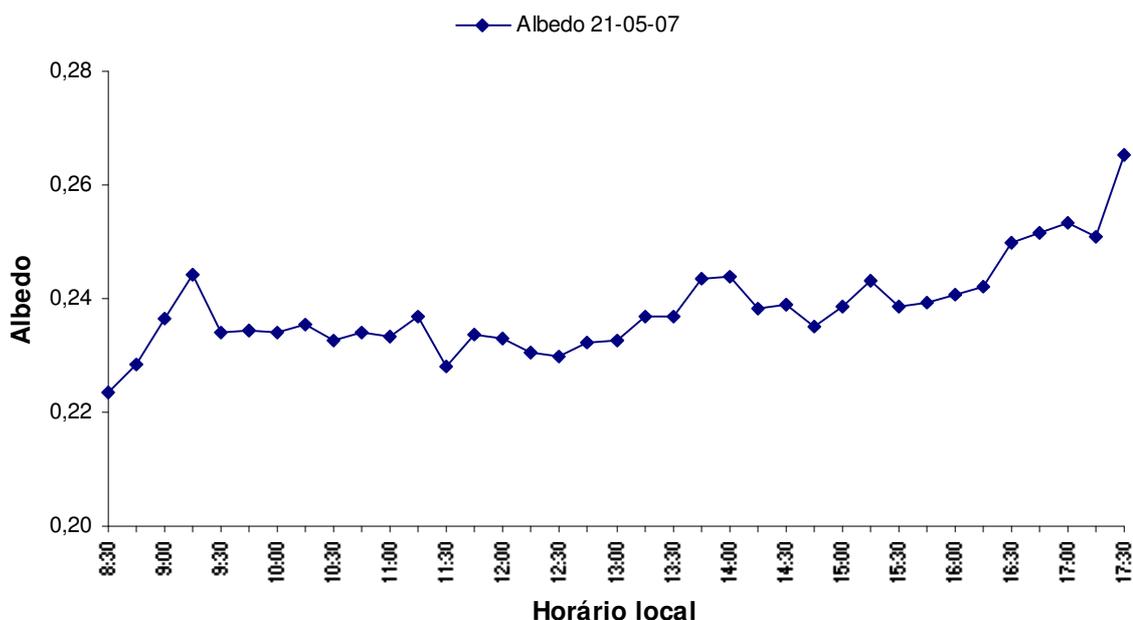


Figura 15 – Variação do albedo do feijão-vagem em ambiente protegido, durante um dia de céu nublado, Pelotas, RS, 2007.

4.3 Balanço de energia

Observando-se o balanço de energia para o ciclo do feijão-vagem na Figura 16, verifica-se que a tendência do saldo de radiação é diminuir com a proximidade do inverno, apresentando um valor mínimo de $0,27 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, no dia 2 de abril. O valor máximo de $8,21 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ocorreu no dia 21 de março. O valor médio, para todo o ciclo, foi de $4,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. LE variou entre $-6,65$ e $0,20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com valor médio de $-3,35 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$; H oscilou entre $-3,28$ e $1,65 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com um valor médio de $-0,75 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Quanto aos valores de LE e H, pode-se observar que, respeitando-se as convenções de sinais, o somatório é igual a R_n , entretanto, em alguns dias, H se tornou positivo conforme já foi observado por Galvani e Escobedo (2001), na cultura do pepineiro em ambiente protegido, fato que está

relacionado à advecção de calor sensível causada pelo vento, o que aumenta a energia disponível para a evapotranspiração.

Dias com fluxo de calor latente muito baixos estão relacionados com valores muito altos de umidade relativa do ar, causados por precipitação pluviométrica, baixos valores de radiação solar global e baixas temperaturas. Silva (2005), em um cultivo de maracujazeiro em Piracicaba, SP, relata que as chuvas e as irrigações realizadas por meio de microaspersão tiveram relação direta com os valores de LE.

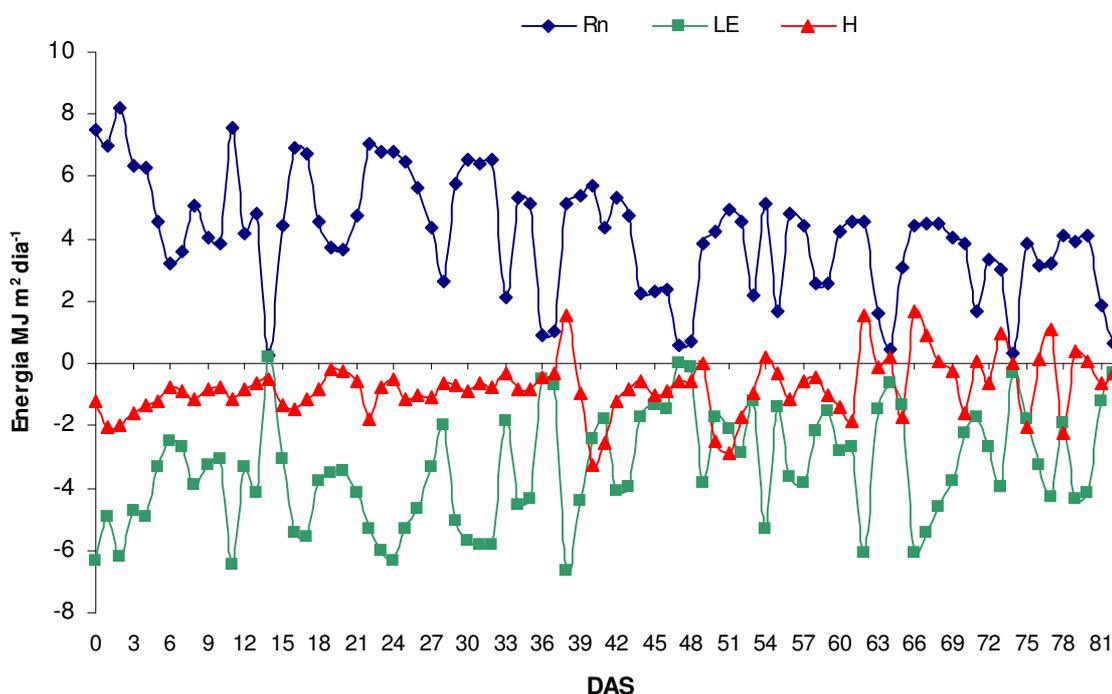


Figura 16 – Balanço de energia no interior do ambiente protegido durante o ciclo do feijão-vagem, Pelotas, RS, 2007.

Dividindo-se o ciclo da cultura em três partes conforme a Tabela 4 observa-se que a quantidade de energia consumida na evaporação representada pelo fluxo de calor latente aumentou e o fluxo de calor sensível diminuiu percentualmente em relação à energia total disponível à cultura representada pelo saldo de radiação, o que relaciona-se com o crescimento das plantas e conseqüentemente do índice de área foliar durante o ciclo.

Tabela 4 – Saldo de radiação (Rn), fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível (MJ m^{-2}) em diferentes ciclos de desenvolvimento da cultura do feijão-vagem, em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

	Rn	LE	H	LE/Rn	H/Rn
Emergência	35,33	-27,13	-8,20	76,8%	23,2%
Desenvolvimento Vegetativo	83,00	-66,71	-16,29	80,4%	19,6%
Floração Frutificação	226,39	-187,69	-38,69	82,9%	17,1%
Total	344,72	-281,53	-63,18	81,7%	18,3%

Comportamento semelhante foi verificado por Souza (1996) no cultivo do feijão-vagem, em ambiente protegido, no período de outubro a dezembro de 1994, em Botucatu, SP. Para a razão LE/Rn observou um valor mínimo de 61%, na fase vegetativa, e um valor máximo de 99%, na fase reprodutiva; a razão H/Rn variou entre 1 e 36%, sendo que H apresentando maiores valores no período da emergência das plantas.

Alves et al. (1998), ao calcular o balanço de energia em um cultivo de melão, no período de outubro a janeiro em Mossoró, RN, observou uma tendência inversa entre H e LE, sendo que H tendeu a diminuir durante o ciclo de cultivo e LE a aumentar. Em alguns dias H também se torna positivo o que foi causado pela transferência de energia do meio externo para o cultivo.

4.4 Evapotranspiração de referência

A Figura 17 apresenta a evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}), calculada pelo método da FAO Penman-Monteith e pelo método do tanque Classe A, onde se pode observar a tendência de diminuição dos valores, em função do término do experimento, no mês de junho (fim do outono e início do inverno). A E_{To} média, mínima e máxima pelo método FAO foi 1,21, 0,10 e 2,55 mm dia^{-1} , respectivamente, e pelo método do tanque Classe A foi 1,50 0,09 e 3,52 mm dia^{-1} , respectivamente.

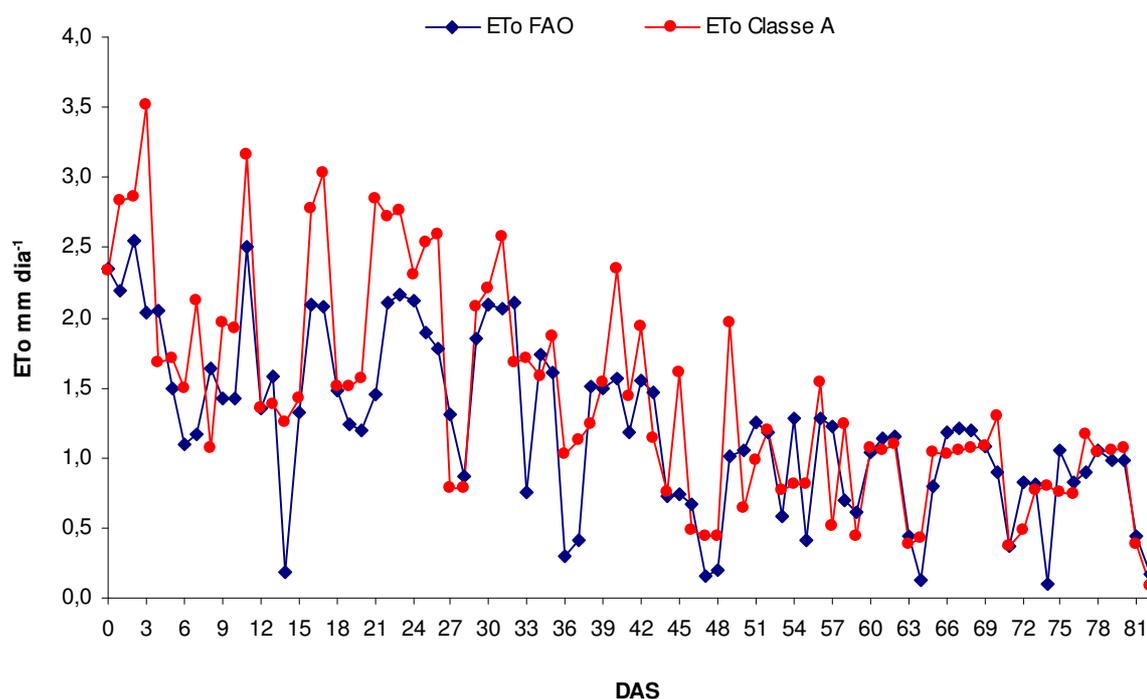


Figura 17 – Evapotranspiração de referência (ETo) diária estimada pelo método da FAO Penman-Monteith e pelo método do tanque Classe A no interior do ambiente protegido cultivado com feijão-vagem, Pelotas, RS, 2007.

