**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Aplicação de CO₂ via irrigação na pimenta Tabasco cultivada em
ambiente protegido**

Fabiana Luiza Matielo de Paula

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem**

**Piracicaba
2008**

Fabiana Luiza Matielo de Paula
Engenheiro Agrônomo

**Aplicação de CO₂ via irrigação na pimenta Tabasco cultivada em
ambiente protegido**

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem

Piracicaba
2008

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Paula, Fabiana Luiza Matielo

Aplicação de CO₂ via irrigação na pimenta Tabasco cultivada em ambiente protegido / Fabiana Luiza Matielo de Paula. - - Piracicaba, 2008.
133 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2008.
Bibliografia.

1. Ambiente protegido (Plantas) 2. Dióxido de carbono 3. Irrigação por gotejamento 4. Pimenta - Produção I. Título

CDD 633.84
P324a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

*Ao meu esposo Adalberto, minha filha Maria Eduarda,
aos meus pais Antônio e Maria Ignês e meus irmãos
Adriana, Elaine e Alex e aos meus sobrinhos queridos
pelo amor e incentivo recebidos*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e pela oportunidade de ter chegado até aqui. Agradeço a ele a recompensa alcançada;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela realização deste trabalho e pela estrutura para que o trabalho fosse concluído;

Ao Conselho de Pesquisa e Ensino Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento da pesquisa;

Ao Professor José Antônio Frizzzone, pela orientação, pela amizade, pelo apoio e pelos ensinamentos recebidos;

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural, pelo ensinamento, pela amizade e pelas sugestões.

Agradeço à EMATER – CE e ao Engenheiro Agrônomo Francisco Rogério de Abreu, pela disponibilidade das sementes da pimenta Tabasco, para que o experimento pudesse ser realizado;

Ao meu esposo, Adalberto, e à minha filha, Maria Eduarda, pelo amor, pelo carinho e principalmente pela compreensão durante as horas mais difíceis desta caminhada;

Aos meus pais, Antônio e Maria Ignês, pelo amor, pelo incentivo e pelo apoio durante o curso;

Aos meus irmãos , Adriana, Elaine, Alex , aos meus sobrinhos, Jéssica, Vitória e Wallacy, e aos meus cunhados, Cleber e Valmerson, pelo carinho e pelo amor;

Ao meu sogro, Irineu, e à minha sogra, Maria, e aos meus cunhados, Christiane e Flávio (*in memoriam*), pelo incentivo e pelo carinho durante o curso;

A todos os amigos do Departamento de Engenharia Rural, pelo companheirismo e pela amizade durante o doutorado; não citarei nomes para não correr o risco de esquecer alguém. Enfim, a todos os familiares e amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Podemos acreditar que tudo que a vida nos oferecerá no futuro é repetir o que fizemos ontem e hoje. Mas, se prestarmos atenção, vamos nos dar conta de que nenhum dia é igual a outro. Cada manhã traz uma benção escondida; uma benção que só serve para esse dia e que não se pode guardar nem desaproveitar.

Se não usamos este milagre hoje, ele vai se perder.

Este milagre está nos detalhes do cotidiano; é preciso viver cada minuto porque ali encontramos a saída de nossas confusões, a alegria de nossos bons momentos, a pista correta para a decisão que tomaremos.

Nunca podemos deixar que cada dia pareça igual ao anterior porque todos os dias são diferentes, porque estamos em constante processo de mudança”

Paulo Coelho

SUMÁRIO

RESUMO.....	13
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS.....	17
LISTA DE TABELAS.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 Aspectos gerais da cultura	25
2.2 Irrigação na cultura da pimenta	28
2.3 Cultivo em ambiente protegido	30
2.4 Dióxido de Carbono (CO ₂).....	33
2.5 Enriquecimento da atmosfera e da água de irrigação com CO ₂	35
3 MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 Localização e caracterização da área experimental.....	43
3.2 Estrutura experimental.....	43
3.3 Tratamentos e delineamento experimental.....	43
3.4 Monitoramento ambiental	45
3.5 Características do solo	46
3.6 Semeadura, transplântio e condução da cultura	47
3.7 Controle fitossanitário	48
3.8 Irrigação.....	49
3.8.1 Sistema de irrigação	49
3.8.2 Manejo da irrigação	49
3.8.3 Aplicação do dióxido de carbono (CO ₂).....	52
3.9 Fertirrigação	54
3.9.1 Sistema de fertirrigação.....	54
3.9.2 Manejo da fertirrigação	54
3.10 Parâmetros avaliados	54
3.10.1 Produção média de frutos.....	54
3.10.2 Número de frutos por planta	54
3.10.3 Peso médio de fruto.....	55
3.10.4 Comprimento e diâmetro médio de fruto	55

3.10.5	Porcentagem de massa de matéria seca nos frutos	55
3.10.6	Massa de matéria seca de frutos por planta	55
3.10.7	Concentração de capsaicina e dihidrocapsaicina no fruto	55
3.10.8	Rendimento de capsaicina e dihidrocapsaicina por planta	56
3.10.9	Altura da planta	56
3.10.10	Diâmetro do caule	56
3.10.11	Área foliar (AF)	56
3.10.12	Concentração de macro e micronutrientes nas folhas	57
3.10.13	Variação do pH do solo	58
3.10.14	Eficiência no uso da água	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
4.1	Características da cultura	61
4.2	Temperatura do ar e umidade relativa	63
4.3	Radiação líquida	65
4.4	Manejo da irrigação	67
4.5	Variação do pH do solo	71
4.6	Concentração de macro e micronutrientes nas folhas	75
4.7	Características morfológicas	81
4.7.1	Variáveis de crescimento	81
4.7.2	Diâmetro do caule	82
4.7.3	Altura das plantas	85
4.7.4	Área foliar	89
4.8	Aspectos produtivos	92
4.8.1	Produção de frutos	92
4.8.2	Número de frutos por planta	97
4.8.3	Massa verde média dos frutos	100
4.8.4	Massa seca do fruto	102
4.8.5	Massa seca de frutos por planta	104
4.8.6	Comprimento e diâmetro de frutos	108
4.8.7	Concentração de capsaicina e dihidrocapsaicina no fruto	111
4.8.8	Rendimento de capsaicina e de dihidrocapsaicina por planta	114

