

GUSTAVO BASTOS LYRA

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E ANÁLISE DE
CRESCIMENTO PARA ALFACE (*Lactuca sativa* L.) CULTIVADA EM
SISTEMA HIDROPÔNICO EM CONDIÇÕES DE CASA-DE-VEGETAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de “*Magister Scientiae*”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

2002

GUSTAVO BASTOS LYRA

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E ANÁLISE DE
CRESCIMENTO PARA ALFACE (*Lactuca sativa* L.) CULTIVADA EM
SISTEMA HIDROPÔNICO EM CONDIÇÕES DE CASA-DE-VEGETAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de “*Magister Scientiae*”.

APROVADA: 13 de fevereiro de 2002

Prof. Gilberto C. Sedyama
(Conselheiro)

Prof. Luiz Cláudio Costa
(Conselheiro)

Dr^a. Maria Aparecida N. Sedyama

Prof. Aristides Ribeiro

Prof. Sérgio Zolnier
(Orientador)

A DEUS.

Aos meus avós paternos Israel (*in memoriam*) e Christina e
maternos Anésio (*in memoriam*) e Gersa (*in memoriam*).

Aos meus pais Feliciano (*in memoriam*) e Rita Maria

Aos meus irmãos Guilherme e Christina

Aos meus tios e primos.

DEDICO.

“Senhor dá-nos esta sabedoria que julga do alto e prevê
longe. Dá-nos o espírito que negligência o insignificante em
favor do essencial. Dá-nos a atividade calma que abrange com
um só olhar a totalidade. Ajuda-nos a aceitar a crítica e a
contradição. Faze-nos evitar a dispersão na desordem”.

SERTILLANGES

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À CAPES, pela concessão de bolsa de estudos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa.

Ao professor Sérgio Zolnier, pelo seu profissionalismo, pela dedicação, paciência, companheirismo e franqueza.

Aos professores Gilberto C. Sedyama, Luiz Cláudio Costa e a Doutora Maria Aparecida N. Sedyama, da EPAMIG, pelas críticas construtivas, sugestões apresentadas e pela amizade.

Ao professor José de Lima Filho pelos conselhos, amizade, apoio e presença na minha vida acadêmica.

Aos professores do curso de Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas pelos ensinamentos que me ajudaram, no decorrer do curso de mestrado, principalmente aos professores José Leonaldo e Roberto F. Lyra.

Aos eternos amigos Alailson Santiago, Cristiano Amaral, Carlos Henrique Eça, Ednaldo, Eduardo Jorge, Evaldo Júnior, Erickson Jesus, Hewlley, José Francisco Júnior, Paulo José, Taciana.

Ao meu irmão Guilherme e ao amigo José Luiz Cabral, pela tranqüila convivência durante a minha permanência em Viçosa, e por me apoiarem nos momentos de dificuldade.

À Vanessa da Silveira Duarte pelo companheirismo e compreensão na maioria dos momentos.

Aos novos amigos Alexandre, Bérqson, Danilo, Dalmácio, Diolino, Ítalo Guedes, Joaquim Branco, João, Lindenbergue, Olívio B. Neto, Silvia e Tânia, pelos momentos bons e sugestões.

Aos companheiros Márcio Catalunha e Nelson pela ajuda, na montagem e na coleta de dados no experimento, além da amizade.

Aos técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, que sempre me ajudaram no que foi necessário para o desenvolvimento desse trabalho.

BIOGRAFIA

GUSTAVO BASTOS LYRA – filho de Feliciano Lyra Neto (*in memoriam*) e Rita Maria Bastos Lyra - nasceu em 2 de outubro de 1975, na cidade de Maceió, Alagoas.

Em janeiro de 2000, graduou-se em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas em Maceió, Alagoas.

Em março de 2000, iniciou no programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, submetendo-se à defesa de tese em fevereiro de 2002.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
INTRODUÇÃO	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	4
ANÁLISE DE CRESCIMENTO E MODELAGEM PARA ALFACE (<i>Lactuca sativa</i> L.) CULTIVADA EM SISTEMA HIDROPÔNICO EM CONDIÇÕES DE CASA-DE-VEGETAÇÃO	6
RESUMO	6
1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1. Aspectos Gerais.....	10
2.2. Casa-de-vegetação	11
2.3. Sistema de Cultivo	12
2.4. Semeadura, Transplântio e Manejo das Plantas e da Solução Nutritiva	20
2.5. Sistema de Aquisição de Dados Meteorológicos.....	23
2.6. Matéria Fresca e Seca da Parte Aérea, Área Foliar e Comprimento Característico.....	24

2.7. Taxa de Assimilação Líquida, Razão de Área Foliar e Taxa de Crescimento Relativo	25
2.8. Graus-Dias e Graus-Dias Efetivos	26
2.9. Modelagem.....	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
3.1. Matéria Seca, Taxa de Crescimento Relativo e Área Foliar	28
3.2. Taxa de Assimilação Líquida e Razão de Área Foliar.....	33
3.3. Produtividade	36
3.4. Modelagem.....	38
4. CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA ALFACE (<i>Lactuca sativa</i> L.) CULTIVADA EM SISTEMA HIDROPÔNICO EM CONDIÇÕES DE CASA-DE-VEGETAÇÃO	51
RESUMO	51
1. INTRODUÇÃO	52
2. MATERIAL E MÉTODOS	54
2.1. Aspectos Gerais.....	54
2.2. Sistema de aquisição de dados	55
2.3. Medição da Evapotranspiração da Cultura (ET_c)	57
2.4. Estimativas da Resistência Aerodinâmica (r_h)	59
2.5. Determinação da Resistência da Cultura (r_c) ao Processo de Difusão do Vapor d'água	60
2.5.1. Balanço de Radiação na Casa-de-Vegetação.....	61
2.6. Estimativa da Evapotranspiração da Cultura (ET_c)	63
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
3.1. Determinação da Resistência da Cultura (r_c)	66
3.2. Variação Diurna da Resistência da Cultura	68
3.3. Simulação e Análise da Evapotranspiração Durante o Ciclo da Cultura.....	70
3.4. Ajuste do modelo de Penman-Monteith	75
3.5. Variação Diurna da Evapotranspiração	81
4. CONCLUSÕES	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
RESUMO E CONCLUSÕES	90

LISTA DE QUADROS

	Página
1.1 - Quantidade de sais para o preparo de 1000 L de solução nutritiva	21
1.2 - Quantidade de sais para o preparo das soluções de ajuste	22
1.3 - Parâmetros da análise de regressão para taxa de assimilação líquida (TAL), razão de área foliar (RAF) tendo dias após o transplântio (DAT) como variável independente e de matéria fresca da parte aérea da planta (PF), tendo graus-dias (GD) como variável independente. Os resultados referem-se aos cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes	35
1.4 - Coeficientes de determinação ajustados dos modelos de crescimento, para alface, cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (DAT), graus-dias (GD) e graus-dias efetivos (GDE).....	39
1.5 - Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliado para alface, cultivar Grand Rapids, tendo como variáveis independentes, dias após o transplântio (DAT), graus-dias (GD) e graus-dias efetivos (GDE), e valores experimentais medidos da taxa de crescimento relativo máxima (r). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses	44

1.6 -	Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliado para alface, cultivar Regina, tendo como variáveis independentes, dias após o transplântio (DAT), graus-dias (GD) e graus-dias efetivos (GDE), e valores experimentais medidos da taxa de crescimento relativo máxima (r). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses	45
1.7 -	Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliado para alface, cultivar Great Lakes, tendo como variáveis independentes, dias após o transplântio (DAT), graus-dias (GD) e graus-dias efetivos (GDE), e valores experimentais medidos da taxa de crescimento relativo máxima (r). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado em parênteses	45
2.1 -	Valores médios diários da resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão de vapor d'água para alface, cultivares Grand Rapids, Great Lakes e Regina. Os valores mostrados foram determinados depois do fechamento do dossel, porém antes do período de formação de cabeça	67

LISTA DE FIGURAS

		Página
1.1 -	Vista geral da casa-de-vegetação, localizada na área experimental da Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa/MG	12
1.2 -	Fachada frontal e lateral da casa-de-vegetação, localizada na área experimental da Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa/MG	13
1.3 -	Disposição das bancadas de cultivo no interior da casa-de-vegetação	14
1.4 -	Corte transversal e longitudinal da casa-de-vegetação, mostrando a disposição vertical dos sensores utilizados para o monitoramento das variáveis do ambiente	15
1.5 -	Detalhe superior e sistema hidráulico da bancada de cultivo, no interior da casa-de-vegetação	16
1.6 -	Vista geral das bancadas de cultivo, com a cultura da alface na fase inicial	17
1.7 -	Vista superior da casa-de-vegetação, com ênfase à distribuição horizontal dos sensores	18
1.8 -	Croqui do sistema hidráulico das bancadas de cultivo	19
1.9 -	Vista do sistema hidráulico das bancadas de cultivo. Tanque de medição (A), tanque de armazenamento da solução nutritiva (B), bomba (C).....	20

1.10 -	Sistema de aquisição de dados. Microcomputador (A) e placa de aquisição de dados (B)	23
1.11 -	Sensores de radiação fotossinteticamente ativa (A) e temperatura e umidade (B)	24
1.12 -	Valores observados do índice de área foliar (●), em função dos graus-dias acumulados (GD) depois do transplântio, e curva ajustada pelo modelo (—). Os gráficos referem-se aos cultivares Grand Rapids (A), Regina (B) e Great Lakes (C) ...	30
1.13 -	Valores observados da área foliar (●), em função do comprimento característico, e curva ajustada pelo modelo (—). Os gráficos referem-se aos cultivares Grand Rapids (A), Regina (B) e Great Lakes (C)	32
1.14 -	Taxa de assimilação líquida (A) e razão de área foliar (B), em função de dias decorridos após o transplântio (DAT). Valores observados e curvas ajustadas pelos modelos referem-se aos cultivares Grand Rapids (●,—), Regina (▲, ····) e Great Lakes (■, ---).....	34
1.15 -	Valores observados da matéria fresca da parte aérea (●), em função dos graus-dias (GD) acumulados depois do transplântio, e curva ajustada pelo modelo (—). Os gráficos referem-se aos cultivares Grand Rapids (A), Regina (B) e Great Lakes (C)	37
1.16 -	Valores de matéria seca acumulada, observada e estimada pelos modelos expolinear (A, B, C), logístico (D, E, F) e Gompertz (G, H, I), tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (A, D, G), graus-dias (B, E, H) e graus-dias efetivos (C, F, I), para alface, cultivar Grand Rapids	41
1.17 -	Valores de matéria seca acumulada, observada e estimada pelos modelos expolinear (A, B, C), logístico (D, E, F) e Gompertz (G, H, I), tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (A, D, G), graus-dias (B, E, H) e graus-dias efetivos (C, F, I), para alface, cultivar Regina	42
1.18 -	Valores de matéria seca acumulada, observada e estimada pelos modelos expolinear (A, B, C), logístico (D, E, F) e Gompertz (G, H, I), tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (A, D, G), graus-dias (B, E, H) e graus-dias efetivos (C, F, I), para alface, cultivar Great Lakes	43

2.1 -	Sensores de velocidade do ar (A) e radiação incidente (B)	56
2.2 -	Representação esquemática dos principais componentes do balanço de radiação à superfície da bancada de cultivo e à superfície do piso da casa-de-vegetação	62
2.3 -	Vista geral da cultura da alface depois do fechamento do dossel, porém antes do período de formação de cabeça	65
2.4 -	Variação do saldo de radiação (R_n), do déficit de pressão de vapor (DPV) e da resistência da cultura (r_c) do cultivar Grand Rapids. As medições foram conduzidas no dia 19/07/2001, ente 08:00 e 16:00 h, no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada	69
2.5 -	Variação do saldo de radiação (R_n), do déficit de pressão de vapor (DPV) e da resistência da cultura (r_c) do cultivar Regina. As medições foram conduzidas no dia 19/07/2001, ente 08:00 e 16:00 h, no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada	69
2.6 -	Variação do saldo de radiação (R_n), do déficit de pressão de vapor (DPV) e da resistência da cultura (r_c) do cultivar Great Lakes. As medições foram conduzidas no dia 19/07/2001, ente 08:00 e 16:00 h, no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada	70
2.7 -	Variação do fluxo de calor latente (LE) do cultivar Grand Rapids, em função dos graus-dias acumulados durante o ciclo da cultura, para diferentes níveis do saldo de radiação (R_n) e do déficit de pressão de vapor d'água (DPV). O valor de R_n de 100 W m^{-2} foi combinado com os níveis de DPV de 500, 1000, 1500 e 2000 Pa (A) e o valor de 2000 Pa foi combinado níveis de R_n de 100, 200, 300 e 400 W m^{-2} (B)	71
2.8 -	Variação do fluxo de calor latente (LE) do cultivar Regina, em função dos graus-dias acumulados durante o ciclo da cultura, para diferentes níveis do saldo de radiação (R_n) e do déficit de pressão de vapor d'água (DPV). O valor de R_n de 100 W m^{-2} foi combinado com os níveis de DPV de 500, 1000, 1500 e 2000 Pa (A) e o valor de 2000 Pa foi combinado níveis de R_n de 100, 200, 300 e 400 W m^{-2} (B)	72
2.9 -	Variação do fluxo de calor latente (LE) do cultivar Great Lakes, em função dos graus-dias acumulados durante o ciclo da cultura, para diferentes níveis do saldo de radiação (R_n) e do déficit de pressão de vapor d'água (DPV). O valor de R_n de 100 W m^{-2} foi combinado com os níveis de DPV de 500, 1000, 1500 e 2000 Pa (A) e o valor de 2000 Pa foi combinado níveis de R_n de 100, 200, 300 e 400 W m^{-2} (B)	73

2.10 -	Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. Os valores apresentados referem-se ao cultivar Grand Rapids com IAF médio de 0,14 (A), 0,28 (B), 0,60 (C), 1,28 (D) e 2,85 (E)	76
2.11 -	Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. Os valores apresentados referem-se ao cultivar Regina com IAF médio de 0,11 (A), 0,26 (B), 0,71 (C), 2,25 (D) e 4,06 (E) ..	77
2.12-	Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. Os valores apresentados referem-se ao cultivar Great Lakes com IAF médio de 0,12 (A), 0,23 (B), 0,55 (C), 1,39 (D) e 2,52 (E)	78
2.13 -	Variação da radiação incidente (R_i), do déficit de pressão de vapor (DPV) e do fluxo de calor latente (LE) observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. As medições foram conduzidas no dia 03/06 (A) e 07/06/2001 (B), entre 08:00 e 16:00h, e os valores medidos de LE referem-se ao cultivar Grand Rapids com IAF de 1,52 e 3,06, respectivamente	83
2.14 -	Variação da radiação incidente (R_i), do déficit de pressão de vapor (DPV) e do fluxo de calor latente (LE) observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. As medições foram conduzidas no dia 03/06 (A) e 07/06/2001 (B), entre 08:00 e 16:00h, e os valores medidos de LE referem-se ao cultivar Regina com IAF 2,14 e 2,37 (A) e de 3,62 e 4,49 (B)	84
2.15 -	Variação da radiação incidente (R_i), do déficit de pressão de vapor (DPV) e do fluxo de calor latente (LE) observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. As medições foram conduzidas no dia 03/06 (A) e 07/06/2001 (B), entre 08:00 e 16:00h, e os valores medidos de LE referem-se ao cultivar Great Lakes com IAF de 1,33 e 1,46 (A) e ambos de 2,52 (B)	85

RESUMO

LYRA, Gustavo Bastos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2002. **Estimativa da evapotranspiração e análise de crescimento para alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em sistema hidropônico em condições de casa-de-vegetação**. Orientador: Sérgio Zolnier. Conselheiros: Gilberto C. Sedyama, Luiz Cláudio Costa.

Foram conduzidos dois experimentos independentes em casa-de-vegetação não-climatizada, tipo cobertura em arco, coberta com um filme de polietileno, com a maior dimensão no sentido Norte-Sul. A casa-de-vegetação foi construída na área experimental do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Os objetivos principais do trabalho foram: a) ajustar modelos de crescimento para simular a variação do índice de área foliar (IAF) depois do transplântio e b) determinar o valor da resistência da cultura (r_c) para três cultivares de alface (Grand Rapids, Regina e Great Lakes), sob cultivo hidropônico. O objetivo complementar foi avaliar as diferenças de crescimento entre os cultivares de alface, utilizando modelos e componentes de crescimento, tais como o modelo expolinear, logístico e Gompertz.

As plantas foram cultivadas em sistema hidropônico com circulação laminar de nutrientes (NFT), no espaçamento de 0,25 m entre plantas e linhas. Foram coletados dados do ambiente e da planta, no período de 18/05 a 09/06/2001 (1º experimento) de 24/06 a 26/07/2001 (2º experimento). O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com três tratamentos (cultivares) e duas repetições (plantas dispostas nas bancadas de crescimento).

Pela análise de crescimento, os cultivares não apresentaram diferenças estatísticas significativas com relação à matéria seca final (MS), porém o cultivar do tipo lisa (Regina) apresentou uma área foliar (AF) 54% maior que os cultivares do tipo crespa (Grand Rapids e Great Lakes), mostrando que esse cultivar necessitou de uma AF maior para a mesma produção de MS. Os modelos de crescimento (expolinar, logístico e Gompertz) foram capazes de simular muito bem o acúmulo de matéria seca depois do transplântio de todos os cultivares de alface em questão. Valores dos coeficientes de determinação ajustados estiveram acima de 98,47% para todos os modelos avaliados. O índice de área foliar se ajustou bem ao modelo proposto por GOUDRIAAN & MONTEITH (1990), tendo graus-dias (GD) como variável independente, com coeficientes de determinação acima de 99,55%.

A resistência da cultura foi determinada após o fechamento do dossel na bancada de cultivo, porém antes do período de formação de cabeça. Os valores médios de r_c encontrados foram $88 (\pm 1)$, $103 (\pm 11)$ e $105 (\pm 14)$ s m^{-1} , os quais estiveram associados aos IAFs de $2,40 (\pm 0,02)$, $2,87 (\pm 0,06)$ e $3,91 (\pm 0,49)$, respectivamente para os cultivares Grand Rapids, Great Lakes e Regina. Os valores de r_c , citados anteriormente, os quais foram determinados entre 8:00 e 16:00 horas, foram então usados na equação de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração. Verificou-se que o modelo de Penman-Monteith estimou de forma satisfatória a evapotranspiração da cultura (ET_c) para valores de IAF superiores a 0,5. Apenas para o período inicial de crescimento, correspondendo a duas semanas depois do transplântio, os resultados não foram muito consistentes, sendo que o modelo superestimou ou subestimou a ET_c dependendo do cultivar. Verificou-se também que o modelo apresentou uma pequena tendência de superestimar os valores de ET_c no início da manhã e final da tarde porque valores constantes de r_c foram utilizados durante o período diurno.

ABSTRACT

LYRA, Gustavo Bastos, M.S., Universidade Federal de Viçosa, February, 2002.
Evapotranspiration estimate and growth analysis for lettuce (*Lactuca sativa* L.) grown in a hydroponic system under greenhouse conditions.
Adviser: Sérgio Zolnier. Committee members: Gilberto C. Sedyama, Luiz Cláudio Costa.

Two independent experiments were carried out in a non-environmentally controlled greenhouse, arch framing construction, covered with a single-layer of polyethylene, with the ridge running in the north to south orientation. The greenhouse was constructed in the experimental area of the Agricultural Engineering Department at the Federal University of Viçosa (Brazil). The main objectives of the present work were: a) to evaluate the goodness of fit of growth models to simulate the variation of the leaf area index (LAI) after transplanting; and b) to determine the value of the crop resistance (r_c) for three cultivars of lettuce (Grand Rapids, Regina and Great Lakes), growing under a hydroponic system. The complementary objective was to evaluate growth differences among cultivars, using models and growth components, such as the expolinear, logístico and Gompertz.

The plants, arranged 0.25 m apart, were grown in a hydroponic system with a nutrient film technique (NFT). Environmental and plant data was collected from May 18 until 9 June (1° experiment) and from June 24 until July 26 (2° experiment) in 2001. The experiments were carried out as a completely

randomized design with three treatments (cultivars) and two replications (plants arranged in greenhouse benches).

From growth analysis, it was noticed that accumulated dry matter, measured at the end of experiment, was not statistically different among cultivars, however, leaf area for cultivar Regina was 54% above those for Grand Rapids and Great Lakes, indicating that this cultivar needed a larger leaf area for the same dry matter production. The growth models (expolinear, logístico and Gompertz) were capable of simulating very well accumulated dry matter after transplanting for all cv. studied. Values of the adjusted determination coefficient were above 98,47% for all models evaluated in this research. Leaf area index measurements fitted well to the growth model proposed by GOUDRIAAN & MONTEITH (1990), with day-degrees (GD) as independent variable, providing determination coefficients above 99,55%.

The crop resistance was determined after canopy closure on the greenhouse bench, but before head formation. Average r_c values were 88 (± 1), 103 (± 11) and 105 (± 14) $s\ m^{-1}$, which were associated with the LAIs of 2,40 ($\pm 0,02$), 2,87 ($\pm 0,06$) and 3,91 ($\pm 0,49$), for cv. Grand Rapids, Great Lakes and Regina respectively. The mentioned r_c values were then used in Penman-Monteith equation for estimating evapotranspiration. These r_c values were determined during the period between 8:00 am and 04:00 pm. It was verified that the Penman-Monteith model provided good estimates of evapotranspiration for leaf area index (LAI) greater than 0.5, but the method was not robust to estimate the crop evapotranspiration (ET_c) in the first two weeks after transplanting. During this period, the model sometimes overestimate or underestimate ET_c depending on cultivar. Additionally, it was noticed that the model overestimated ET_c early in the morning and late afternoon because a constant value of the surface diffusive resistance (r_c) was used during the day.

INTRODUÇÃO

A produção de alface em sistemas hidropônicos em ambiente protegido tem despertado, em razão das vantagens proporcionadas por essa técnica de cultivo, o interesse não só dos técnicos e pesquisadores, mas também dos produtores. Dentre tais vantagens, destaca-se o planejamento da produção ao longo do ano, favorecendo a oferta regular de produto de alta qualidade e a obtenção de melhores preços quando a produção ocorre na entressafra (FAQUIN & FURLANI, 1999). Atualmente, a alface é a principal cultura produzida em hidroponia no Brasil, principalmente na técnica de circulação laminar de nutrientes (NFT).

O crescimento e desenvolvimento das plantas em sistemas hidropônicos, além de ser influenciado pelas condições meteorológicas do ambiente de cultivo e, principalmente, pelo manejo da solução nutritiva, sofre também a ação de características da própria planta, como partição de matéria seca e estrutura do dossel (HAY & WALKER, 1989).

Devido à complexidade de interação dos diversos fatores relacionados à produção vegetal, a análise de crescimento é uma ferramenta extremamente útil para auxiliar o pesquisador na identificação de diferenças de crescimento entre espécies e mesmo entre cultivares (BENINCASA, 1988). Além do mais, a análise de crescimento facilita a compreensão das interações ambiente-planta, permitindo, portanto, identificar os cultivares mais apropriados para o cultivo em um sistema de produção vegetal característico e sob condição ambiental particular.

Em sistemas hidropônicos, os nutrientes requeridos para o crescimento e desenvolvimento das plantas são incorporados na água da irrigação. Apesar de não informar a concentração individual de sais presentes na solução nutritiva, a condutividade elétrica (CE) é uma variável extremamente útil no monitoramento da concentração total de sais na solução.

Um elemento que afeta de forma dinâmica a concentração apropriada de nutrientes para uma determinada planta é a transpiração, a qual tem um papel de destaque na relação entre o consumo de nutrientes e o consumo de água pela planta. Medições diretas do consumo de água pelas plantas, em sistemas hidropônicos, são difíceis de serem conduzidas ou não são convenientemente obtidas e, portanto, estimativas da evapotranspiração, baseadas em medições dos elementos meteorológicos no ambiente de cultivo, são importantes para o manejo automático da aplicação de água (HAMER, 1997).

Embora vários métodos venham sendo testados e usados para a estimativa de evapotranspiração em condições de campo, em ambientes protegidos o método de Penman-Monteith tem sido utilizado preferencialmente por vários autores (ZHANG & LEMEURE, 1992; BAILLE et al., 1994; ZOLNIER, 1999). O desenvolvimento teórico do modelo de Penman-Monteith é apresentado por MONTEITH (1965).

Apesar de ser reconhecido internacionalmente, uma das limitações para a difusão do método de Penman-Monteith é a estimativa de certos parâmetros, tais como, resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão de vapor d'água e resistência aerodinâmica (r_h) ao processo de difusão do calor sensível. De acordo com ROSENBERG et al. (1983), esses parâmetros estão disponíveis para um número limitado de culturas e para condições de ambientes específicos.

A resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão de vapor d'água, pode ser estimada por extrapolação da resistência estomática, obtida por meio de medições realizadas com porômetros, ou por meio da inversão do modelo de evapotranspiração de Penman-Monteith (SMITH & BARRS, 1988).

A inversão do modelo de Penman-Monteith é considerada, pelo menos teoricamente, a técnica mais apropriada para a determinação da resistência da cultura (r_c) à difusão de vapor d'água, desde que os componentes do balanço de

energia sejam medidos com exatidão. Para a aplicação dessa técnica é necessária a estimativa da resistência aerodinâmica (r_h) da cultura ao processo de difusão de calor sensível a partir de equações de transferência de calor por convecção.

Com base no exposto, os objetivos do trabalho foram: a) ajustar modelos de crescimento para simular a variação do índice de área foliar (IAF) depois do transplântio das mudas, possibilitando, posteriormente, a estimativa da evapotranspiração e b) determinar o valor da resistência da cultura (r_c) para três cultivares de alface (Grand Rapids, Regina e Great Lakes), sob cultivo hidropônico, por meio da inversão do modelo de Penman-Monteith. O objetivo complementar foi avaliar as diferenças de crescimento entre os cultivares de alface, utilizando modelos e componentes de crescimento, tais como o modelo expolinear, logístico e Gompertz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAILLE, M.; BAILLE, A.; LAURY, J.C. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. **Scientia Horticulturae**, v.59, p. 217-232, 1994.
- BENINCASA, M.M.P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 44 p.
- FAQUIN, V.; FURLANI, P.R. **Cultivo de hortaliças de folhas em hidroponia em ambiente protegido**. Informe Agropecuário, n. 20 v. 200/201, p. 99-104, 1999.
- HAY, R.K.M.; WALKER, A.J. **An introduction to the physiology of crop yield**. Lexington (UK): Longman Scientific & Technical, 1989.
- HAMER, P.J.C. Simulating the irrigation requirements of a greenhouse crop. **Acta Horticulturae**, v. 443, p. 147-154, 1997.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, p. 205-234, 1965.
- ROSENBERG, N.J.; BLAD, L.B.; SHASHI, B.V. **Microclimate: The biological environment**. 2 .ed. New York: John Wiley & Sons, 1983. 495 p.
- SMITH, R.C.G.; BARRS, H.D. Inferring stomatal resistance of sparse crops from infrared measurements of foliage temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 42, p. 183-198, 1988.
- ZHANG, L.; LEMEUR, R. Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 58, p. 209-228, 1992.

ZOLNIER, S. **Dynamic misting control techniques for poinsettia propagation.** Lexington: UK, 1999. 343p. (Ph.D. Thesis Agricultural Engineering) - Biosystems and Agricultural Engineering Department, University of Kentucky, 1999.

ANÁLISE DE CRESCIMENTO E MODELAGEM PARA ALFACE (*Lactuca sativa* L.) CULTIVADA EM SISTEMA HIDROPÔNICO EM CONDIÇÕES DE CASA-DE-VEGETAÇÃO

RESUMO

O estudo experimental foi conduzido em casa-de-vegetação não-climatizada, tipo cobertura em arco, com três cultivares de alface (Grand Rapids, Regina e Great Lakes), em sistema hidropônico com circulação laminar de nutrientes (NFT), no espaçamento de 0,25 m entre plantas e linhas, localizada na área experimental da Meteorologia Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola (UFV), Viçosa-MG, no período de 24/06 a 26/07/2001. Os objetivos foram: a) avaliar diferenças de crescimento, utilizando algumas componentes de crescimento e modelos estatísticos e b) o ajuste de modelos expolinear, logístico e Gompertz ao acúmulo de matéria seca depois do transplântio das mudas. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com três tratamentos (cultivares) e duas repetições (plantas dispostas nas bancadas de crescimento).

Dentre os vários componentes de crescimento utilizados, os mais importantes foram a matéria seca acumulada, matéria fresca, área foliar, taxa de assimilação líquida (TAL) e razão de área foliar (RAF). A análise desses componentes mostrou resultados interessantes no que diz respeito às relações entre matéria seca acumulada, área foliar e TAL. Embora a matéria seca acumulada no final do ciclo não diferiu estatisticamente entre cultivares, resultados da área foliar para o cultivar Regina foram 54% superiores aos dos cultivares Grand Rapids e Great Lakes. Esse fato indica a menor taxa de fotossíntese líquida do cultivar Regina, considerando-se a matéria seca produzida por unidade de área foliar. Adicionalmente, observou-se um comportamento anômalo da RAF na fase final do experimento. Em contraste com os resultados obtidos em campo, verificou-se as curvas da RAF para todos os cultivares apresentaram uma diminuição até 25 dias após o transplântio e cresceram em seguida. Finalmente, vários modelos estatísticos foram ajustados aos

componentes de crescimento e de produtividade, permitindo a estimativa desses elementos, em estudos de eficiência de uso de água em condições de casa-de-vegetação. O modelo expolinear, tendo graus-dias (GD) como variável independente, ajustou-se bem ($R^2_{aj} > 99,55\%$) aos dados experimentais do índice de área foliar. Similarmente, a análise de regressão não-linear mostrou que o modelo expolinear ajustou-se muito bem ($R^2_{aj} > 99,65\%$) aos valores experimentais da matéria fresca.