Na Tabela 5, observa-se que, em todas as fases do ciclo de cultivo do feijão-vagem, a evapotranspiração estimada pelo método do tanque Classe A superestimou os valores, atingindo até 30% a mais que a do método padrão FAO no período de desenvolvimento vegetativo. A menor diferença entre os dois métodos foi no período de floração e frutificação (11%), resultando em uma pequena diferença entre Kp e Kpa.

Tabela 5 – Evapotranspiração de referência método FAO, em mm dia⁻¹ (ETo FAO), evapotranspiração de referência método tanque Classe A em mm dia⁻¹ (ETo Classe A), percentual que o método Classe A foi superior ao método da FAO, coeficiente médio do tanque Classe A para cada período (Kp) e coeficiente médio do tanque Classe A ajustado (Kpa) para o cultivo de feijão-vagem, em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

	ETo FAO	ETo Classe A	Percentual	Kp	Kpa
Emergência	2,23	2,64	18%	0,76	0,68
Desenvolvimento vegetativo	1,49	1,93	30%	0,77	0,62
Floração Frutificação	1,05	1,17	11%	0,78	0,77

A variação do valor do coeficiente do tanque Classe A, durante o cultivo foi pequena, entre 0,76 e 0,78, mas a ETo do tanque Classe A foi de 11 a 30% maior que o padrão FAO. Salienta-se que no período de floração e frutificação, quando a diferença entre os métodos é menor, ocorreram baixas temperaturas devido a proximidade do inverno. Nos dias em que os valores da evapotranspiração método FAO foram baixos, os fatores que contribuíram para isto foram alta umidade relativa, ocorrência de precipitação, alta nebulosidade, baixa radiação solar e baixo saldo de radiação (BOLETIM DA ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA DE PELOTAS, 2007). Como o método é sensível a estas variações, justifica-se o fato. Por outro lado, o experimento foi realizado no período de outono, quando ainda ocorrem baixas temperaturas. A temperatura média no período de emergência foi de 24,5°C, no de desenvolvimento vegetativo, foi de 23,4°C e no período de floração e frutificação foi de 15,7°C.

Resultados semelhantes foram obtidos por Moura e Soares (2004), com dados médios da Estação Agrometeorológica de Bebedouro, em Petrolina, Pernambuco, no período de 2000 a 2003, sendo que a evapotranspiração de referência obtida pelo método do tanque Classe A superou, em torno de 32%, a evapotranspiração de referência obtida pelo método da FAO Penman-Monteith.

Conforme Allen et al. (1998), a calibração do valor de Kp pelo padrão FAO Penman-Monteith para uma determinada localidade, pode reduzir seu valor em até 20% para climas áridos e de 5 a 10% para locais com vento, com umidade relativa do ar e temperatura moderados.

4.5 Evapotranspiração e coeficiente de cultura

A Tabela 6 evidencia o aumento do evapotranspiração da cultura, em relação a evapotranspiração de referência ao longo do ciclo. Considerando-se o total evapotranspirado (padrão FAO) e o consumo hídrico da cultura, resulta em um coeficiente de cultura de 0,79. Notou-se, que o coeficiente de cultura é variável durante do ciclo, conforme observado na Tabela 9, o que sugere o uso do mesmo, a fim de estimar o consumo hídrico com maior precisão.

Tabela 6 – Evapotranspiração da cultura em mm dia^{-1} (ETc), evapotranspiração de referência em mm dia^{-1} (ETo) e coeficiente de cultura (Kc) para o cultivo de feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

	ETo FAO (mm)	ETc (mm)	Kc
Emergência	11,17	2,96	0,27
Desenvolvimento Vegetativo	26,84	10,67	0,40
Floração Frutificação	64,03	67,00	1,05
Total	102,04	80,63	0,79

Os valores da Tabela 9 se aproximam dos valores sugeridos pela FAO (ALLEN et al., 1998), para o feijão-vagem, a qual indica um Kc inicial igual a 0,5, intermediário 1,05 e no final do ciclo, um Kc igual a 0,9. Salienta-se que a cobertura plástica do solo pode reduzir a evapotranspiração da cultura entre 10 a 30%.

Curi e Campelo Jr. (2001), ao compararem o consumo hídrico do feijoeiro, cultivar Jalo Precoce (crescimento indeterminado), medido por lisímetro de pesagem, com a evapotranspiração de referência no período de setembro a novembro de 1998, na fazenda experimental da Universidade Federal do Mato Grosso, no município de Santo Antônio do Laverger, concluíram que o coeficiente da cultura variou de 0,37 a 1,79, de acordo com o estágio de desenvolvimento, tendo um valor médio de 1,18.

Silveira e Stone (2008) recomendam para o feijoeiro cultivado no sistema convencional, de acordo com o estágio de desenvolvimento, os seguintes valores de Kc : germinação ao início da floração 0,69; floração 1,28; desenvolvimento de vagens à maturação 1,04.

Em relação ao consumo hídrico da cultura (Evapotranspiração da cultura), verificou-se que o valor do mesmo foi inferior à pesquisa anterior realizada na UFPel em ambiente protegido: Duarte et al. (2001) obtiveram em média de 504,8mm para feijão-vagem de crescimento indeterminado no período de outubro de 1997 a março de 1998.

De acordo com Farias (1991), são necessários valores variáveis de 300 a 500mm, para que as plantas do feijão-vagem, de crescimento indeterminado, atinjam um bom rendimento.

Para feijão-vagem de crescimento determinado, no período de 19 de setembro a 10 de dezembro de 1988, Gálvez (1990), em Almeria, Espanha, obteve uma ETc de 88mm, com Kc variando de 0,3 a 0,8. Portanto, comparando-se os dois experimentos realizados na mesma época do ano (outono) e com o mesmo hábito de crescimento, verifica-se que os valores são semelhantes.

O consumo hídrico está relacionado à época do ano em que foi realizado o cultivo e ao hábito de crescimento, o que levou a um baixo valor de evapotranspiração de cultura. Nota-se que Kc aproximou-se dos valores obtidos por outros pesquisadores.

4.6 Respostas agrônômicas

4.6.1 Fases fenológicas

Através da Tabela 7, podem ser verificadas as datas de ocorrência das fases fenológicas, o tempo em dias após a semeadura e a duração de cada evento. O ciclo total da cultura foi de 84 dias (de 19 de março - semeadura a 11 de junho de 2007 - dia da última colheita). O ciclo completo dividiu-se em 33 dias de período vegetativo e 51 dias período reprodutivo. A emergência ocorreu de 4 dias após a semeadura (DAS). Iniciou-se a colheita em 24 de maio, isto é, 66 DAS, estendendo-se por 18 dias.

O período de germinação está entre 5 e 10 dias para as variedades de feijão-vagem de crescimento determinado, cultivadas em ambiente protegido (CERMEÑO,1977), portanto, o período de 5 dias para a germinação e emergência ficaram dentro do intervalo esperado. Resultados semelhantes foram obtidos por Souza e Escobedo (1997), em Botucatu, SP, com feijão-vagem rasteiro na primavera.

Souza e Escobedo (1997) também obtiveram resultados semelhantes quanto ao tempo de duração do período de desenvolvimento vegetativo. Porém, a partir da fase fenológica R7 ocorreram diferenças - os tempos de duração de R7 e R8 foram 26 e 18 dias, respectivamente, bem superiores aos observados na primavera: 19 e 9 dias, respectivamente.

Após 38 DAS (26 de abril), isto é, entre o final do estágio fenológico R6 (23 de abril - aparecimento da primeira flor aberta) e começo do estágio R7 (28 de abril - aparecimento da primeira vagem) começam a ocorrer temperaturas abaixo de 12°C, coincidindo com o aumento do tempo de duração dos estádios fenológicos R7 e R8.

Além das baixas temperaturas que ocorreram nos estádios fenológicos R7 e R8, foram observados baixos valores de radiação solar global incidente no interior do ambiente protegido, o quais ficaram abaixo do limite trófico das hortaliças de verão durante vários dias. Esse comportamento da radiação solar, causado pela proximidade do inverno e pela ocorrência de muitos dias nublados e parcialmente nublados contribuiu com o aumento dos estádios fenológicos no final do ciclo de cultivo.

Para Barbosa et al. (2001), o ciclo total do feijão-vagem de porte rasteiro é de 55 a 60 dias para cultivo em campo, com tempo de colheita de 15 dias. O cultivo em ambiente protegido tende a ter um ciclo mais longo quando comparado ao cultivo a campo nas mesmas condições, fato relacionado ao efeito da redução da radiação solar proporcionado pela cobertura plástica (LOPES et al., 1987), o que concorda com os resultados obtidos.