4.9 Eficiência do uso da água.....	115
5 CONCLUSÕES.....	117
REFERÊNCIAS	119
ANEXOS.....	131

RESUMO

Aplicação de CO₂ via irrigação na pimenta Tabasco cultivada em ambiente protegido

O presente trabalho teve como objetivo verificar os efeitos de diferentes doses de dióxido de carbono (CO₂), aplicadas via água de irrigação por gotejamento na produção da cultura da pimenta Tabasco (*Capsicum frutescens* L.). O experimento foi conduzido em duas estufas agrícolas de 122,5 m² equipadas com sistema de irrigação por gotejamento, fertirrigação e injeção de CO₂. As estufas foram instaladas na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ – USP, em Piracicaba. O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados com quatro tratamentos e oito repetições. Os tratamentos aplicados foram 4 doses de CO₂: antes da poda as doses foram de 0 (T1), 206,6 (T2); 309,9 (T3) e 413,2 (T4) kg ha⁻¹ e após a poda foram 0 (T1), 245,35 (T2); 368,03 (T3) e 490,72 (T4) kg ha⁻¹. O CO₂ foi aplicado via água de irrigação com frequência de quatro dias e a irrigação foi realizada com turno de rega de dois dias, sendo monitorada por tensiômetro digital. A lâmina total de água aplicada durante o ciclo (432 dias) foi de 1032,47 mm. As variáveis analisadas foram: estado nutricional das plantas, parâmetros de crescimento, aspectos produtivos, eficiência do uso da água, concentração de capsaicina e dihidrocapsaicina nos frutos e na planta. Os resultados permitiram as seguintes conclusões: (a) a aplicação de 207 kg CO₂ ha⁻¹ antes da poda proporcionou aumento de 21% na produção de frutos da pimenta. Durante os dois ciclos de cultivo, a aplicação de 452 kg CO₂ ha⁻¹ proporcionou aumento de 16% na produção, em relação ao tratamento sem CO₂; (b) o número de frutos produzidos por planta durante os dois ciclos aumentou segundo uma relação quadrática com o aumento da dose de CO₂ aplicada via água de irrigação, decrescendo a partir da dose de 409 kg CO₂ ha⁻¹. A resposta ao CO₂ foi maior no primeiro ciclo (antes da poda) atingindo um máximo de 696 frutos por planta com a aplicação de 220 kg CO₂ ha⁻¹; (c) a aplicação de CO₂ via água de irrigação não alterou a massa verde, massa seca, comprimento e diâmetro de frutos; (d) as concentrações de capsaicina e dihidrocapsaicina nos frutos reduziram com a aplicação de CO₂, mas o rendimento desses capsaicinóides por planta aumentou em decorrência do aumento do número de frutos e da produção com a aplicação de CO₂; (e) a eficiência do uso da água aumentou com o aumento da aplicação de CO₂, atingindo um máximo para a aplicação de 207 kg CO₂ ha⁻¹ no primeiro ciclo e de 452 kg CO₂ ha⁻¹ para os dois ciclos; (f) a aplicação de CO₂ não proporcionou efeito consistente para as variáveis de crescimento; (g) na última colheita (484 dias após o transplântio) a concentração de cálcio nas folhas reduziu linearmente com o aumento das doses de CO₂ aplicadas; (h) ao final do primeiro ciclo de colheita (187 dias após o transplântio) os teores de Zn, Fe e Mn na folhas apresentaram redução quadrática em função do aumento das doses de CO₂ e o teor de nitrogênio apresentou aumento quadrático.

Palavras-chave: Irrigação por gotejamento; Dióxido de carbono; Produção de pimenta

ABSTRACT

CO₂ application via drip irrigation in *Capsicum frutescens* cultivated in a protected environment

The objective of the present work was to verify the effect of different doses of carbon dioxide (CO₂) supplied via drip irrigation on the production of Tabasco pepper (*Capsicum frutescens* L.). The experiment was carried out in two 122.5 m² greenhouses equipped with drip irrigation, fertirrigation and CO₂ injection. The greenhouses were installed in the experimental area of the Department of Rural Engineering at ESALQ – USP in Piracicaba. The experimental design consisted of randomized blocks with four treatments and eight repetitions. The treatments comprised 4 doses of CO₂ before trimming as follow: 0 (T1), 206.6 (T2), 309.9 (T3) and 413.2 (T4) kg ha⁻¹; after the trimming the treatments applied were 0 (T1), 245.35 (T2); 368.03 (T3) and 490.72 (T4) kg ha⁻¹. CO₂ was supplied via drip irrigation with four days frequency and the irrigation was scheduled on a two-day basis and monitored by a digital tensiometer. During the cycle (432 days), the total water supplied was 1032.47 mm. The variables analysed were: nutritional condition of plants, growing parameters, productive aspects, efficiency of water use, capsaicin and dihydrocapsaicin concentration in the fruits and plant. The results allowed the following conclusions: (a) the application of 207 kg CO₂ ha⁻¹ before trimming promoted an increase of 21% in the yield of fruits. During the two cycle of cultivation, the application of 452 kg CO₂ ha⁻¹ increased the production by 16% in relation to the treatment without CO₂; (b) the number of fruits per plant during the two cycles increased in a quadratic relation with the increase of CO₂ dose supplied via drip irrigation, decreasing from the dose of 409 kg CO₂ ha⁻¹. The response to CO₂ was greater in the first cycle (before trimming), achieving the maximum of 696 fruits per plant with the application of 220 kg CO₂ ha⁻¹; (c) CO₂ injection via drip irrigation did not altered green matter, dry matter, length or diameter of fruits; (d) capsaicin and dihydrocapsaicin concentration in the fruits diminished with application of CO₂, but the yield of these capsaicins per plant increased as a result of the greater number of fruits and the production with the application of CO₂; (e) the efficiency of water usage increased with the increase of CO₂ application, achieving a maximum in the application of 207 kg CO₂ ha⁻¹ in the first cycle, and 452 kg CO₂ ha⁻¹ in both cycles; (f) CO₂ injection did not propitiated a consistent effect on the growing variables; (g) in the last harvest (484 days before transplantation), the concentration of calcium in the leaves was linearly reduced with the increase in the doses of CO₂; (h) at the end of the first cycle of harvest (187 days after transplantation), the tenor of Zn, Fe and Mn in the leaves presented quadratic reduction due to the increase in CO₂ doses while nitrogen tenor presented quadratic increase.