Os ajustes dos modelos de crescimento (expolinear, logístico e Gompertz) foram efetuados utilizando-se três variáveis independentes, denominadas “dias após o transplântio” (DAT), “graus-dias” (GD) e “graus-dias efetivos” (GDE). Resultados da análise de regressão não-linear demonstraram que todos os modelos foram capazes de simular o acúmulo de matéria seca depois do transplântio de todos os cultivares de alface em questão. Valores dos coeficientes de determinação ajustados estiveram acima de 98,47% para todos os modelos avaliados. Entretanto, a taxa máxima de crescimento relativo, representada pelo parâmetro r , foi superestimada pelo modelo Gompertz para os três cultivares. Resultados desse parâmetro, estimados pelo referido modelo, foram, aproximadamente, 60% superiores aos valores experimentais medidos logo depois ao transplântio. Em contraste, os modelos logístico e expolinear forneceram estimativas próximas dos valores observados. No que se refere à variável independente DAT, GD e GDE, os resultados de ajuste e de estimativa dos parâmetros de regressão foram bastante similares. Entretanto, o empirismo associado à variável independente DAT limita a aplicação dos resultados somente para condições ambientais semelhantes às medidas no interior da casa-de-vegetação no período do experimento.

1. INTRODUÇÃO

O cultivo comercial da alface em sistemas hidropônicos é bastante recente no Brasil, sendo observado nos últimos anos, seu crescimento como técnica de produção vegetal (SEDIYAMA et al., 2000). Atualmente a alface é a principal

cultura produzida em hidroponia no Brasil, principalmente no sistema de circulação laminar de nutrientes, conhecido e consagrado internacionalmente como NFT. De acordo com FAQUIN & FURLANI (1999), isso ocorre devido ao seu fácil manejo e ciclo rápido. O cultivo dessa hortaliça em sistemas hidropônicos pode ser adequado para que se obtenham maiores produções, por meio do controle da frequência de aplicação de água, da condutividade elétrica da solução nutritiva (CE) e do pH (JENSEN & COLLINS, 1985). Assim, em casas-de-vegetação não-climatizadas, a produtividade se torna dependente apenas das condições ambientais como temperatura, umidade relativa do ar, radiação fotossinteticamente ativa, velocidade do ar e duração do período diurno.

O crescimento e desenvolvimento da alface em sistemas hidropônicos, além de ser afetado pelas condições meteorológicas do ambiente de cultivo, sofrem a ação de fatores como partição de matéria seca, estrutura do dossel e interação entre genótipo e práticas agrícolas (HAY & WALKER, 1989).

Devido à complexidade de interação dos diversos fatores relacionados à produção vegetal, a análise de crescimento é uma ferramenta extremamente útil para auxiliar o pesquisador na identificação de diferenças de crescimento entre espécies e mesmo entre cultivares (BENINCASA, 1988). Por outro lado, ela facilita a compreensão das interações ambiente-planta, permitindo, portanto, identificar os cultivares mais apropriados para o cultivo em um sistema de produção vegetal característico e sob condição ambiental particular.

BENINCASA (1988) sugere a utilização de vários elementos para caracterizar o crescimento das plantas. Dentre eles, destaca-se o comprimento característico da folha, a área foliar, a matéria seca e matéria fresca total ou parcial da planta, além do número de unidades estruturais como folhas, frutos e entoe-nos. DENNETT & ISHAG (1998) utilizaram a matéria seca acumulada, índice de área foliar, razão de área foliar e taxa de crescimento relativo para avaliar o crescimento de plantas de ervilha, lentilha e fava, cultivadas em campo, sob diferentes densidades de plantio. TEI et al. (1996a) realizaram um estudo comparativo de análise de crescimento para plantas de alface, cebola e beterraba por meio da utilização de componentes de crescimento como matéria seca acumulada, razão de área foliar e taxa de crescimento relativo. Portanto, a

determinação dos componentes mencionados permite avaliar o crescimento de forma integral e, particularmente, a contribuição dos diferentes órgãos no crescimento total da planta.

Outra ferramenta que pode ser utilizada na avaliação do crescimento e desenvolvimento de plantas são os modelos de crescimento. Sendo necessário o ajuste dos mesmos para que se possa estimar de forma satisfatória a resposta das culturas ao ambiente e às interações com práticas culturais e sistemas de produção vegetal, como o sistema de NFT (TEI et al., 1996b).

Vários tipos de modelos (empíricos, semi-empíricos ou mecanísticos) podem ser usados, de acordo com suas habilidades, para facilitar a interpretação dos processos envolvidos no sistema de produção vegetal (JONES, 1992). Embora modelos mecanísticos tenham uma formulação científica (PENNING de VRIES & VAN LAAR, 1982), modelos semi-empíricos simples podem fornecer também informações e estimativas úteis, particularmente se forem baseados em parâmetros que permitem interpretação biológica (RICHARDS, 1959). Os modelos empíricos usados freqüentemente para estimar o crescimento de plantas incluem a função logística (PEARL & REED, 1920) e as funções Gompertz e Richards (AMER & WILLIAMS, 1957; RICHARDS, 1959).

Os modelos semi-empíricos incluem a função expolinear de GOUDRIAAN & MONTEITH (1990), para o crescimento de plantas em um dossel uniforme. Esse modelo é baseado na pressuposição de que a taxa de crescimento de qualquer cultura é proporcional à radiação interceptada, sendo exponencial quando as plantas estão isoladas, sem sombreamento mútuo, e linear depois do fechamento do dossel, quando a interceptação de radiação fotossinteticamente ativa é máxima (COSTA et al., 1999).

A variável independente tempo decorrido (tempo após a emergência, tempo após o transplântio, etc...) é comumente usada em modelos de crescimento. Todavia, as taxas dos processos metabólicos dependem da temperatura. Normalmente, assume-se que essa dependência é aproximadamente linear, sendo que o tempo térmico acumulado, expresso em graus-dias (GD), é usado como uma alternativa ao tempo decorrido após a emergência (TEI et al., 1996a). Por outro lado, o crescimento das plantas depende também dos níveis de

radiação fotossinteticamente ativa. SCAIFE et al. (1987) propuseram o tempo fototérmico, conhecido como graus-dias efetivo (GDE), para quantificar os efeitos combinados da temperatura e da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) no crescimento de plantas.

Baseado no exposto, este trabalho objetivou a avaliação de componentes de crescimento e o ajuste de modelos estatísticos aos componentes de crescimento e de produtividade, bem como o ajuste dos modelos expolinear, logístico e Gompertz ao acúmulo de matéria seca depois do transplântio, utilizando-se três variáveis independentes, denominadas “dias após o transplântio” (DAT), “graus-dias” (GD) e “graus-dias efetivos” (GDE), para três cultivares de alface, um do tipo lisa (Regina) e dois do tipo crespa (Grand Rapids e Great Lakes), produzidas em sistema hidropônico com a técnica de circulação laminar de nutrientes (NFT), em casa-de-vegetação não-climatizada.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Aspectos Gerais

O presente trabalho foi realizado na área experimental da Meteorologia Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG, de coordenadas geográficas: latitude 20° 45' 45" S, longitude 42° 52' 04" W e altitude de 690 m. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é Cwa (clima temperado quente – mesotérmico; chuvas no verão e seca no inverno; temperatura média do mês mais quente superior a 22°C).

Foram coletados dados do ambiente e da cultura da alface, cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, no período de 24 de junho a 26 de julho de 2001, em sistema hidropônico de circulação laminar de nutrientes (NFT), em condições de ambiente protegido.

2.2. Casa-de-vegetação

O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação não-climatizada, tipo cobertura em arco, com a maior dimensão orientada no sentido Norte-Sul, coberta com polietileno de baixa densidade (PEBD), aditivado contra raios ultravioleta (UV) e espessura de 150 μm . As laterais foram revestidas com tela plástica de cor branca, com 1 mm de malha, conhecida comercialmente como “clarite” para reduzir a entrada de insetos no ambiente de cultivo (Figuras 1.1 e 1.2).

A casa-de-vegetação apresentava características modulares e pré-fabricadas, com 15,0 m de comprimento, 7,0 m de largura (Figura 1.3) e altura central de 3,5 m (Figura 1.4), tomada em relação ao vértice da concavidade da cobertura. A superfície da casa-de-vegetação tinha uma área de 105 m², coberta por uma camada de pedra britada.

Os pilares de sustentação foram construídos na fábrica de pré-moldados da Universidade Federal de Viçosa, em concreto armado, adotando-se uma seção quadrada, com 0,10 m de lado e comprimento total de 2,70 m, de forma a permitir a fixação do mesmo no solo, a cerca de 0,70 m de profundidade, apresentando assim 2,0 m de pé direito (Figura 1.4). Os mesmos foram alinhados e posicionados a cada 2,3 m de distância entre eles (Figura 1.3).

Na parte superior dos pilares foi colocada uma peça de aço galvanizado, para possibilitar a instalação da estrutura metálica da cobertura, formando um semicírculo com 7,0 m de diâmetro e 1,5 m de altura central. Perpendicularmente, no vértice dos arcos, três canos de aço galvanizado (ϕ 0,02 m), com 15,0 m de comprimento, espaçados 1,0 m entre si, foram colocados para servir como apoio ao material da cobertura (PEBD), e fornecer estabilidade à estrutura (Figura 1.4).

Ao redor da casa-de-vegetação, a 0,15 e 2,00 m acima do solo, foram colocadas ripas de madeira com 0,7 m de largura e 2,00 m de comprimento, para fixação do PEBD e da tela plástica (clarite). Nas ripas superiores, foram afixadas o filme de polietileno e a parte superior da tela plástica; e às ripas inferiores, a parte inferior da tela plástica.

2.3. Sistema de Cultivo

A técnica utilizada para o cultivo hidropônico foi a de circulação laminar de nutrientes ou *nutrient film technique* (NFT). Nessa técnica a solução nutritiva é bombeada intermitentemente ou continuamente nos canais e escoam por gravidade, formando uma fina lâmina de solução que irriga as raízes.

As bancadas de cultivo foram compostas de cinco perfis hidropônicos, com 6,0 m de comprimento e 0,1 m de largura cada, com orifícios de 0,05 m de diâmetro, espaçados em 0,25 m, totalizando 24 orifícios por perfil, onde foram colocadas as mudas de alface dos cultivares em estudo. O espaçamento de centro a centro dos perfis foi de 0,25 m, com uma largura da bancada de cultivo de 1,0 m (Figuras 1.5 e 1.6). O espaçamento entre plantas e linhas foi de 0,25 x 0,25 m.



Figura 1.1 – Vista geral da casa-de-vegetação, localizada na área experimental da Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa/MG.

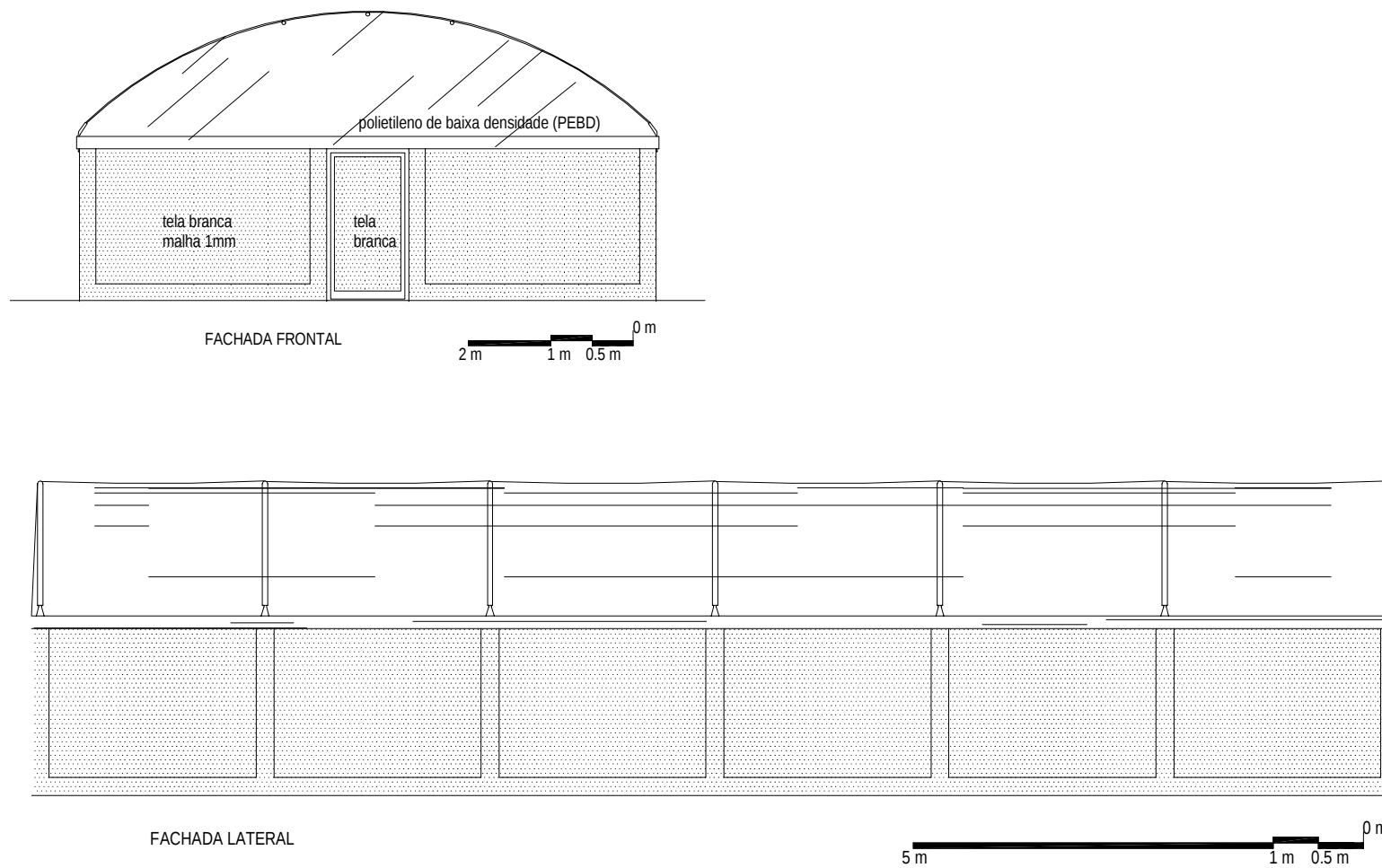


Figura 1.2 – Fachada frontal e lateral da casa-de-vegetação, localizada na área experimental da Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa/MG.

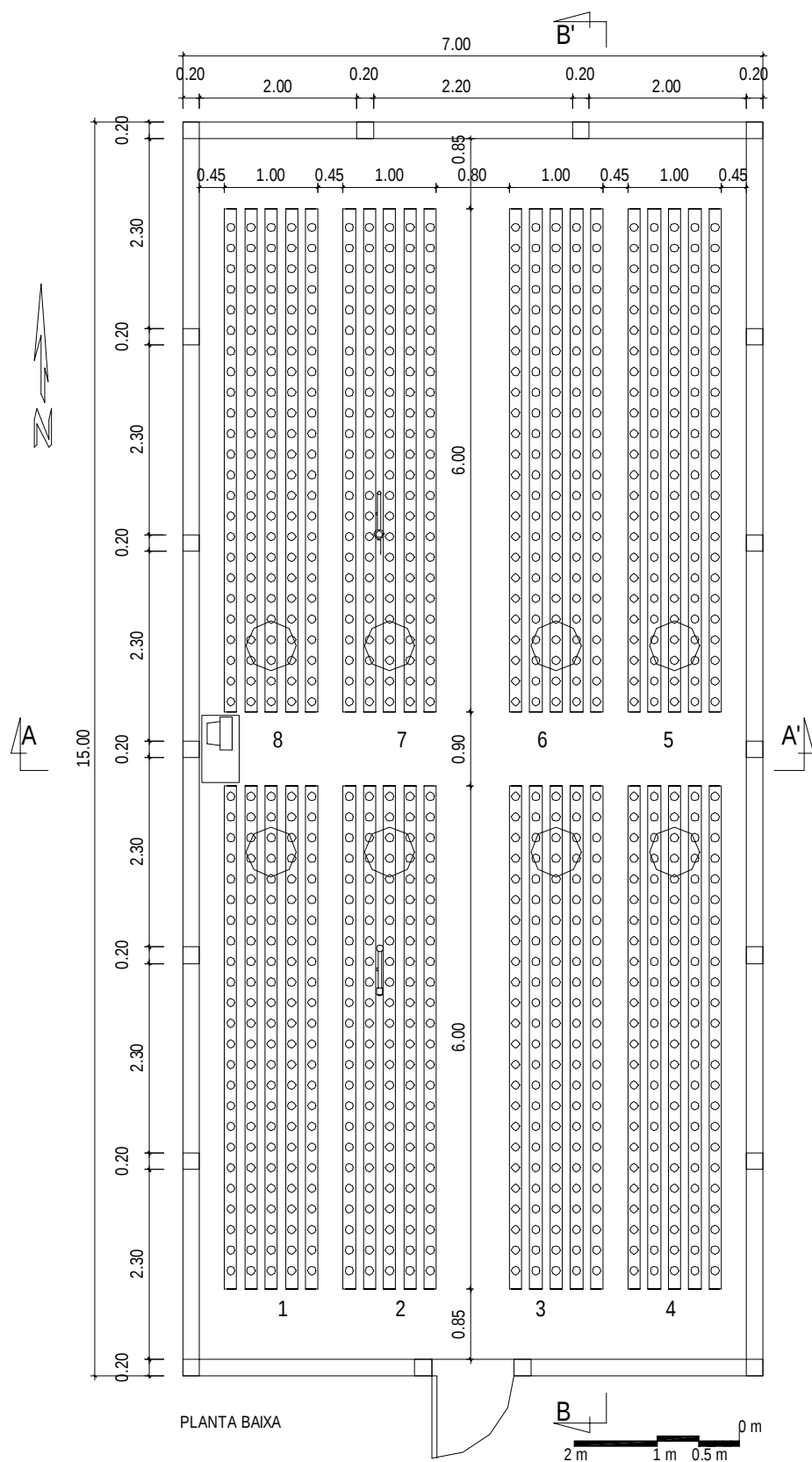


Figura 1.3 – Disposição das bancadas de cultivo no interior da casa-de-vegetação.

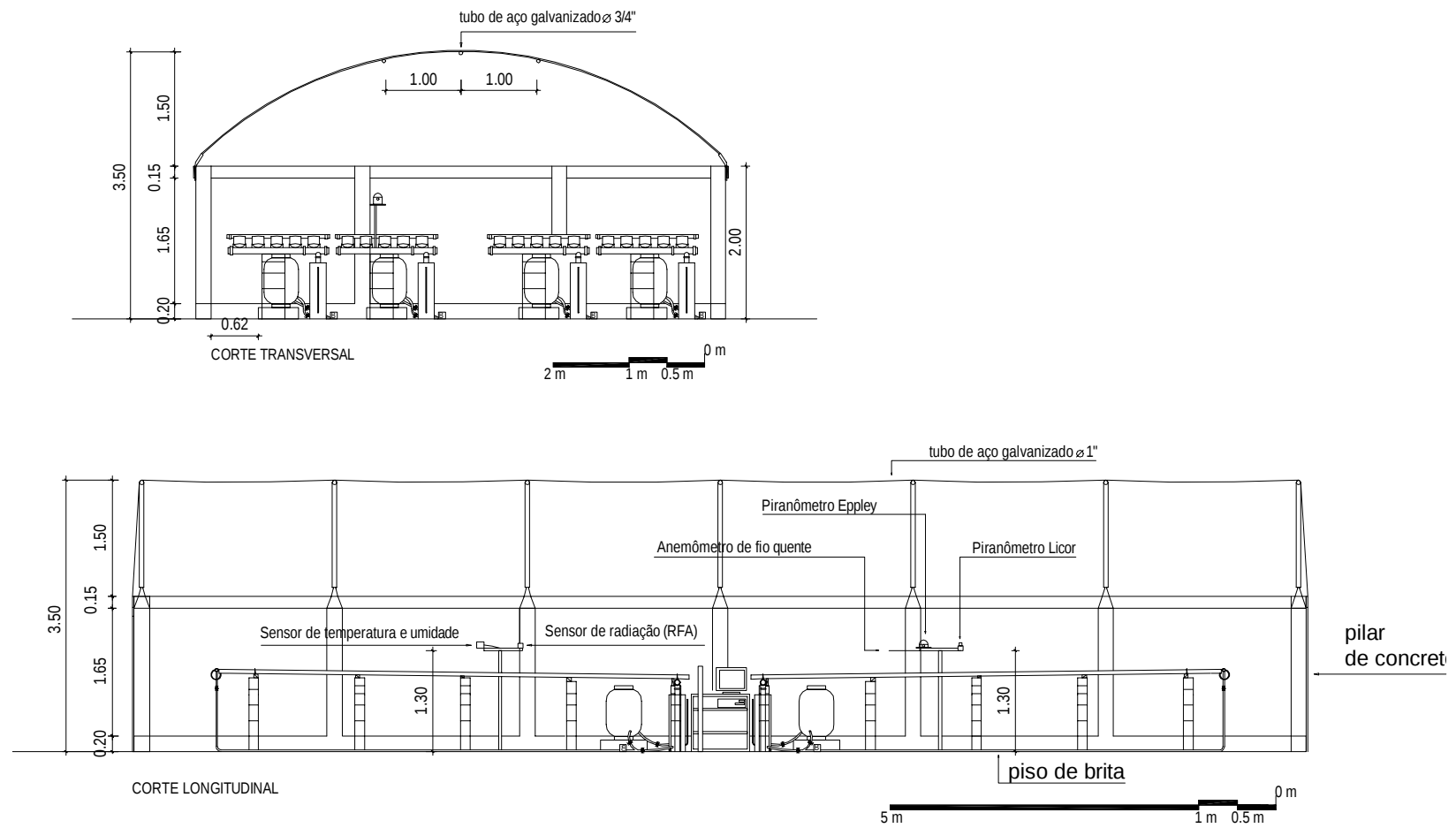
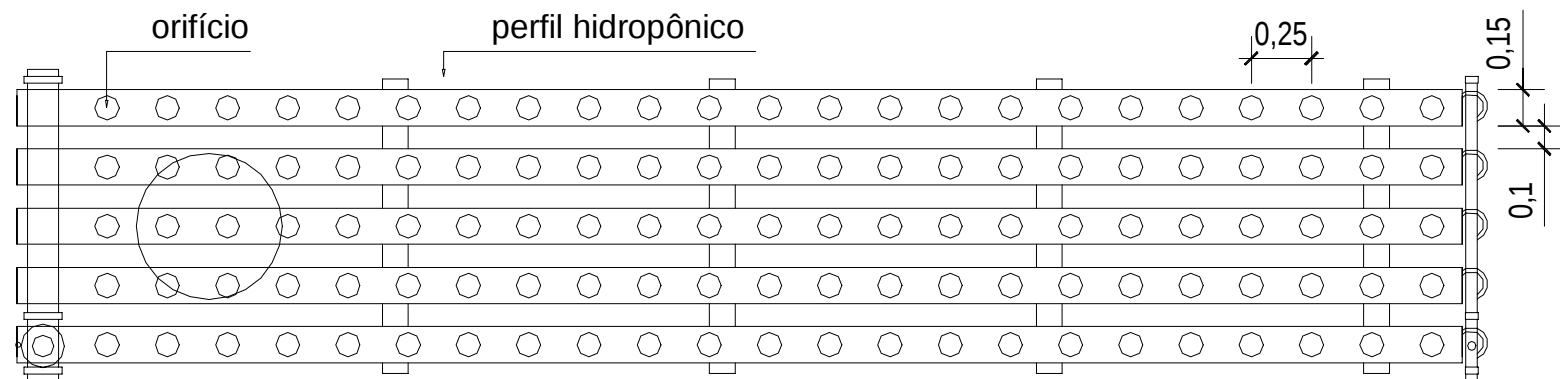
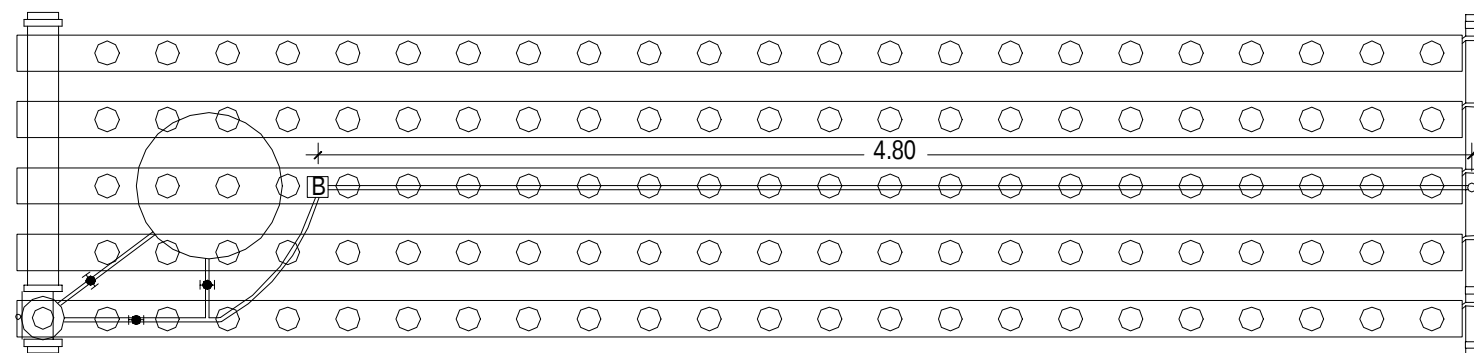


Figura 1.4 – Corte transversal e longitudinal da casa-de-vegetação, mostrando a disposição dos sensores utilizados para o monitoramento das variáveis do ambiente.



DETALHE SUPERIOR DA BANCADA



ESQUEMA HIDRÁULICO

Figura 1.5 – Detalhe superior e sistema hidráulico da bancada de cultivo, no interior da casa-de-vegetação.



Figura 1.6 – Vista geral das bancadas de cultivo, com a cultura da alface na fase inicial.

Os perfis foram afixados a ripas de madeira, de 0,10 m de altura e 1,25 m de comprimento, por meio de ganchos, e apoiados em cinco blocos de concreto, com espaçamento de 1,25 m entre eles (Figura 1.7). Cada bancada tinha uma declinação de aproximadamente 2 %, permitindo assim o escoamento da solução nutritiva por gravidade, sendo altura máxima de 1,1 m e a mínima de 0,85 m (Figura 1.8).

O sistema hidráulico das bancadas era individual, permitindo medições por cultivar, sendo composto de um tanque de armazenamento apoiado em blocos de concreto a 0,1 m acima do solo. O tanque com capacidade de armazenar aproximadamente 120 L de solução nutritiva foi mantido completamente fechado para evitar perdas por evaporação. Além do tanque, o sistema foi composto de uma bomba, usada para levar a solução aos perfis hidropônicos, de um conjunto de mangueiras ($\phi \frac{1}{2}''$) que faziam a ligação do tanque de armazenamento ao de medição e dos mesmos com a bomba (Figuras 1.8 e 1.9) e dessa a um cano de $\frac{1}{2}''$ e 4,8 m de comprimento (Figura 1.5). No final das bancadas o cano fazia uma curva de 90° para cima, onde foi conectado outro cano ($\phi \frac{1}{2}''$) de altura igual a 1,0 m e em sua extremidade mais um cano formando um “T”, para alimentar individualmente os perfis através de mangueiras (Figura 1.8).