Tabela 7 – Código do estágio fenológico, data e duração em dias após a semeadura (DAS) para ocorrer cada fase fenológica da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

Código	Data	DAS	Duração
V0	19/03	-	4
V1	23/03	4	2
V2	25/03	6	8
V3	02/04	14	8
V4	10/04	22	11
R5	21/04	33	2
R6	23/04	35	5
R7	28/04	40	26
R8	24/05	66	18
R9	-	-	-

4.6.2 Índice de área foliar

Pela Figura 18 verifica-se que o maior aumento no índice da área foliar (IAF) ocorreu até o dia 7 de maio (49 DAS). A partir desta data, o índice de área foliar aumenta, porém com menor intensidade, atingindo um valor máximo de 1,11 no dia 28 de maio (70 DAS), o que coincidiu com a fase fenológica R7 (aparecimento da primeira vagem). Neste momento a alocação de nutrientes passou para as vagens, diminuindo para as folhas e conseqüentemente diminuindo seu ritmo de crescimento.

A temperatura do ar foi um aspecto favorável ao maior aumento no índice de área foliar, até 49 DAS, pois se manteve abaixo de 12°C apenas em 2 dias, porém acima de 10°C. No intervalo entre 49 DAS e 70 DAS passaram a ocorrer alguns dias com temperaturas abaixo de 12°C, coincidindo com a diminuição do ritmo de aumento do índice de área foliar. Em seguida passaram a ocorrer temperaturas abaixo de 12°C todos os dias, acompanhando a queda no índice de área foliar. A senescência e queda de folhas no final do ciclo, levaram a diminuição do índice de área foliar.

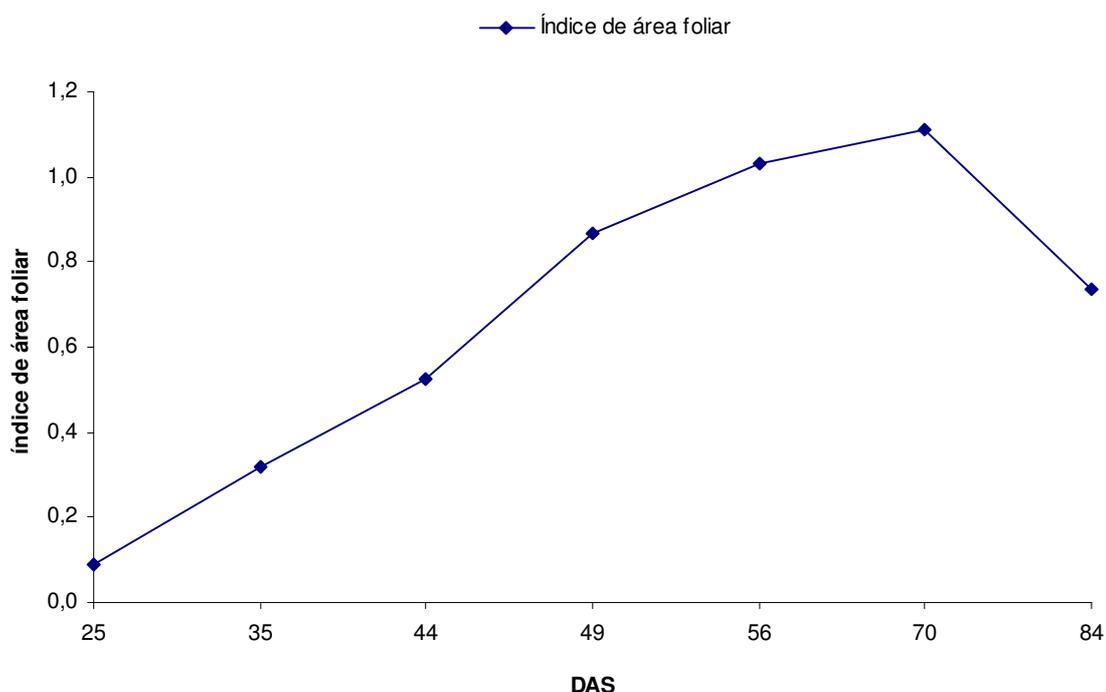


Figura 18 – Índice de área foliar durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

Souza e Escobedo (1997), ao analisarem o comportamento do índice de área foliar do feijão-vagem, variedade Paulista de hábito de crescimento determinado em Botucatu, SP, na primavera, também notaram um aumento significativo até as fases fenológicas R7-R8 (IAF=6,13) e um decréscimo no período seguinte (entre as fases R8 e R9 – IAF=4,84). Salienta-se que esta diferença de valores em relação a Pelotas pode estar relacionada ao número de plantas por m^2 – em Botucatu foram 28 e em Pelotas 4,17. Além disso, a experimento foi realizado na primavera em Botucatu e no outono em Pelotas, onde os níveis de radiação solar global são limitantes nesta época, já que ficaram abaixo do limite trófico em vários dias.

Comparando-se o índice de área foliar em Pelotas com o obtido por Gálvez (1990), que analisou o feijão-vagem de crescimento determinado, em ambiente protegido, no período de 23 de dezembro de 1987 a 04 de abril de 1988, em Almeria, Espanha, latitude $36^{\circ} 47'$, pode-se verificar que os valores são mais próximos que os obtidos em outros locais – 1,67 em Almeria e 1,1 em Pelotas. Colaboraram para a proximidade dos valores a densidade de plantio (5 plantas m^{-2} em Almeria e 4 plantas m^{-2} em Pelotas) e as latitudes semelhantes entre os locais. Além da maior densidade de plantio, a época de cultivo inverno-primavera pode ter contribuído para o maior IAF na Espanha.

4.6.3 Fitomassa fresca

Na Figura 19 pode-se observar a fitomassa fresca acumulada, em média, por planta na parte aérea. O caule aumentou durante todo o ciclo do cultivo, atingindo $53,81g\ planta^{-1}$ no dia 11 de junho (84 DAS). O peso das folhas aumentou até o dia 28 de maio (70 DAS), atingindo $62,04g\ planta^{-1}$, diminuindo até $48,02g\ planta^{-1}$ no final do ciclo (84 DAS), fato explicado pela senescência e queda das mesmas no final do experimento, conforme já foi verificado com a diminuição do índice de área foliar. Na coleta de plantas realizada dia 7 de maio (49 DAS), além do caule e das folhas, verifica-se a presença de vagens. A partir desta data é considerado o peso das vagens presentes na planta somado ao peso das vagens colhidas no intervalo entre as coletas. O peso da matéria fresca acumulada nas vagens foi de $161,05g\ planta^{-1}$ no final do cultivo. Salienta-se que este valor é a

soma do peso médio de vagens por planta no último dia (11 de junho) somado aos pesos das colheitas realizadas em 24/05, 30/05 e 04/06. No final do experimento a matéria fresca acumulada na parte aérea foi de 262,88g planta⁻¹.

Comparando-se o peso de matéria fresca acumulada nas vagens com o obtido por Souza (1996), que cultivou feijão-vagem de crescimento determinado, em ambiente protegido, na primavera, em Botucatu, SP, verificamos que o resultado em Pelotas foi superior, pois o referido pesquisador obteve 91,58g planta⁻¹ de matéria fresca. Neste caso, a maior densidade de plantas (28 plantas m⁻²) levou a uma menor produção de vagens por plantas.

Os resultados obtidos também foram superiores a Gálvez (1990), que analisou a produtividade do feijão-vagem de crescimento determinado, em ambiente protegido, no período de 19 de setembro a 10 de dezembro de 1988, em Almeria, Espanha, onde obteve rendimentos que variaram entre 80 e 43,73g planta⁻¹, dependendo da densidade de plantio: 15 plantas m⁻² ou 27 plantas m⁻². Neste caso os dois experimentos foram feitos na mesma época do ano, outono, porém a maior densidade de plantas pode ter causado a menor produção por planta.

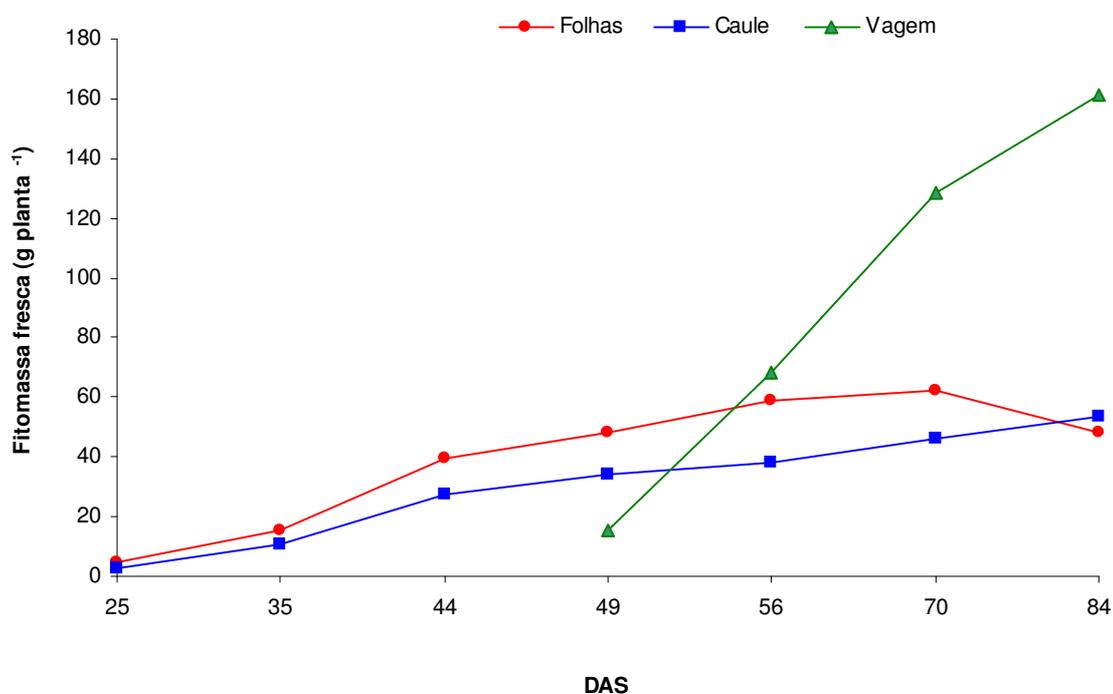


Figura 19 – Fitomassa fresca, acumulada por planta em gramas durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

A Tabela 8 apresenta, em média, a fitomassa fresca da parte aérea das plantas coletadas em cada data a fim de verificar o percentual de cada parte em relação ao total do peso da parte aérea. Entre as datas de coleta são apresentados o peso das vagens colhidas (colheitas 24 e 30 de maio; 04 e 11 de junho). O peso do caule aumentou até o final do ciclo de cultivo, entretanto o peso da folhas e das vagens presentes nas plantas coletadas aumentou até 28 de maio (70 DAS), diminuindo até o final. O peso das folhas diminuiu em função da senescência e queda das mesmas e o peso das vagens diminuiu em função das colheitas. Como consequência, percentualmente, o peso do caule representou a maior parte de todo peso da parte aérea no final do ciclo.