Keywords: Drip irrigation; Carbon dioxide; Pepper production

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Croqui da área experimental	45
Figura 2 - “Datalogger” modelo CR 10X (a), saldo radiômetro e (b) psicrômetro com termopares de bulbos seco e úmido (c).....	46
Figura 3 - Produção de mudas de pimenta Tabasco	47
Figura 4 - Transplântio das mudas para o ambiente protegido	48
Figura 5 - Disposição do sistema de irrigação, fertirrigação e injeção de CO ₂ , na estação de controle	49
Figura 6 - Curva de retenção da água no solo a 0,20 m (a) e a 0,40m (b) de profundidade	50
Figura 7 - Leitura dos tensiômetros com tensímetro digital	50
Figura 8 - Válvula reguladora de pressão e manômetro (a), sistema motobomba e entrada de CO ₂ (b) e fluxômetro com escala de 0,2 a 2,0 L min ⁻¹ (c)	53
Figura 9 - Medidas de comprimento e diâmetro dos frutos da pimenta Tabasco	55
Figura 10 - Relação entre a área foliar da pimenta Tabasco pelo LI-3100 e a área do retângulo resultante das medidas de comprimento e largura da folha.....	57
Figura 11 - Medidor de pH portátil, utilizado para a medição pontual.....	58
Figura 12 - Estádios de desenvolvimento da pimenta Tabasco durante o ciclo fenológico de 239 dias, antes da poda.....	62
Figura 13 - Estádios de desenvolvimento da pimenta Tabasco durante o ciclo fenológico de 244 dias, após a poda.....	62
Figura 14 - Variação da temperatura do ar máxima, mínima, média e umidade relativa média, durante o ciclo da pimenta Tabasco, em ambiente protegido (Estufa1)	64
Figura 15 - Variação da temperatura do ar máxima, mínima, média e umidade relativa, durante o ciclo da pimenta Tabasco, em ambiente protegido (Estufa 2)	64
Figura 16 - Radiação líquida durante o ciclo da pimenta Tabasco, em ambiente protegido	67
Figura 17 - Variação do potencial mátrico da água no solo a 0,20m (a) e a 0,40m (b) nas duas estufas de cultivo	69

Figura 18 - Lâminas de água aplicadas e acumuladas durante o ciclo da pimenta Tabasco, em ambiente protegido com aplicação de CO ₂	70
Figura 19 - Variação do pH do solo para os tratamentos T2 (a), T3 (b) e T4 (c) antes e depois da aplicação de CO ₂ na estufa 1.....	72
Figura 20 - Variação do pH do solo para os tratamentos T2 (a), T3 (b) e T4 (c) antes e depois da aplicação de CO ₂ na estufa 2.....	73
Figura 21 - Valores de pH do solo para o tratamento T1 na estufa 1 (a) e na estufa 2 (b)	74
Figura 22 - Concentração de nitrogênio (a), ferro (b), manganês (c) e zinco (d) nas folhas da pimenta Tabasco aos 187 DAT em função das doses de CO ₂ aplicadas via irrigação por gotejamento	78
Figura 23 - Concentração de Ca nas folhas da pimenta Tabasco aos 484 DAT em função das doses de CO ₂ aplicadas via irrigação por gotejamento	78
Figura 24 - Concentração de macronutrientes nas folhas da pimenta Tabasco para os tratamentos T1 (a), T2(b), T3(c) e T4(d) aos 187, 404 e 434 dias após o transplântio.....	79
Figura 25 - Concentração de micronutrientes nas folhas da pimenta Tabasco para os tratamentos T1 (a), T2(b), T3(c) e T4(d) aos 187, 404 e 434 dias após o transplântio.....	80
Figura 26 - Evolução do crescimento médio do diâmetro do caule (mm) da pimenta Tabasco em função da duração do ciclo.....	83
Figura 27 - Diâmetro do caule em função das doses de CO ₂ aos 54 (a) e 78 (b) DAT na cultura da pimenta Tabasco na estufa 2	84
Figura 28 - Evolução do crescimento médio da altura das plantas da pimenta Tabasco em função da duração do ciclo.....	86
Figura 29 - Altura das plantas em função das doses de CO ₂ na estufa 2 aos 27 (a), 54 (c), 103 DAT (e) e, na estufa 1, aos 54 (b), 61 (d) e 137 DAT (f) na cultura da pimenta Tabasco	88
Figura 30 - Área foliar (m ²) da pimenteira, obtida por funções sigmoidais ao longo do ciclo da cultura, nos diferentes tratamentos CO ₂	90
Figura 31 - Número médio de folhas da pimenteira para as doses de CO ₂	91

Figura 32 - Variação da produção média de frutos por planta em função das doses de CO ₂ , antes da poda, após a poda e o total produzido na cultura da pimenta Tabasco	93
Figura 33 - Produção média de frutos por planta em função das doses de CO ₂ , antes da poda (a) e a produção total (b) na cultura da pimenta Tabasco	94
Figura 34 - Resultado do teste de Tukey a 5% para produção por planta, nas duas estufas de cultivo	95
Figura 35 - Variação do número médio de frutos por planta em função das doses de CO ₂ antes da poda, após a poda e o total produzido na cultura da pimenta Tabasco	98
Figura 36 - Número de frutos por planta em função das doses de CO ₂ , antes da poda (a), após a poda (b) e total (c).....	99
Figura 37 - Variação do número de frutos por planta, nas duas estufas de cultivo, após a poda e para o total produzido	100
Figura 38 - Variação do peso médio verde de frutos por planta em função das doses de CO ₂ antes da poda, após a poda e o total produzido na cultura da pimenta Tabasco	102
Figura 39 - Variação da massa seca média de fruto por planta em função das doses de CO ₂ , antes da poda, após a poda e o total produzido na cultura da pimenta Tabasco	103
Figura 40 - Massa de frutos por planta em função das doses de CO ₂ , após a poda, na cultura da pimenta Tabasco	104
Figura 41 - Variação da produção média de frutos por planta em função das doses de CO ₂ antes da poda, após a poda e o total produzido na cultura da pimenta Tabasco	105
Figura 42 - Produção média de massa seca de frutos por planta em função das doses de CO ₂ antes da poda (a) e o total produzido (b) na cultura da pimenta Tabasco	106
Figura 43 - Produção de massa seca de frutos por planta nas duas estufas de cultivo	107