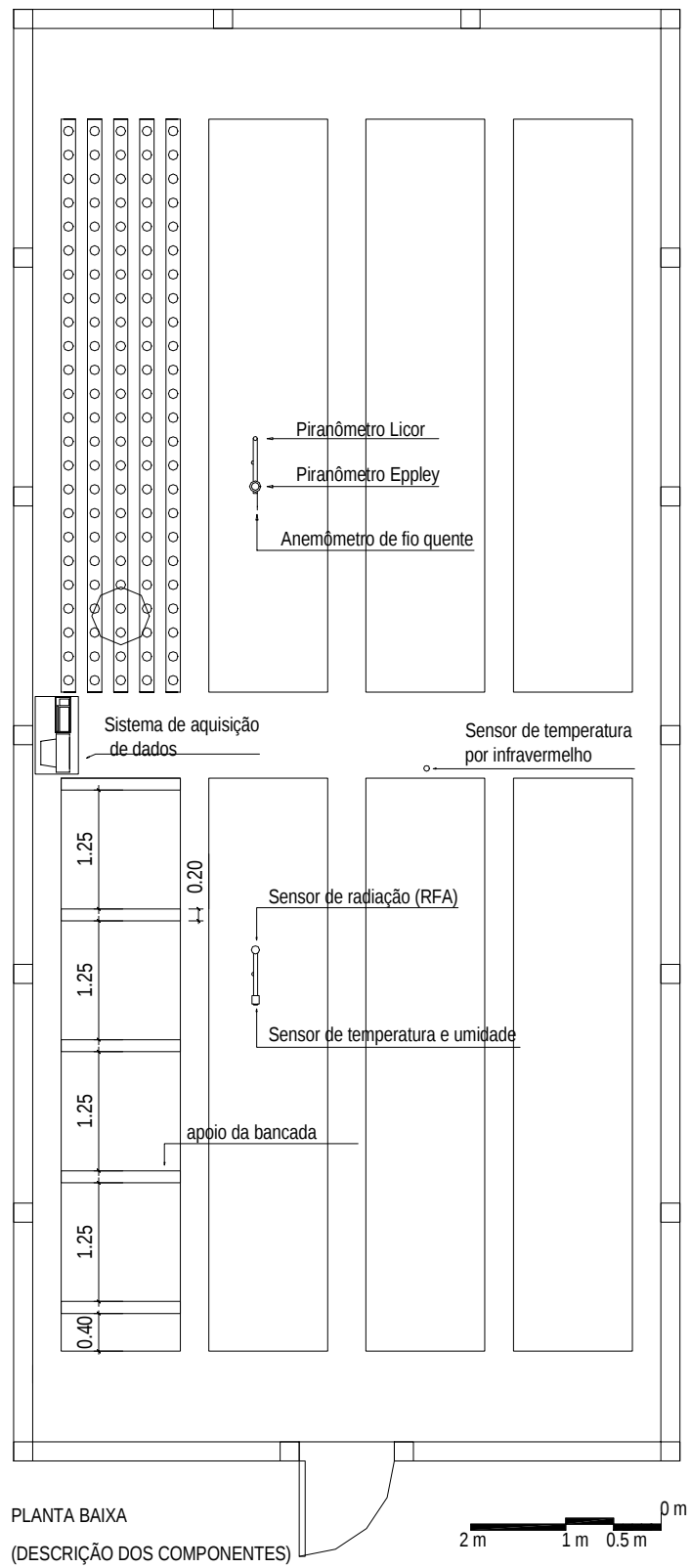


Figura 1.7 – Vista superior da casa-de-vegetação, com ênfase à distribuição horizontal dos sensores.

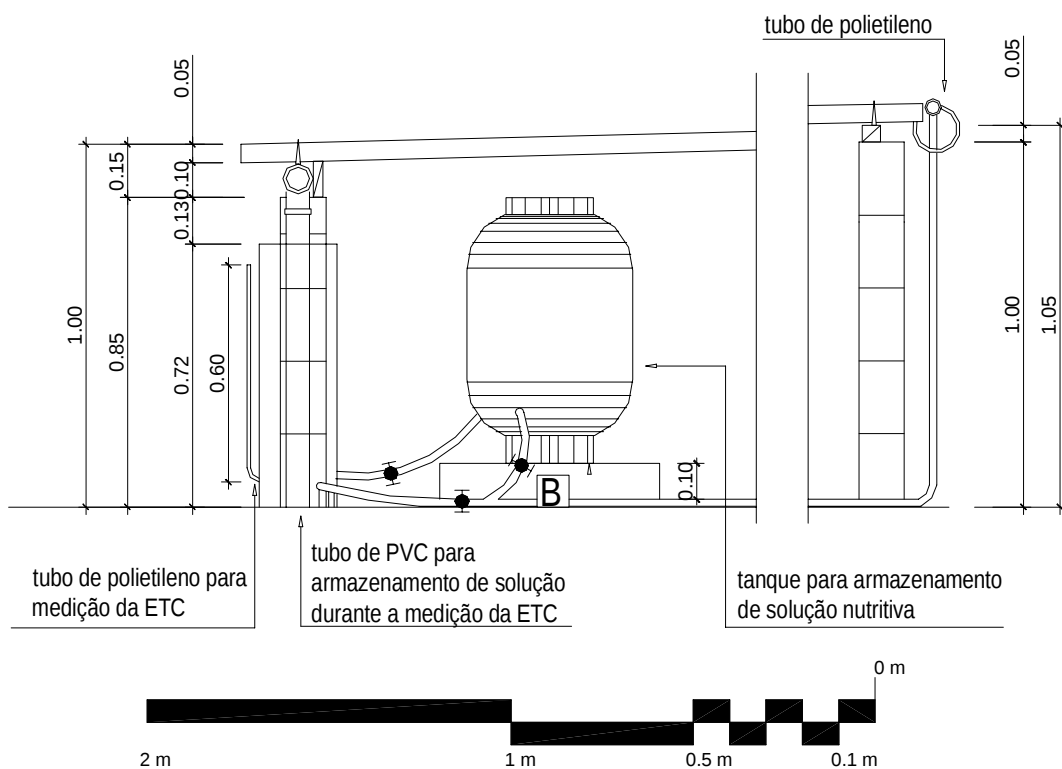
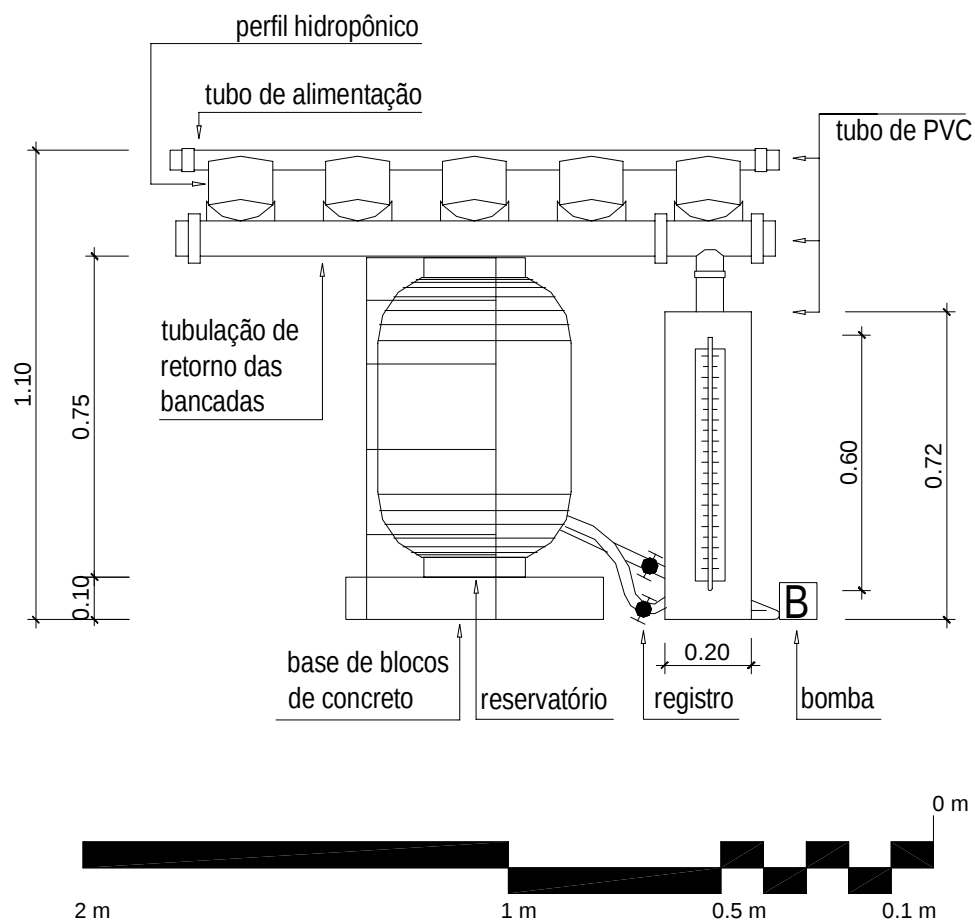


Figura 1.8 – Croqui do sistema hidráulico das bancadas de cultivo.



Figura 1.9 – Vista do sistema hidráulico das bancadas de cultivo. Tanque de medição (A), tanque de armazenamento da solução nutritiva (B), bomba (C).

O retorno da solução nutritiva foi realizado por uma tubulação, 0,05 m de diâmetro, a qual recebia solução dos cinco perfis hidropônicos e a conduzia ao tanque de medição, com capacidade de aproximadamente 20 L, de 0,72 m de altura e diâmetro variando de 0,15 a 0,20 m, dependendo do experimento e da fase em que a cultura se encontrava (Figura 1.8).

2.4. Semeadura, Transplântio e Manejo das Plantas e da Solução Nutritiva

As sementes foram colocadas para germinar em células de espuma fenólica com formato cúbico, tendo 0,02 m de aresta. Depois da semeadura, as células foram mantidas em um sistema hidropônico, especialmente construído para produção de mudas, com área de aproximadamente 2 m², o qual foi colocado sobre uma bancada na casa-de-vegetação. No período da semeadura até a germinação, a aplicação de água foi realizada durante dez minutos com intervalos de uma hora.

Depois da germinação, as plantas passaram a receber solução nutritiva, preparada de acordo com a formulação proposta por FURLANI (1998) para hortaliças de folhas (Quadro 1.1). Apesar da substituição da água pela solução nutritiva, a frequência de aplicação não foi alterada. Na fase de produção das mudas, a condutividade elétrica (CE) foi mantida em torno de $0,8 \text{ dS m}^{-1}$. O ajuste da CE foi feito utilizando-se as soluções de ajuste propostas pelo mesmo autor (Quadro 1.2).

Aos 21 dias depois da semeadura (15/05/01 para o 1º experimento e 21/06/01 para o 2º experimento), as mudas, com três a quatro folhas definitivas, foram transplantadas nas bancadas de cultivo, descritas anteriormente, permanecendo nesse local até o final do experimento (09/06/01 para o 1º experimento e 26/07/01 para o 2º experimento). Para realização dos experimentos, foram utilizadas oito bancadas de crescimento, sendo duas para cada cultivar e, adicionalmente, outras duas para reposição das plantas utilizadas nas análises de crescimento (Figura 1.3).

Quadro 1.1 – Quantidade de sais para o preparo de 1000 L de solução nutritiva

Nº	Sal/Fertilizante	g/1000L
1	Nitrato de cálcio Hydro [®] Especial	750
2	Nitrato de potássio	500,00
3	Fosfato monoamônico	150,00
4	Sulfato de magnésio	400,00
5	Sulfato de cobre	0,15
6	Sulfato de zinco	0,50
7	Sulfato de manganês	1,50
8	Ácido bórico	1,5
9	Molibdato de sódio	0,15
10	Tenso-Fe [®] (FeEDDHMA-6%Fe)	30

Fonte: FURLANI (1998)

Quadro 1.2 – Quantidade de sais para o preparo das soluções de ajuste

Solução	Sal/Fertilizante	Quantidade g/10L
A	Nitrato de potássio	1200
	Fosfato monoamônico purificado	200
	Sulfato de magnésio	240
B	Nitrato de cálcio Hydro [®] Especial	600
		g/1L
C	Sulfato de cobre	1,0
	Sulfato de zinco	2,0
	Sulfato de manganês	10,0
	Ácido bórico	5,0
	Molibdato de sódio	1,0
	Tenso-Fe [®] (FeEDDHMA-6%Fe)	20

Fonte: FURLANI (1998)

As plantas foram irrigadas com a mesma solução nutritiva usada para a produção das mudas, mantendo-se o pH em torno de 6,0 durante todo o ciclo da cultura. Entretanto, a CE foi mantida em torno de 1,3 dS m⁻¹, valor um pouco abaixo do recomendado por FURLANI (1998). Esse procedimento foi realizado para se amenizar a queima de bordos, problema comum no cultivo hidropônico, conhecido também como “tipburn”.

A solução circulava intermitentemente das 05:00 às 19:00 h nas bancadas de crescimento, sendo que a aplicação da solução nutritiva era realizada durante dez minutos, com intervalos de 20 minutos para drenagem e oxigenação das raízes. Adicionalmente, uma aplicação era realizada às 24:00 h para se evitar um possível estresse hídrico das plantas, devido à transpiração noturna. O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado com três tratamentos (cultivares de alface) e duas repetições (plantas dispostas nas bancadas de crescimento).

2.5. Sistema de Aquisição de Dados Meteorológicos

Os dados de temperatura do ar e da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foram obtidos por meio de um sistema automático de aquisição de dados, tendo como plataforma um microcomputador. Nessa configuração, uma placa de aquisição de dados (CYDAS 1602HR, CYBERRESEARCH, Branford, CT), consistindo de 16 canais de entrada analógica com 16 bits, foi instalada em um barramento ISA do microcomputador (Figura 1.10). Dois canais analógicos foram conectados ao sensor de temperatura (Modelo, HUM50Y, VAISALA, Woburn, MA) e ao sensor de radiação fotossinteticamente ativa (Modelo LI-190SA-50, LI-COR Inc., Lincoln, NE) (Figura 1.11). Os dados ambientais medidos foram armazenados em intervalos de um minuto, totalizando 1440 medições por dia. Cada dado armazenado correspondeu a uma média de cinco valores medidos com intervalos de um segundo. A temperatura média diária do ar foi calculada como sendo a média aritmética de todas as leituras, incluindo as medições dos períodos diurno e noturno.

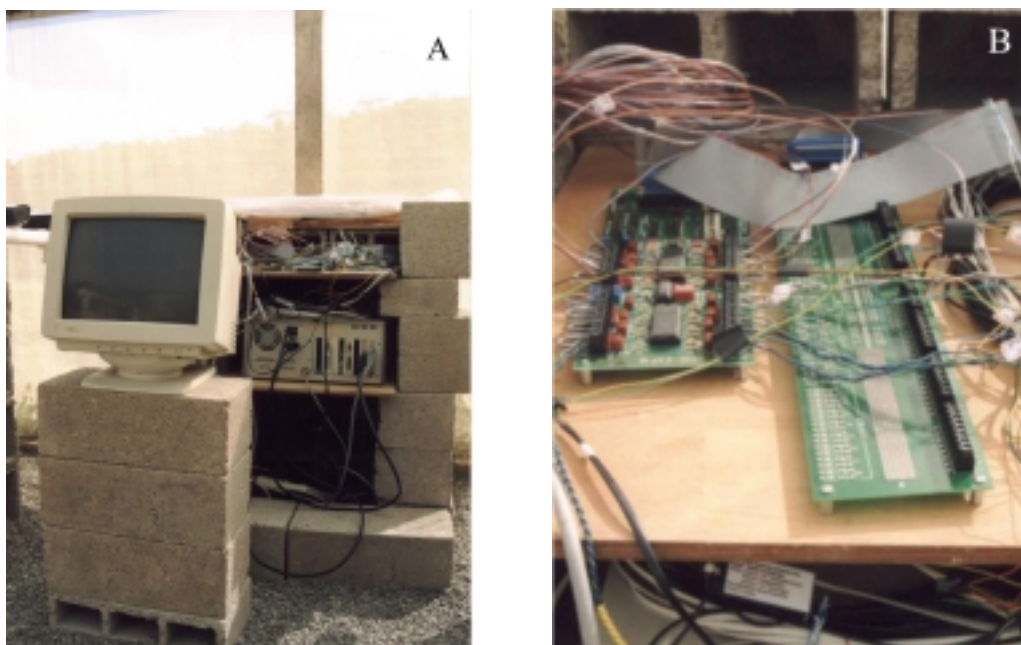


Figura 1.10 – Sistema de aquisição de dados. Microcomputador (A) e placa de aquisição de dados (B).



Figura 1.11 – Sensores de radiação fotossinteticamente ativa (A) e temperatura e umidade (B).

2.6. Matéria Fresca e Seca da Parte Aérea, Área Foliar e Comprimento Característico

Depois do transplântio das mudas para as bancadas de crescimento, foram feitas sete avaliações de matéria fresca da parte aérea (folhas e caule), matéria seca (folhas e caule), comprimento e largura das folhas e área foliar, com intervalos de cinco dias. A primeira amostragem foi realizada a partir do quarto dia depois do transplante das mudas (25/06/01), correspondente a terceira semana depois da semeadura. Em cada amostragem, foram colhidas cinco plantas por bancada de crescimento. As plantas retiradas para análise eram imediatamente substituídas por plantas do mesmo cultivar, que estavam sendo cultivadas nas bancadas de reposição.

Avaliações da matéria fresca da parte aérea dos três cultivares e, especificamente, das folhas e do caule, foram realizadas utilizando-se uma balança de precisão (Modelo MICRONAL B200, Micronal S.A., São Paulo, SP) com $\pm 0,001\text{g}$. A área da superfície vegetal de cada folha foi determinada

utilizando-se um medidor de área foliar (Modelo LI-3100, LI-COR, Inc., Lincoln, NE). Os valores medidos foram totalizados para a obtenção da área foliar das plantas amostradas, em cada tratamento. Esse resultado foi dividido pela área do espaçamento destinado para as plantas amostradas, permitindo assim, a obtenção do índice de área foliar (IAF). Além da área foliar, foi determinado o comprimento e largura de cada folha, para o cálculo do comprimento característico da folha, pela seguinte relação,

$$L = (Co_m + La_m)/2 \quad (1.1)$$

em que, L é o comprimento característico (m), Co_m é o comprimento máximo (m) e La_m é a largura máxima da folha (m).

Depois da determinação da área foliar, as amostras foram levadas para uma estufa com circulação de ar, permanecendo por 72 horas à temperatura de 70°C, sendo em seguida pesadas em balança de precisão, para quantificação da matéria seca das folhas e total da parte aérea (folhas e caule).

2.7. Taxa de Assimilação Líquida, Razão de Área Foliar e Taxa de Crescimento Relativo

A taxa de assimilação líquida (TAL) permite a estimativa da taxa de fotossíntese líquida, em função da matéria seca produzida (em gramas), por metro quadrado de área foliar, por unidade de tempo (BENINCASA, 1988; CONFALONE, 1998).

$$TAL = \frac{w_2 - w_1}{t_2 - t_1} \cdot \frac{\ln(AF_2) - \ln(AF_1)}{AF_2 - AF_1} \quad (1.2)$$

em que, w_1 e w_2 são a matéria seca total da planta (g), excluindo-se as raízes, obtidas a partir de duas amostragens sucessivas 1 e 2; AF é a área foliar (m^2) e $t_2 - t_1$ é intervalo de tempo entre as amostragens (d). Esta fórmula é aplicada

quando existe correlação linear entre área foliar e matéria seca, o que foi observado no presente estudo.

A razão de área foliar (RAF) fornece a área foliar útil para a fotossíntese, sendo um componente morfo-fisiológico, pois é a razão entre a área foliar (área responsável pela interceptação da energia fotossinteticamente ativa e pelo CO₂) e a matéria seca total, resultado da fotossíntese (BENINCASA, 1988; TEI et al., 1996b; CONFALONE, 1998).

$$RAF = \frac{AF_2 - AF_1}{w_2 - w_1} \cdot \frac{\ln(w_2) - \ln(w_1)}{\ln(AF_2) - \ln(AF_1)} \quad (1.3)$$

De acordo com BENINCASA (1988), todo crescimento é resultante da produção de matéria seca suficiente para atender às necessidades metabólicas do material já existente e, adicionalmente, para armazenar e/ou construir novo material estrutural. Portanto, qualquer incremento em matéria seca, altura ou área foliar, ao longo de um determinado período, estará diretamente relacionado ao tamanho alcançado ao longo do período anterior, sendo representado pela taxa de crescimento relativo (r), obtida por:

$$r = \frac{\ln(w_2) - \ln(w_1)}{t_2 - t_1} \quad (1.4)$$

2.8. Graus-Dias e Graus-Dias Efetivos

Os graus-dias (GD) e graus-dias efetivos (GDE), acumulados depois do transplante das mudas, foram determinados pelas equações propostas por SCAIFE et al. (1987) e TEI et al. (1996a),

$$GD = \sum_{i=1}^n (\bar{T} - T_b) \quad (1.5)$$

$$GDE^{-1} = GD^{-1} + f.RFA^{-1} \quad (1.6)$$

em que $\bar{T}$ é a temperatura do ar média diária (°C); T_b é a temperatura base da cultura (°C), RFA é a integral da radiação fotossinteticamente ativa ($MJ\ m^{-2}$); e f é a constante que define a importância relativa da RFA e da temperatura do ar ($GD\ m^2\ MJ^{-1}$). Para o cálculo do GD e GDE para a cultura da alface, os autores recomendam a utilização dos valores 3,5 °C e 0,09 $GD\ m^2\ MJ^{-1}$ para as variáveis, T_b e f , respectivamente.

2.9. Modelagem

Os modelos utilizados foram o expolinear, logístico e Gompertz, os quais foram ajustados de acordo com a variável independente, podendo ser “dias após o transplântio” (DAT), “graus-dias” (GD) ou “graus-dias efetivos” (GDE). As análises de regressão foram realizadas com base na aplicação dos logaritmos aos modelos propostos, conforme sugerido por TEI et al. (1996b),

expolinear:

$$\ln(w) = \ln(c_m/r) + \ln\{\ln[1 + \exp(r(x - t_b))]\} \quad (1.7)$$

logístico:

$$\ln(w) = \ln(w_f) - \ln[1 + (w_f/w_o - 1)\exp(-r x)] \quad (1.8)$$

Gompertz:

$$\ln(w) = \ln(w_o) + r[1 - \exp(-r_d x)]/r_d \quad (1.9)$$

em que x representa DAT, GD ou GDE; w_o e w_f , são, respectivamente, a matéria seca (g m^{-2}) no início e final do ciclo da cultura, excluindo-se a das raízes; r , é a taxa máxima de crescimento relativo ($\text{g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$); c_m , a taxa máxima de crescimento absoluto ($\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); r_d , o parâmetro que define o decréscimo da taxa de crescimento relativo; e t_b , o tempo perdido ou tempo necessário para o fechamento do dossel (d , GD ou GDE).

Para propósitos de avaliação dos modelos de crescimento, valores medidos da taxa máxima de crescimento relativo (r), obtidos imediatamente depois do transplante, foram determinados pela equação (1.4).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Matéria Seca, Taxa de Crescimento Relativo e Área Foliar

As determinações da matéria seca da parte aérea dos três cultivares de alface, realizadas aos quatro dias depois do transplantio (período inicial) e no final do ciclo da cultura, mostraram um incremento da ordem de aproximadamente 150%. A matéria seca da parte aérea, medida quatro dias depois do transplantio, foi de 0,0567 ($\pm 0,0021$) para o cultivar Grand Rapids, 0,0456 ($\pm 0,0001$) para o Regina e 0,0693 ($\pm 0,0028$) g por planta para o cultivar Great Lakes, sendo o cultivar Regina menos produtivo. No final do experimento, a matéria seca acumulada foi de 8,46 ($\pm 0,37$), 8,33 ($\pm 0,87$) e 9,25 ($\pm 0,17$) g por planta para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, respectivamente. Verificou-se que os cultivares do tipo crespa (Grand Rapids e Great Lakes) apresentaram matéria seca inicial e final maior do que a tipo lisa (Regina). Entretanto, apenas os valores iniciais foram estatisticamente diferentes pelo teste Tukey ($P < 0,05$), sendo que o cultivar Great Lakes apresentou a maior produção de matéria seca inicial.

A taxa de crescimento relativo máxima foi de 0,2618 ($\pm 0,0112$), 0,2756 ($\pm 0,0442$) e 0,2754 ($\pm 0,0039$) $\text{g g}^{-1} \text{ d}^{-1}$ para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, respectivamente. Os valores obtidos para r não apresentaram

diferenças estatísticas pelo teste Tukey a 5 % de probabilidade, o que pode explicar também a semelhança das matérias secas finais para os três cultivares.

Independente do cultivar, os valores de matéria seca final, encontrados no presente trabalho, foram maiores que os relatados por KOEFENDER (1996) e MATTOS (2000) e bastante próximo aos valores obtidos por FANQUIN et al. (1996) e SCHIMIDT (1998). Os valores reportados por KOEFENDER (1996) e MATTOS (2000) foram em média 7,35 e 6,61 g por planta, respectivamente. Por outro lado, os valores relatados por FANQUIN et al. (1996) e SCHIMIDT (1998), foram de 9,12 e 8,48 g por planta, respectivamente. Todos os valores mencionados anteriormente referem-se a medições conduzidas em sistemas hidropônicos de produção vegetal. Comparando-se os valores finais de matéria seca acumulada, obtida em sistemas hidropônicos pelos autores supracitados, inclusive os do presente trabalho, com os valores reportados por RANDIN et al. (2001), para alface produzida em solo, sob condições de campo, observa-se que o valor máximo de 6,20 g por planta encontrado pelo último autor está abaixo dos obtidos para a alface cultivada em sistema hidropônico.

Os valores iniciais (quatro dias depois do transplantio) da área foliar por planta foram 0,0031 ($\pm$ 0,0002) m² para o cultivar Grand Rapids, 0,0034 ($\pm$ 0,0004) m² para o Regina e 0,0028 ($\pm$ 0,0002) m² para o Great Lakes, não havendo diferença estatística entre as médias, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Esse resultado indica a uniformidade da área de superfície foliar das unidades experimentais na fase inicial, o que é desejável para a análise de crescimento de plantas. Por outro lado, no final do ciclo da cultura, a área foliar do cultivar Regina foi maior em relação ao Grand Rapids e Great Lakes ($P < 0,05$). Embora a matéria seca acumulada no final do ciclo não diferiu estatisticamente entre cultivares, resultados da área foliar para o cultivar Regina foram em média 54% superiores aos cultivares do tipo crespa.

A variação do índice de área foliar (IAF), do período inicial do transplantio ao final do ciclo da cultura, em função dos graus dias acumulados (GD), pode ser visualizada na Figura 1.12. Os dados se ajustaram muito bem ao modelo proposto por GOUDRIAAN & MONTEITH (1990), dado pela seguinte equação:

$$IAF = (1/k) \ln \{ 1 + (\exp(k IAF_0) - 1) \exp(r x) \} \quad (1.10)$$

em que, k é o coeficiente de extinção, IAF_0 o índice de área foliar inicial, r a taxa inicial de crescimento relativo ($m^2 m^{-2} GD^{-1}$) e x é o tempo térmico acumulado, expresso em graus-dia (GD). Os coeficientes de determinação ajustados foram de 99,75, 99,55 e 99,76 % para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, respectivamente.

Os coeficientes de extinção gerados pelo modelo foram $0,3510 (\pm 0,0690)$, $0,3598 (\pm 0,0713)$ e $0,5202 (\pm 0,0754)$ para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, respectivamente. Esses valores se encontram próximos do valor estimado por TEI et al. (1996b) de 0,39 para alface do tipo crespa, usando a equação expolinear, e abaixo do medido em campo pelo mesmo autor de 0,66 para a mesma cultura.

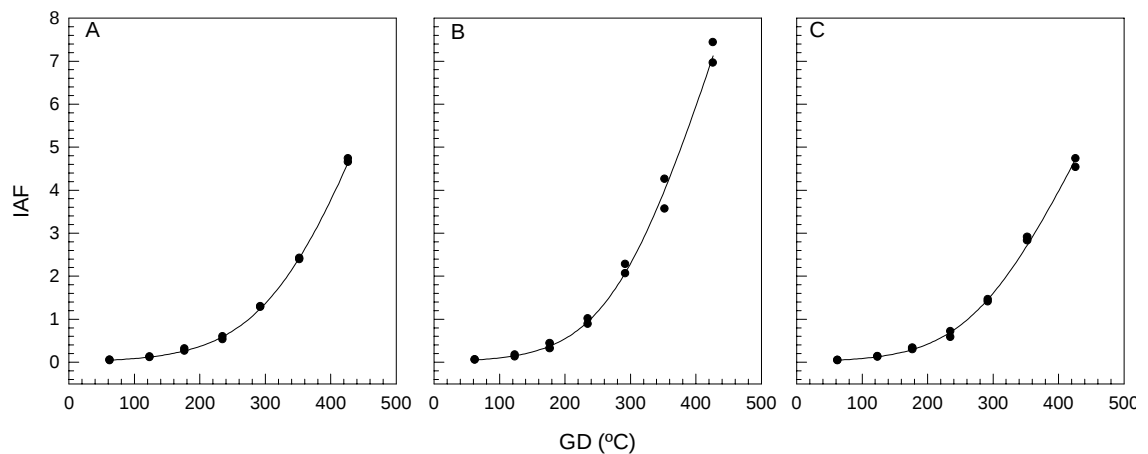


Figura 1.12 – Valores observados do índice de área foliar (•), em função dos graus-dias acumulados (GD) depois do transplântio, e curva ajustada pelo modelo (—). Os gráficos referem-se aos cultivares Grand Rapids (A), Regina (B) e Great Lakes (C).

O índice de área foliar inicial (IAF₀) estimado pelo modelo foi de 0,0194 ($\pm 0,0014$), 0,0175 ($\pm 0,0019$) e 0,0166 ($\pm 0,0012$) para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes. Finalmente, os valores de r estimados pelo modelo foram 0,0150 ($\pm 0,0005$), 0,0177 ($\pm 0,0007$) e 0,0167 ($\pm 0,0005$) m² m⁻² GD⁻¹ para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, respectivamente. Esses valores se aproximaram muito dos observados no experimento de 0,0140 ($\pm 0,0029$), 0,0167 ($\pm 0,0018$) e 0,0176 ($\pm 0,0010$) respectivamente para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes.

Usando-se os parâmetros mencionados anteriormente e considerando-se que o GD acumulado do transplântio ao final do ciclo da cultura foi de aproximadamente 430 GD, como medido no presente trabalho, conclui-se que o IAF máximo alcançado foi de 7,12 para o cultivar Regina, seguido de 4,64 para o cultivar Grand Rapids e de 4,66 para o cultivar Great Lakes. Evidentemente, a diferença do IAF no final do ciclo entre o cultivar do tipo lisa e os do tipo crespa ocorrem devido às características desses cultivares.