O maior peso de matéria fresca por planta coletada, ocorreu no dia 28 de maio (70 DAS), quando a planta estava no início da fase fenológica R8 (vagens com comprimento máximo). A partir desta data a senescência e queda das folhas causaram a diminuição do peso. Esta observação concorda com experimentos realizados com feijão-vagem em períodos anteriores: Souza (1996), em Botucatu, SP e Aldrighi (2000), em Pelotas, RS.

Tabela 8 – Componentes da fitomassa fresca em gramas e percentual do total da parte aérea, por planta, em cada coleta de plantas, durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

Data	Folhas	Caule	Vagem	Total	Folha	Caule	Vagem
13/04	4,43	2,40		6,83	64,86%	35,14%	
23/04	15,53	10,61		26,14	59,42%	40,58%	
02/05	39,46	27,15		66,61	59,24%	40,76%	
07/05	48,25	34,15	15,33	97,73	49,37%	34,95%	15,68%
14/05	59,02	38,01	67,99	165,02	35,76%	23,03%	41,20%
24/05			34,93				
28/05	62,04	46,49	93,68	202,21	30,68%	22,99%	46,33%
30/05			69,38				
04/06			29,99				
11/06	48,02	53,81	26,75	128,58	37,35%	41,85%	20,80%

4.6.4 Fitomassa seca

Através da Figura 20 pode-se observar a fitomassa seca, em média, por planta, acumulada na parte aérea. Os componentes da mesma seguem a mesma tendência da fitomassa fresca. O caule aumentou durante todo o ciclo do cultivo, atingindo $11,54\text{g planta}^{-1}$ após 84 DAS. O peso das folhas aumentou até o dia 28 de maio (70 DAS), atingindo $11,27\text{g planta}^{-1}$, diminuindo até o final do ciclo ($8,72\text{g planta}^{-1}$), fato explicado pela senescência e queda das mesmas no final do experimento, conforme já foi verificado com a diminuição do índice de área foliar. A partir do dia 7 de maio (49 DAS), além do caule e das folhas, verificou-se a presença de vagens. A partir desta data também é considerado o peso das vagens colhidas no intervalo entre as coletas de plantas. O peso da matéria seca acumulada no final do cultivo foi de $34,14\text{g planta}^{-1}$, considerando-se o peso final das folhas e caule já citados, bem como $13,88\text{g planta}^{-1}$ de vagens. No valor acumulado foi somado o peso de matéria seca das vagens colhidas em 24/05, 30/05 e 04/06.

Souza (1996), cultivando feijão-vagem em ambiente protegido, da mesma variedade, na primavera, em Botucatu, SP, obteve $43,53\text{g planta}^{-1}$ (caule, folhas e vagens); valor superior a Pelotas. Salienta-se que esta diferença pode ter ocorrido em função da densidade de plantio, 28 plantas m^{-2} em SP, além da época do ano ser diferente.

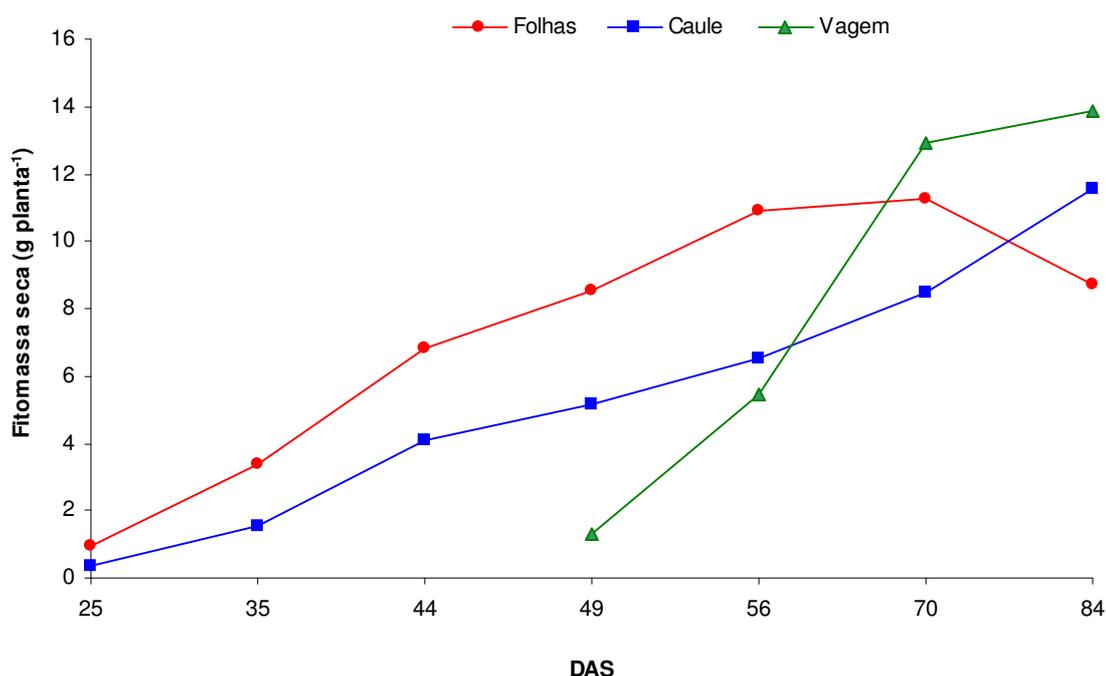


Figura 20 – Fitomassa seca, acumulada por planta em gramas durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

Na Tabela 9 pode-se observar, em média, a fitomassa seca da parte aérea das plantas coletadas em cada data, bem como o percentual que representou cada componente em relação ao total. Entre as datas de coleta de plantas são apresentados os pesos das vagens colhidas. O peso do caule aumentou até o final do ciclo de cultivo, entretanto o peso da folhas e das vagens aumentou até 28 de maio (70 DAS) diminuindo até o final. O peso das folhas diminuiu em função da senescência e queda das mesmas e o peso das vagens diminuiu em função das colheitas. Como consequência, percentualmente, o peso do caule aumentou até o final do ciclo de cultivo, quando representou a maior parte de todo peso da parte aérea. Em oposição, percentualmente, o peso das folhas diminuiu ao longo do cultivo.

O valor máximo de matéria seca ocorreu durante a fase fenológica R8 (28 de maio – 70 DAS). Este resultado é semelhante ao que obteve Souza (1996), em Botucatu, SP, e com o obtido por Aldrighi (2000) em Pelotas, RS na mesma época do ano.

Tabela 9 – Componentes da fitomassa seca em gramas e percentual do total da parte aérea, por planta, durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

Data	Folhas	Caule	Vagem	Total	Folha	Caule	Vagem
13/04	0,96	0,38		1,34	71,40%	28,60%	
23/04	3,40	1,56		4,96	68,55%	31,45%	
02/05	6,84	4,09		10,92	62,59%	37,41%	
07/05	8,54	5,16	1,30	14,99	56,93%	34,38%	8,69%
14/05	10,93	6,50	5,44	22,86	47,79%	28,42%	23,79%
24/05			2,97				
28/05	11,27	8,49	9,96	29,71	37,91%	28,57%	33,52%
30/05			5,55				
04/06			3,19				
11/06	8,72	11,54	2,17	22,44	38,87%	50,69%	9,69%

4.6.5 Rendimento

A quantidade colhida de feijão-vagem foi, em média, de $161,05\text{g planta}^{-1}$, o que equivale a $6,72\text{Mg ha}^{-1}$, levando-se em consideração uma densidade de $4,17$ plantas m^{-2} . Durante o período de frutificação foram realizadas quatro colheitas conforme apresentado na Figura 21. A maior colheita foi de $69,38\text{g planta}^{-1}$, que ocorreu no dia 30 de maio (72 DAS).

Gálvez (1990), cultivando feijão-vagem de crescimento determinado em ambiente protegido, na mesma estação do ano (outono), em Almeria na Espanha, latitude $36^{\circ} 47'$, obteve rendimentos maiores, entre $11,35$ e $12,06\text{Mg ha}^{-1}$. Se considerarmos a densidade de plantio, 21 e 15 plantas por m^2 , resulta numa produção de $54,07$ e $80,42\text{g planta}^{-1}$, respectivamente.

Souza (1996), cultivando feijão-vagem em ambiente protegido na primavera em Botucatu, SP obteve uma produtividade maior que em Pelotas, $25,7\text{Mg ha}^{-1}$. Entretanto, a produção por planta foi menor ($91,78\text{g planta}^{-1}$). Este fato está relacionado à densidade de plantas – 28 em Botucatu e $4,17$ em Pelotas. Além

disso, as baixas temperaturas e baixos valores de radiação solar global contribuíram para a menor produtividade da cultura em Pelotas no outono.

Em Pelotas, Aldrighi (2000), para o feijão-vagem “Macarrão Favorito” de crescimento indeterminado, cultivado em estufa tipo túnel alto, com 320m² de área, obteve rendimentos entre 26 e 72Mg ha⁻¹, nos períodos de março a junho e outubro a março, respectivamente, que corresponderam a 385 e 1.081g planta⁻¹. No período de outubro a março foram realizadas 12 colheitas e no período março a junho foram 5, sendo que nesta época a maior foi a segunda. Segundo o mesmo autor as baixas temperaturas foram responsáveis pela diferença de rendimento entre as duas épocas do ano.

Comparando-se a produção obtida por planta com Aldrighi (2000) na mesma época do ano (outono), verificou-se que está dentro do esperado, isto é, aproximadamente a metade da produção, já que a variedade utilizada foi de crescimento determinado. O número de colheitas também foi semelhante. Conforme a Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária (2006) a produção das variedades de crescimento determinado é aproximadamente a metade das variedades de crescimento indeterminado.