Figura 44 - Comprimento médio dos frutos em função das doses de CO ₂ , antes da poda (a), após a poda (b) e produção total (c)	109
Figura 45 - Diâmetro médio dos frutos em função das doses de CO ₂ , antes da poda (a), após a poda (b) e as duas juntas (c)	110
Figura 46 - Concentração de capsaicina por fruto em função das doses de CO ₂ , antes da poda	112
Figura 47 - Concentração de dihidrocapsaicina por fruto em função das doses de CO ₂ , antes da poda.....	112
Figura 48 - Rendimento de capsaicina por planta, em função das doses de CO ₂	115
Figura 49 - Valores médios de eficiência do uso da água em função das doses de CO ₂	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tratamentos empregados no experimento	44
Tabela 2 – Esquema para a análise de variância do experimento	44
Tabela 3 - Características físicas do solo utilizado no experimento	46
Tabela 4 - Análise química do solo para macronutrientes	46
Tabela 5 - Análise química do solo para micronutrientes: boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), mangans (Mn) e zinco (Zn)	47
Tabela 6 - Resultado do teste de uniformidade do sistema de irrigação	51
Tabela 7 - Valores dos parâmetros de ajuste do modelo de Van Genuchten (1980) relativos aos dados da curva de retenção de água do solo do experimento	52
Tabela 8 - Resultado da análise de regressão aplicadas a dados sem repetição (quadrados médios) referente à concentração de macro e micronutrientes nas folhas da pimenta Tabasco aos 187 dias após o transplantio	76
Tabela 9 - Resultado da análise de regressão aplicados a dados sem repetição (quadrados médios) referente à concentração de macro e micronutrientes nas folhas da pimenta Tabasco aos 404 dias após o transplantio	77
Tabela 10 - Resultado da análise de regressão aplicados a dados sem repetição (quadrados médios) referente à concentração de macro e micronutrientes nas folhas da pimenta Tabasco aos 434 dias após o transplantio	77
Tabela 11 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente ao diâmetro do caule (mm) da pimenta Tabasco	83
Tabela 12 - Resultado da comparação de médias do efeito estufa pelo teste de Tukey (5%) do diâmetro de caule da pimenta Tabasco (cm)	84
Tabela 13 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à altura das plantas da pimenta Tabasco (cm)	86
Tabela 14 - Resultado da comparação de médias pelo teste de Tukey (5%) da altura das plantas da pimenta Tabasco (cm)	87
Tabela 15 - Resultado do desdobramento da interação entre estufas e doses pelo teste de Tukey ajustado (5%) da altura das plantas da pimenta Tabasco (cm) aos 137 DAT	89

Tabela 16 - Resultados da análise de variância (quadrados médios) referente à área foliar de plantas da pimenta Tabasco (m ²)	90
Tabela 17 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à produção média por plantas da pimenta Tabasco	92
Tabela 18 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente ao número de frutos por plantas da pimenta Tabasco	97
Tabela 19 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à massa verde de frutos da pimenta Tabasco	101
Tabela 20 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente para massa seca do fruto da pimenta Tabasco.....	103
Tabela 21 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à produção de massa seca dos frutos por plantas da pimenta Tabasco.....	105
Tabela 22 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente ao comprimento de frutos da pimenta Tabasco	108
Tabela 23 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente ao diâmetro de frutos da pimenta Tabasco	108
Tabela 24 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à análise de capsaicina e de dihidrocapsaicina nos frutos da pimenta Tabasco.....	111
Tabela 25 - Resultado do desdobramento da interação entre estufas e doses de CO ₂ pelo teste de Tukey ajustado (5%) para o teor de capsaicina em frutos da pimenta Tabasco.....	113
Tabela 26 - Resultado do desdobramento da interação entre as estufas e as doses pelo teste de Tukey ajustado (5%) do teor de dihidrocapsaicina em frutos da pimenta Tabasco, antes da poda	114
Tabela 27 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à análise de capsaicina por planta da pimenta Tabasco	114

1 INTRODUÇÃO

A pimenta (*Capsicum frutescens* L.) cv. Tabasco McIlhenny é uma olerícola originária da Bacia amazônica, conhecida mundialmente pelo molho de pimenta que leva seu nome. A área anual cultivada no Brasil é de dois mil hectares, e os principais Estados produtores são Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Ceará e Rio Grande do Sul. A produtividade média depende do tipo de pimenta cultivada, variando de 10 a 30 t ha⁻¹ (EMBRAPA, 2007). No Ceará a pimenta Tabasco é exportada na forma de pasta, utilizada na fabricação do molho Tabasco (MOREIRA et al., 2006).

A demanda por alimentos de melhor qualidade requer o uso de tecnologias que minimizem os efeitos que limitam a produtividade. Dentre estas tecnologias tem-se o uso do dióxido de carbono (CO₂) aplicado via irrigação, com o objetivo de maximizar a produtividade, melhorar a qualidade de frutos e reduzir os custos de produção (FURLAN et al., 2002). Segundo Basile, Arienzo e Zena (1993) a concentração de CO₂ na rizosfera pode aumentar a concentração de íons bicarbonatos, diminuindo o pH da solução e disponibilizando alguns nutrientes. Essas variações da mobilidade dos nutrientes podem causar diferentes efeitos sobre a absorção. O dióxido de carbono (CO₂) aplicado via solo vem sendo utilizado desde o final do século passado no cultivo de espécies ornamentais.

Existem várias hipóteses para esclarecer os efeitos provocados pela aplicação de CO₂ sobre a produtividade. O CO₂ aplicado via irrigação sofre difusão do solo para a atmosfera, pode ser absorvido pelas raízes e melhora a absorção de nutrientes (MACHADO; TAKANE; FERRO, 1999). Mas essas hipóteses precisam ser esclarecidas, pois cada cultura responde diferentemente as condições impostas. A aplicação de CO₂ na água ou no ar baseia-se no fato de que alguns processos fisiológicos ou bioquímicos das plantas são beneficiados por este gás, causando respostas positivas na produtividade em várias culturas agrícolas (MACHADO; TAKANE; FERRO., 1999).