As curvas para área foliar em função do comprimento característico, nos três cultivares, apresentaram a mesma característica de crescimento exponencial (Figura 1.13), por isso, foi ajustado um modelo empírico não-linear, dado pela relação $AF = a L^b$, o qual foi usado por ZOLNIER (1999) para estimativa da área foliar de plantas de “poinsetia” no estágio de propagação vegetativa. Nesse trabalho, os parâmetros do modelo foram $a = 0,406$ ($\pm 0,028$) e $b = 2,132$ ($\pm 0,023$) para o cultivar Grand Rapids, $a = 0,621$ ($\pm 0,025$) e $b = 1,987$ ($\pm 0,014$) para o Regina e $a = 0,424$ ($\pm 0,020$) e $b = 2,093$ ($\pm 0,020$) para o cultivar Great Lakes. Os coeficientes de determinação ajustados, correspondentes aos parâmetros mencionados anteriormente, foram 96,88, 97,29 e 97,62 % para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, respectivamente.

Os resultados da análise de regressão mostram a semelhança dos parâmetros a e b do modelo para os cultivares do tipo crespa. Possivelmente, essa semelhança é explicada pelas características morfológicas desses cultivares, os quais são diferentes da geometria do cultivar Regina, pertencente ao grupo lisa.

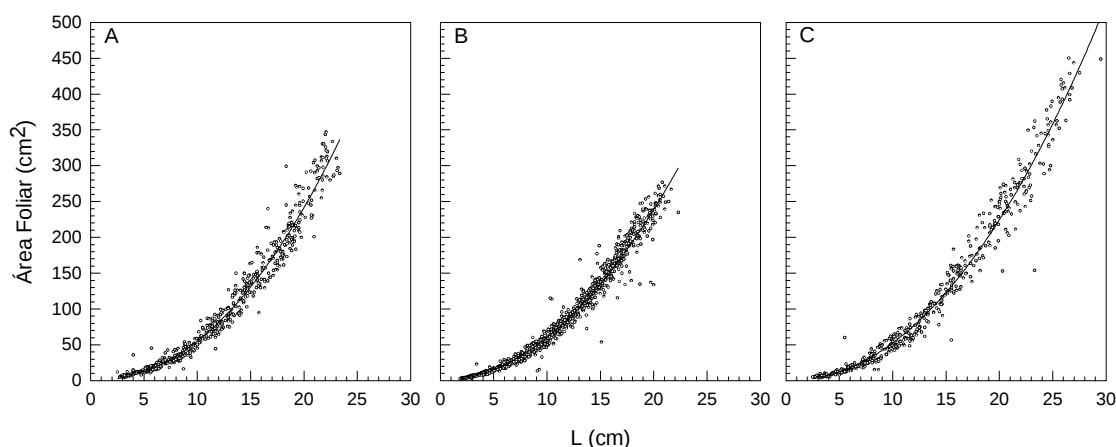


Figura 1.13 – Valores observados da área foliar (●), em função do comprimento característico, e curva ajustada pelo modelo (—). Os gráficos referem-se aos cultivares Grand Rapids (A), Regina (B) e Great Lakes (C).

O cultivar Regina (grupo lisa) apresentou maior número de folhas por planta (28,5 em média) quando comparado com os cultivares do tipo crespa (Grand Rapids e Great Lakes), resultando em maior área foliar por planta, apesar dessas folhas, individualmente, terem área superficial menor. O cultivar Great Lakes (com formação de cabeça) teve menor número de folhas (9,7 em média), mas a área foliar por planta não diferiu muito do Grand Rapids (sem formação de cabeça), que apresentou em média 14,8 folhas por planta. Esse fato ocorreu por causa do maior comprimento característico do cultivar Great Lakes (Figura 1.13C). Os valores referentes ao número de folhas por planta estão abaixo dos observados por SEDIYAMA et al. (2000), que encontraram 39,33 para o cultivar Regina, e também daqueles medidos por PEDROSA et al. (2000), que encontraram 23,75 e 19,98 para os cultivares Grand Rapids e Great Lakes, respectivamente. Entretanto, no presente trabalho, o número de folhas para o cultivar Regina foi superior ao citado por MATTOS (2000), o qual encontrou apenas 20 folhas por planta. O referido autor ressalta que o número de folhas não é um bom indicador do crescimento, devido a grande variação da mesma em função de diversos fatores pertinentes ao sistema de produção vegetal. Por outro

lado, segundo VAZQUEZ (1986), o número médio de folhas em alface está relacionado com o cultivar utilizado.

3.2. Taxa de Assimilação Líquida e Razão de Área Foliar

A Figura 1.14 ilustra a variação da taxa de assimilação líquida (TAL) e da razão de área foliar (RAF), em função de dias decorridos após o transplântio (DAT). Observa-se que a TAL (Figura 1.14A) teve um incremento seguido de uma queda brusca na taxa de assimilação líquida até o final do ciclo de crescimento, independente do cultivar. Esse comportamento está associado ao maior sombreamento mútuo entre folhas à medida que ocorre o fechamento do dossel. Com o crescimento da planta, as folhas superiores tendem a sombrear as inferiores, diminuindo proporcionalmente a área útil para a realização da fotossíntese.

O cultivar Great Lakes apresentou o maior valor da TAL logo depois do transplântio, mas foi superado pelo cultivar Grand Rapids a partir do 24 DAT, igualando-se, no final do ciclo da cultura. A semelhança da TAL para os cultivares do tipo crespa resultou em acúmulos de matéria seca também semelhantes. Por outro lado, o cultivar Regina teve o menor valor de TAL durante todo o ciclo. Entretanto, é importante notar que, apesar dos menores valores desse componente de crescimento, o acúmulo de matéria seca desse cultivar não diferiu estatisticamente dos cultivares do tipo crespa. Esse fato pode ser explicado pela maior área de superfície foliar no cultivar Regina, o que obviamente compensou os baixos valores de taxa de assimilação líquida. Conforme elucidado anteriormente, o sombreamento mútuo entre as folhas, diminui a fração de radiação interceptada, e dessa forma, a fotossíntese.

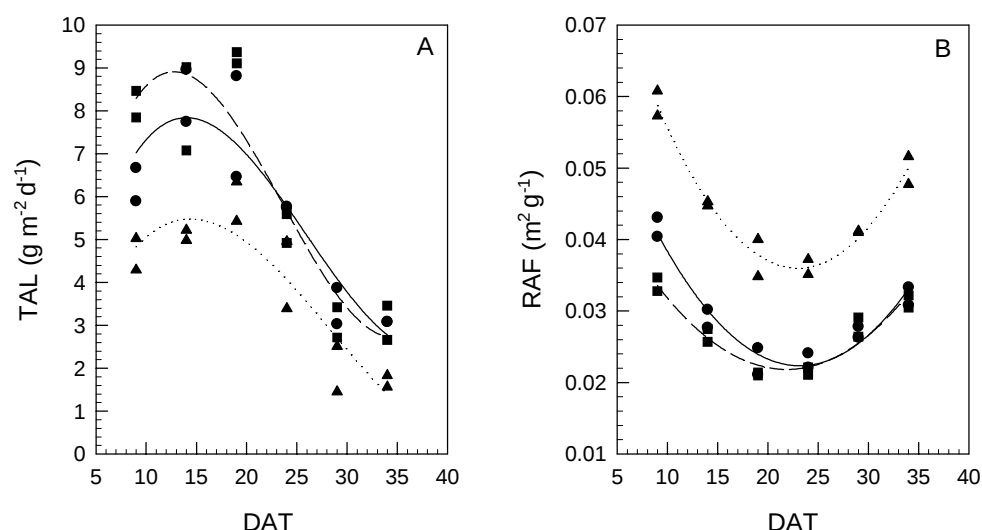


Figura 1.14 – Taxa de assimilação líquida (A) e razão de área foliar (B), em função de dias decorridos após o transplântio (DAT). Valores observados e curvas ajustadas pelos modelos referem-se aos cultivares Grand Rapids (●,—), Regina (▲, ····) e Great Lakes (■, ---).

Todos os cultivares tiveram um ajuste razoável entre a TAL e DAT, com coeficiente de determinação ajustado da ordem de aproximadamente 82%, em média. As curvas tiveram comportamentos semelhantes, se ajustando a uma função polinomial cúbica, conforme mostrado no Quadro 1.3. No que se refere a RAF, os ajustes do modelo foram um pouco melhores que TAL. A curva da razão de área foliar (RAF) (Figura 1.14B) teve o mesmo comportamento para os três cultivares, se ajustando a uma função quadrática, com coeficientes de determinação ajustados acima de 88% (Quadro 1.3).

Na Figura 1.14B, verifica-se que as curvas da RAF apresentaram uma diminuição até o 25 DAT, e começam a crescer em seguida. A RAF do cultivar Regina foi superior aos cultivares do tipo crespa durante todo o ciclo de crescimento depois, do transplântio das mudas. Os valores da RAF variaram de 0,02 a 0,06 m² g⁻¹, aproximando-se bastante dos relatados por TEI et al. (1996b), que estiveram entre 0,02 e 0,04 m² g⁻¹ para alface cultivada em solo. Entretanto, o comportamento da curva da RAF em função da DAT, apresentada para a alface crespa (cv. Saladin R100) em condições de campo, foi diferente da obtida no

presente trabalho. Em condições de campo, não foi identificado um aumento da RAF no final do ciclo da cultura, ajustando-se assim, a uma função mononuclear.

Quadro 1.3 – Parâmetros da análise de regressão para taxa de assimilação líquida (TAL), razão de área foliar (RAF) tendo dias após o transplântio (DAT) como variável independente e de matéria fresca da parte aérea da planta (MF), tendo graus-dias (GD) como variável independente. Os resultados referem-se aos cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes

Modelo	Parâmetros	Cultivares		
		Grand Rapids	Regina	Great Lakes
$TAL = a \text{ DAT} + b \text{ DAT}^2 + c \text{ DAT}^3$	a	1,277 ($\pm 0,1310$)	0,8582 ($\pm 0,1139$)	1,592 ($\pm 0,1590$)
	b	-0,0625 ($\pm 0,0011$)	-0,0399 ($\pm 0,0097$)	-0,0854 ($\pm 0,0135$)
	c	0,0008 ($\pm 0,0002$)	0,0005 ($\pm 0,0003$)	0,0012 ($\pm 0,0003$)
	R ²	82,68	79,22	83,33
$RAF = a + b \text{ DAT} + c \text{ DAT}^2$	a	0,0718 ($\pm 0,0038$)	0,0975 ($\pm 0,0037$)	0,0558 ($\pm 0,0033$)
	b	-0,0043 ($\pm 0,0004$)	-0,0054 ($\pm 0,0004$)	-0,0031 ($\pm 0,0003$)
	c	0,0001 ($\pm 0,0000$)	0,0001 ($\pm 0,0000$)	0,0001 ($\pm 0,0000$)
	R ²	91,79	94,83	88,32
$PF = (a/b) \ln\{1 + \exp(b (GD - c))\}$	a	30,82 ($\pm 2,32$)	31,77 ($\pm 4,58$)	25,95 ($\pm 0,99$)
	b	0,0169 ($\pm 0,0009$)	0,0169 ($\pm 0,0018$)	0,0185 ($\pm 0,0007$)
	c	330,8 ($\pm 10,8$)	326,1 ($\pm 21,1$)	295,5 ($\pm 5,9$)
	R ²	99,95	99,70	99,96

3.3. Produtividade

A produtividade de matéria fresca total, excluindo-se as raízes, foi de $3.513 \pm 32 \text{ g m}^{-2}$ ($219,6 \pm 2,0 \text{ g}$ por planta) para o cultivar Great Lakes, seguida de $3.508 \pm 30,4 \text{ g m}^{-2}$ ($219,3 \pm 1,9 \text{ g}$ por planta) para o Regina e, finalmente, de $3.277 \pm 86 \text{ g m}^{-2}$ ($204,8 \pm 5,4 \text{ g}$ por planta) para o cultivar Grand Rapids. As médias dos cultivares Great Lakes e Regina não apresentaram diferenças estatísticas entre si, diferindo ambas do cultivar Grand Rapids pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A produtividade da parte de importância econômica, no caso as folhas para a alface, foi novamente maior para o cultivar Great Lakes com $3.415 \pm 29 \text{ g m}^{-2}$ ($213,5 \pm 1,8 \text{ g}$ por planta), de $3.251 \pm 6 \text{ g m}^{-2}$ ($203,2 \pm 0,3 \text{ g}$ por planta) para o Regina e de 3.088 ± 60 ($193,0 \pm 3,8 \text{ g}$ por planta), para o cultivar Grand Rapids. Nesse caso, também se verificou que os cultivares Great Lakes e Regina não apresentaram diferenças significativas entre suas médias pelo teste Tukey a 5 % de probabilidade, diferindo ambos do cultivar Grand Rapids, que apresentou a menor produtividade.

Em cultivo hidropônico, PEDROSA et al. (2000) encontraram valores de 320,0 e 241,7 g por planta de matéria fresca das folhas para os cultivares Grand Rapids e Great Lakes, respectivamente. Para o cultivar Regina, SEDIYAMA et al. (2000) e MATTOS (2000) apresentam, respectivamente, os valores de matéria fresca das folhas de 233,9 e 228,9 g por planta. Adicionalmente, FARIAS et al. (2000) relataram valores de 2.390 g m^{-2} de produtividade total para o cultivar Regina. Em contraste, para cultivo em solo, RADIN et al. (2001) apresentam valores inferiores a 100 g por planta de produtividade total, o que demonstra a superioridade da técnica hidropônica, onde a maioria dos fatores, incluindo os nutrientes se encontram em ótimas condições à máxima produtividade.

As diferenças encontradas entre os valores obtidos nesse trabalho e os apresentados na literatura estão relacionados com a concentração da solução nutritiva adotada pelos diversos autores e também com a duração do ciclo da cultura. No presente estudo, optou-se pela utilização da condutividade elétrica (CE) de $1,3 \text{ dS m}^{-1}$, valor menor que o recomendado por FURLANI (1998). Esse procedimento foi adotado para amenizar o problema da queima de bordos, e se

mostrou satisfatório para o cultivo da alface, no inverno. Segundo MUCKLE (1995), os valores ideais da CE e do pH para uma determinada espécie cultivada em sistemas hidropônicos são influenciados pela transpiração, a qual tem um papel de destaque na relação entre o consumo de nutrientes e o consumo de água pela planta.

Finalmente, a Figura 1.15 ilustra a variação da matéria fresca (MF) dos cultivares de alface em função dos graus-dias acumulados (GD) após o transplante das mudas. A análise de regressão não-linear mostrou que uma equação na forma expolinear proporcionou os melhores ajustes entre MF e GD. A referida equação proporcionou coeficientes de determinação ajustados acima de 99,00 % (Quadro 1.3), permitindo assim, excelentes estimativas do MF ao longo do ciclo da cultura. Esse modelo é de grande importância para correção dos valores de evapotranspiração medidos em sistemas hidropônicos, uma vez que a água incorporada nos tecidos das plantas não deve ser medida como transpiração. No final do ciclo da cultura, essa correção pode alcançar até 15 W m^{-2} , considerando o intervalo de medição de 30 min.

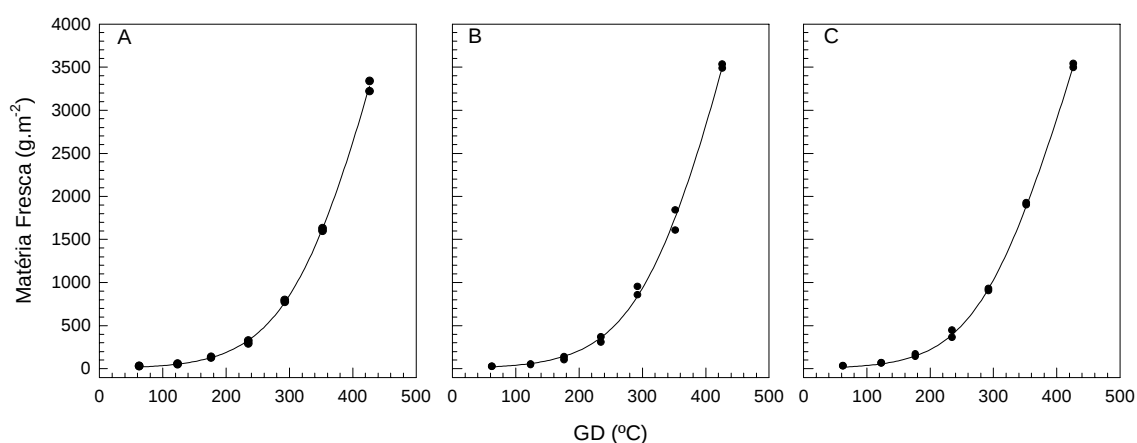


Figura 1.15 – Valores observados da matéria fresca da parte aérea (●), em função dos graus-dias (GD) acumulados depois do transplante, e curva ajustada pelo modelo (—). Os gráficos referem-se aos cultivares Grand Rapids (A), Regina (B) e Great Lakes (C).

3.4. Modelagem

Todos os modelos estudados apresentaram coeficiente de determinação ajustado bastante elevado, da ordem de 99,00 %, para os três cultivares de alface e para as três variáveis independentes, dias após o transplântio (DAT), graus-dias (GD) e graus-dias efetivos (GDE), conforme mostrado no Quadro 1.4. Entretanto, deve-se notar que o R^2_{aj} fornece apenas uma idéia relativa do ajuste de uma regressão não-linear. Para os modelos expolinear e logístico, as variáveis independentes GD e GDE mostraram coeficientes de determinação ligeiramente superiores aos encontrados com a utilização de DAT para todos os cultivares. Da mesma forma, esses modelos conseguem descrever melhor a dependência dos processos metabólicos das plantas com relação à temperatura e à radiação fotossinteticamente ativa. Em contraste aos modelos expolinear e logístico, os coeficientes de determinação para o modelo Gompertz, tendo DAT como variável independente, foram superiores quando comparados com aqueles que tinham GD ou GDE.

Com exceção do R^2_{aj} para o cultivar Regina tendo como variável independente GDE, os valores dos coeficientes de determinação para o modelo expolinear foram ligeiramente superiores aos encontrados por TEI et al. (1996b). No presente estudo, o menor valor de R^2_{aj} foi de 99,28 % para o cultivar Regina, tendo como variável independente GDE, e o maior valor foi 99,85 % para a cultivar Grand Rapids, tendo como variável independente GD. Resultados do trabalho TEI et al. (1996b), para alface tipo crespa (cv. Saladin R100), foram 99,6, 99,3 e 99,4 %, tendo como variáveis independentes dias decorridos, graus-dias e graus-dias efetivos, respectivamente.

Com relação ao modelo logístico, os valores de R^2_{aj} para o cultivar Grand Rapids estiveram bem próximos do valor obtido pelo mesmo autor, que encontrou 99,4 % em condições de campo. Para o cultivar Grand Rapids, os valores obtidos foram 99,38, 99,41 e 99,49 %, tendo como variáveis independentes DAT, GD e GDE, respectivamente. Em geral, valores ligeiramente menores, oscilando de 99,23 a 99,40 %, foram encontrados para os cultivares Regina e Great Lakes.

Quadro 1.4 – Coeficientes de determinação ajustados dos modelos de crescimento, para alface, cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (DAT), graus-dias (GD) e graus-dias efetivos (GDE)

Modelo	Cultivar	Variável Independente		
		DAT	GD	GDE
exponencial	Grand Rapids	99,80	99,85	99,81
	Regina	99,40	99,41	99,28
	Great Lakes	99,70	99,81	99,73
logístico	Grand Rapids	99,38	99,41	99,49
	Regina	99,23	99,28	99,25
	Great Lakes	99,25	99,34	99,40
Gompertz	Grand Rapids	99,87	99,76	99,56
	Regina	99,22	99,06	98,76
	Great Lakes	99,74	99,70	98,47

Coeficientes de determinação para modelo Gompertz foram inferiores aos encontrados por TEI et al. (1996b), para todos os cultivares, utilizando-se GDE como variável independente, e valores superiores para os cultivares Grand Rapids e Great Lakes, tendo como variável independente DAT. Comparando-se os três cultivares, também se pode observar que para o modelo mencionado, a variável GDE forneceu os menores valores de R^2_{aj} para todos os cultivares.

O modelo exponencial foi o que apresentou melhor ajuste da curva de acúmulo de matéria seca com relação aos outros modelos para graus-dias acumulados e graus-dias efetivos, sendo o de Gompertz superior aos demais para os cultivares Grand Rapids e Great Lakes em função da variável DAT. Com exceção do cultivar Regina, tendo DAT como variável independente, o modelo logístico apresentou ajuste inferior aos outros modelos para todos os cultivares e variáveis independentes. TEI et al. (1996b) também observou um ajuste inferior

do modelo logístico, independente da utilização de dias após o transplântio, graus-dias ou graus-dias efetivo, em relação aos outros modelos.

Em resumo, os resultados obtidos e apresentados precisam ser interpretados com cautela. Visivelmente, todos os modelos se ajustam muito bem para todas as variáveis independentes. No entanto, os parâmetros obtidos por meio da análise de regressão precisam ser comparados em estudos posteriores para condições meteorológicas diferentes das observadas durante o período de realização do experimento. Assim, espera-se que os modelos, que tenham GD e GDE como variáveis independentes, estime com maior exatidão o acúmulo de matéria seca. Como exemplo, deve-se observar que os parâmetros dos modelos expolinear, logístico e Gompertz, tendo como variável independente DAT, foram ajustados para as condições ambientais medidas na casa-de-vegetação, para o período que compreendendo entre o final da estação do outono e início do inverno. Portanto, se os parâmetros obtidos nesse estudo forem utilizados para estimativa do crescimento dos três cultivares de alface em outras regiões e estações do ano, os valores estimados, tendo DAT como variável independente, não devem ser coerentes com os valores experimentais medidos. Por outro lado, modelos tendo GD e GDE como variáveis independentes devem fornecer resultados mais condizentes com a realidade, uma vez que essas variáveis representam alterações das condições do ambiente de crescimento das plantas.

Os valores de matéria seca acumulada depois do transplântio, estimados pelos modelos expolinear (A, B e C), logístico (D, E e F) e Gompertz (G, H e I), são apresentados nas Figuras 1.16, 1.17 e 1.18 para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, respectivamente. Adicionalmente, os resultados são apresentados na ordem alfabética para as variáveis independentes DAT, GD e GDE. Os resultados mostram claramente que todos os modelos estimaram de maneira satisfatória o acúmulo de matéria seca depois do transplântio para todos os cultivares de alface. De modo geral, observa-se que os modelos descrevem bem o acúmulo de matéria seca e, portanto, não subestimam e nem superestimam os valores medidos desde o transplântio até a colheita.

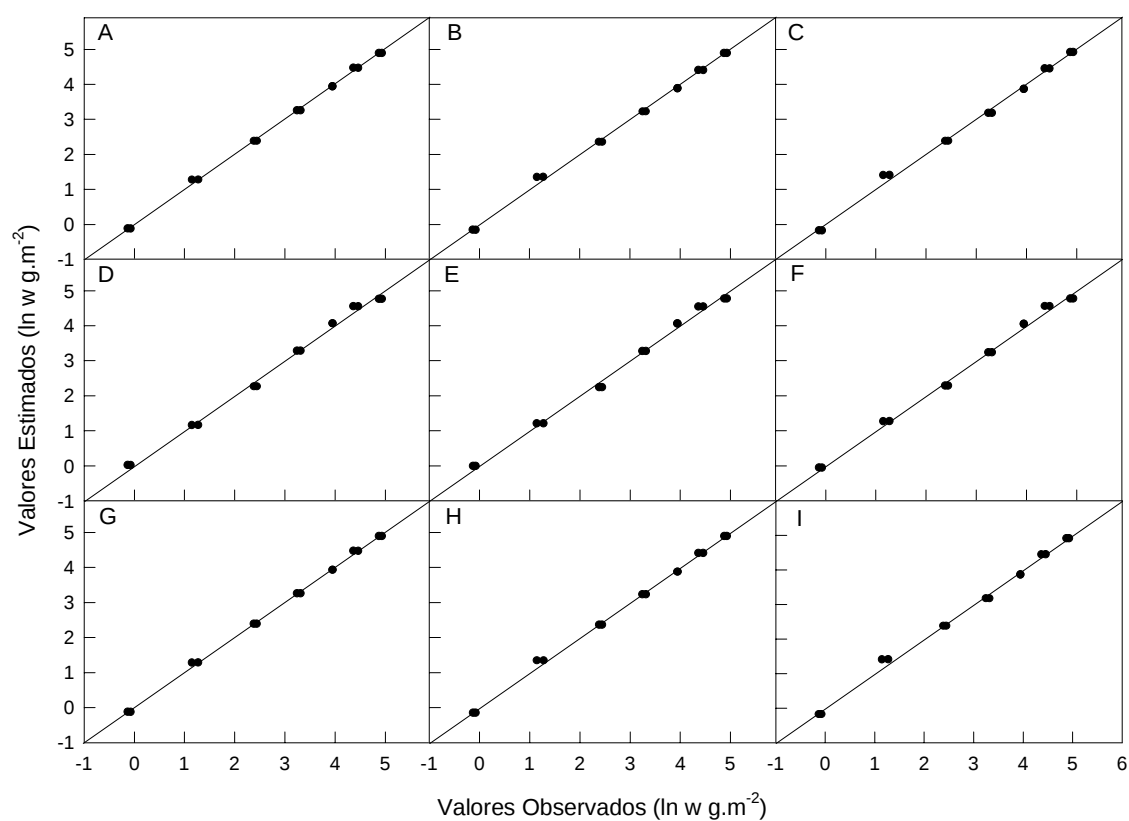


Figura 1.16 – Valores de matéria seca acumulada, observada e estimada pelos modelos expolinear (A, B, C), logístico (D, E, F) e Gompertz (G, H, I), tendo como variáveis independentes dias após o transplante (A, D, G), graus-dias (B, E, H) e graus-dias efetivos (C, F, I), para alface, cultivar Grand Rapids.

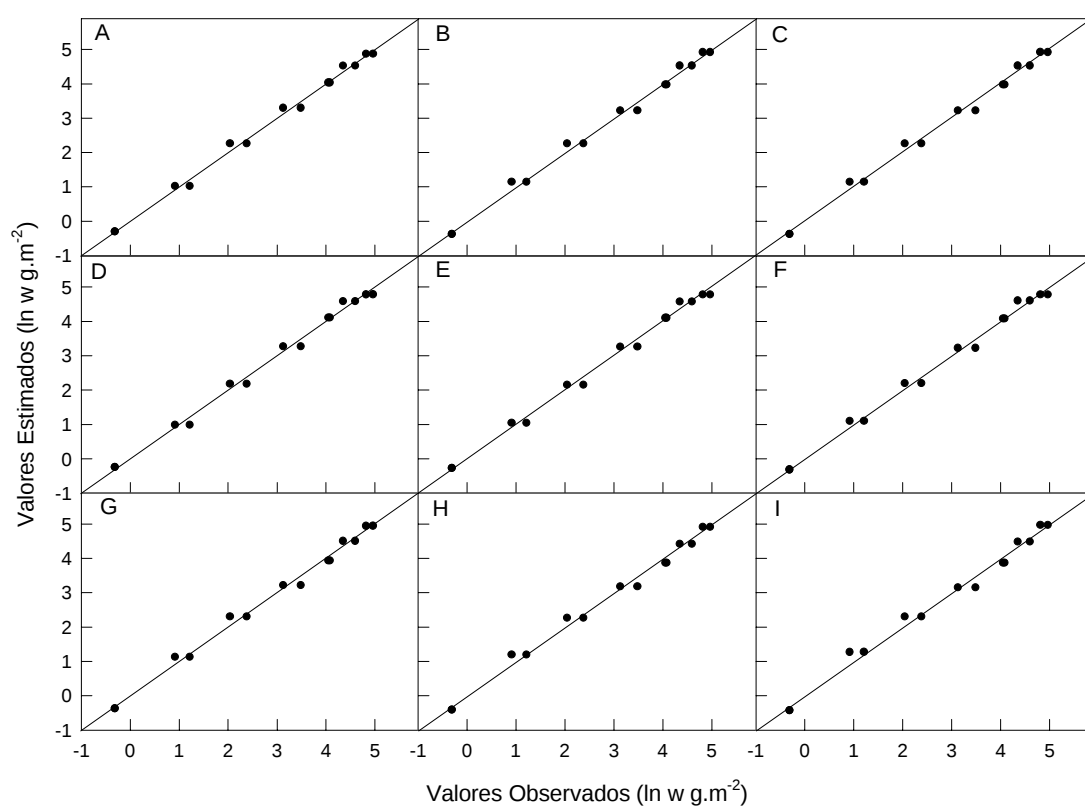


Figura 1.17 – Valores de matéria seca acumulada, observada e estimada pelos modelos expolinear (A, B, C), logístico (D, E, F) e Gompertz (G, H, I), tendo como variáveis independentes dias após o transplântio (A, D, G), graus-dias (B, E, H) e graus-dias efetivos (C, F, I), para alface, cultivar Regina.