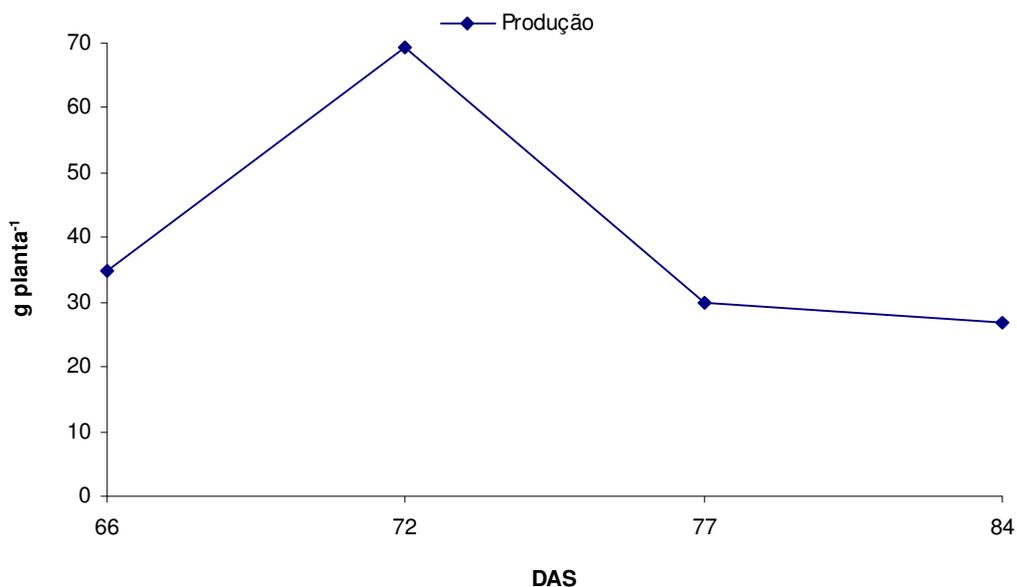


Figura 21 – Quantidade média colhida por planta durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

4.6.6 Rendimento energético da radiação solar

Através da Figura 22, pode-se observar que o rendimento energético máximo em relação a radiação solar global incidente no interior do ambiente protegido e a radiação solar fotossinteticamente ativa incidente foram 0,2 e 0,5g MJ⁻¹, respectivamente, no dia 28 de maio (70 DAS), decrescendo até o final do ciclo do cultivo. O decréscimo do rendimento energético ocorrido no final do experimento está relacionado com a senescência e queda das folhas, que fez com que o acúmulo de radiação solar não fosse acompanhado por um correspondente acúmulo de fitomassa fresca e seca.

Os baixos valores de radiação solar global incidente no interior do ambiente protegido contribuíram para que ocorressem baixas temperaturas, fator que levou a uma diminuição no ritmo de crescimento da planta e conseqüentemente menor rendimento energético no final do ciclo, conforme já observado por Aldrighi (2004), cultivando berinjela em ambiente protegido no período de fevereiro a junho, em Pelotas, RS. Segundo o autor, as baixas temperaturas e a diminuição da radiação solar global incidente diminuíram a fitomassa seca das folhas, prejudicando o aparelho fotossintetizador e reduzindo o rendimento energético no final do cultivo.

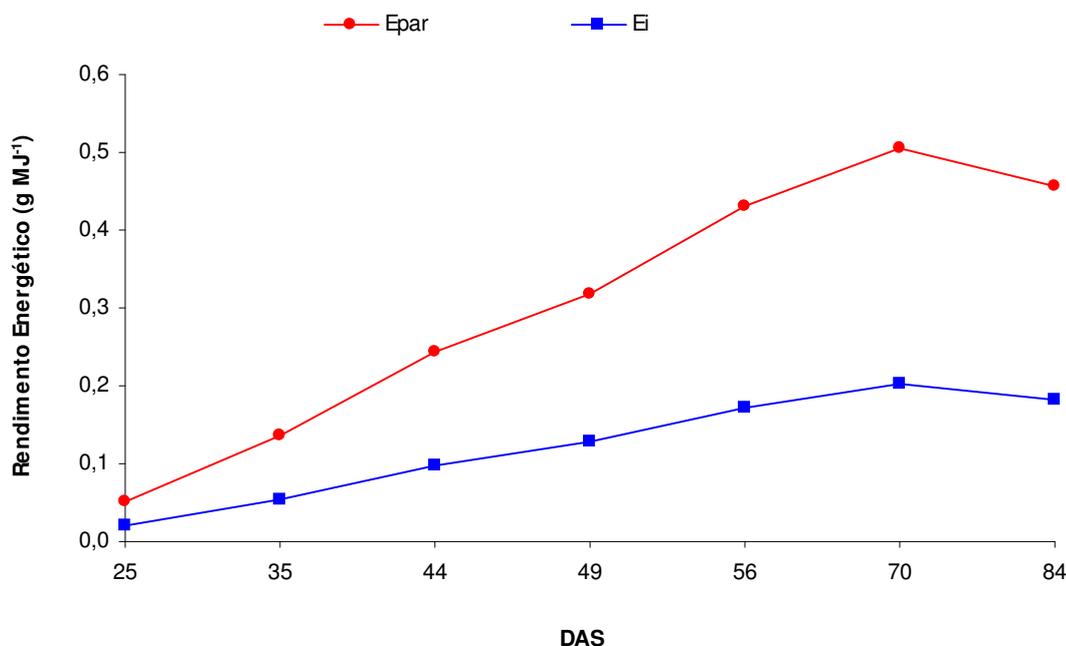


Figura 22 – Rendimento energético da radiação solar (Ei) e da radiação fotossinteticamente ativa (Epar) durante o ciclo da cultura do feijão-vagem em ambiente protegido, Pelotas, RS, 2007.

Cultivando feijão-vagem, em ambiente protegido, no período de outubro a dezembro de 1994, em Botucatu, SP, Souza (1996) obteve 1218,91g m⁻² de matéria seca acumulada na parte aérea e um saldo de radiação acumulado de 582MJ m⁻² dia⁻¹. Considerando que, em média a relação entre o saldo de radiação e a radiação solar global incidente foi de 0,66, pode-se estimar que o rendimento energético foi de 1,38g MJ⁻¹ (matéria seca acumulada na parte aérea e radiação solar global incidente). Em comparação com Pelotas, esse resultado foi bastante superior. Além da diferença de local e época do ano, que proporcionaram uma temperatura média de 25,2°C, a maior densidade de plantio (28 plantas m⁻²) também colaborou para um maior valor de rendimento energético.

Em Viçosa, MG, no período de outubro de 2000 a fevereiro de 2001, Santos et al. (2003), obtiveram um rendimento energético de 1,96g MJ⁻¹ e 1,83g MJ⁻¹ para o feijão, antes do florescimento e depois do florescimento, respectivamente, ambos em cultivo a campo com densidade de 5 plantas m⁻². Foi utilizado no cálculo matéria seca (folhas, raízes, caule e partes reprodutivas) e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada. Além da inclusão das raízes, o local e a época do ano foram fatores que tornaram Epar bastante superior a Pelotas.

Canteri e Godoy (2005), cultivando feijão 'Carioca' de hábito de crescimento indeterminado, em Castro, PR, a campo, de janeiro a abril, obtiveram um rendimento energético de 0,44 e 0,45g MJ⁻¹ para as parcelas sem aplicação de fungicidas e de 0,46g MJ⁻¹ para as parcelas com fungicida. Salienta-se que o cálculo foi realizado a partir da radiação solar global absorvida. Além dessa diferença no cálculo, o local, a densidade (32 plantas m⁻²) e a cultivar influenciaram, o que resultou em Ei menor em Pelotas, porém com menor diferença que outras pesquisas citadas, o que pode ter sido influenciado pela época do ano dos cultivos que é coincidente em parte (março e abril).

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos e as condições em que o experimento foi realizado, permitem concluir que:

- a temperatura do ar no interior do ambiente protegido foi favorável ao cultivo no período de emergência e desenvolvimento vegetativo, porém no período de floração-frutificação ocorreram temperaturas inferiores ao limite mínimo recomendado para a cultura;
- o ambiente protegido promoveu o aumento das temperaturas médias e máximas, durante o outono;
- a cobertura plástica foi ineficiente na retenção de calor durante a noite, período predominante da ocorrência das temperaturas mínimas;
- a temperatura do solo se manteve entre os limites críticos admitidos para a cultura;
- o ambiente protegido promoveu o aumento da umidade relativa do ar, principalmente no período noturno, proporcionando uma condição desfavorável ao cultivo;
- a radiação solar global no interior do ambiente protegido foi limitante ao cultivo de feijão-vagem durante os períodos de floração e frutificação. Em média, seu valor foi 85,07% da radiação solar global no ambiente externo.
- o saldo de radiação diminuiu durante o ciclo do cultivo. Entretanto, a parcela relativa ao fluxo de calor latente aumentou, e o fluxo de calor sensível diminuiu percentualmente, em relação à energia total disponível à cultura, representada pelo saldo de radiação;
- o balanço de radiação mostrou a tendência da radiação solar global, incidente sobre o cultivo, de diminuir com a aproximação do inverno. A parcela

relativa ao balanço de ondas curtas acompanhou esta tendência, entretanto, o balanço de ondas longas, relativamente à radiação incidente, aumentou;

- em todas as fases do ciclo de cultivo do feijão-vagem, a evapotranspiração estimada pelo método do tanque Classe A superestimou os valores em relação ao método considerado padrão pela FAO em até 30%;

- o método do tanque Classe A, também pode ser utilizado para a estimativa da evapotranspiração de referência para o cultivo do feijão-vagem, em ambiente protegido, no período de outono, desde que seja utilizado, no cálculo, o coeficiente do tanque ajustado (Kpa);

- a evapotranspiração da cultura aumentou em relação à evapotranspiração de referência, ao longo do ciclo. O coeficiente de cultura foi variável durante todo o ciclo, o que sugere o uso dos valores calculados, a fim de estimar o consumo hídrico com maior precisão.