Storlie e Heckman (1996b) explicam que o uso de água carbonatada não tem sido recomendado comercialmente devido às poucas pesquisas realizadas a campo e ao desconhecimento de certos mecanismos de ação, que promovem resultados diversos, dependendo das condições ambientais durante o experimento. A utilização extensiva

desta técnica ainda é restrita pela falta de informação sobre o comportamento da planta nas condições de elevação da concentração do CO₂ na solução do solo.

No Brasil a aplicação de dióxido de carbono via irrigação é de uso recente, fazendo-se necessário esclarecer aspectos importantes de sua aplicação na produtividade e na qualidade dos frutos. A falta de informação sobre o efeito da aplicação de água carbonatada na cultura da pimenta tem limitado a utilização dessa técnica, sendo necessário realizarem-se estudos, para determinar as doses de CO₂ mais adequadas para otimizar seu cultivo em ambiente protegido. O objetivo deste trabalho foi verificar os efeitos de diferentes doses de dióxido de carbono (CO₂), aplicadas via irrigação por gotejamento, sobre a produção, o número de frutos por planta, a massa de matéria verde, a massa de matéria seca, o comprimento e diâmetro dos frutos na cultura da pimenta Tabasco (*Capsicum frutescens* L.).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais da cultura

A pimenta (*Capsicum frutescens* L.) cv. Tabasco McIlhenny é uma olerícola originária da bacia amazônica, conhecida mundialmente pelo molho de pimenta que leva seu nome. A disseminação da pimenta pelo mundo foi realizada pelos navegadores portugueses e pelos povos que eram transportados em suas embarcações. As rotas de navegação, no período de 1492 a 1600, permitiram que as espécies, picantes e doces, de pimentas viajassem o mundo. As pimentas foram, então, introduzidas na África, na Europa e, posteriormente, na Ásia. Os tailandeses e os coreanos-do-sul são os maiores consumidores de pimenta do mundo, ingerindo de 5 a 8 gramas por pessoa/dia (EMBRAPA, 2007).

As pimentas constituem importante segmento do setor de hortaliças, tanto para a agricultura, quanto para a indústria alimentícia. Do ponto de vista social, a pimenta tem grande importância devido à exigência de mão-de-obra, principalmente na colheita (MOREIRA et al., 2006).

A área anual cultivada no Brasil é de dois mil hectares, e os principais Estados produtores são Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Ceará e Rio Grande do Sul. A produtividade média depende do tipo da pimenta cultivada, variando de 10 a 30 Mg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2007). No Ceará, a pimenta Tabasco é exportada na forma de pasta, utilizada na fabricação do molho Tabasco (RUFINO; PENTEADO, 2006).

A cultura da pimenta Tabasco apresenta ciclo longo, variando de 6 a 8 meses, dependendo das condições climáticas do local. Essa cultura apresenta hábito de crescimento indeterminado (EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS - EPAMIG, 2006). A pimenta tipo Tabasco é pertencente à família solanaceae, ao gênero *Capsicum*. A espécie *Capsicum frutescens* é uma planta arbustiva, atingindo 120 cm de altura, com formação de ramificações laterais e possibilidade de tornar-se perene; normalmente é autopolinizada, mas pode ocorrer polinização cruzada. Possui flores brancas e em número de três por nó (ocasionalmente fasciculadas), com anteras azuis, roxas ou violetas e os frutos geralmente vermelhos (NUEZ; ORTEGA; GARCIA, 1996). Produzem frutos com sabor picante, devido à presença de alcalóides, ou mais

especificamente, de dois capsaicinóides: a capsaicina e a dihidrocapsaicina, responsáveis por 99% do conteúdo de capsaicinóides, sendo a capsaicina responsável por 66% e a dihidrocapsaicina por 33% do total; os demais capsaicinóides são responsáveis por 1% do restante (SUKRASMO; YEOMAN, 1993). Essas substâncias apresentam várias propriedades benéficas à saúde humana. São conhecidos pelo menos três desses efeitos farmacológicos: antiinflamatório, antioxidante e liberador de endorfina, causando sensação de bem-estar e atuando na elevação do humor (ISLA, 2008)

Essas substâncias são encontradas exclusivamente na placenta e nas sementes e, em menor quantidade, no pericarpo e são liberadas quando os frutos sofrem qualquer dano físico, conferindo-lhes a pungência (ARAÚJO, 2005). A capsaicina é utilizada em remédios para artrites (pomadas à base de capsaicina), dores musculares, dor de dente, má digestão, dor de cabeça e gastrite. A capsaicina, responsável pela pungência das pimentas, é a única substância que, usada externamente no corpo, gera endorfinas internamente que promovem uma sensação de bem-estar, acionando o potencial imunológico (EMBRAPA, 2007).

O acúmulo de capsaicinóides nos frutos de *Capsicum frutescens* varia com a idade e o tamanho dos frutos, seu estágio de desenvolvimento e a quantidade de carotenóide. Os capsaicinóides estão sendo utilizados na composição de medicamentos para aliviar dores (SUKRASMO; YEOMAN, 1993). O conteúdo de capsaicina na placenta é de, mais ou menos, 25% da massa seca e de 0,6% nos frutos e 0,7% nas sementes (CASAS; RIQUELME, 2003). Sukrasmo e Yeoman (1993), avaliando a concentração de capsaicinóide aos 35 dias do ciclo, observaram que 8%, 76% e 16% se encontravam na semente, na placenta e no pericarpo de frutos de pimenta, respectivamente. As pimentas são mais nutritivas que os pimentões e as do tipo vermelho geralmente possuem maior valor nutricional que as verdes.

As pimentas são fontes de antioxidantes, especialmente as vitaminas A e C; contêm bioflavonóides, pigmentos vegetais que parecem prevenir contra o câncer. Além disso, uma pesquisa recente indica que a capsaicina pode atuar como anticoagulante, prevenindo a formação de coágulos que podem causar ataques cardíacos ou derrames cerebrais, e também beneficia a perda de peso (UNIMED, 2008).