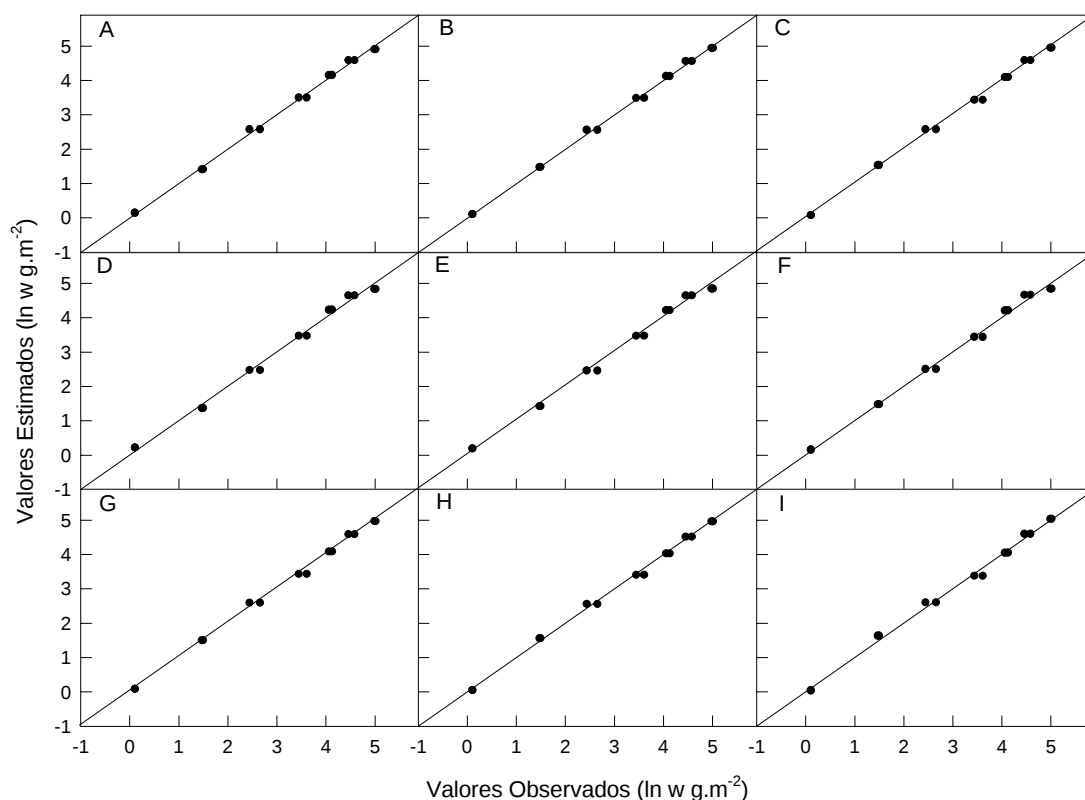


Figura 1.18 – Valores de matéria seca acumulada, observada e estimada pelos modelos expolinear (A, B, C), logístico (D, E, F) e Gompertz (G, H, I), tendo como variáveis independentes dias após o transplante (A, D, G), graus-dias (B, E, H) e graus-dias efetivos (C, F, I), para alfafa, cultivar Great Lakes.

Outro aspecto notório na Figura 1.17 é maior dispersão dos dados em torno da linha 1:1 para o cultivar Regina quando comparada com os cultivares Grand Rapids (Figura 1.16) e Great Lakes (Figura 1.18). Resultados da análise de crescimento podem ser importantes para ajudar o produtor na escolha de cultivares que tenham crescimento mais uniforme, reduzindo assim, o descarte de plantas que não atendem aos padrões de comercialização.

Os Quadros 1.5, 1.6 e 1.7, referentes aos cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, mostram que os valores da taxa máxima de crescimento relativo (r), estimados pelos modelos expolinear e logístico, tendo DAT como variável independente, ficaram próximos dos valores experimentais observados. Em contraste, o modelo Gompertz, com a mesma variável independente,

superestimou a taxa máxima de crescimento relativo em aproximadamente 60%. Resultado semelhante foi relatado por TEI et al. (1996b), o qual observou que o modelo Gompertz superestimou os valores observados em cerca de 40%. Do ponto de vista biológico, esses resultados sugerem que valores do parâmetro r estimados pelo modelo Gompertz deveriam ser interpretados com cautela. Uma análise minuciosa das Figuras 1.16, 1.17 e 1.18, letras G, H e I, apresentadas anteriormente, indicam que os dados de matéria seca acumulada para nove dias depois do transplântio, dois grupos de dados observados, foram ligeiramente superestimados pelo modelo Gompertz, afetando seriamente a estimativa do parâmetro r pela análise de regressão. Apesar do bom ajuste do modelo aos valores observados de matéria seca acumulada, conforme mostrado pelos altos valores de R^2_{aj} , a interpretação da taxa de crescimento logo após do transplântio fica comprometida. Por outro lado, os modelos expolinear e logístico tiveram também altos valores de R^2_{aj} , mas com a possibilidade de interpretação biológica do parâmetro r .

Quadro 1.5 – Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliado para alface, cultivar Grand Rapids, tendo como variáveis independentes, dias após o transplântio (DAT), graus-dias (GD) e graus-dias efetivos (GDE), e valores experimentais medidos da taxa de crescimento relativo máxima (r). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses

Modelo	Parâmetro	DAT	GD	GDE
Expolinear	r	0,2606 ($\pm$ 0,0081)	0,0231 ($\pm$ 0,0006)	0,0282 ($\pm$ 0,0008)
	c_m	7,171 ($\pm$ 0,504)	0,5787 ($\pm$ 0,0327)	0,7550 ($\pm$ 0,0494)
	t_b	16,92 ($\pm$ 2,64)	205,4 ($\pm$ 6,0)	171,7 ($\pm$ 5,5)
Logístico	r	0,2321 ($\pm$ 0,0091)	0,0203 ($\pm$ 0,0008)	0,0254 ($\pm$ 0,0009)
	w_f	130,3 ($\pm$ 13,4)	126,5 ($\pm$ 11,7)	127,0 ($\pm$ 10,9)
Gompertz	r	0,3841 ($\pm$ 0,0151)	0,0373 ($\pm$ 0,0021)	0,0449 ($\pm$ 0,0034)
	r_d	0,0484 ($\pm$ 0,0025)	0,0045 ($\pm$ 0,0003)	0,0053 ($\pm$ 0,0005)
Observado	r	0,2618 ($\pm$ 0,0079)	0,0215 ($\pm$ 0,0007)	0,0247 ($\pm$ 0,0008)

Quadro 1.6 – Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliado para alface, cultivar Regina, tendo como variáveis independentes, dias após o transplântio (DAT), graus-dias (GD) e graus-dias efetivos (GDE), e valores experimentais medidos da taxa de crescimento relativo máxima (r). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado entre parênteses

Modelo	Parâmetro	DAT	GD	GDE
Exponential	r	0,2718 ($\pm$ 0,0144)	0,0241 ($\pm$ 0,0013)	0,0295 ($\pm$ 0,0016)
	c _m	7,840 ($\pm$ 1,005)	0,6310 ($\pm$ 0,0749)	0,8184 ($\pm$ 0,1084)
	t _b	17,43 ($\pm$ 1,11)	211,5 ($\pm$ 11,9)	175,8 ($\pm$ 10,5)
Logística	r	0,2914 ($\pm$ 0,0383)	0,0218 ($\pm$ 0,0009)	0,0272 ($\pm$ 0,0011)
	w _f	129,9 ($\pm$ 14,7)	126,6 ($\pm$ 13,0)	127,2 ($\pm$ 13,2)
Gompertz	r	0,4122 ($\pm$ 0,0399)	0,0402 ($\pm$ 0,0045)	0,0484 ($\pm$ 0,0061)
	r _d	0,0492 ($\pm$ 0,0061)	0,0046 ($\pm$ 0,0006)	0,0054 ($\pm$ 0,0008)
Observado	r	0,2756 ($\pm$ 0,0299)	0,0226 ($\pm$ 0,0024)	0,0261 ($\pm$ 0,0028)

Quadro 1.7 – Valores estimados dos parâmetros dos modelos de crescimento avaliado para alface, cultivar Great Lakes, tendo como variáveis independentes, dias após o transplântio (DAT), graus-dias (GD) e graus-dias efetivos (GDE), e valores experimentais medidos da taxa de crescimento relativo máxima (r). O erro padrão de estimativa dos parâmetros é apresentado em parênteses

Modelo	Parâmetro	DAT	GD	GDE
Exponential	r	0,2654 ($\pm$ 0,0106)	0,0235 ($\pm$ 0,0008)	0,0286 ($\pm$ 0,0010)
	c _m	7,472 ($\pm$ 0,606)	0,6088 ($\pm$ 0,0373)	0,7934 ($\pm$ 0,0588)
	t _b	15,97 ($\pm$ 0,76)	195,3 ($\pm$ 6,6)	163,7 ($\pm$ 6,4)
Logística	r	0,2339 ($\pm$ 0,0102)	0,0205 ($\pm$ 0,0008)	0,0256 ($\pm$ 0,0010)
	w _f	138,0 ($\pm$ 14,4)	134,8 ($\pm$ 12,3)	135,6 ($\pm$ 11,8)
Gompertz	r	0,3956 ($\pm$ 0,0217)	0,0385 ($\pm$ 0,0024)	0,0463 ($\pm$ 0,0038)
	r _d	0,0520 ($\pm$ 0,0035)	0,0048 ($\pm$ 0,0003)	0,0056 ($\pm$ 0,0005)
Observado	r	0,2754 ($\pm$ 0,0028)	0,0226 ($\pm$ 0,0002)	0,0260 ($\pm$ 0,0023)

Os valores do parâmetro r estimados pelo modelo logístico com GD e GDE como variáveis independentes, foram os que mais se aproximaram dos valores experimentais observados. Similarmente, o modelo Gompertz apresentou a mesma tendência de superestimar o valor da taxa de crescimento relativo logo depois do transplântio. A mesma tendência de superestimar os valores experimentais de r também pode ser observada para o modelo expolinear. Entretanto, os valores estimados de r ficaram apenas ligeiramente acima dos valores experimentais medidos.

Os valores de r observados no presente trabalho foram superiores para DAT e inferiores para GD e GDE, aos reportados por TEI et al. (1996b) para a cultura da alface cultivada em condições de campo. Os valores encontrados pelo autor foram $0,2190 \text{ g g}^{-1}\text{d}^{-1}$, $0,0277 \text{ g g}^{-1}\text{GD}^{-1}$ e $0,0310 \text{ g g}^{-1}\text{GDE}^{-1}$, os quais estão próximos dos valores apresentados nos Quadros 1.5, 1.6 e 1.7. Por outro lado, os valores de r estimados pelo modelo logístico são inferiores aos encontrados por SCAIFE et al. (1987), BREWSTER & SUTHERLAND (1993) e TEI et al. (1996b), os quais foram $0,0239$; $0,0265$ e $0,0280 \text{ g g}^{-1}\text{GDE}^{-1}$, respectivamente.

4. CONCLUSÕES

A avaliação de componentes de crescimento para os três cultivares de alface utilizados, sendo um do tipo lisa (Regina) e dois do tipo crespa (Grand Rapids e Great Lakes), mostrou resultados interessantes no que diz respeito às relações entre matéria seca acumulada, área foliar e taxa de assimilação líquida. Embora a matéria seca acumulada no final do ciclo não diferiu estatisticamente entre cultivares, resultados da área foliar para o cultivar Regina foram bem superiores aos cultivares do tipo crespa, mostrando uma diferença da ordem de aproximadamente 54%. Esse fato evidencia a menor taxa de fotossíntese líquida do cultivar Regina, tomando-se por base a matéria seca produzida por unidade de área foliar.

Adicionalmente, observou-se que a TAL teve um incremento até os primeiros 15 DAT seguido de uma redução brusca na fotossíntese líquida até o final do ciclo de crescimento, ajustando-se bem a uma função polinomial cúbica

($R^2_{aj} > 88 \%$), independente do cultivar. Por outro lado a razão de área foliar (RAF) reduziu até os 25 DAT e aumentou no final do ciclo, sendo uma função quadrática a que melhor descreveu sua variação ($R^2_{aj} > 79\%$), desde do transplântio a colheita.

Vários modelos estatísticos foram ajustados aos componentes de crescimento e de produtividade, permitindo a estimativa desses elementos em estudos de eficiência de uso de água em condições de casa-de-vegetação. O índice de área foliar se ajustou bem ao modelo proposto por GOUDRIAAN & MONTEITH (1990), tendo graus-dias (GD) como variável independente, com coeficientes de determinação acima de 99,55%. Similarmente, a análise de regressão não-linear mostrou que um modelo na forma expolinear proporcionou os melhores ajustes entre matéria fresca e graus-dias acumulados após o transplante das mudas, com coeficientes de determinação ajustados acima de 99,65%, permitindo assim, boas estimativas do PF ao longo do ciclo da cultura.

Resultados da análise de regressão não-linear demonstraram que todos os modelos (expolinear, logístico e Gompertz) foram capazes de simular de maneira precisa o acúmulo de matéria seca após o transplântio de todos os cultivares de alface em questão. Valores dos coeficientes de determinação ajustados estiveram acima de 98,47% para todos os modelos avaliados, mostrando que, de forma geral, seus parâmetros têm significados fisiológicos coerentes, acompanhando as variações da curva de crescimento, e se aproximando dos valores observados no experimento. Entretanto, o parâmetro r que representa a taxa de crescimento relativo máximo foi superestimado pelo modelo de Gompertz para os três cultivares de alface. Resultados desse parâmetro estimados pelo modelo de Gompertz foram aproximadamente 60% superiores aos valores medidos logo após o transplântio. Em contraste, os modelos logístico e expolinear forneceram estimativas próximas dos valores observados.

No que se refere as variáveis independentes DAT, GD e GDE, os resultados de ajuste e de estimativa dos parâmetros foram bastante similares. Entretanto, o empirismo associado à variável independente DAT limita a aplicação dos três modelos para condições ambientais idênticas às medidas no interior da casa-de-vegetação, no final da estação do outono e início do inverno

em Viçosa-MG. Por outro lado, a sensibilidade das variáveis GD à temperatura e GDE à temperatura e radiação fotossinteticamente ativa, sugere que aplicação dos modelos avaliados em condições ambientais diferentes possibilitaria melhor estimativa do acúmulo de matéria seca após o transplante. Essa hipótese precisa ser verificada por meio da comparação desses modelos em condições ambientais diferentes das usadas para estimativa dos parâmetros dos modelos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMER, F.A.; WILLIAMS, W.T. Leaf-area growth in *Pelargonium zonale*. **Annals of Botany**. v.21, p.339-342, 1957.
- BENINCASA, M.M.P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 44 p.
- BREWSTER, J.L.; SUTHERLAND, R.A. The rapid determination in controlled environments of parameters for predicting seedling growth rates in natural conditions. **Annals of Applied Biology**. v. 122, p. 123-133, 1993.
- CONFALONE, A.E. **Captura e utilização da radiação na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) com e sem irrigação em diferentes estádios de desenvolvimento**. Viçosa: UFV, 1998. 74 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- COSTA, L.C.; FERREIRA, E.A.; SEDIYAMA, G.C.; MANTOVANI, E.C.; CECON, P.R. Uso da função expolinear para análise de crescimento da cultura da soja em diferentes condições de disponibilidade de água no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v. 7, n.2, p. 1-4, 1999.
- DENNETT, M.D.; ISHAG, K.H.M. Use of the expolinear growth model to analyse the growth of faba bean, peas and lentils at three densities: predictive use of the model. **Annals of Botany**. v. 82, p.507-512, 1998.
- FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; VILELA, L.A..A. **Produção de alface em hidroponia**. Lavras: UFLA, 1996.
- FAQUIN, V.; FURLANI, P.R. **Cultivo de hortaliças de folhas em hidroponia em ambiente protegido**. Informe Agropecuário, n. 20 v. 200/201, p. 99-104, 1999.

- FURLANI, P.R. **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de Hidroponia - NFT**. Campinas: IAC, 1998. 30p. (IAC. Boletim Técnico, 168).
- 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.
- GOUDRIAAN, J.; MONTEITH, J.L. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. **Annals of Botany**. v.66, p.695-701, 1990.
- HAY, R.K.M.; WALKER, A.J. **An introduction to the physiology of crop yield**. Lexington (UK): Longman Scientific & Technical, 1989.
- JENSEN, M.H.; COLLINS, W.L. Hydroponic vegetable production. **Horticultural Reviews**, v.7, p.484-555, 1985.
- JONES, H.G. A quantitative approach to plant-environment interactions. In: **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University, 1992, p. 1-8.
- KOEFENDER, V.N. **Crescimento e absorção de nutrientes pela alface cultivada em fluxo laminar de solução**. Piracicaba: USP, 1996. 85p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1996.
- MATTOS, K.M.C. **Efeito da temperatura do ar das canaletas e da estufa sobre o crescimento da alface (*Lactuca sativa* L.) em sistema hidropônico em função do material de cobertura da bancada**. Piracicaba: USP, 2000. 66 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo, 2000.
- MUCKLE, M.E. **Basic hydroponics for do-it-yourselfer**. 13. ed. Princeton: Growers Press Inc., 1995, 200 p.
- PEDROSA, M. W.; SEDIYAMA, M. A. N.; GARCIA, N. C. P.; SALGADO, L. T. Produção de alface em cultivo hidropônico em condições de inverno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 40, CONGRESSO IBERO-AMERICANO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE PLÁSTICOS NA AGRICULTURA, 2, SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE PRODUÇÃO DE PLANTAS MEDICINAIS, AROMÁTICAS E CONDIMENTARES, 1, 2000, São Pedro. **Anais...** São Pedro: UNESP, 2000.

- PENNING de VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. **Simulation of plant growth and crop production**. Wageningen: PUDOC, 1982.
- PEARL, R.; REED, L.J. Skew growth curves. **Proceeding of the National of Sciences of the United States**. v.6, p.16-22, 1920.
- RADIN, B.; REISSER JUNIOR, C.; BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. Crescimento de três cultivares de alface no interior e exterior de estufa plástica. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 12., 2001, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2001. v.1, p. 429-430.
- RICHARDS, F.J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of Experimental Botany**. v. 10 p. 290-300, 1959.
- SCAIFE, A.; COX, E.F.; MORRIS, G.E.L. The relationship between shoot weight, plant density and time during the propagation of four vegetable species. **Annals of Botany**. v. 59, p. 325-334, 1987.
- SEDIYAMA, M. A. N.; PEDROSA, M. W.; GARCIA, N. C. P.; GARCIA, S. R. L. Seleção de cultivares de alface para o cultivo hidropônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 40, CONGRESSO IBERO-AMERICANO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE PLÁSTICOS NA AGRICULTURA, 2, SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE PRODUÇÃO DE PLANTAS MEDICINAIS, AROMÁTICAS E CONDIMENTARES, 1, 2000, São Pedro. **Anais...** São Pedro: UNESP, 2000.
- SCHIMIDT, D. **Produção final**: Hidroponia da alface, Santa Maria: UFSM, 1998. p.57-62.
- TEI, F.; SCAIFE, A.; AIKMAN, D.P. Growth of lettuce, onion and red beet. 1. Growth Analysis, Light Interception, and Radiation Use Efficiency. **Annals of Botany**. v. 78, p.633-643, 1996 a.
- TEI, F.; AIKMAN, D.P.; SCAIFE, A. Growth of lettuce, onion and red beet. 2. Growth Modeling. **Annals of Botany**. v. 78, p.645-652, 1996 b.
- VAZQUEZ, M.S.V. **Estudo comparativo da morfologia foliar em seis cultivares de alface (*Lactuca sativa* L.)**. Piracicaba: USP, 1986. 61 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo, 1986.
- ZOLNIER, S. **Dynamic misting control techniques for poinsettia propagation**. Lexington: UK, 1999. 343p. (Ph.D. Thesis Agricultural Engineering) - Biosystems and Agricultural Engineering Department, University of Kentucky, 1999.

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO PARA ALFACE (*Lactuca sativa* L.) CULTIVADA EM SISTEMA HIDROPÔNICO EM CONDIÇÕES DE CASA-DE-VEGETAÇÃO

RESUMO

Dois experimentos independentes foram conduzidos na Área Experimental da Meteorologia Agrícola, pertencente ao DEA/UFV, no período de 18/05 a 09/06/2001 (1º experimento) e 24/06 a 26/07/2001 (2º experimento) em casa-de-vegetação não-climatizada com três cultivares de alface (Grand Rapids, Regina e Great Lakes), em sistema hidropônico com circulação laminar de nutrientes (NFT). Os objetivos foram: a) determinar a resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão de vapor d'água da alface em cultivo hidropônico em condições de casa-de-vegetação, por meio da inversão do modelo de Penman-Monteith, e com base nos valores de r_c previamente determinados, a variação da evapotranspiração (ET_c), ao longo do ciclo da cultura, foi estimada considerando-se o aumento do índice de área foliar por meio do modelo de crescimento expolinear e b) avaliar o ajuste do modelo de Penman-Monteith aos valores experimentais de evapotranspiração medidos depois do transplântio das mudas.

O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com três tratamentos (cultivares) e duas repetições (plantas dispostas nas bancadas de crescimento). Os dados do ambiente físico dentro da casa-de-vegetação foram obtidos por meio de um sistema automático de aquisição de dados, tendo como plataforma um microcomputador. O sistema de aquisição de dados do ambiente de cultivo era constituído de sensores de radiação solar global, velocidade do ar, temperatura e umidade relativa do ar, temperatura do material plástico de cobertura e da solução nutritiva. Para determinação da evapotranspiração da cultura, foi projetado e construído um sistema de medição específico para o cultivo hidropônico, permitindo a medição individual da evapotranspiração para cada bancada de crescimento. A resistência da cultura foi determinada depois do fechamento do dossel, mas antes do período de formação de cabeça.

Os valores de r_c encontrados foram $88 (\pm 1)$, $103 (\pm 11)$ e $105 (\pm 14) \text{ s m}^{-1}$, os quais estiveram associados aos IAFs de $2,40 (\pm 0,02)$, $2,87 (\pm 0,06)$ e $3,91 (\pm 0,49)$, respectivamente, para os cultivares Grand Rapids, Great Lakes e Regina.

Verificou-se que o modelo de Penman-Monteith estimou muito bem a ET_c para valores de IAF superiores a 0,5. Apenas para o período inicial de crescimento depois do transplante, (IAF menores que 0,3), os resultados não foram muito consistentes, sendo que o modelo superestimou ou subestimou a ET_c dependendo do cultivar. Verificou-se também que o modelo apresentou uma pequena tendência de superestimar os valores de ET_c no início da manhã e final da tarde.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento da população mundial, há uma tendência de se aumentar o consumo de alimentos, surgindo a necessidade de se incorporar novas tecnologias para aumentar a produtividade de diferentes culturas. Nos países de maior desenvolvimento tecnológico, como Canadá, Espanha, Estados Unidos, Holanda, Israel e Japão, sistemas de cultivo hidropônicos comerciais têm sido implantados desde 1975 para a produção de hortaliças. No Brasil, o cultivo comercial da alface em sistemas hidropônicos, em condições de casa-de-vegetação, tem se expandido de forma notável, principalmente a partir da década de 1990.

Medições diretas do consumo de água pelas plantas em sistemas hidropônicos são difíceis de serem conduzidas ou não são convenientemente obtidas e, portanto, estimativas de evapotranspiração, baseadas em medições dos elementos meteorológicos no ambiente de cultivo, são importantes para o manejo automático da aplicação da solução nutritiva e para o ajuste dinâmico da condutividade elétrica (CE) e do pH da solução (HAMER, 1997).

Para produção de alface, a solução nutritiva é, em geral, recirculada periodicamente nos canais de cultivo, geralmente a cada 10-15 min com duração de 15 min. Esse manejo empírico da aplicação de água é realizado por meio de temporizadores, os quais são insensíveis ao ambiente físico que sofre alterações

contínuas ao longo do dia. Por outro lado, esse método de aplicação de água não considera o crescimento da planta ao longo do ciclo da cultura, o que implica no aumento da demanda de água. Assim, atualmente, os intervalos de circulação da solução nutritiva são fixos ao longo do dia e ao longo do ciclo da cultura.

Atualmente, a automação de sistemas intensivos de produção vegetal tem merecido atenção especial. Dessa forma, a aplicação de água em ambientes protegidos pode ser otimizada por meio de modelos de crescimento que simulam o aumento da área foliar da cultura e de modelos de estimativa de evapotranspiração que simulam as necessidades de água da cultura ao longo do dia. Nesse caso, não só a quantidade correta de água pode ser determinada, mas também o momento apropriado para ativar o sistema de irrigação. Essa técnica reduz o consumo de energia elétrica em dias nublados e o estresse hídrico em dias de elevada demanda de água. A implementação de sistemas automáticos para o manejo de aplicação de água, concentração nutrientes e pH depende de estimativas exatas da evapotranspiração para curtos intervalos de tempo, preferencialmente 30 min.

Em condições de casas-de-vegetação, o modelo de Penman-Monteith tem sido utilizado com sucesso por muitos pesquisadores para fornecer estimativas exatas da transpiração e evapotranspiração de várias culturas (FAVER & O'TOOLE, 1989; ZHANG & LEMEURE, 1992; BAILLE et al., 1994a; ZOLNIER, 1999; ZOLNIER et al. 1999; ZOLNIER et al. 2001a; ZOLNIER et al. 2001b). Apesar de ser reconhecido internacionalmente, uma das limitações para a difusão do método de Penman-Monteith é a estimativa de certos parâmetros, tais como, resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão de vapor d'água e resistência aerodinâmica (r_h) ao processo de difusão do calor sensível. De acordo com ROSENBERG et al. (1983), esses parâmetros são disponíveis para um número limitado de culturas e para condições ambientais específicas.

A resistência da cultura (r_c) pode ser estimada a partir da extrapolação de medições da resistência estomática realizadas com porômetros em um número limitado de folhas amostradas ao acaso, ou por meio da inversão da equação de Penman-Monteith para estimativas de evapotranspiração (SMITH & BARRS, 1988).

Desde que os componentes do balanço de energia sejam medidos ou estimados com exatidão, a inversão da equação de Penman-Monteith pode ser considerado o método teoricamente correto para determinação da resistência da cultura. Nesse método, em casas-de-vegetação, a resistência aerodinâmica (r_h) ao processo de difusão do calor sensível é estimada a partir de equações de transferência de calor e massa por convecção, utilizando-se os números de Reynolds (Re) e Grashof (Gr) para definição do regime de convecção nas proximidades das plantas (CHAPMAN, 1984; INCROPERA & DEWITT, 1996).

Baseado no exposto, o presente trabalho teve como objetivos: a) determinar a resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão de vapor d'água, por meio da inversão do modelo de Penman-Monteith . Complementarmente, com base nos valores de r_c previamente determinados, a variação da evapotranspiração (ET_c), ao longo do ciclo da cultura, foi estimada considerando-se o aumento do índice de área foliar por meio do modelo de crescimento expolinear e b) avaliar o ajuste do modelo de Penman-Monteith ao valores experimentais de evapotranspiração medidos em intervalos de 30 min depois do transplântio e examinar a variação da evapotranspiração ao longo do dia, para três cultivares de alface (Grand Rapids, Regina e Great Lakes), em sistema hidropônico com circulação laminar de nutrientes (NFT), em condições de casa-de-vegetação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Aspectos Gerais

O presente trabalho foi realizado na área experimental da Meteorologia Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa-MG, de coordenadas geográficas: latitude 20° 45' 45" S, longitude 42° 52' 04" W e altitude de 690 m. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é Cwa (clima

temperado quente – mesotérmico; chuvas no verão e seca no inverno; temperatura média do mês mais quente superior a 22°C).

Foram coletados dados do ambiente e da cultura da alface, cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, para dois experimentos, no período de 18 de maio a 09 de junho, e de 24 de junho a 26 de julho de 2001 em sistema hidropônico com circulação laminar de nutrientes (NFT), em condições de casa-de-vegetação.

Os dados do segundo experimento da cultura e do ambiente foram usados para a determinação da resistência da cultura (r_c), e os do primeiro experimento para o ajuste do modelo de Penman-Monteith para estimativas da evapotranspiração.

Detalhes da casa-de-vegetação e do sistema de cultivo, além dos procedimentos experimentais pertinentes à produção de mudas e manejo dos cultivares estão descritos no capítulo 1 desse trabalho.

2.2. Sistema de aquisição de dados

Os dados do ambiente foram obtidos por meio de um sistema automático de aquisição de dados, tendo como plataforma um microcomputador. Nessa configuração, uma placa de aquisição de dados (CYDAS 1602HR, CYBERRESEARCH, Branford, CT), consistindo de 16 canais de entrada analógica com 16 bits, foi instalada em um barramento ISA do microcomputador (Figura 1.10). Os canais analógicos foram conectados aos sensores responsáveis pelo monitoramento do ambiente físico.

O sistema de aquisição de dados do ambiente de cultivo foi constituído por sensores de radiação solar, velocidade do ar, temperatura e umidade relativa do ar, temperatura da cobertura e da solução nutritiva. A densidade de fluxo de radiação solar foi medida, por meio de um piranômetro Eppley (Figura 2.1), o qual foi instalado a 0,50 m acima da cultura (1,30 m acima do solo). A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi medida com um sensor quântico (Modelo LI-190SA-50, LI-COR Inc., Lincoln, NE), instalado a mesma altura do piranômetro (Figura 1.11). A temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas por meio

de um instrumento que combina dois sensores independentes (Figura 1.11), sendo um para temperatura e outro para umidade relativa do ar (Modelo, HUM50Y, VAISALA, Woburn, MA). A velocidade do ar foi medida utilizando-se um anemômetro de fio quente (Modelo FMA-903-I, OMEGA, Stanford) (Figura 2.1). Além desses sensores, termopares do tipo “T” foram instalados dentro dos tanques de medição e na cobertura.

Os dados ambientais medidos foram armazenados em intervalos de um minuto, totalizando 1440 medições por dia. Cada dado armazenado correspondeu a uma média de cinco valores medidos com intervalos de um segundo. Foram feitas as médias aritméticas de todas as variáveis medidas, nos intervalos de tempo das medições da ET_c . Adicionalmente, foi determinada a variação da temperatura da solução, entre os intervalos de medições da ET_c , para obtenção do fluxo de calor sensível da solução.