- o índice de área foliar, a produção de matéria fresca, a produção de matéria seca e do rendimento foram baixos em função das baixas temperaturas e valores de radiação solar global incidente abaixo do limite trófico;

- o ciclo total da cultura foi maior que o esperado em função do aumento dos estádios fenológicos R7 e R8;

- os rendimentos energéticos da radiação solar global e da fotossinteticamente ativa aumentaram até 70 dias após a semeadura, decrescendo, em seguida, até o final do ciclo da cultura, concordando com o comportamento do índice de área foliar;

- o microclima do ambiente protegido atendeu às necessidades da cultura até o final do mês de abril, a partir de maio começaram a ocorrer temperaturas inferiores ao limite recomendado, bem como níveis de radiação solar global incidente inferiores ao limite trófico.

6. REFERÊNCIAS

ALDRIGHI, C. B. **Crescimento e desenvolvimento da cultura da berinjela em ambiente protegido**. 2004. 59f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

ALDRIGHI, C. B. **Produção de feijão-vagem em duas épocas de cultivo em ambiente protegido com adubação orgânica**. 2000. 62f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome, FAO, 1998, (Irrigation and Drainage, Paper 56).

ALVES, A.V.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, B.B. Balanço de energia e reflectância de um cultivo de melão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.139-146, 1998.

BAILLE, A. **Energy cycle**. In: Enoch Z.; Stanhill G. (Edit). *Ecosystem of the world. The greenhouse ecosystem*. Elsevier, Amsterdam, 1998, 56p.

BARBOSA, M. L.; REZENDE, M. R. R.; COSTA, H. S. C.; MALUF, W. R. A cultura do feijão-vagem. **Boletim Técnico de Hortaliças**. Lavras-MG, v.1, n. 65, 2001.

BECKMANN, M. Z. **Uso da radiação solar pela cultura do tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.) sob adubação orgânica em ambiente protegido**. 2004. 85f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

BECKMANN, M. Z.; DUARTE, G. R. B.; PAULA, V. A. de; MENDEZ, M. E. G.; PEIL, R. M. N. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Revista Ciência Rural**, v.36, n.1, p.86-92, 2006.

BLISKA JR., A. A revolução das estufas. **Revista Plasticultura**, ano 1, n.1, p.32-35, 2007.

BOLETIM DA ESTAÇÃO AGROCLIMATOLÓGICA DE PELOTAS Disponível em: <<http://www.cpact.embrapa.br/agromet/estacao/index.html/>> Acesso em: 01 dez. 2007.

BURIOL, G. A.; LAGO, I., HELDWEIN, A. B.; SCHNEIDER, F. M., ANDRIOLO, J. L.; Disponibilidade de radiação solar para hortaliças cultivadas em ambiente protegido no período invernal no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, n.1, p.21-26, 2005.

BURIOL, G. A.; SCHNEIDER, F. M., ESTEFANEL, V.; ANDRIOLO, J. L.; MEDEIROS, S. L. P. Modificação na temperatura mínima do ar causada por estufas de polietileno transparente de baixa densidade. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.1, n.1, p.43-49, 1993.

CANTERI, M. G.; GODOY, C. V. Influência da severidade de mancha angular na eficiência fotossintética da área foliar sadia de feijoeiro, sob condições de campo. **Revista Ciências Agrárias**, Londrina, v.26, n.2, p.179-186, 2005.

CENTRAIS DE ABASTECIMENTO DO RIO GRANDE DO SUL S.A. - CEASA/RS. **Cotação de atacado de produtos hortigranjeiros**. Disponível em: <<http://www.ceasa.rs.gov.br/cotacao.htm>>. Acessado em: 14 set. 2007.

CERMEÑO, Z. S. **Cultivo de plantas hortícolas em estufa**. Portugal: Litexa, 1977, 368p.

CUNHA, A.; ESCOBEDO, J. F. Determinação do coeficiente do tanque Classe A em condições de ambiente protegido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., 2003, Santa Maria, **Anais do...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2003.

CUNHA, A.; ESCOBEDO, J.; KLOSOWSKI, E. Balanço de energia em pimenteiro sob cultivo protegido e a campo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.2, p.159-167, 2001.

CURI, S.; CAMPELO JR, J. H. Necessidades hídricas da cultura do feijoeiro (*Phaseolus Vulgaris* L.) na baixada Cuiabana. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.1, p.59-65, 2001.

DUARTE, L. A. **Caracterização do ambiente protegido cultivado com tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizando diferentes telas antiinsetos**. 2006. 65f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

DUARTE, G.; ALDRIGHI, C. B.; MARTINS, S. MENDEZ, M. E. G.; FERNANDES, H. Consumo hídrico do feijão-vagem em ambiente protegido sob adubação orgânica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 12., 2001, Santa Maria, **Anais do...** Santa Maria: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001.

EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO. **Irrigação**. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/CultivodoFeijoeiro/irrigacao.htm>> Acesso em: 25 set. 2007.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p

EMBRAPA HORTALIÇAS. **Feijão-de-vagem**. Disponível em: <[http://www.cnph.embrapa.br/paginas/dicas_ao_consumidor/feijao de vagem.htm](http://www.cnph.embrapa.br/paginas/dicas_ao_consumidor/feijao_de_vagem.htm)> Acesso em: 25 set. 2007.

EMBRAPA RONDÔNIA. **Cultivo do feijão comum em Rondônia**. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/CultivodoFeijaoComumRO/clima.htm>> Acesso em: 09 maio 2008.

EMBRAPA SOJA. **Rotação de culturas**. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Soja/SojaCentralBrasil2003/rotacao.htm>> Acesso em: 03 nov. 2008.

EMPRESA PERNAMBUCANA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Feijão-vagem**. Disponível em: <http://www.ipa.br/CD_1/G_FEIJAO%20VAGEM/vagem.html> Acesso em: 06 ago. 2006.

FAO. **Protected cultivation in the Mediterranean climate**. Rome, 1990. 313p. (FAO Plant Production and Protection Paper, 101).

FARIAS, J. R. B. **Respostas do feijão-vagem à disponibilidade hídrica associada a alterações micrometeorológicas em estufa plástica**. 1991. 176f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FARIAS, J. R. B.; BERGAMASCHI, H.; MARTINS, S. R.; BERLATO, M. A. Efeito da cobertura plástica de estufa sobre a radiação solar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v.1, n.1, p.31-36, 1993. (a)

FARIAS, J. R. B., BERGAMASCHI, H.; MARTINS, S. R.; BERLATO, M. A.; OLIVEIRA, A.C.B. Alterações na temperatura e umidade relativa do ar provocadas pelo uso de estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.1, n.1, p. 51-62, 1993. (b)

FARIAS, J. R. B., BERGAMASCHI, H.; MARTINS, S. R. Evapotranspiração no interior de estufas plásticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.2, n.1, p. 17-22, 1994.

FIGENBAUM, V.; dos SANTOS, D. S. B.; MELLO, V. D. C.; dos SANTOS FILHO, B. G.; TILMANN, M. A. A.; da SILVA, J. B. Influência do déficit hídrico sobre os componentes de rendimento de três cultivares de feijão. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.26, n.2, 1991.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo Manual de Olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 2ª edição revista e ampliada. Viçosa: UFV, 2003. 412p.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F. Balanço de energia na cultura de pepineiro em ambiente natural e protegido. **Bragantia**. v.60, n.2, p. 127-137, 2001.

GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A. B.; De CAMPOS, C. J. Medidas e estimativa do albedo em cultura de pepineiro cultivado a campo e em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.8, n.2, p. 163-169, 2000.

GÁLVEZ, J. L. **Productividad de la judia verde sobre enarenado bajo invernadero em Almeria**. 1990. 225f. Tese (Doutorado) – Escuela Tecnica Superior de Ingenieros Agronomos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Agricultura orgânica**. Disponível em: <<http://www.iapar.br>>. Acesso em: 09 ago. 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário de 1996**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/horti/default.asp?t=2&z=t&o=16&u1=1&u2=1&u3=1>> Acesso em: 09 ago. 2006.

KUROZAWA, C. **Feijão-vagem**. Disponível em: <<http://globoruraltv.globo.com/GRural/0,27062,LTP0-4373-0-L-F,00.html>>. Acesso em: 02 out. 2007.

LOPES, N. R.; OLIVA, M. A.; CARDOSO, M. J.; GOMES, M. M. S.; SOUZA, V. F. Crescimento, morfologia, partição de assimilados e produção de matéria seca de feijão (*Phaseolus Vulgaris* L.) submetido a três densidades de fluxo radiante e dois regimes hídricos. **Revista Ceres**, v.34, n.132, p.110-124, 1987.

MAROTO, J.V. **Horticultura herbacea especial**. Madri: Artes Gráficas Cuesta S.A., 2000. 611p.

MARQUES, K. O.; PAIVA, T.; ASSIS, S. V. Análise do comportamento mensal do índice de limpidez. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. **Anais do...** Rio de Janeiro, RJ: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000.

MARTINS, S. R.; FERNANDES, H.S.; ASSIS, F.N.; MENDEZ, M.E.G. Caracterização climática e manejo de ambientes protegidos: a experiência brasileira. **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, v.20, n.200/201, p.5-10, set./dez. 1999.

MARTINS, S. R.; GONZALEZ, J. F. Evapotranspiração e respostas fisiológicas do feijão-vagem cultivado em substrato em estufa com sistema de ventilação/calefação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 3, p. 31-37, 1995.

MINGUEZ, P. L. Intercepcion de luz, bioproductividad e intercambio gaseoso durante la ontogenia del cultivo de pepino (*Cucumis Sativus* L.) en invernadero. Almeria: Junta Andalucia. Consejeria de Agricultura y Pesca., 1994. 255p.

MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F. da; BENINCASA, M.; SOUZA, J. L. de; FILHO, M. F. do N. Variação do albedo em áreas de floresta e pastagens na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.2, p. 163-168, 1999.

MOURA, M. S. B.; SOARES, J. M. Comparação entre a evapotranspiração de referência obtida pelo tanque "Classe A" e pela equação FAO-Penman-Monteith na região do submédio São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza, **Anais do...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004.

NASCIMENTO, W. M. **Temperatura x germinação**. Disponível em: <<http://www.cnph.embrapa.br/public/textos/texto3.html>>. Acesso em: 18 set. 2007.

NÓBREGA, J. Q.; TANTRAVAH, V. R. R.; BELTRÃO, N. E. de M.; FIDELES FILHO, J. Análise de crescimento do feijoeiro submetido a quatro níveis de umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.3, p.437-443, 2001.