A pimenta Tabasco distingue-se da Malagueta pela coloração dos frutos durante a maturação, passando de verde para amarela ou alaranjada e somente depois para vermelha; produz frutos picantes, com 2,5 a 5 cm de comprimento e 0,5 cm de largura. As pimentas são plantas de crescimento indeterminado e de floração contínua. (MOREIRA et al., 2006).

As temperaturas médias mensais, ideais para o cultivo, situam-se entre 21°C e 30°C, sendo a média ideal das mínimas 18°C e das máximas em torno de 35°C. A germinação é favorecida por temperaturas do solo entre 25°C e 30°C, sendo 30°C a temperatura em que ocorre o menor intervalo de dias entre a semeadura e a germinação. Quando as temperaturas do solo forem iguais ou inferiores a 10°C, pode inibir-se a germinação. Para as mudas, o melhor crescimento é alcançado com temperaturas entre 26°C e 30°C, sendo a temperatura de 27°C considerada como a ideal para favorecer o desenvolvimento das plantas (EMBRAPA, 2007). O solo mais recomendado é o que apresenta textura leve com pH entre 5,5 e 6,0, com boa drenagem (FRAIFE, 2006).

A pimenta é uma cultura de clima tropical, sensível a baixas temperaturas e intolerante às geadas, devendo ser cultivadas nos meses com temperaturas altas. A temperatura afeta a qualidade dos frutos, especialmente os teores de açúcar e de vitamina C, e a intensidade da cor, sendo maiores em temperaturas elevadas. Em condições de baixas temperaturas, a pungência dos frutos pode ser alterada (PINTO et al., 2006). A pimenta apresenta um alto valor nutricional, sendo fontes de vitaminas, ferro, caroteno, tiamina, niacina, riboflavina e fibras (FRAIFE, 2006).

Para as pimentas, quanto maior a luminosidade e a temperatura e menor a umidade, maior será a expressão da pungência (CURRY et al., 1999). As pimentas apresentam características importantes, sendo uma delas a pungência. Além desta, existem outras características muito importantes, como a produtividade, o número de frutos por planta, o peso médio dos frutos, a largura e o comprimento dos frutos e a espessura da polpa. A pungência é uma característica importante atribuída às pimentas vermelhas. As pimentas Tabasco possuem características importantes, devido ao melhoramento, conferindo-lhes aumento de sabor, de aroma e de cor. Embora possua baixo valor nutritivo, destaca-se pelo teor vitamínico (SILVA; SOUZA, 2006).

As pimentas do gênero *Capsicum* destacam-se como importante produto do agronegócio brasileiro. O volume de exportação brasileira atingiu 8.479 toneladas, no valor de US\$ 17.344 mil, em 2004. Comparando-se com o ano de 2000, as exportações aumentaram, em volume, 22,1% e, em valor, de 43,0%. Devido à elevada capacidade de geração de emprego e de renda, principalmente para pequenos produtores, a pimenta é considerada uma cultura com elevada importância socioeconômica (EMBRAPA, 2007).

No sistema de produção da pimenta Tabasco, o item que mais eleva o custo de produção são os insumos (66,11%), principalmente os adubos químicos (33,4%) e as sementes (20%), em geral importadas, mas também produzidas pelos próprios agricultores. As pimentas são produtos que agregam valor, na forma processada, e detêm amplas oportunidades de mercado, tanto na forma *in natura* como processada. Além do mercado interno, parte da produção brasileira de pimentas é exportada sob diferentes formas, como páprica, pasta, desidratada, flocos (calabresa) e conservas ornamentais (EMBRAPA, 2007). A páprica é utilizada, principalmente, como corante natural na indústria de alimentos (MOREIRA et al., 2006). Atualmente, o valor da pimenta ardida varia de 4,50 a 6,00 reais por kg (CEASA, 2008).

2.2 Irrigação na cultura da pimenta

Em regiões onde as chuvas são regulares e abundantes, o cultivo da pimenta pode ser realizado sem o uso da irrigação. No caso de regiões com precipitação mal distribuída ou deficiente, o uso da irrigação é decisivo para a obtenção de altos rendimentos em cultivos comerciais. A deficiência de água em alguns estádios de desenvolvimento pode causar perdas em produtividade, devido à ocorrência de quedas de flores e de abortamentos de frutos. A pimenta tem sua fase crítica de deficiência de água durante os estádios de floração e de frutificação, reduzindo-se a produtividade e a qualidade dos frutos. As plantas de pimenta submetidas ao déficit hídrico moderado produzem frutos mais pungentes, com maior teor de sólidos solúveis e de matéria seca (ESTRADA et al., 1999). E em condições de umidade elevada, no caso de irrigações excessivas, pode prejudicar a aeração do solo, devido à drenagem deficiente,

favorecendo a ocorrência de doenças de solo, como as causadas por *Phytophthora spp.* e *Rhizoctonia solani* (MAROUELLI; SILVA; SILVA, 1996).

O modo como a água é fornecida para a planta constitui um dos fatores que também pode favorecer a ocorrência de doenças. Por isso, a escolha do sistema de irrigação adequado a cada cultura é de extrema importância para uma boa rentabilidade do cultivo. Por isso, o suprimento adequado de água às plantas, no momento e na quantidade adequados, é imprescindível para o sucesso do cultivo. Muitos agricultores utilizam a irrigação de forma inadequada, obtendo, dessa forma, baixa eficiência no uso da água e a ocorrência de doenças, em decorrência do excesso de água, ocasionado pela utilização inadequada do sistema de irrigação (EMBRAPA, 2007).