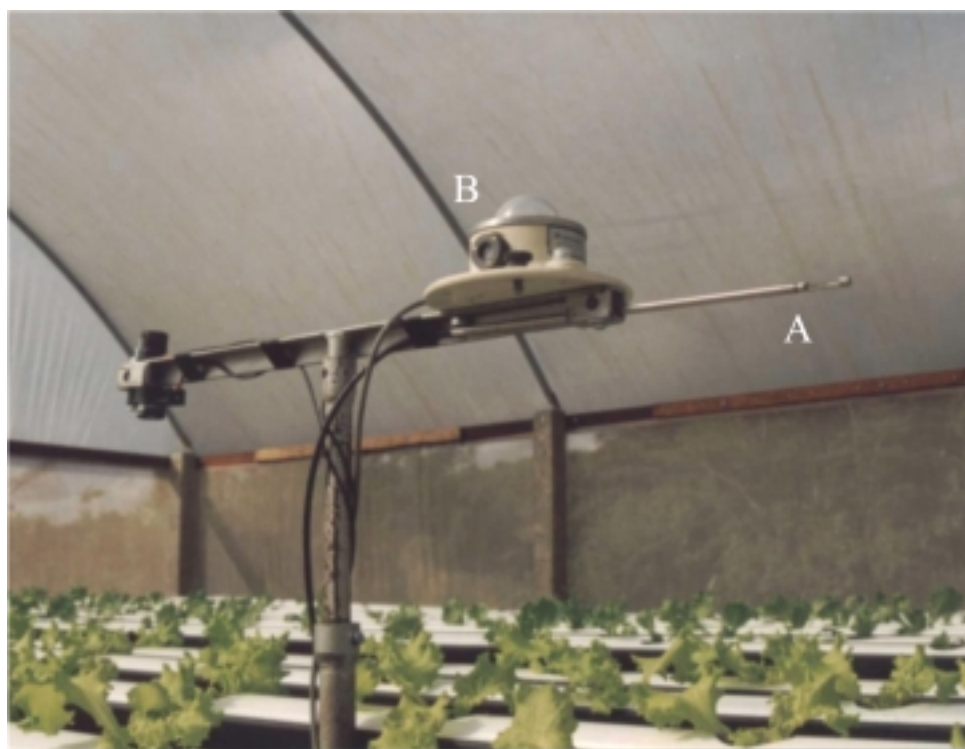


Figura 2.1 – Sensores de velocidade do ar (A) e radiação incidente (B).

2.3. Medição da Evapotranspiração da Cultura (ET_c)

Para a determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c), foi desenvolvido um sistema de medição específico para o cultivo hidropônico, o qual estava interligado ao sistema hidráulico das bancadas de cultivo, permitindo a medição individual da ET_c para cada unidade experimental consistindo de 120 plantas.

O sistema de medição (Figura 1.8) era composto de um tubo de PVC, com diâmetro de 0,15 m para medições da ET_c a partir do transplântio até duas semanas subsequentes e de 0,20 m dessa data até o final do ciclo da cultura. Ao tubo de PVC, com 0,72 m de altura, chamado de tanque de medição, foi conectada externamente uma mangueira de polietileno transparente, graduada em milímetros, para facilitar a leitura da variação do nível (h) da solução nutritiva, em intervalos pré-determinados. As medições foram realizadas das 08:00 as 16:00 h, a cada uma hora ou 30 minutos, dependendo do período de medição e da hora do dia. Acoplado ao tanque de medição, um reservatório da solução nutritiva, com capacidade de aproximadamente 120 L, era usado periodicamente para repor a solução utilizada pela planta e para promover a recomposição dos níveis de condutividade elétrica (CE) e pH desejados.

O reservatório era isolado hidráulicamente do tubo de PVC durante os períodos de medição da ET_c . Assim, nos intervalos de medições, as torneiras que ligavam o reservatório da solução nutritiva ao resto do sistema hidráulico eram fechadas, e dessa forma o sistema se tornava um volume de controle, onde as únicas perdas eram por evapotranspiração ou pela água incorporada no tecido da planta.

As medições de evapotranspiração foram conduzidas para cinco e sete períodos distintos de três dias ao longo do ciclo da cultura, depois do transplântio das mudas, relativos ao primeiro e segundo experimentos respectivamente. Os períodos de medições de ET_c foram intercalados por intervalos de dois dias quando apenas medições das variáveis ambientais foram realizadas. A evapotranspiração não corrigida (ET_{cn}) foi obtida dividindo-se o volume de água consumido pelas plantas em um intervalo de tempo conhecido pela área da

bancada de cultivo (7,5 m²). O volume foi determinado multiplicando-se a variação do nível da solução nutritiva pela área de secção transversal do tubo de PVC.

Devido à incorporação da água no tecido das plantas, faz-se necessário à correção das medições da ET_c. A água incorporada pela planta é calculada a partir da diferença entre a taxa de variação da matéria fresca (MF) e a taxa de variação de matéria seca, considerando-se no período de medição da ET_c, expresso em graus-dia acumulados, determinada pela equação abaixo,

$$A_i = \left(\frac{\partial PF}{\partial GD} - \frac{\partial MS}{\partial GD} \right) \left(\frac{GD}{60 \cdot N} \Delta t \right) \quad (2.1)$$

em que,

A_i = água incorporada no tecido da planta (kg m⁻²);

$\frac{\partial PF}{\partial GD}$ = taxa de variação da matéria fresca (kg °C⁻¹);

$\frac{\partial MS}{\partial GD}$ = taxa de variação da matéria seca (kg °C⁻¹);

GD = graus-dias do dia em questão (°C);

N = duração do fotoperíodo (h);

Δt = intervalo de tempo entre as medições (min).

Deve-se observar que a correção da ET_c pode ser dispensada no período inicial de crescimento imediatamente depois do transplantio. Entretanto, esse procedimento deve ser efetuado na fase final do ciclo da cultura quando a MF sofre alterações importantes. As taxas de variação da MF e da matéria seca para os cultivares de alface utilizados nesse estudo podem ser obtidos facilmente a partir de modelos de crescimento apresentados no capítulo 1 do presente trabalho. A evapotranspiração da cultura corrigida pode ser dada então por,

$$ET_c = ET_{cn} - A_i \quad (2.2)$$

2.4. Estimativas da Resistência Aerodinâmica (r_h)

A resistência aerodinâmica foi estimada considerando-se o regime de transferência de calor sensível predominante nas proximidades das plantas, sendo observado no presente experimento que o regime dominante foi à convecção forçada. Nesse regime, a resistência ao processo convectivo de transferência de calor sensível pode ser obtida segundo CHAPMAN (1984) e INCROPERA & DEWITT (1996) por,

$$r_h = \frac{\left(\frac{L}{\alpha \cdot u_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} \text{Pr}^{\frac{1}{6}}}{1,328 \cdot \text{IAF}} \quad (2.3)$$

em que,

r_h = resistência aerodinâmica ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$);

α = difusividade térmica ($22,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$);

L = comprimento característico da folha (m);

u_∞ = velocidade do ar dentro da casa-de-vegetação (m s^{-1});

Pr = número de Prandtl (0,705 adimensional);

IAF = índice de área foliar (adimensional).

O comprimento característico (L) e o índice de área foliar (IAF) foram obtidos a partir de modelos de crescimento apresentados no capítulo 1 do presente trabalho.

2.5. Determinação da Resistência da Cultura (r_c) ao Processo de Difusão do Vapor d'água

Depois da estimativa da resistência aerodinâmica ao processo de transferência de calor sensível, foi determinada a resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão de vapor d'água, a qual foi obtida por meio da inversão da equação de Penman-Monteith, dada a seguir,

$$r_c = \frac{\rho_{ar} \cdot c_{par} \cdot DPV}{\gamma \cdot LE} - r_h \left(1 + \frac{\Delta \cdot H}{\gamma \cdot LE} \right) \quad (2.4)$$

em que,

LE = evapotranspiração, expressa em termos de fluxo de calor latente na superfície ($W \cdot m^{-2}$);

ρ_{ar} = densidade absoluta do ar ($kg \cdot m^{-3}$);

DPV = déficit da pressão de saturação do vapor d'água ($Pa \cdot ^\circ C^{-1}$);

γ = coeficiente psicrométrico ($Pa \cdot ^\circ C^{-1}$);

H = Fluxo de calor sensível ($W \cdot m^{-2}$).

O fluxo de calor sensível (H) foi obtido a partir do resíduo do balanço de energia à superfície da bancada de cultivo,

$$H = LE - (R_n - F) \quad (2.5)$$

em que,

$$F = \frac{m \cdot c_{ps} \cdot \Delta T}{A_b \cdot \Delta t} \quad (2.6)$$

F = fluxo de calor sensível da solução nutritiva, normalizado para a área da bancada de cultivo ($W \cdot m^{-2}$);

m = massa da solução nutritiva circulante no sistema hidropônico (kg);

c_{ps} = calor específico da solução, assumido igual ao valor correspondente para água pura ($J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$);

ΔT = variação da temperatura da solução nutritiva ($^\circ C$);

A_b = área da bancada de cultivo ($7,5\ m^2$);

Δt = intervalo de tempo correspondente ao período de medição da ET_c (s).

Deve-se observar que o fluxo de calor sensível da solução nutritiva corresponde ao componente fluxo de calor do solo em estudos de evapotranspiração para cultivo de plantas em solo.

O balanço de radiação à superfície da bancada de cultivo é calculado por:

$$R_n = B_{oc} + B_{ol} \quad (2.7)$$

R_n = saldo de radiação ($W\ m^{-2}$);

B_{oc} = saldo de radiação de ondas curtas ($W\ m^{-2}$);

B_{ol} = saldo de radiação de ondas longas ($W\ m^{-2}$);

2.5.1. Balanço de Radiação na Casa-de-Vegetação

A Figura 2.2 mostra a representação esquemática dos principais componentes do balanço de radiação à superfície da bancada de cultivo e à superfície do piso da casa-de-vegetação. Na referida figura, os componentes do balanço de ondas curtas e ondas longas foram separados por motivos didáticos. Os componentes de ondas curtas podem ser descritos da seguinte forma:

R_{ic} = radiação solar incidente sobre a cultura (1) ($W\ m^{-2}$);

R_{icr} = radiação solar refletida pela cultura (2) ($W\ m^{-2}$);

R_{ip} = radiação solar incidente sobre a superfície do piso da casa-de-vegetação, constituída de pedra britada nº zero (3) ($W\ m^{-2}$);

R_{ipr} = radiação refletida pela pedra (4) ($W\ m^{-2}$);

R_{iprr} = radiação refletida pela pedra, a qual incidiu sobre a cultura e, posteriormente, foi refletida pela mesma (5) ($W\ m^{-2}$).

De forma análoga, os componentes de ondas longas podem ser relacionados como:

R_{c_pl} = troca de radiação de ondas longas entre a cultura e o material plástico de cobertura da casa-de-vegetação, constituído de um filme de polietileno de 150 μm (1) (W m^{-2});

R_{c_x} = troca de radiação de ondas longas entre a cultura e o ambiente externo a casa-de-vegetação (2) (W m^{-2});

R_{c_p} = troca de radiação de ondas longas entre a cultura e a superfície do piso da casa-de-vegetação (3) (W m^{-2});

R_{p_pl} = troca de radiação de ondas longas entre a superfície do piso da casa-de-vegetação e o filme de polietileno (4) (W m^{-2});

R_{p_x} = troca de radiação de ondas longas entre a superfície do piso casa-de-vegetação e o ambiente externo (5) (W m^{-2}).

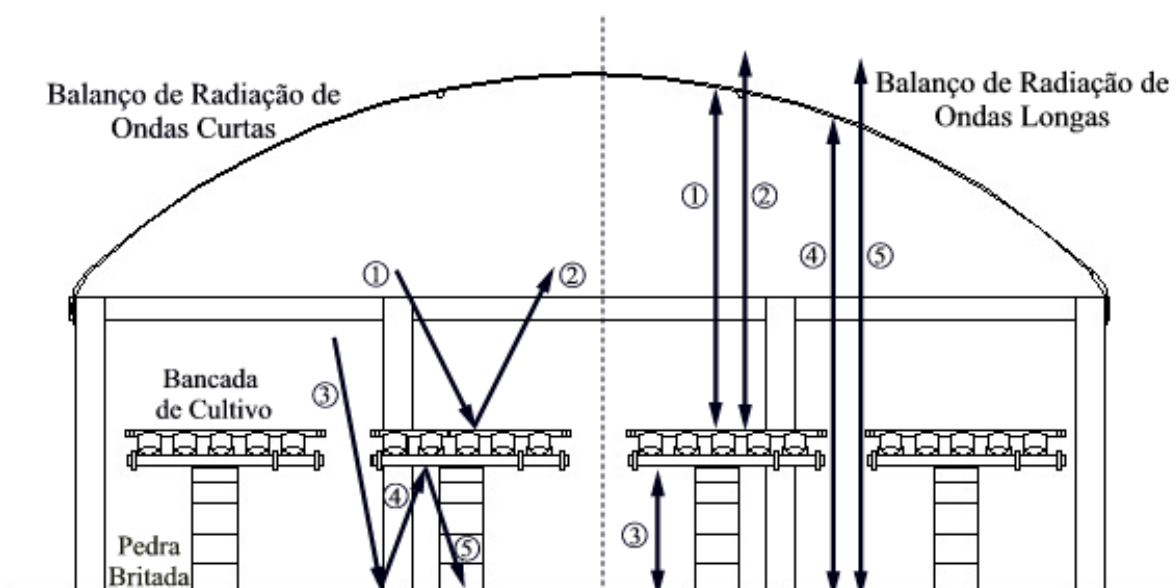


Figura 2.2 - Representação esquemática dos principais componentes do balanço de radiação à superfície da bancada de cultivo e à superfície do piso da casa-de-vegetação.

A radiação incidente sobre a cultura foi obtida a partir dos valores de radiação medidos no interior da casa-de-vegetação pelo piranômetro Eppley. Para determinação da radiação incidente sobre a superfície do piso da casa-de-vegetação, estimou-se a radiação não interceptada pela cultura e pelos perfis hidropônicos de cultivo. No período anterior ao fechamento do dossel, a área de projeção da cultura foi determinada com base no comprimento característico da planta (L), estimado por meio de um modelo de crescimento apresentado no capítulo 1. Nesse caso, considerou-se a projeção de uma área circular com raio L. A radiação refletida foi determinada multiplicando-se o coeficiente de reflexão de ondas curtas da superfície pela radiação incidente na mesma. No presente trabalho, adotou-se o valor 0,27 para a cultura da alface (FRISINA & ESCOBEDO, 1998) e 0,22 para a pedra britada (TUBELIS & NASCIMENTO).

As trocas de radiação de ondas longas foram estimadas utilizando-se a metodologia proposta por ALBRIGHT (1991) e HELICKSON & WALKER (1983), tendo como base a equação de Stephan-Boltzmann, cuja forma genérica é:

$$E = \sigma \epsilon_{\text{com}} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.8)$$

em que,

E = troca de radiação de ondas longas entre as superfícies consideradas (W m^{-2});

σ = constante de Stephan-Boltzmann ($5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$);

ϵ_{com} = emissividade combinada para as duas superfícies em questão (adimensional);

T = temperatura das superfícies consideradas (K).

2.6. Estimativa da Evapotranspiração da Cultura (ET_c)

A evapotranspiração no interior da casa-de-vegetação foi estimada com a utilização do modelo de Penman-Monteith. O desenvolvimento teórico do modelo é apresentado por MONTEITH (1965), sendo que a evapotranspiração,

expressa em termos de fluxo de calor latente, e adaptada ao sistema de produção hidropônico, foi calculada pela equação:

$$LE = \frac{\Delta(R_n - F) + \rho_{ar} c_{par} DPV_{ar}/r_h}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_h)} \quad (2.9)$$

em que,

LE = fluxo de calor latente da superfície ($W m^{-2}$)

$(R_n - F)$ = energia disponível na superfície ($W m^{-2}$)

R_n = saldo de radiação na superfície ($W m^{-2}$)

F = fluxo de calor sensível da solução nutritiva, normalizado para a área da bancada de cultivo ($W m^{-2}$);

$\Delta \cong$ derivada da pressão de saturação do vapor d'água com respeito à temperatura, sendo avaliada por meio da temperatura de bulbo seco do ar, ($Pa ^\circ C^{-1}$)

ρ_{ar} = densidade absoluta do ar ($kg m^{-3}$);

c_{par} = calor específico do ar à pressão constante ($J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$);

DVP_{ar} = déficit da pressão de saturação do vapor d'água do ar (Pa);

r_h = resistência aerodinâmica ao processo de transferência de calor sensível ($s m^{-1}$);

γ = coeficiente psicrométrico ($Pa ^\circ C^{-1}$);

r_c = resistência da cultura ($s m^{-1}$).

Para possibilitar a estimativa da ET_c ao longo do ciclo da cultura, a resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão de vapor d'água foi parametrizada com relação à variação do índice de área foliar (IAF), pela relação,

$$r_c = r_{cr} \cdot \frac{IAF_r}{IAF} \quad (2.10)$$

em que,

r_c = resistência da cultura, associado ao valor do IAF em questão ($s m^{-1}$);

r_{cr} = resistência da cultura de referência, associado ao valor de IAF_r ($s m^{-1}$);

IAF = índice de área foliar em questão, estimado por meio de modelos de crescimento (adimensional);

IAF_r = índice de área foliar de referência, medido depois do fechamento do dossel (Figura 2.3), porém antes do período de formação de cabeça (adimensional).

Deve-se observar que essa metodologia dispensa a utilização do coeficiente de cultura (K_c), normalmente utilizado para estimativa da ET_c em condições de campo. O modelo de crescimento para estimativa de IAF pode ser encontrado no capítulo 1 do presente trabalho.



Figura 2.3 – Vista geral da cultura da alface depois do fechamento do dossel, porém antes do período de formação de cabeça.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Determinação da Resistência da Cultura (r_c)

Os valores da resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão de vapor d'água para os cultivares Grand Rapids, Great Lakes e Regina, determinados depois do fechamento do dossel, porém antes do período de formação de cabeça, são apresentados no Quadro 2.1. A média da resistência da cultura foi de 88 (± 1), 103 (± 11) e 105 (± 14) $s\ m^{-1}$, com um índice de área foliar de 2,40 ($\pm 0,02$), 2,87 ($\pm 0,06$) e 3,91 ($\pm 0,49$) para os cultivares Grand Rapids, Great Lakes e Regina, respectivamente.

Para o período de medições entre 8:00 e 16:00 h, não foi encontrada nenhuma relação entre os valores de r_c com os de radiação incidente e com os do déficit de pressão de vapor d'água. Devido à intermitência da aplicação da solução nutritiva, usado no sistema de produção NFT, medições da ET_c não puderam ser conduzidas com êxito no período anterior às 8:00 h e posterior às 16:00 h quando o efeito reconhecido da radiação é manifestado na resistência da cultura. Assim, os resultados sugerem a necessidade da utilização de um sistema hidropônico específico para medição da ET_c que elimine a necessidade de aplicação intermitente de água. Evidentemente, esse sistema requer a oxigenação contínua da solução nutritiva.

Embora a publicação de valores de r_c para culturas e sistemas de produção hidropônicos é bastante limitada, vários trabalhos foram conduzidos com o objetivo de determinar a r_c em condições de campo. OKE (1992) apresentou valores médios de r_c para culturas agrícolas, os quais estão em torno de 50 $s\ m^{-1}$. O'TOOLE & REAL (1986), trabalhando com nove culturas irrigadas, encontraram valores variando de 14 $s\ m^{-1}$ (arroz irrigado) até 69 $s\ m^{-1}$ (figueira), sendo que sete das culturas estudadas apresentaram r_c entre 32 e 69 $s\ m^{-1}$. PERES et al. (1999) encontraram valores médios da resistência para a cana-de-açúcar de 44 e 42 $s\ m^{-1}$, em escalas decendial e mensal, respectivamente. MONTEITH (1985) recomenda que se adote $r_c = 50\ s\ m^{-1}$ para a determinação da evapotranspiração potencial das plantas cultivadas. As resistências supracitadas são determinadas

geralmente depois do fechamento do dossel, não sendo relacionados os seus índices de área foliar. ALLEN (1989) sugere uma r_c de 69 s m^{-1} , para uma cultura hipotética com 0,12 m de altura, albedo de 0,23 e IAF de 2,88 para estimativa da evapotranspiração potencial ET_o .

BAILLE et al. (1994a), avaliando a resistência da cultura para nove espécies de plantas ornamentais, em condições de casa-de-vegetação, encontraram valores variando de 41 (IAF de 5,1) para “*Impatiens*” a 670 s.m^{-1} (IAF de 2,0) para poinsetia “*Euphorbia pulcherrima*”, sendo que seis das culturas avaliadas apresentaram r_c entre 41 e 187 s.m^{-1} , e respectivos IAF de 5,1 e 4,5.

ZOLNIER (1999) determinou a resistência da cultura de estacas de poinsetia, com IAF médio igual a 3,0 ($\pm 0,2$), em câmaras climatizadas, e verificou que, em termos gerais, os valores de r_c encontrados declinaram de aproximadamente 460 s m^{-1} para 200 s m^{-1} com o aumento da radiação incidente de 50 para 300 W m^{-2} .

Quadro 2.1 - Valores médios diários da resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão de vapor d’água para alface, cultivares Grand Rapids, Great Lakes e Regina. Os valores mostrados foram determinados depois do fechamento do dossel, porém antes do período de formação de cabeça

Cultivar	Resistência da Cultura (s m^{-1})	IAF
Grand Rapids	88 (± 1)	2,40 ($\pm 0,02$)
Great Lakes	103 (± 11)	2,87 ($\pm 0,06$)
Regina	105 (± 14)	3,91 ($\pm 0,49$)
C.V.	9,87 %	25,31 %

Os valores da resistência da cultura apresentados na literatura mostram a grande variação da mesma entre culturas, ambientes de cultivo e com o índice de área foliar, dificultando a comparação minuciosa dos valores encontrados por outros autores com os apresentados nesse trabalho. Entretanto, pode-se dizer que os valores de r_c apresentados no Quadro 2.1 se encontram na faixa determinada para a maioria das culturas agrícolas.

3.2. Variação Diurna da Resistência da Cultura

A variação diurna da resistência da cultura (r_c) com a variação correspondente do saldo de radiação (R_n) e do déficit de pressão de vapor (DPV) é ilustrada nas Figuras 2.4, 2.5 e 2.6, respectivamente para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes. As medições foram conduzidas no dia 19/07/2001, entre 08:00 e 16:00 h, no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. Observa-se que os valores de r_c oscilaram bastante ao longo do dia, o que comprometeu a determinação do efeito de R_n e DPV no controle da evapotranspiração pela planta. Devido a esse fato, foram calculados os valores médios de r_c por bancada de cultivo, para um período de 3 dias, sendo posteriormente determinado o valor médio de r_c para cada cultivar (Quadro 2.1). No presente experimento, as resistências apresentaram uma variação diária com valores próximos a 0 s m^{-1} até 200 s m^{-1} para todos os cultivares.

ALVES & PERREIRA (2000), trabalhando com alface (cv. Saladin), cultivada em solo, em condições de campo, encontraram uma variação de r_c na faixa de magnitude citada anteriormente, no horário de 08:00 a 16:00 h. ALVES et al. (1998), avaliando a mesma cultura e cultivar, encontraram variações de r_c entre 0 e 100 s m^{-1} .

A determinação de r_c a partir da inversão do modelo de Penman-Monteith se mostrou bastante sensível a pequenas variações nas medições de LE, não sendo possível realizar medições com a precisão necessária, nos intervalos de tempo de 30 minutos, o que possivelmente impossibilitou qualquer tipo de observação da relação entre as variáveis ambientais citadas e r_c .

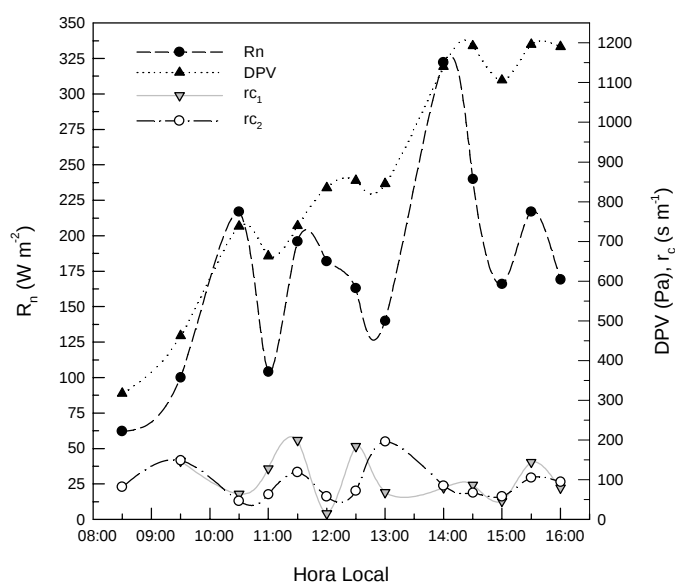


Figura 2.4 – Variação do saldo de radiação (R_n), do déficit de pressão de vapor (DPV) e da resistência da cultura (r_c) do cultivar Grand Rapids. As medições foram conduzidas no dia 19/07/2001, ente 08:00 e 16:00 h, no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada.

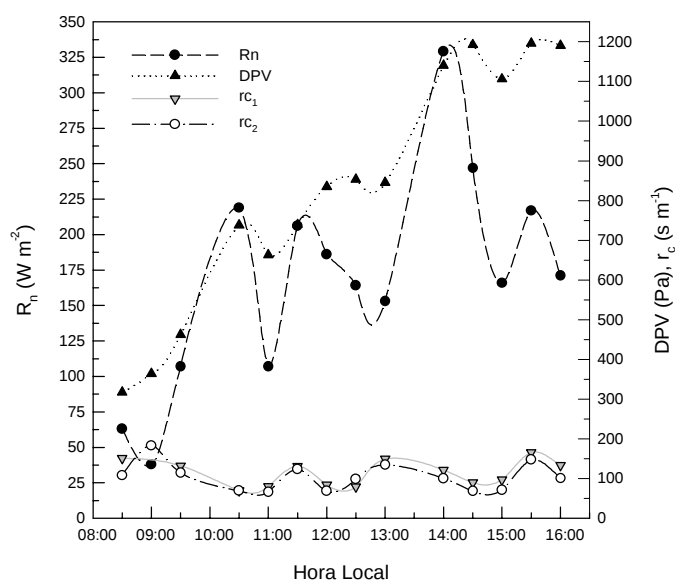


Figura 2.5 – Variação do saldo de radiação (R_n), do déficit de pressão de vapor (DPV) e da resistência da cultura (r_c) do cultivar Regina. As medições foram conduzidas no dia 19/07/2001, ente 08:00 e 16:00 h, no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada.

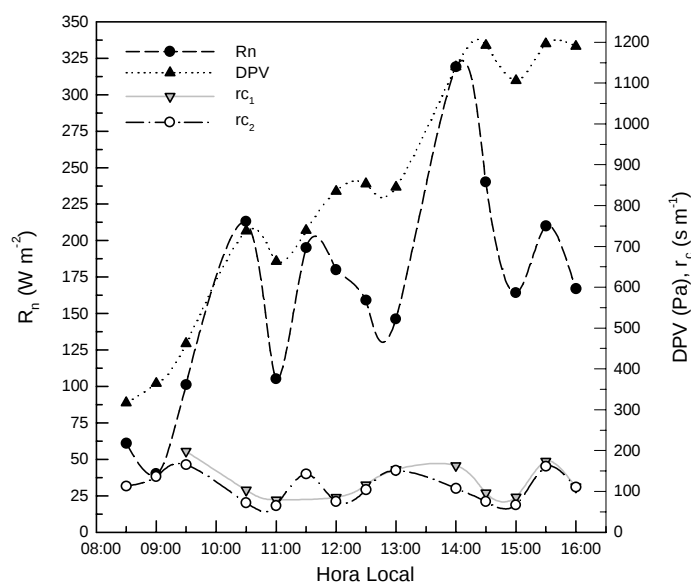


Figura 2.6 – Variação do saldo de radiação (R_n), do déficit de pressão de vapor (DPV) e da resistência da cultura (r_c) do cultivar Great Lakes. As medições foram conduzidas no dia 19/07/2001, ente 08:00 e 16:00 h, no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada.

3.3. Simulação e Análise da Evapotranspiração Durante o Ciclo da Cultura

As Figuras 2.7, 2.8 e 2.9 apresentam a simulação do fluxo de calor latente (LE), em função dos graus-dias acumulados (GD) durante o ciclo da alface, em cultivo hidropônico, para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, respectivamente. Essa simulação considera valores típicos do saldo de radiação (R_n) à superfície da bancada de cultivo e de valores do déficit de pressão de vapor d'água (DPV), os quais foram observados dentro da casa-de-vegetação. Os valores adotados para simulação foram R_n de 100 W m^{-2} , combinado com os níveis de DPV de 500, 1000, 1500 e 2000 Pa, e o valor fixo de DPV de 2000 Pa, associado aos valores de R_n de 100, 200, 300 e 400 W m^{-2} .