OLIVEIRA, A. C. B. **Efeito da poda e da população de plantas na cultura do feijão-vagem em estufa plástica**. 1992. 70f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

PEIXOTO, N.; BRAZ, L. T.; BANZATTO, D. A.; OLIVEIRA, A. P. Adaptabilidade e estabilidade em feijão-vagem de crescimento indeterminado. **Horticultura Brasileira**, Brasília, V.20, n.4, p.616-618, 2002.

PEIXOTO, N.; SILVA, L. O.; THUNG, M. D. T.; SANTOS, G. Produção de sementes de linhagens e cultivares arbustivas de feijão-vagem em Anápolis. **Horticultura Brasileira**, Brasília, V.11, n.2, p.151-152, 1993.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 465p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997.

PEZZOPANE, J. E. M.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; ORTALANI, A. A.; MEYER, N. Radiação líquida e temperatura de folha no interior de estufa com cobertura plástica, durante o período noturno. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.3, p.1-4, 1995.

PIRES, R. C. de M.; FOLEGATTI, M. V.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; SAKAI, E.; PASSOS, F. A.; ARRUDA, F. B.; CALHEIROS, R. de O. Efeito de níveis de água, coberturas do solo e condições ambientais na temperatura do solo e no cultivo de morangueiro em ambiente protegido e a céu aberto. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.663-674, set./dez. 2004

POSTINGHER, D. **Respostas agronômicas e consumo hídrico da cultura do tomateiro cultivado em estufa plástica**. 1995. 59f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

PURQUERIO, L. F. V.; TIVELLI, S. W. **Manejo do ambiente em cultivo protegido**. Disponível em: <[http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/MANEJO Cultivo Protegido/Manejo Cultivo protegido.htm](http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/MANEJO_Cultivo_Protegido/Manejo_Cultivo_protegido.htm)> Acesso em: 11 abr. 2008.

- RIBEIRO, D. S. **Parâmetros agrometeorológicos de ambiente protegido com o cultivo de abóbora italiana sob adubação orgânica**. 2008. 128f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- RIGHI, E. Z. **Balço de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004. 103f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, Piracicaba.
- RISSER, G.; CORNILLON, P.; RODE, J. C. Effect de la temperature des racines sur croissance de jeunes plants de diverses variétés de melon (*Cucumis melo* L.). **Ann. Agron.**, Paris, v.29, n.5, p.453-473. 1978.
- ROLAS. **Recomendação de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 3ª Edição. Passo Fundo: SBCS-Núcleo Regional Sul, 2004. 224p.
- SACCO, F.G.; ASSIS, S. V. Potencialidade da insolação para a cidade de Pelotas. In: CONGRESSO INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12, 2003, Pelotas. **Anais do...** Pelotas, RS: UFPEL, 2003.
- SANTOS, J. B. dos; PROCÓPIO, S, de O.; SILVA, A. A. da; COSTA, L. C. Captação e aproveitamento da radiação solar pelas culturas da soja e do feijão e por plantas daninhas. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.1, p.147-153, 2003
- SCHALLENBERGER, E. **Produção orgânica de tomate em diferentes ambientes de cultivo**. 2005. 128f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- SCHIEDECK, G. **Ambiência e resposta agrônoma de meloeiro (*Cucumis melo* L.) cultivado sob adubação orgânica em ambiente protegido**. 2002, 100f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS.
- SCHNEIDER, F. M.; BURIOL, G. A.; ANDRIOLO, J. L.; ESTEFANEL, V.; STRECK, N. A. Modificação na temperatura do solo causada por estufas de polietileno transparente de baixa densidade em Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v.1, n.1, p.37-42, 1993.
- SENTELHAS, P. C.; SANTOS, A. O. Cultivo Protegido: aspectos microclimáticos **Revista Brasileira de Horticultura Ornamental**, v.1, n.1, p.108-115, 1995.
- SILVA, M. A. A.; GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; GARCIA, C. J. Temperatura do solo em ambiente protegido cultivado com a cultura do pimentão (*Capsicum annum* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia **Anais do...** Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003.
- SILVA NETO, J. L. da **Balço de radiação como subsídio ao cultivo do milho nos tabuleiros costeiros de Alagoas**. 2006. 53f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

SILVA, T. J. A. da **Evapotranspiração e coeficiente de cultivo de maracujazeiros determinados pelo métodos do balanço de radiação e lisimetria de pesagem hidráulica**. 2005. 99f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

SILVANDO, C. S.; STEINMETZ, S. **Clima**. Disponível em:
<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia4/AG01/arvore/AG01_20_13112002_15101.html> Acesso em: 09 maio 2008.

SILVEIRA, P. M. da; STONE, L. F. **Manejo da Irrigação**. Disponível em:
<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia4/AG01/arvore/AG01_86_13112002_15104.html> Acesso em: 11 abr. 2008.

SILVEIRA, V. P.; CAMARGO, C. G.; MUZA, M. N. Distribuição dos valores médios anuais da radiação solar global para a cidade de Pelotas-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. **Anais do...** Rio de Janeiro, RJ: UERJ, 2000.

SOUZA, J. L. de; ESCOBEDO, J. F. Balanço de radiação em cultivos de feijão-vagem com e sem cobertura de polietileno. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.32, n.31, p.1-15, jan. 1997.

SOUZA, J. L. **Saldo radiômetro com termopilha de filme fino e aplicação no balanço de radiação e energia em cultivo de feijão-vagem**. 1996. 174f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP.

SOUZA, J. R. P.; MIGLIORANZA, E.; BRANDÃO, R. A. P.; ATHANÁZIO, J. C. Produção e textura de feijão-vagem cultivado sob diferentes níveis de sombreamento. **Horticultura Brasileira**, v. 19, n. 3, p.247-249, nov. 2001.

STEINMETZ, S.; MIORI, P. R. B. Melhoria do sistema de vedação de tubos solarímetros construídos com placa de circuito impresso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba, **Anais do...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p.207-209.

STRASSBURGER, A. **Crescimento da abobrinha italiana cultivada em substrato de casca de arroz in natura com recirculação da solução nutritiva em duas estações de cultivo**. 2007, 119f. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS.

TOLEDO, L. R. **Plasticultura**. Disponível em:
<<http://www.globo rural.globo.com/barra.asp?d=/edit/171/rep.estuf.htm>>. Acesso em: 12 ago. 2006.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 2002. 449 p.

VIEIRA, A. R. R.; SCHNEIDER, L., MARQUES JÚNIOR, S.; JUSTINO, R.G.B.; ZUCCALMAGLIO, G. V.; DA SILVA, J. G. Caracterização térmica e hídrica da cultura do feijão-de-vagem na região da grande Florianópolis. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.33, n.6, 1998.

VIEIRA, C. Influência das épocas de plantio sobre as etapas de desenvolvimento do feijoeiro. **Revista Ceres**. v.38, p.439-443, 1991.

APÉNDICES

APÊNDICE A – Observações meteorológicas externas ao ambiente protegido

Tabela1A – Observações meteorológicas realizadas na Estação Agroclimatológica de Pelotas, convênio UFPel/EMBRAPA, durante o período de 19 de março a 11 de junho de 2007.

Data	Variáveis								
	RS	I	PR**	TA	TM	Tm	UR	EV	VM
19/03	432	7,6	33,8	21,7	26,4	19,0	85,3	5,8	1,8
20/03	460	10,5	0,0	21,7	27,2	18,0	85,3	5,2	1,3
21/03	469	10,7	0,0	21,6	27,2	17,6	87,0	5,3	1,3
22/03	411	10,2	0,0	23,0	27,8	18,2	84,0	5,6	2,0
23/03	353	7,7	1,4	25,0	32,2	21,0	83,5	3,7	1,5
24/03	307	5,0	0,0	21,5	25,8	19,8	84,0	5,7	1,0
25/03	209	1,8	0,0	22,5	26,0	18,6	83,8	1,7	1,5
26/03	231	3,6	0,4	23,2	27,4	20,4	86,3	1,7	1,4
27/03	284	2,5	0,2	22,8	28,0	19,0	88,0	3,7	1,3
28/03	244	3,3	7,6	23,5	27,8	21,6	92,0	3,5	1,9
29/03	217	0,9	0,0	25,2	28,8	22,2	91,0	2,7	2,8
30/03	400	8,3	0,2	26,0	36,2	22,4	80,8	6,7	2,2
31/03	242	2,2	0,2	23,6	28,0	21,0	88,5	3,5	1,9
01/04	295	4,1	0,0	22,9	26,2	20,6	77,8	4,4	2,7
02/04	60	0,0	24,6	22,2	24,6	20,8	97,5	6,9	1,6
03/04	276	3,3	35,2	21,7	26,2	19,6	90,0	4,1	1,0
04/04	412	10,5	0,0	20,7	27,0	18,2	87,3	4,5	1,2
05/04	401	9,7	0,0	20,2	25,4	17,0	83,0	5,6	1,5
06/04	323	8,9	0,0	21,9	25,4	18,2	71,0	5,7	4,2
07/04	222	2,0	10,0	22,3	27,4	20,4	86,8	2,9	1,9
08/04	214	3,2	9,0	20,3	23,0	18,2	89,8	3,0	3,7
09/04	280	5,3	0,8	17,8	22,8	15,0	83,9	3,0	1,2
10/04	416	10,4	0,0	18,0	26,0	11,4	85,0	3,9	1,0
11/04	389	10,1	0,0	22,4	29,8	15,0	77,5	6,4	2,4
12/04	424	10,5	10,0	16,2	23,8	13,0	77,5	7,6	1,7
13/04	424	10,5	0,0	15,6	23,4	7,8	78,8	3,2	1,9
14/04	324	6,2	0,0	21,2	27,0	15,2	87,8	5,1	1,9
15/04	249	2,6	0,0	20,9	27,0	16,4	90,0	3,6	0,9
16/04	176	2,4	0,0	21,0	25,6	18,0	93,3	1,6	0,9
17/04	331	9,3	0,0	23,1	28,4	20,0	88,0	4,9	2,0
18/04	381	9,5	0,0	22,9	28,0	20,4	89,3	5,5	1,9
19/04	379	10,3	0,0	24,3	31,6	20,8	82,5	5,9	1,7
20/04	357	10,2	0,0	24,6	32,8	17,8	82,0	4,7	1,2
21/04	128	1,3	0,0	22,9	26,6	21,0	92,8	2,1	1,5
22/04	293	7,8	0,0	24,1	29,0	21,4	91,3	3,8	1,5
23/04	274	6,0	0,0	23,8	32,6	19,0	87,5	7,5	1,4
24/04	84	0,0	28,6	20,6	22,8	18,6	96,3	1,3	1,0
25/04	76	0,0	8,7	19,0	21,8	18,0	95,0	1,3	1,7

Tabela1A – Observações meteorológicas realizadas na Estação Agroclimatológica de Pelotas, convênio UFPel/EMBRAPA, durante o período de 19 de março a 11 de junho de 2007.