No Brasil, o principal sistema de irrigação utilizado na pimenteira é a aspersão, seguido por sulcos e uma pequena quantidade por gotejamento. A seleção do sistema a utilizar deve ser coerente com o custo inicial, o tipo de solo, a topografia, as condições climáticas, o rendimento da cultura, a quantidade e a qualidade da água disponível. O sistema de gotejamento vem sendo usado no Ceará na cultura da pimenta, por apresentar a vantagem da aplicação localizada da água na zona radicular, evitando, dessa forma, a ocorrência de doenças da parte aérea e as perdas por evaporação (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

A utilização da fertirrigação faz com que o gotejamento seja atrativo para a cultura da pimenta. Nutrientes, como nitrogênio e potássio, podem ser parcelados e aplicados via irrigação, de modo a atender às necessidades da cultura, minimizando as perdas de nutrientes e proporcionando melhor produtividade (MAROUELLI; SILVA, 2006). Mas esse sistema apresenta desvantagens, como o risco de entupimento dos emissores, a distribuição superficial do sistema radicular e o alto custo de implantação e de manutenção. Com o objetivo de diminuir o custo, esse sistema é indicado para pimentas cultivadas com espaçamento entre linhas de 1,00 m e com um alto retorno econômico, como exemplo o cultivo da pimenta Malagueta. Apesar das desvantagens, a irrigação por gotejamento apresenta vantagens, como maior eficiência no uso da água, maior produtividade, maior eficiência na adubação, controle fitossanitário, não interferência em outras práticas culturais, adaptação a diferentes tipos de solo e de

topografia, utilização de água salina, ou em solos salinos e economia de mão-de-obra (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

2.3 Cultivo em ambiente protegido

A descoberta do polietileno ocorreu no final da década de 30 e sua introdução na agricultura, na década de 50, com a produção de algumas hortaliças em diversas regiões do mundo (LAMONT JUNIOR, 1996). No Brasil, essa tecnologia teve início na década de 70, no cinturão verde de São Paulo (KUMAGAIA, 1989). O polietileno de baixa densidade (PEBD) é um material que apresenta boa transparência à radiação solar, deixando passar, em média, 70 a 80% e, no máximo, 95% da radiação solar (BURIOL; STRECK; PETRY 1993).

No Brasil, a utilização de ambiente protegido ocorre, principalmente, na produção de plantas ornamentais e de hortícolas tem aumentado, devido às vantagens relacionada à maior proteção das plantas contra fenômenos climáticos (temperatura baixas, geadas, excesso de chuva), à proteção do solo contra a lixiviação e a redução dos custos com fertilizantes e defensivos. O ciclo da cultura nesse tipo de cultivo é mais curto e a produtividade é maior e com frutos de melhor qualidade, quando comparado ao cultivo a céu aberto (OLIVEIRA, 1995; SGANZERLA, 1995)

O sistema de ambiente protegido tem, basicamente, três processos de produção: cultivo no solo, cultivo em substrato e cultivo hidropônico. O cultivo em ambiente protegido, utilizando o próprio solo como substrato, é a forma mais empregada na produção de hortaliças, principalmente nos países em desenvolvimento (SILVA; MAROUELLI, 1998). Dentre as hortaliças mais cultivadas em ambiente protegido no Brasil, destacam-se o pimentão, a alface, o tomate e o pepino (VECCHIA; KOCH, 1999).

No ambiente protegido, deve manejar-se adequadamente a irrigação, já que é a única forma de suprimento da água consumida pelas culturas. Para tanto, é preciso utilizarem-se equipamentos adequados para o manejo da água, de modo a obter o máximo rendimento da cultura, levando em conta o método adequado de irrigação a utilizar, o volume e a frequência da irrigação, a retenção de água do solo e a qualidade

da água, para que esses fatores associados sejam ideais para o cultivo empregado no interior da estufa (CARRIJO; MAROUELLI; SILVA 1999).

No cultivo sob ambiente protegido, observa-se que a evapotranspiração é menor, quando comparado ao cultivo a céu aberto, devido ao efeito opaco dos plásticos, reduzindo o efeito da radiação solar direta e, velocidade do vento, considerados os principais fatores da demanda evaporativa da atmosfera. Em geral a evapotranspiração no interior do ambiente protegido fica em torno de 60% da verificada no exterior (FARIAS et al., 1993) e o uso da água por unidade de produção pode diminuir em até 50% em relação ao ambiente externo (STANGHELLINI, 1993).

O maior efeito da cobertura plástica recai sobre a temperatura máxima, com valores de 1,2°C a 4,4°C acima dos observados externamente (SCATOLINI, 1996), tendendo as temperaturas mínimas a ser iguais ou ligeiramente superiores às observadas externamente. No cultivo protegido, a temperatura é, afetada principalmente pelo manejo da ventilação durante o dia e pelo fechamento e pela abertura das cortinas laterais desse ambiente (BURIOL; STRECK; PETRY 1993)

Nas condições de ambiente protegido, com a cultura do pimentão, Cunha et al. (2001) observaram que, para um saldo de radiação de 1431,07 MJ m⁻², o rendimento foi 84,10 Mg ha⁻¹, enquanto, em ambiente a céu aberto, se obteve, para um saldo de radiação de 1879,83 MJ m⁻², um rendimento de 63,94 Mg ha⁻¹, concluindo-se, então que o ambiente protegido foi mais eficiente na conversão da energia utilizada (MJ por kg produzido). Apesar de o cultivo protegido receber menor radiação solar global, é mais eficiente na conversão da radiação líquida disponível em massa seca total e na produtividade da cultura do pimentão, em relação ao cultivo em campo.

A maior variação na medida da radiação solar no interior de uma estufa pode ser devida ao efeito do sombreamento ocasionado pela estrutura da estufa sobre o sensor do radiômetro, influenciando nas medidas da radiação solar difusa. Stanhill, (1966) verificaram que a intensidade da radiação solar difusa, no interior de uma estufa em função da sua estrutura de cobertura, pode variar de 14% a 36%. Esse ambiente altera o balanço de energia no seu interior, apresentando valores de transmissividade da radiação solar global entre 60 e 80% (PRADOS, 1989).

O cultivo desse tipo tem crescido intensivamente, devido à melhor qualidade dos frutos. No Brasil, nas regiões Sudeste e Sul, essa expansão tem ocorrido principalmente, no cultivo de hortaliças, com a finalidade de se obterem produtos de melhor qualidade e com maior produtividade (ANDRIOLO, 1999). A produção média de pimentão em estufa, na região da Almeria, na Espanha, varia de 30 a 40 Mg ha⁻¹, enquanto, a céu aberto, varia de 14 a 20 Mg ha⁻¹ para cultivo associado (ROBLEDO; MARTIN, 1981). Serrano Cermenõ (1990) obteve produtividade de pimentão de 80 a 150 Mg ha⁻¹ em cultivo protegido e de 40 a 60 Mg ha⁻¹ a céu aberto.