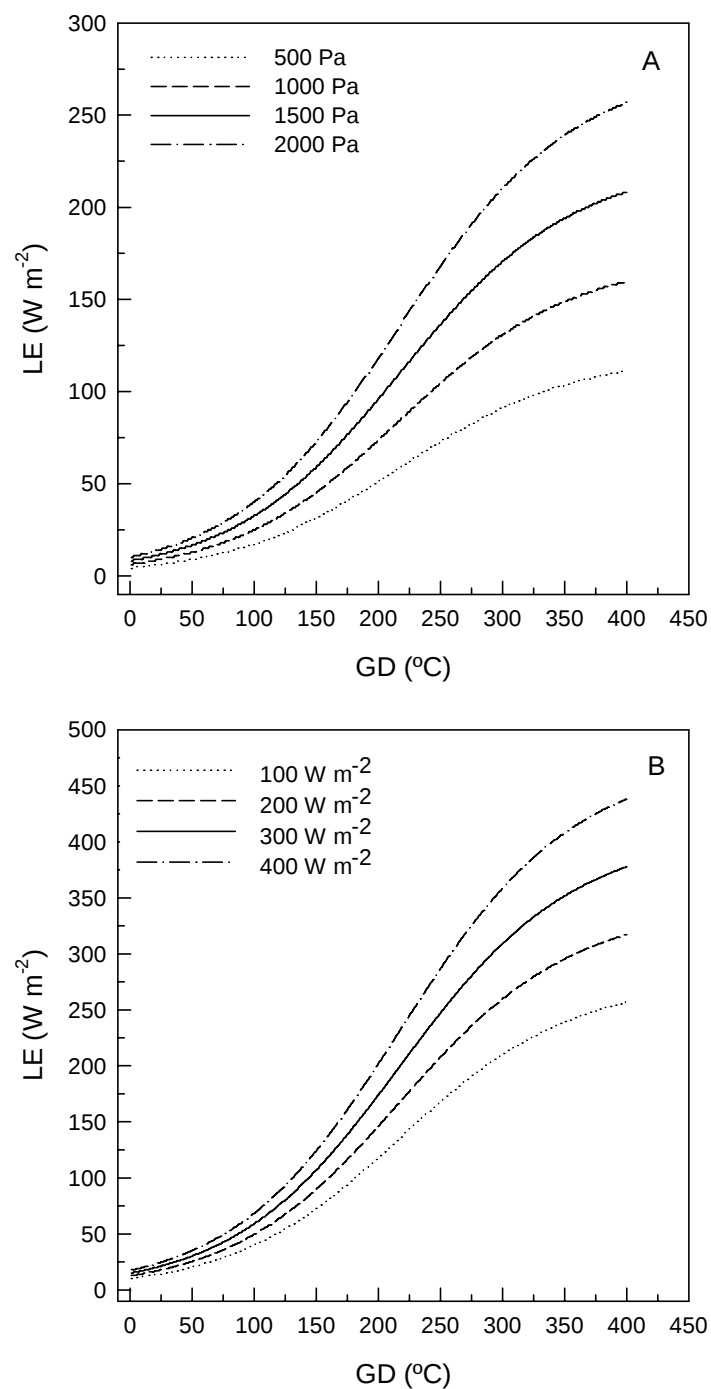


Figura 2.7 – Variação do fluxo de calor latente (LE) do cultivar Grand Rapids, em função dos graus-dias acumulados durante o ciclo da cultura, para diferentes níveis do saldo de radiação (R_n) e do déficit de pressão de vapor d'água (DPV). O valor de R_n de 100 W m^{-2} foi combinado com os níveis de DPV de 500, 1000, 1500 e 2000 Pa (A) e o valor de 2000 Pa foi combinado com os níveis de R_n de 100, 200, 300 e 400 W m^{-2} (B).

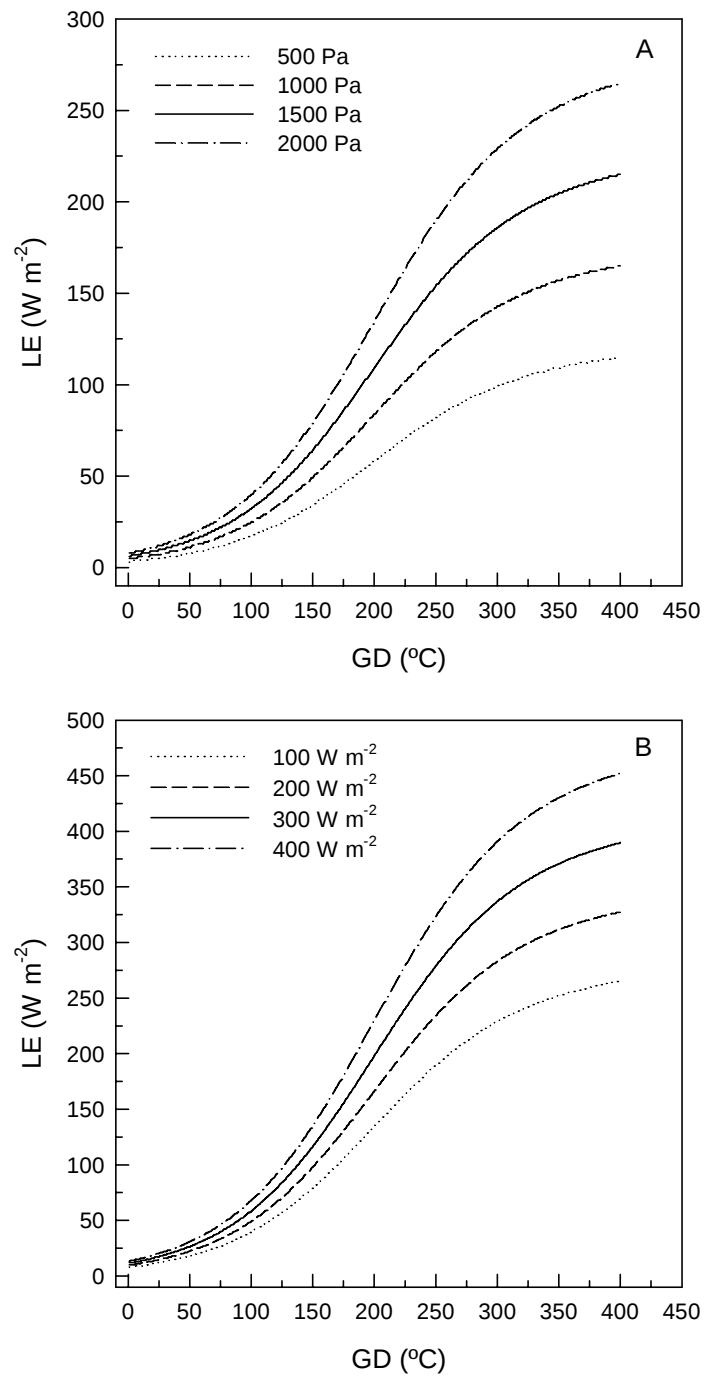


Figura 2.8 – Variação do fluxo de calor latente (LE) do cultivar Regina, em função dos graus-dias acumulados durante o ciclo da cultura, para diferentes níveis do saldo de radiação (R_n) e do déficit de pressão de vapor d'água (DPV). O valor de R_n de 100 W m^{-2} foi combinado com os níveis de DPV de 500, 1000, 1500 e 2000 Pa (A) e o valor de 2000 Pa foi combinado níveis de R_n de 100, 200, 300 e 400 W m^{-2} (B).

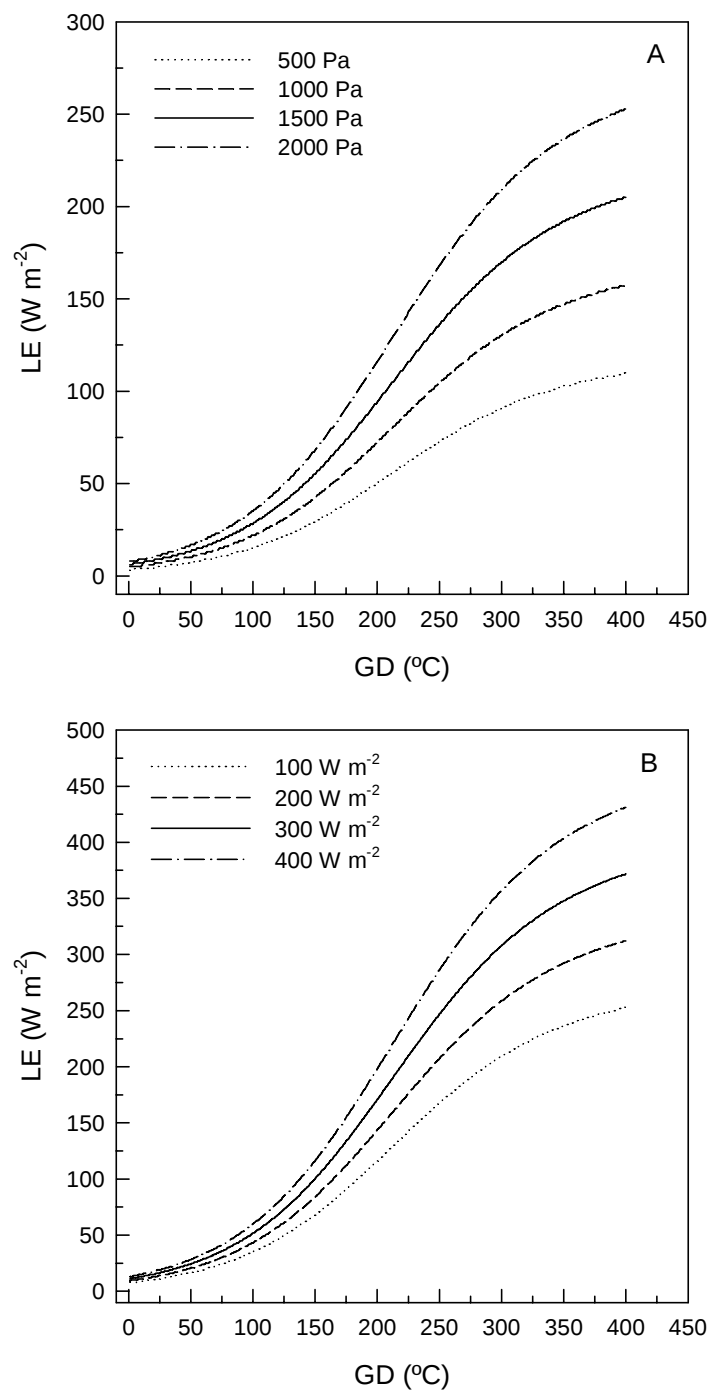


Figura 2.9 – Variação do fluxo de calor latente (LE) do cultivar Great Lakes, em função dos graus-dias acumulados durante o ciclo da cultura, para diferentes níveis do saldo de radiação (R_n) e do déficit de pressão de vapor d'água (DPV). O valor de R_n de 100 W m^{-2} foi combinado com os níveis de DPV de 500, 1000, 1500 e 2000 Pa (A) e o valor de 2000 Pa foi combinado níveis de R_n de 100, 200, 300 e 400 W m^{-2} (B).

Independente do cultivar, as curvas ilustradas nas figuras acima mencionadas mostram um crescimento lento da ET_c , expressa em termos de fluxo de calor latente, com os graus-dias acumulados até aproximadamente 100 GD, tendo um incremento rápido e linear a partir desse ponto até o fechamento do dossel, mostrando novamente uma tendência de estabilização na fase final do ciclo da cultura. A utilização de modelos de crescimento da cultura associados ao modelo de estimativa da evapotranspiração de Penman-Monteith permite uma análise minuciosa da evolução da ET_c com crescimento da cultura, permitindo assim, determinar a relação entre o consumo de água e consumo de nutrientes pela cultura.

Os resultados de simulação mostram que, para condições ambientais idênticas, a ET_c no final do ciclo da cultura pode ser até 45 vezes superior ao valor correspondente ao período imediatamente depois do transplântio das mudas, sugerindo a necessidade do desenvolvimento de um sistema automático de aplicação de água que considere a variação da demanda de água com o crescimento da cultura. Atualmente, em sistemas hidropônicos com circulação laminar de nutrientes, os intervalos de aplicação de água são controlados empiricamente por meio de temporizadores, sem considerar as variações da ET_c ao longo do dia e ao longo do ciclo da cultura. Como regra geral para a produção de alface, a solução nutritiva é recirculada periodicamente nos canais de cultivo, geralmente a cada 10-15 min com duração de 15 min.

Segundo PEREIRA et al. (1997), o componente de radiação é responsável pela maior fração da evapotranspiração quando comparada com a do termo aerodinâmico. No presente trabalho, com base nas Figuras 2.7A, 2.8A e 2.9A, verifica-se que, praticamente independente do cultivar, acréscimos do DPV da ordem de 500 Pa causam incrementos em LE da ordem de 40 W m^{-2} no final do ciclo da cultura, considerando-se R_n mantido no nível de 100 W m^{-2} . Por outro lado, nas Figuras 2.7B, 2.8B e 2.9B, verifica-se que, acréscimos de R_n da ordem de 100 W m^{-2} causam incrementos em LE da ordem de 50 W m^{-2} no final do ciclo da cultura, considerando-se DPV mantido no nível de 2000 Pa.

Os valores simulados no presente experimento foram confrontados com valores medidos em experimento independente, permitindo a comparação dos valores da resistência da cultura (r_c) apresentados no Quadro 2.1.

3.4. Ajuste do modelo de Penman-Monteith

As Figuras 2.10, 2.11 e 2.12 mostram os valores do fluxo de calor latente (LE) determinados experimentalmente e estimados pelo modelo de Penman-Monteith para os cultivares Grand Rapids, Regina e Great Lakes, respectivamente. Os resultados são apresentados de acordo com o aumento do índice de área foliar ao longo do ciclo da cultura depois do transplântio.

Verifica-se que o modelo de Penman-Monteith, com o parâmetro r_c determinado, em experimento independente (2º experimento), possibilita estimativas satisfatórias de ET_c , mesmo para o período anterior ao fechamento do dossel. Em geral, para valores de IAF superiores a 0,5 e para todos os cultivares estudados, observa-se nas Figuras 2.10, 2.11 e 2.12 que o modelo de Penman-Monteith superestimou os baixos valores de LE, os quais são medidos no início e final do dia. Em contraste, os altos valores de LE foram ligeiramente subestimados pelo referido modelo.

Para valores de IAF inferiores a 0,5 os resultados não foram muito consistentes entre cultivares. Verifica-se que os valores de LE foram subestimados pelo modelo de Penman-Monteith para os cultivares do tipo crespa (Grand Rapids e Great Lakes) e, por outro lado, foram superestimados para o cultivar do tipo lisa (Regina). Observa-se também que, para o cultivar Regina (Figura 2.11), apenas valores de LE inferiores a 10 W m^{-2} foram superestimados, enquanto que os restantes foram subestimados. Além disso, nota-se que para o IAF de 0,26, o modelo forneceu resultados satisfatórios, semelhantes aos apresentados para valores de IAF maiores que 0,5.

Dois aspectos distintos precisam ser discutidos com base nos resultados apresentados. O primeiro se refere aos erros de LE devido a subestimativas de ET_c no início e final da tarde e o segundo se refere à falta de exatidão devido à extrapolação da resistência da cultura para o período inicial de crescimento após o transplante, quando não houve ainda o fechamento do dossel.

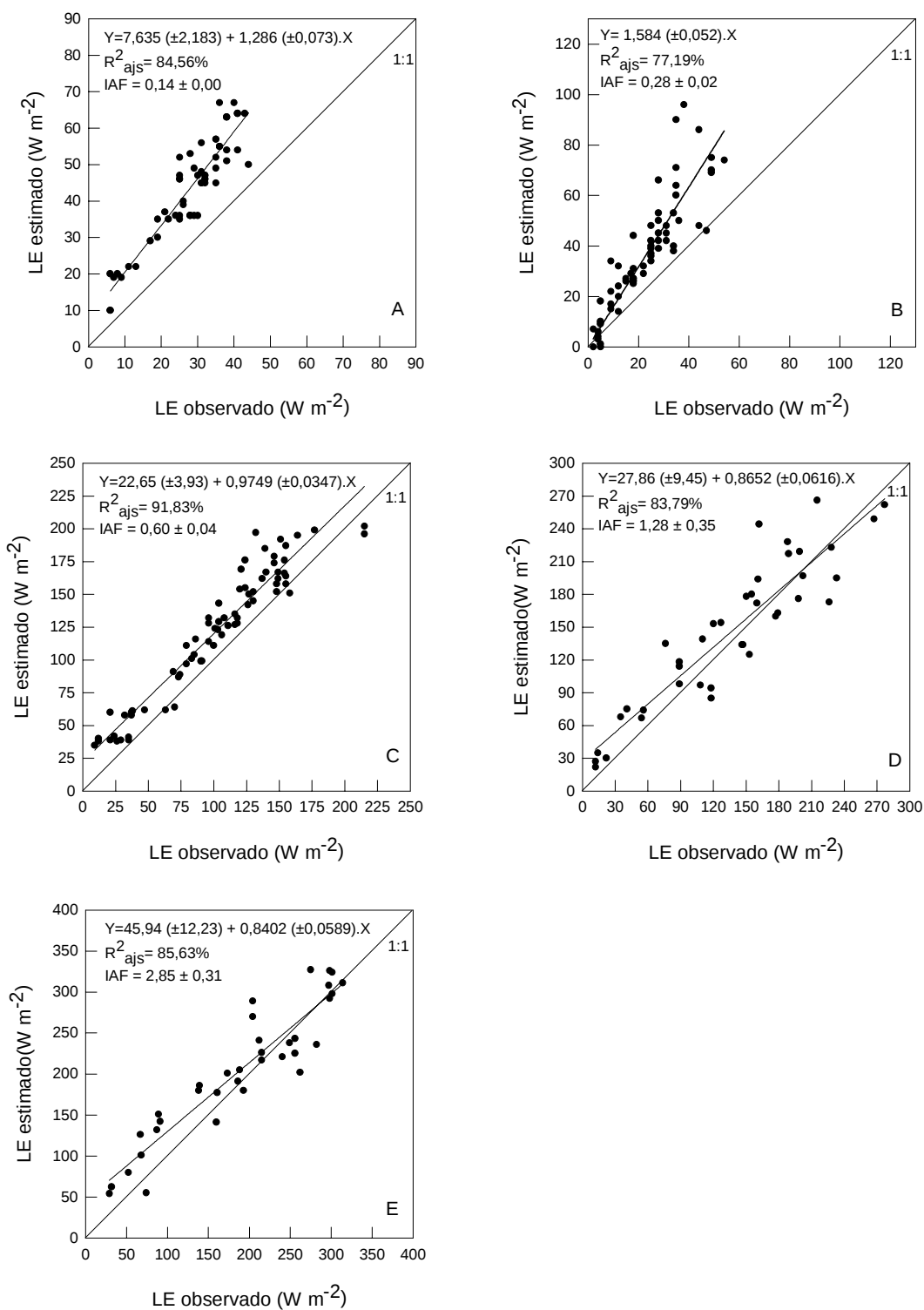


Figura 2.10 – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. Os valores apresentados referem-se ao cultivar Grand Rapids com IAF médio de 0,14 (A), 0,28 (B), 0,60 (C), 1,28 (D) e 2,85 (E).

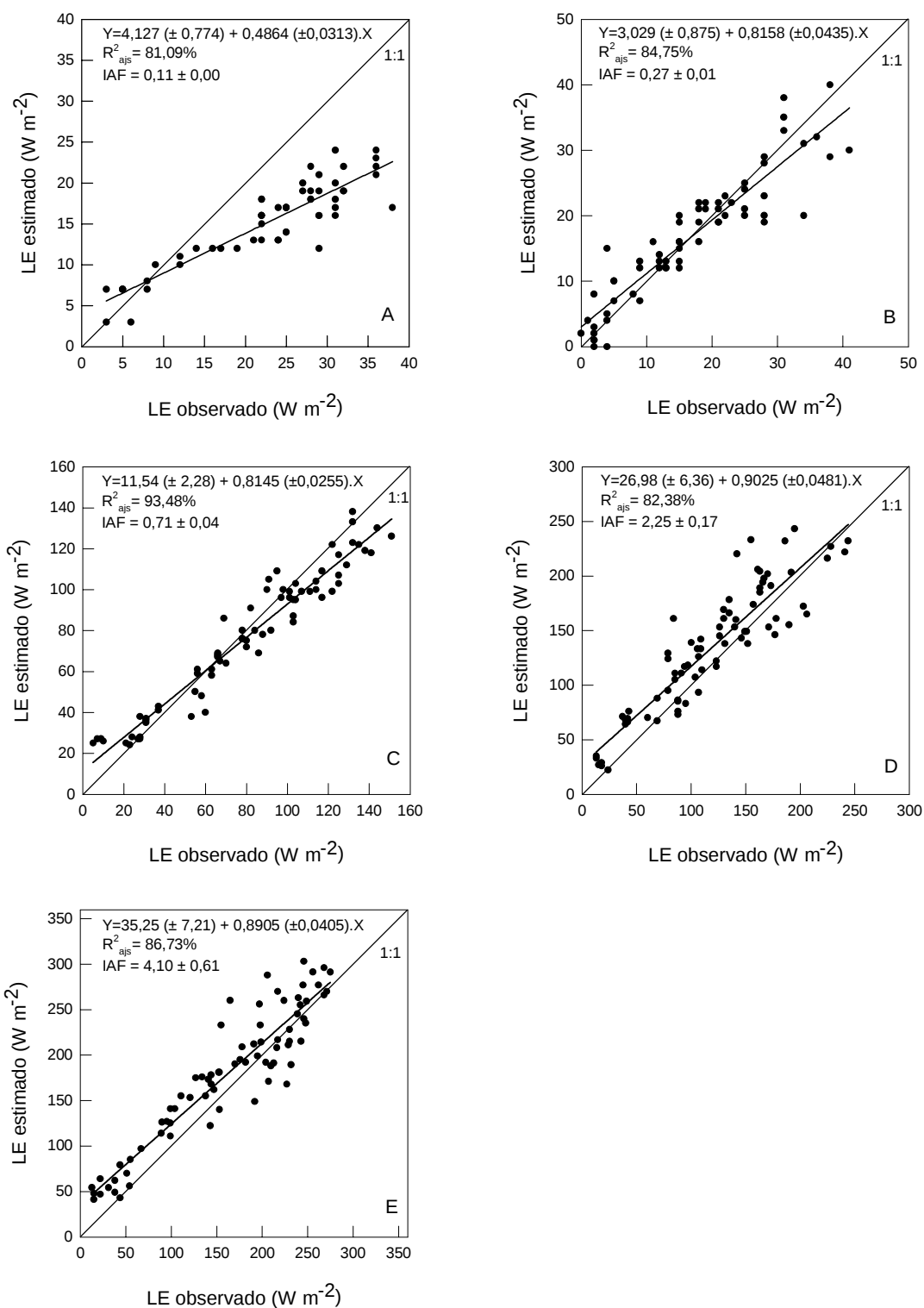


Figura 2.11 – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. Os valores apresentados referem-se ao cultivar Regina com IAF médio de 0,11 (A), 0,26 (B), 0,71 (C), 2,25 (D) e 4,06 (E).

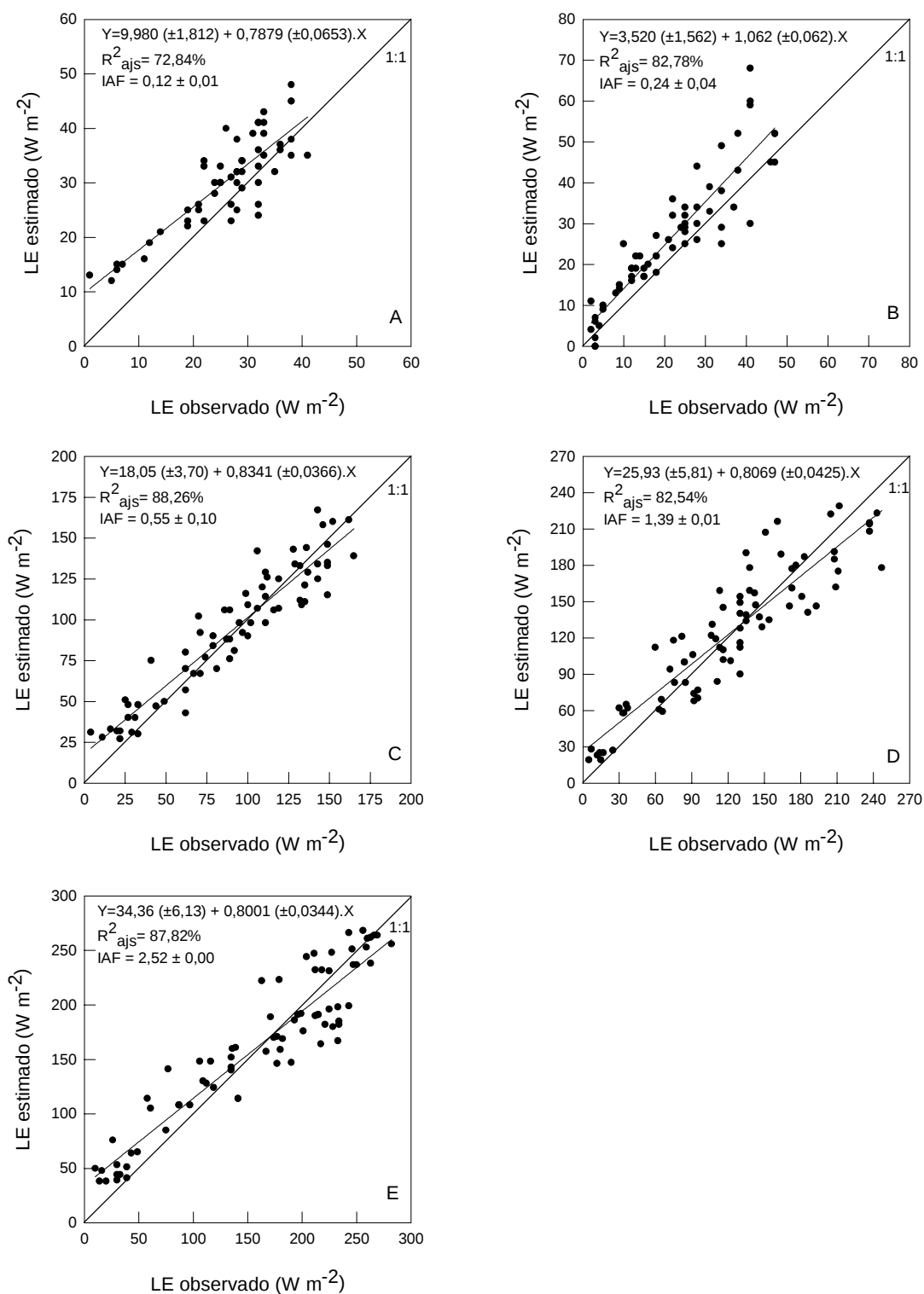


Figura 2.12 – Fluxo de calor latente observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. Os valores apresentados referem-se ao cultivar Great Lakes com IAF médio de 0,12 (A), 0,23 (B), 0,55 (C), 1,39 (D) e 2,52 (E).

Aparentemente, os resultados sugerem a necessidade de se estimar a resistência da cultura com maior exatidão nos períodos iniciais de crescimento depois do transplante. Entretanto, Os erros de estimativa da ET_c , inerentes à técnica utilizada no presente trabalho, são devidos à extrapolação da resistência da cultura com base no valor do IAF. No entanto, os erros de estimativa foram de magnitude inferior a 20 W m^{-2} , o que representa uma lâmina de evapotranspiração de $0,030 \text{ mm h}^{-1}$, ou seja, $0,015 \text{ mm}$ em 30 min .

No que se refere ao erro no início e final da manhã esse pode ser corrigido a partir de uma calibração mais exata da resistência da cultura levando-se em conta o efeito da radiação solar e do déficit de pressão de vapor na abertura e fechamento dos estômatos. No início da manhã os estômatos estão parcialmente fechados, aumentando assim a resistência da cultura.

As medições de evapotranspiração foram conduzidas em um sistema hidropônico fechado, onde a solução nutritiva era ministrada periodicamente durante um período de 10 min , seguida de um intervalo de interrupção de 20 min para oxigenação das raízes. Esse sistema, apesar de fornecer resultados satisfatórios para estimativa de ET_c , como mostrado nas Figuras 2.10, 2.11 e 2.12, necessita ainda de um aprimoramento. Um problema constatado foi o armazenamento da solução nutritiva no sistema radicular, agravando-se com o crescimento da cultura. Esse fato dificultou a drenagem da solução nutritiva para o tanque de medição da ET_c . Evidenciou-se que, apesar da utilização de 120 plantas por bancada, o período de drenagem não era exatamente o mesmo e um efeito transiente inevitável afetou a exatidão das medições.

Esses resultados sugerem a necessidade de medição da evapotranspiração em sistemas hidropônicos onde a água é recirculada continuamente, evitando-se assim, a necessidade de drenagem da solução entre períodos de medição. Evidentemente, haveria a necessidade de injeção contínua de oxigênio na solução nutritiva, por meio de um sistema automático, com monitoramento permanente dos níveis de O_2 . Esse sistema permitiria ainda a medição do consumo de água para períodos inferiores a 30 min , como determinado no presente trabalho.

Os coeficientes de determinação ajustados (R^2_{ajs}), variaram de 77,19 a 91,83 % para o cultivar Grand Rapids, 81,09 a 93,48 % para Regina e 72,84 a

88,26 % para o cultivar Great Lakes, mostrando uma boa correlação entre os valores de ET_c observados e estimados pelo modelo de Penman-Monteith. Esses valores servem apenas de referência para indicar o grau de dispersão dos valores experimentais.