Data	Variáveis*								
	RS	I	PR**	TA	TM	Tm	UR	EV	VM
26/04	336	8,6	17,6	15,2	19,8	13,6	75,5	6,0	3,6
27/04	340	10,2	0,0	13,1	18,0	9,6	73,5	3,8	1,5
28/04	363	10,1	0,0	14,2	21,6	7,8	88,8	2,4	0,9
29/04	293	6,8	0,0	15,9	23,0	10,8	91,0	1,6	0,5
30/04	339	7,7	0,0	15,8	25,0	10,4	90,8	3,5	1,1
01/05	274	6,1	7,0	19,2	27,6	15,4	88,8	6,7	1,3
02/05	147	0,1	0,0	19,8	23,4	18,0	92,5	1,6	0,8
03/05	280	8,3	0,0	19,4	23,0	13,6	85,0	3,8	3,4
04/05	90	0,0	56,2	19,3	22,6	17,2	93,8	3,1	3,4
05/05	50	0,0	36,0	19,1	21,2	18,4	94,5	1,3	1,2
06/05	57	0,0	4,2	18,0	19,4	16,8	96,0	1,0	2,6
07/05	247	5,3	0,0	13,0	17,6	11,0	75,5	3,9	3,0
08/05	301	9,6	0,0	10,4	15,2	6,8	70,0	4,8	4,3
09/05	314	8,8	0,0	10,8	16,2	7,4	79,8	2,3	2,6
10/05	273	8,3	0,0	12,9	19,8	8,2	87,0	2,2	0,8
11/05	156	2,7	0,0	15,3	21,4	10,6	89,8	1,6	1,0
12/05	315	8,9	0,0	12,4	17,2	10,4	77,5	3,6	1,9
13/05	127	2,2	0,0	11,7	15,6	5,8	95,0	0,5	1,2
14/05	280	8,3	0,0	14,2	21,0	10,6	86,5	2,1	0,5
15/05	268	6,5	0,0	14,7	20,8	8,4	85,8	3,1	2,2
16/05	183	3,4	0,0	13,4	18,2	11,0	79,3	3,0	1,9
17/05	201	6,1	0,0	9,4	15,6	4,6	82,0	2,4	1,1
18/05	273	8,7	0,0	9,2	16,6	4,6	85,8	2,0	0,7
19/05	304	9,9	0,0	10,0	19,6	3,2	77,3	1,9	0,4
20/05	280	8,5	0,0	11,5	20,4	3,6	93,0	1,9	0,7
21/05	96	0,2	0,6	14,7	17,4	11,0	96,3	0,7	1,1
22/05	46	0,0	0,0	13,2	15,8	12,0	95,5	1,0	1,9
23/05	243	7,6	0,0	10,2	15,2	8,6	77,8	3,4	4,1
24/05	283	9,2	0,0	9,7	15,8	6,0	76,0	2,9	1,8
25/05	285	10,0	0,0	9,6	18,0	4,4	84,5	2,3	0,5
26/05	288	9,9	0,0	8,8	18,0	1,6	85,0	2,1	0,8
27/05	253	8,3	0,0	9,0	15,6	3,8	91,0	2,4	1,9
28/05	276	8,8	0,0	7,0	12,4	5,0	71,0	3,7	4,2
29/05	156	5,2	0,0	8,0	13,8	3,2	82,3	2,0	3,6
30/05	211	6,7	0,0	10,4	16,4	7,8	92,3	3,2	1,0
31/05	218	5,9	0,0	11,1	17,6	4,0	84,5	1,5	1,5
01/06	56	0,0	1,6	10,9	13,4	9,2	85,0	1,0	2,1
02/06	274	9,8	0,0	10,9	17,2	7,2	60,3	4,6	3,7
03/06	277	9,9	0,0	13,9	18,2	10,0	48,8	7,4	4,1
04/06	273	9,9	0,0	12,5	20,2	9,2	65,0	2,3	1,0
05/06	280	9,7	0,0	11,8	22,0	5,0	71,3	3,0	0,8

Tabela1A – Observações meteorológicas realizadas na Estação Agroclimatológica de Pelotas, convênio UFPel/EMBRAPA, durante o período de 19 de março a 11 de junho de 2007.

Data	Variáveis*								
	RS	I	PR**	TA	TM	Tm	UR	EV	VM
06/06	255	7,3	0,0	11,6	22,0	4,2	77,8	2,7	0,5
07/06	265	9,2	0,0	9,2	19,0	3,6	87,8	1,8	0,7
08/06	131	2,4	0,0	8,5	12,4	3,4	96,3	2,2	2,0
09/06	37	0,0	20,2	14,4	16,6	9,6	95,3	0,5	1,7
10/06	60	0,1	4,4	14,0	16,2	12,4	90,8	2,5	1,1
11/06	8	0,0	19,4	14,5	16,4	11,6	98,0	0,7	1,1

*RS - radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); I - insolação (horas e décimos); PR - precipitação pluviométrica (mm); TA - temperatura média diária ($^{\circ}\text{C}$); TM - temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$); Tm - temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$); UR - umidade relativa (%); EV - evaporação tanque Classe A (mm); VM - velocidade média do vento à 2m de altura (m s^{-1}).

**Precipitação pluviométrica registrada nas leituras das 9h, 15h e 21h.

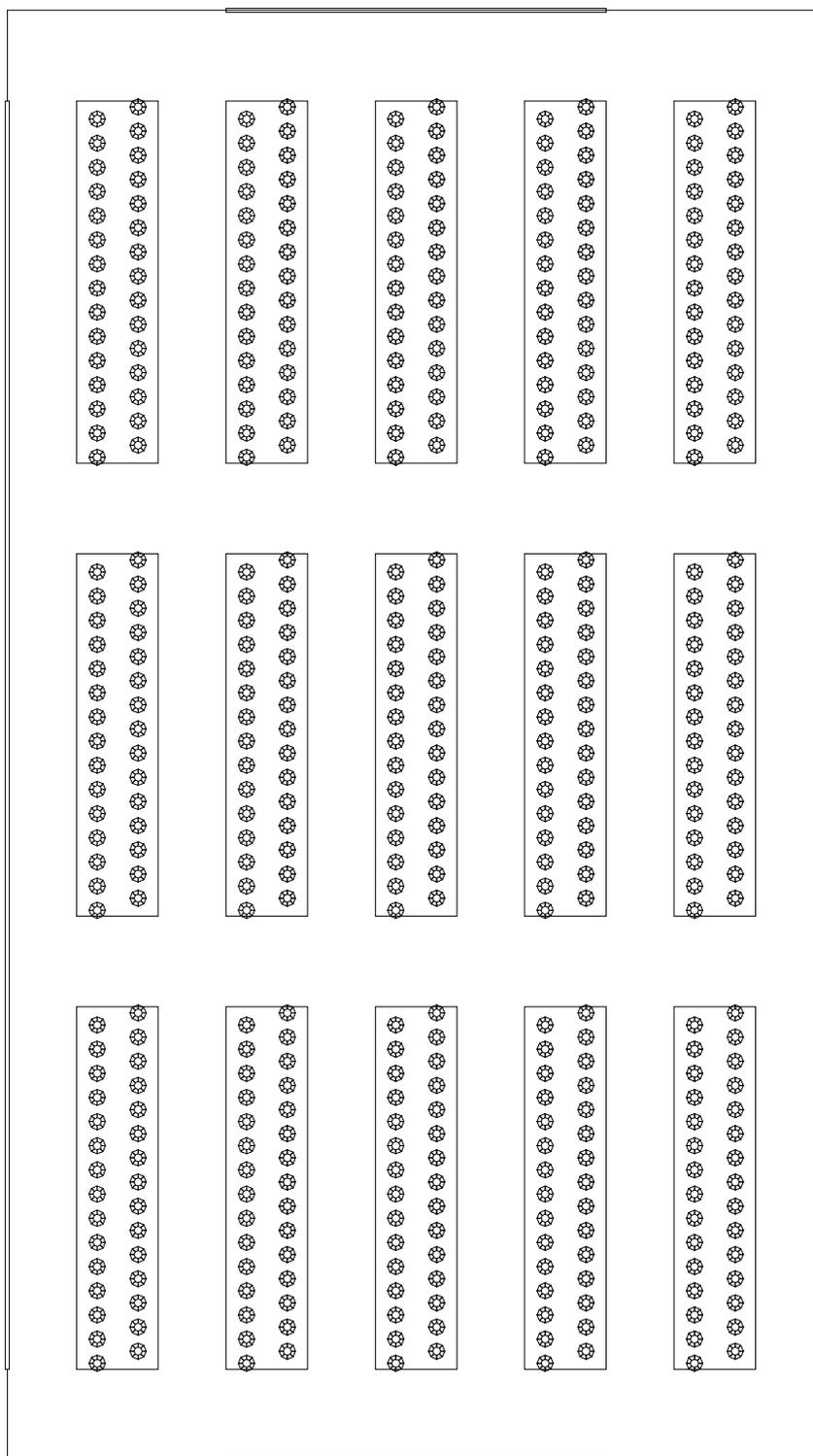
APÊNDICE B – Croqui do ambiente protegido

Figura 1B – Croqui do ambiente protegido

APÊNDICE C – Sensores e equipamentos no interior do ambiente protegido

Figura 1C – Saldo radiômetro



Figura 2C – Termômetros



Figura 3C – Tubos solarímetros



Figura 4C – Anemômetro