Os valores de R^2_{ajs} , apresentados nesse trabalho, encontram-se na faixa dos observados por BAILLE et al. (1994a), de 68% a valores acima de 80%, e abaixo dos reportados por ZHANG & LEMEUR (1992), maiores que 97%, para estimativas de LE, utilizando o modelo de Penman-Monteith, em condições de ambiente protegido.

ZOLNIER (1999) utilizou o modelo de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de estacas de poinsetia "*Euphorbia pulcherrima*" em câmaras climatizadas, sob condições parcialmente molhadas, após eventos de nebulização. O referido autor encontrou valores de R^2_{ajs} , entre 77 e 97 % e verificou também que os valores baixos de evapotranspiração foram superestimados, sendo os maiores subestimados.

ZHANG e LEMEUR (1992) realizaram estudo experimental em casa-de-vegetação visando à estimativa de evapotranspiração de plantas de *Ficus Benjamina*, com valores de IAF entre 2,0 e 3,4, utilizando-se a equação de Penman-Monteith. A resistência da cultura foi obtida dividindo-se a resistência estomática média pelo IAF e a resistência aerodinâmica foi determinada por meio de equações clássicas de transferência de calor e massa por convecção. No referido trabalho, os valores de LE medidos foram ligeiramente superestimados pelo método de Penman-Monteith para toda faixa de valores de LE observados.

Outro estudo experimental para estimativa de evapotranspiração em casas-de-vegetação foi conduzido por BAILLE et al. (1994a). Os autores realizaram um estudo com nove espécies vegetais cultivadas em vasos, sendo os valores de evapotranspiração obtidos a partir de uma balança eletrônica. Apenas valores de ET_c estimada para hibisco, begônias e poinsetias foram comparados com os observados. Valores estimados para o hibisco estiveram próximos dos valores observados para toda faixa de LE, mas foram subestimados para altos valores de LE e foram na maior parte superestimados para a poinsetia.

FACCIOLI (1998), avaliando a evapotranspiração de referência (ET_r), utilizando a equação de Penman-Monteith FAO 24, em casa-de-vegetação, observou que o mesmo superestima os valores da ET_r , tendo como referência à grama.

Outro fato interessante, é que aproximadamente duas semanas após o transplântio, quando o dossel está quase que completamente fechado, e com um IAF superior a 0,6, os valores estimados se aproximam muito da reta 1:1, com coeficientes angulares da regressão (Figuras 2.10, 2.11 e 2.12) entre 0,8652 ($\pm 0,0616$) a 0,9749 ($\pm 0,0347$) para o cultivar Grand Rapids, 0,8145 ($\pm 0,255$) a 0,9025 ($\pm 0,0481$), cultivar Regina e 0,8001 ($\pm 0,0344$) a 0,8341 ($\pm 0,0366$) para o cultivar Great Lakes.

3.5. Variação Diurna da Evapotranspiração

As Figuras 2.13, 2.14, e 2.15 ilustram a variação diurna da evapotranspiração, expressa em $W\ m^{-2}$, afetada pelas variações da radiação incidente e do déficit de pressão de vapor d'água. Os resultados são apresentados para o período após o fechamento do dossel. Nas referidas figuras, verifica-se que os valores estimados pelo modelo de Penman-Monteith acompanham os valores observados de acordo com variações da radiação solar e do déficit de pressão de vapor.

Apesar da dificuldade de se estimar o fluxo de vapor d'água para curtos intervalos de tempo, o modelo forneceu resultados satisfatórios. Como discutido previamente, o modelo superestima ligeiramente os valores de ET_c no início da manhã 8:00-10:00 h e estima muito bem a partir desse horário. Entretanto, os erros no início da manhã são inferiores a $20\ W\ m^{-2}$ (0,030 mm/h, aproximadamente).

Nas Figuras 2.13, 2.14, e 2.15 verifica-se também, que para dias com pouca ou nenhuma nebulosidade, a radiação solar tem um comportamento simétrico em relação ao tempo cronológico local. Por outro lado, o déficit de pressão de vapor é nitidamente maior depois do meio-dia, tendo uma queda drástica apenas no final da tarde. Em razão desse comportamento em casas-de-

vegetação, torna-se evidente a necessidade da utilização de intervalos diferentes de aplicação da solução nutritiva. Atualmente, vários autores recomendam a aplicação intermitente da solução nutritiva, utilizando-se os mesmos intervalos para o período da manhã e período da tarde. O desenvolvimento de um sistema automático, baseado na estimativa da evapotranspiração da cultura, que regule os intervalos de aplicação da solução nutritiva é de extrema importância para a otimização dessa técnica de produção vegetal.

Medições da radiação incidente (R_i) e do fluxo de calor latente conduzidas no dia 03/06/2001, com o IAF variando de 1,33 a 2,37 (Figuras 2.13A, 2.14A e 2.15A), apresentaram valores de R_i variando entre 125 e 480 $W\ m^{-2}$, e de DPV na faixa entre 250 e 1400 Pa. Nessa data, o valor máximo de R_i esteve associado ao valor de DPV de 500 Pa, sendo o LE em média 37% do valor da radiação incidente. Em contraste, medições realizadas no dia 07/06/2001, com o IAF variando de 2,52 a 4,49 (Figuras 2.13B, 2.14B e 2.15B), mostraram que a radiação incidente alcançou valor máximo de 600 $W\ m^{-2}$, o qual esteve associado ao DPV de 900 Pa. Nesse caso, o fluxo de calor latente foi em média 57% da R_i .

Os valores máximos de LE medidos ficaram em torno de 200 e 300 $W\ m^{-2}$, para o cultivar Grand Rapids, 175 e 275 $W\ m^{-2}$, cultivar Regina, 150 e 250 $W\ m^{-2}$, para o cultivar Great Lakes, os quais foram medidos nos dias 03 e 07/06, respectivamente. Apesar do cultivar Regina, ter apresentado um maior índice de área foliar (IAF), e o Great Lakes um IAF próximo do cultivar Grand Rapids, o mesmo apresentou uma evapotranspiração maior.

O modelo de Penman-Monteith foi capaz descrever muito bem a variação diurna do fluxo de calor latente, tanto para uma dia parcialmente nublado (Figuras 2.13A, 2.14A e 2.15A), como para um dia com altos valores de radiação solar (Figuras 2.13B, 2.14B e 2.15B). A curva de LE apresenta um comportamento similar à da radiação incidente, comprovando a forte dependência da evapotranspiração ao termo de radiação da equação de Penman-Monteith, sendo essa dependência menor com relação ao termo aerodinâmico, representado pelo DPV.

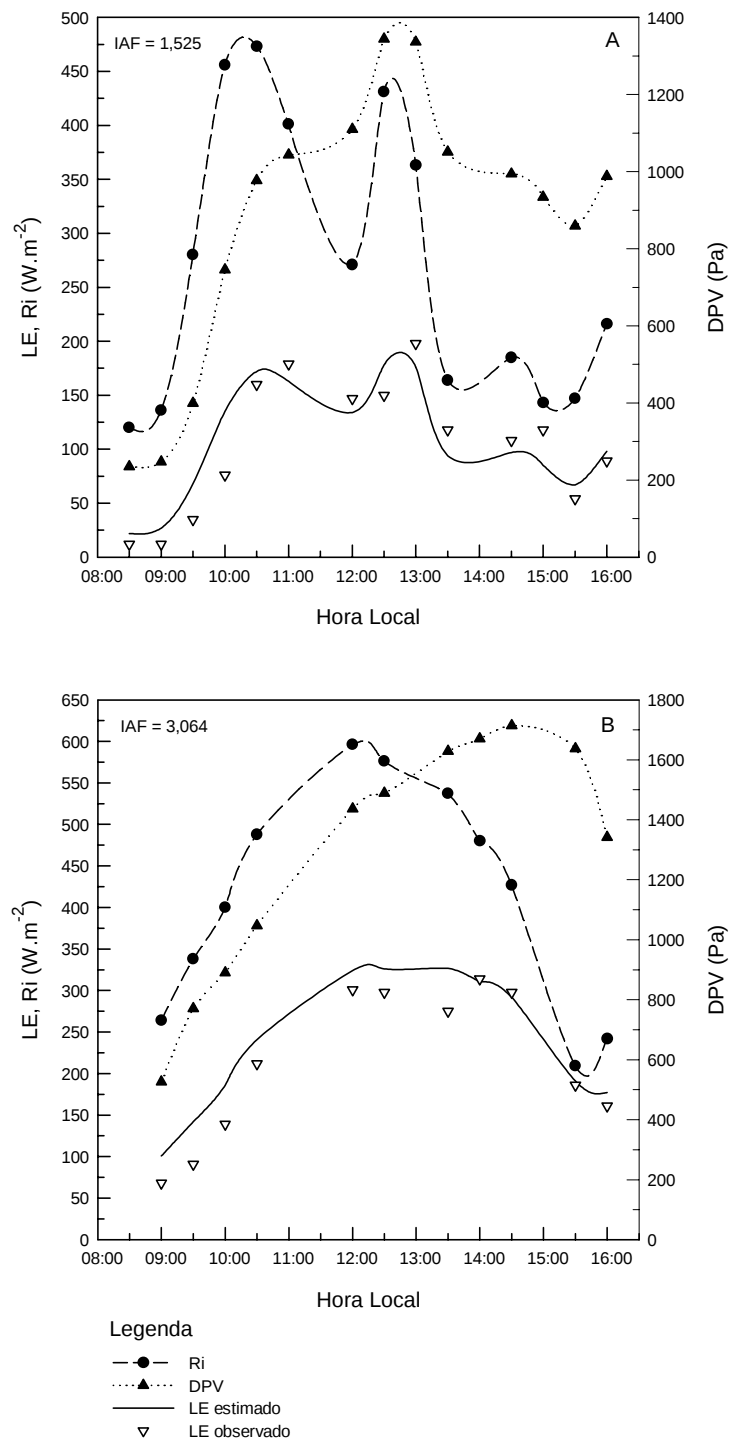


Figura 2.13 – Variação da radiação incidente (R_i), do déficit de pressão de vapor (DPV) e do fluxo de calor latente (LE) observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. As medições foram conduzidas no dia 03/06 (A) e 07/06/2001 (B), entre 08:00 e 16:00h, e os valores medidos de LE referem-se ao cultivar Grand Rapids com IAF de 1,52 e 3,06, respectivamente.

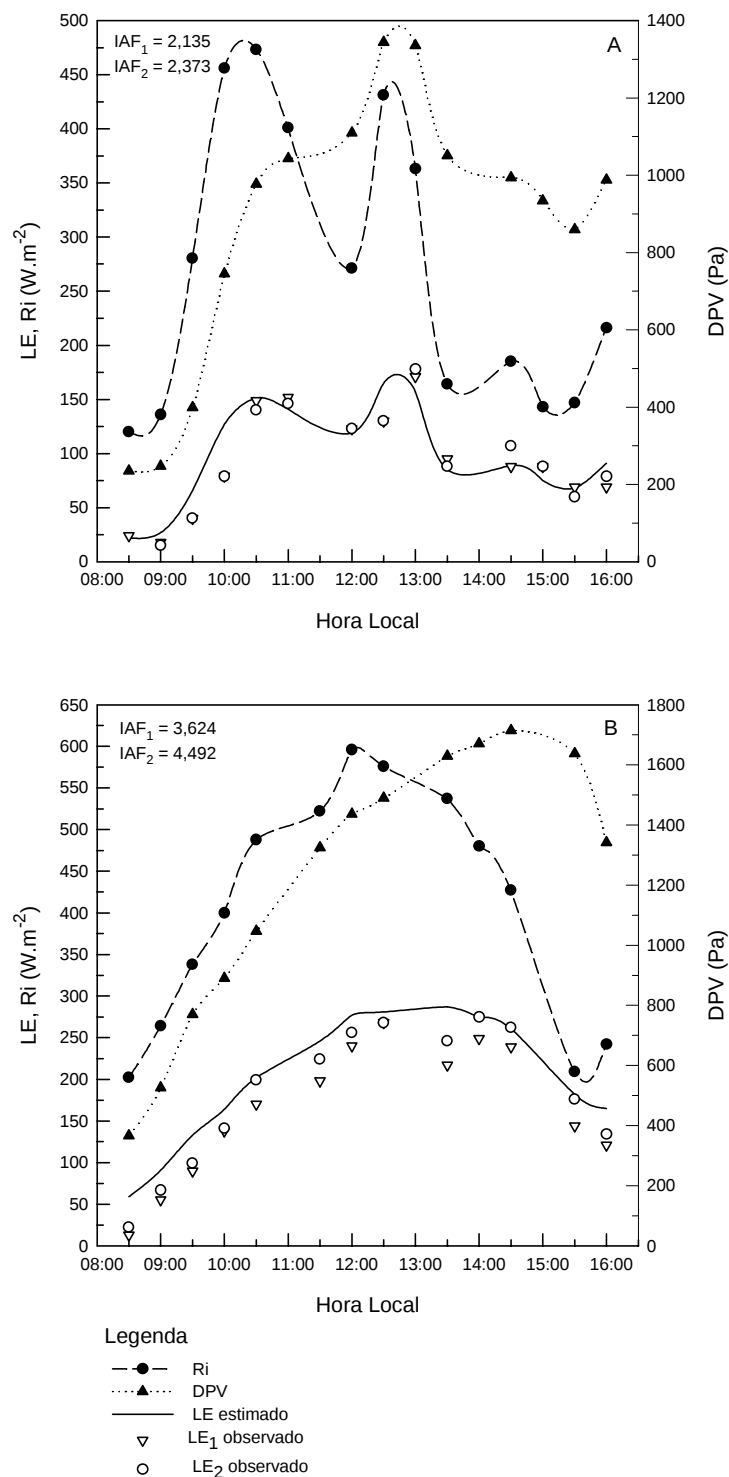


Figura 2.14 – Variação da radiação incidente (R_i), do déficit de pressão de vapor (DPV) e do fluxo de calor latente (LE) observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. As medições foram conduzidas no dia 03/06 (A) e 07/06/2001 (B), entre 08:00 e 16:00h, e os valores medidos de LE referem-se ao cultivar Regina com IAF 2,14 e 2,37 (A) e de 3,62 e 4,49 (B).

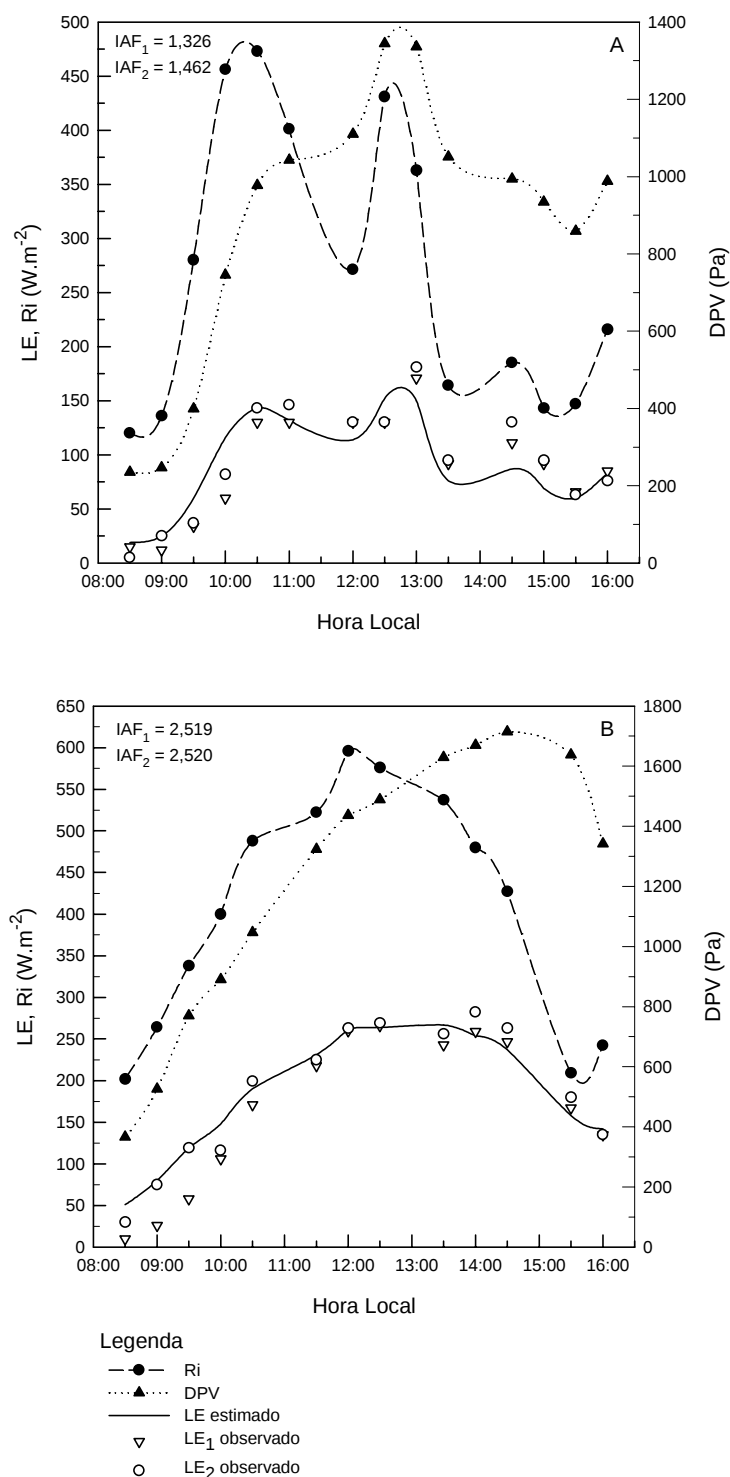


Figura 2.15 – Variação da radiação incidente (R_i), do déficit de pressão de vapor (DPV) e do fluxo de calor latente (LE) observado e estimado pelo modelo de Penman-Monteith no interior de uma casa-de-vegetação não-climatizada. As medições foram conduzidas no dia 03/06 (A) e 07/06/2001 (B), entre 08:00 e 16:00h, e os valores medidos de LE referem-se ao cultivar Great Lakes com IAF de 1,33 e 1,46 (A) e ambos de 2,52 (B).

Como citado anteriormente, o LE no início da manhã e no final da tarde foi superestimado, sendo essa menor no final da tarde, onde o DPV foi maior, aumentando dessa forma a demanda evaporativa da atmosfera, independente do cultivar e da fase. Para valores acima de 300 W m^{-2} de R_i e 1000 Pa de DPV, a curva se aproximou bastante dos valores medidos.

4. CONCLUSÕES

A média da resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão do vapor d'água foi de $88 (\pm 1)$, $103 (\pm 11)$ e $105 (\pm 14) \text{ s m}^{-1}$, com o índice de área foliar de $2,40 (\pm 0,02)$, $2,87 (\pm 0,06)$ e $3,91 (\pm 0,49)$ para os cultivares Grand Rapids, Great Lakes e Regina, respectivamente. Para o período de medições entre 8:00 e 16:00 h, não foi encontrada nenhuma relação entre os valores de r_c com os de radiação incidente e com os do déficit de pressão de vapor d'água.

A partir da utilização dos valores de r_c determinados previamente, realizou-se uma simulação da ET_c ao longo do ciclo da cultura para verificar diferenças de demanda de água com o aumento do índice de área foliar, para condições ambientais normalmente reinantes em casa-de-vegetação. Para condições ambientais idênticas, a ET_c no final do ciclo da cultura pode ser até 45 vezes superior ao valor correspondente ao período imediatamente após o transplântio das mudas.

A resistência aerodinâmica (r_h) ao processo convectivo de transferência de calor sensível foi estimada por meio de equações clássicas de transferência de calor e massa, sendo observado no presente experimento que o regime dominante foi à convecção forçada.

Verificou-se que o modelo de Penman-Monteith estimou de forma satisfatória a ET_c para valores de IAF superiores a 0,5. Apenas para o período inicial de crescimento após o transplântio (IAF menor que 0,3), os resultados não foram muito consistentes, sendo que o modelo superestimou ou subestimou a ET_c dependendo do cultivar. Os erros de estimativa da ET_c , inerentes à técnica utilizada no presente trabalho, são devidos à extrapolação da resistência da

cultura com base no valor do IAF. No entanto, os erros de estimativa foram de magnitude inferior a 20 W m^{-2} nesse período, o que corresponde a uma lâmina de evapotranspiração de apenas $0,030 \text{ mm h}^{-1}$. Verificou-se também que o modelo apresentou uma pequena tendência de subestimar os valores de ET no início da manhã e no final da tarde, provavelmente devido à utilização do valor médio diário da resistência da cultura, o qual não considera a variação diária do r_c , principalmente em função da radiação incidente.

Resultados do presente trabalho são importantes para melhorar a eficiência de aplicação da solução nutritiva, possibilitando a racionalização do uso da energia elétrica em sistemas hidropônicos, e também permite a implementação de sistemas automáticos de ajuste da concentração de nutrientes da solução nutritiva para produção da alface hidropônica com base na estimativa de evapotranspiração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBRIGHT, L.D. **Environment control for animals and plants**. St. Joseph, Michigan: The American Society of Agricultural Engineers, 1990, 453 p.
- ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**. Madison, v.81, p. 650-662, 1989.
- ALVES, I.; PERRIER, A.; PEREIRA L.S. Aerodynamic and surface resistance of complete cover crops: how good is the “big leaf”. **Transactions of the ASAE**. v. 41, n. 2, p. 345-351, 1998.
- ALVES, I.; PEREIRA, L.S. Modelling surface resistance from climates variables?. **Agricultural Water Management**. v. 42, p. 371-385, 2000.
- BAILLE, M.; BAILLE, A.; LAURY, J.C. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. **Scientia Horticulturae**, v.59, p. 217-232, 1994a.
- BAILLE, M.; BAILLE, A.; LAURY, J.C. Canopy surface resistances to water vapour transfer for nine greenhouse pot plant crops. **Scientia Horticulturae**, v.57, p. 143-155, 1994b.

- CHAPMAN, A. J. **Heat transfer**. 4. ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1984. 608 p.
- FACCIOLI, G.G. **Determinação da evapotranspiração de referência e da cultura da alface em condições de casa-de-vegetação, em Viçosa, MG**. Viçosa: UFV, 1998. 85 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- FAQUIN, V.; FURLANI, P.R. **Cultivo de hortaliças de folhas em hidroponia em ambiente protegido**. Informe Agropecuário, n. 20 v. 200/201, p. 99-104, 1999.
- FAVER, K.L.; O'TOOLE, J.C. Short-term estimation of sorghum evapotranspiration from canopy temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.48, p. 175-183, 1989.
- FRISINA, V.A.; ESCOBEDO, J.F. Albedômetro com termopilhas de filmes finos e aplicação na determinação do albedo da cultura da alface (*Lactuca sativa*, L.) em estufa de polietileno. **Revista Brasileira da Agrometeorologia**. v.6, n.1, p. 81-90, 1998.
- HAMER, P.J.C. Simulating the irrigation requirements of a greenhouse crop. **Acta Horticulturae**, v. 443, p. 147-154, 1997.
- HANAN, J.J. **Greenhouses** – Advanced technology for protected horticulture. New York: CRC Press LLC, NY, 1998. 684 p.
- HELLICKSON, M.A.; WALKER, J.N. **Ventilation of Agricultural Structures**. St. Joseph, Michigan: The American Society of Agricultural Engineers, 1983. 372 p.
- INCROPERA, F.P.; DE WITT, D.P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, NY, 1996. 886 p.
- JARVIS, P.G., The interpretation of the variations in leaf area water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. **Phil. Trans. R. Soc. Lon.** v. 273, p 595-610, 1976.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, p. 205-234, 1965.
- MONTEITH, J.L. Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. In: NACIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, 1985. **Proceedings**, St, Joseph: ASAE, 1985, p. 4-12.
- OKE, T.R. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. London: Routledge, 1992. 435 p.

- O'TOOLE, J.C.; REAL, J.G. Estimation of aerodynamic and crop resistance from canopy temperature. **Agronomy Journal**. Madison, v. 78, p. 305-310, 1986.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- PERES, J.G.; PEREIRA, A.R.; FOLEGATTI, M.V. Determinação da resistência do dossel da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) para utilização no modelo de Penman-Monteith. **Rev. Bras. Agrometeorologia**. Santa Maria, v.7, n.1, p. 1-4, 1999.
- ROSENBERG, N.J., BLAD, L.B.; SHASHI, B.V. **Microclimate: The biological environment**. 2 .ed. New York: John Wiley & Sons, 1983. 495 p.
- SMITH, R.C.G.; BARRS, H.D. Inferring stomatal resistance of sparse crops from infrared measurements of foliage temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 42, p. 183-198, 1988.
- STANGHELLINI, C.; VAN MEURS, W.T.M. Environmental control of greenhouse crop transpiration. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 51, p. 297-311, 1992.
- TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F.J.L. **Meteorologia descritiva**: Fundamentos e aplicações brasileiras, São Paulo: NOBEL, 1987. 374 p.
- ZHANG, L.; LEMEURE, R. Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 58, p. 209-228, 1992.
- ZOLNIER, S. **Dynamic misting control techniques for poinsettia propagation**. Lexington: UK, 1999. 343p. (Ph.D. Thesis Agricultural Engineering) - Biosystems and Agricultural Engineering Department, University of Kentucky, 1999.
- ZOLNIER, S.; GATES, R.S.; BUXTON, J.W.; MACH, C. Psychrometric and ventilation constraints for vapor pressure deficit control. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 26, p. 343-359, 2000.
- ZOLNIER, S.; GATES, R.S.; ANDERSON R.G.; NOKES, S.E.; DUNCAN, G.A. Non-water-stressed baseline as a tool for dynamic control of a misting system for propagation of poinsettias. **Transactions of the ASAE**, v. 44, n.1, p.137-147, 2001.
- ZOLNIER, S.; GATES, R.S.; GENEVE, R.L.; BUXTON, J.W. Surface diffusive resistances of rooted poinsettia cuttings under controlled-environment conditions. **Transactions of the ASAE**, v. 44, n.6, p. 1779-1787, 2001.

RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como principais objetivos: a) ajustar modelos de crescimento para simular a variação do índice de área foliar (IAF) depois do transplântio, possibilitando, posteriormente, a estimativa da evapotranspiração para intervalos de 30 min e b) determinar o valor da resistência da cultura (r_c) ao processo de difusão de vapor d'água para três cultivares de alface hidropônica (Grand Rapids, Regina e Great Lakes), em cultivo hidropônico, por meio da inversão do modelo de Penman-Monteith. O objetivo complementar foi avaliar as diferenças de crescimento entre os cultivares de alface, utilizando modelos e componentes de crescimento, tais como o modelo expolinear, logístico e Gompertz.

Para alcançar os objetivos propostos, dois experimentos independentes foram conduzidos na Área Experimental da Meteorologia Agrícola, pertencente ao DEA/UFV, no período de 18/05 a 09/06/2001 (1º experimento) de 24/06 a 26/07/2001 (2º experimento). As plantas foram cultivadas em sistema hidropônico com circulação laminar de nutrientes (NFT). O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado com três tratamentos (cultivares) e duas repetições (plantas dispostas nas bancadas de crescimento).

Os dados do ambiente físico dentro da casa-de-vegetação foram obtidos por meio de um sistema automático de aquisição de dados, tendo como plataforma um microcomputador. O sistema de aquisição de dados do ambiente de cultivo era constituído de sensores de radiação solar global, radiação fotossinteticamente ativa, velocidade do ar, temperatura e umidade do ar. Para determinação da

evapotranspiração da cultura, foi projetado e construído um sistema de medição específico para o cultivo hidropônico, permitindo a medição individual da evapotranspiração para cada bancada de crescimento.

Pela análise de crescimento, os cultivares não apresentaram diferenças estatísticas significativas com relação à matéria seca final (MS), porém o cultivar do tipo lisa (Regina) apresentou uma área foliar (AF) 54% maior que os cultivares do tipo crespa (Grand Rapids e Great Lakes), mostrando que esse cultivar necessitou de uma AF maior para a mesma produção de MS. Os modelos de crescimento (exponencial, logístico e Gompertz) foram capazes de simular de forma excelente o acúmulo de matéria seca depois do transplântio de todos os cultivares de alface em questão. Valores dos coeficientes de determinação ajustados estiveram acima de 98,47% para todos os modelos avaliados. O índice de área foliar se ajustou bem ao modelo proposto por GOUDRIAAN & MONTEITH (1990), tendo graus-dias (GD) como variável independente, com coeficientes de determinação acima de 99,55%.

A resistência da cultura foi determinada após o fechamento do dossel na bancada de cultivo, porém antes do período de formação de cabeça. Os valores de r_c encontrados foram 88 (± 1), 103 (± 11) e 105 (± 14) s m^{-1} , os quais estiveram associados aos IAFs de 2,40 ($\pm 0,02$), 2,87 ($\pm 0,06$) e 3,91 ($\pm 0,49$), respectivamente para os cultivares Grand Rapids, Great Lakes e Regina. Os valores de r_c , citados anteriormente, foram então usados na Equação de Penman-Monteith para estimativa da ET_c . A partir desses valores, verificou-se que o modelo de Penman-Monteith estimou de forma satisfatória a ET_c para valores de IAF superiores a 0,5. Apenas para o período inicial de crescimento após o transplântio, (IAF menores que 0,3), os resultados não foram muito consistentes, sendo que o modelo superestimou ou subestimou a ET_c dependendo do cultivar. Verificou-se também que o modelo apresentou uma pequena tendência de subestimar os valores de ET_c no início da manhã e final da tarde.