Na cultura do pepino de conserva, o rendimento em campo no Brasil é de 1,6 kg m⁻² e para o tipo salada de 2,0 a 8,0 kg m⁻² (EPAGRI, 1993); já no cultivo em ambiente protegido, a produtividade pode variar de 15 a 30 kg m⁻² (SERRANO CERMEÑO, 1979; ROBLEDO e MARTIN, 1981). O cultivo do tomate em ambiente protegido tem, como objetivo, produzir nos períodos das entressafras, obtendo-se produtividades superiores a 100 Mg ha⁻¹ em um ciclo de aproximadamente de 150 dias (ANDRIOLO et al., 1997). No cultivo de tomate em ambiente protegido, é utilizado substrato inerte e solução nutritiva completa fornecida de forma a suprir a demanda hídrica da cultura (LE BOT; ADAMOWICZ; BOBIN, 1998).

Radin et al. (2004) comparando o cultivo da alface cultivar “Regina” produzida em ambiente protegido e em campo, observaram que o número final de folhas foi maior no cultivo em ambiente protegido, pois, no interior da estufa, a temperatura foi superior à do campo, durante a condução do experimento, podendo ter interferido no acúmulo de graus dias (GD) para a emissão de uma nova folha, sendo o valor para essa emissão de 45,1 GD (HERMES et al., 2001).

O ambiente protegido é responsável pelas modificações nos elementos meteorológicos, tornando viável a produção dos vegetais em épocas e locais com condições climáticas críticas. Trabalhos relatam que as modificações microclimáticas ocasionadas pelo uso de ambiente protegido tiveram efeito positivo na produção agrícola (FARIAS et al., 1993; HELDWEIN et al., 1995; SCATOLINI, 1996).

Os ambientes protegidos são bastante utilizados para elevar a concentração de CO₂, tomando o ar como alvo, no caso de enriquecimento da atmosfera. Essa prática é utilizada em muitos países para aumentar o rendimento de hortaliças, nas horas da fase

clara do dia, em que as estufas são mantidas fechadas (ANDRIOLO, 1999). No caso de o CO_2 ser aplicado via irrigação, as pesquisas são realizadas em ambiente protegido e a céu aberto. Segundo Andriolo (1999), o gás aplicado via irrigação junto com a água sofreria difusão do solo para a atmosfera, passando pelo interior da cobertura vegetal e seria capturado pelas reações da fotossíntese, o que poderia explicar os aumentos de 30% nas produtividades de melão e pimentão, obtidos por Pinto et al. (2001) e Furlan et al. (2001), respectivamente. Daí, utilização de ambiente protegido seria uma alternativa eficaz na aplicação de CO_2 via irrigação, devido aos benefícios citados, advindo do uso desse tipo de cultivo, principalmente para hortaliças. Sobre a cultura da pimenta Tabasco, não há informações de produção em ambiente protegido.

2.4 Dióxido de Carbono (CO_2)

A matéria seca dos vegetais é constituída de aproximadamente 45% de carbono, sendo a principal fonte o CO_2 atmosférico, cuja concentração na atmosfera é de aproximadamente $340\mu\text{ L.L}^{-1}$ (ANDRIOLO, 1999). Essa concentração é considerada baixa para o pleno funcionamento do processo fotossintético dos vegetais. A principal razão é a competição entre CO_2 e O_2 atmosférico para serem fixados pela enzima rubisco. O CO_2 e o O_2 competem pela reação com a rubisco, pois a carboxilação e a oxigenação ocorrem dentro do mesmo sítio ativo da enzima e essa competição faz que a eficiência da fotossíntese se reduz (TAIZ; ZEIGER, 2004). O balanço entre a carboxilação e a oxigenação é determinado pelas propriedades cinéticas da rubisco, pelas concentrações dos substratos CO_2 e O_2 e pela temperatura (TAIZ; ZEIGER, 2004).

O dióxido de carbono (CO_2) é um composto químico constituído por dois átomos de oxigênio e um átomo de carbono, e foi descoberto pelo escocês Joseph Black em 1754 (BASSALO, 2008). O CO_2 é considerado um gás incolor e inodoro. Sua solubilidade em água é de 1,45 g por litro de água, com uma densidade de $1,98\text{ kg m}^{-3}$. A solubilidade do dióxido de carbono decresce com o aumento da temperatura (SHAKHASHIRI, 2008).

A concentração normal de O_2 na atmosfera é 21%, inibindo a absorção de CO_2 pelas plantas e aumentando a dependência da fotorrespiração. Com o aumento do CO_2 , essa inibição do O_2 da fotossíntese é quase eliminada pela razão CO_2/O_2 (MORISON; GIFFORD, 1984). O incremento depende da temperatura: quanto menor a temperatura, menor o efeito.

A fixação e a redução de CO_2 ocorrem lentamente em baixas temperaturas, aumentando rapidamente com o aquecimento, até um valor ótimo. Em temperaturas supra-ótimas, a relação CO_2/O_2 é modificada a favor do oxigênio e, sendo assim, o trabalho de carboxilação da rubisco carboxilase/oxigenase diminui. Em temperaturas elevadas, ocorre uma total desorganização entre as muitas reações do metabolismo do carbono e o transporte de material. Essa desorganização e o retardamento dos processos fotoquímicos ligados às membranas acarretam um rápido declínio da fotossíntese. A temperatura ótima para a fotossíntese líquida em plantas C_3 sob condições naturais, situa-se abaixo da temperatura ótima para a fotossíntese potencial sob saturação de CO_2 (LARCHER, 2000).

O carbono aumenta a atividade metabólica da planta, aumentando assim sua absorção total de CO_2 , o vigor, a floração, a frutificação, obtendo-se maior produtividade com melhor qualidade (PINTO; BOTREL; MACHADO, 2000)

As plantas absorvem CO_2 atmosférico durante o processo de fotossíntese e transformam-no em carboidratos. O CO_2 utilizado pelas plantas atinge os cloroplastos sob a forma de dióxido de carbono dissolvido, ácido carbônico ou um sal desse ácido. Quando ocorre excesso de CO_2 , as plantas aumentam a fotossíntese e, com isso, produzem mais carboidratos do que são capazes de utilizar (MEYER; ANDERSON; BOHNING, 1965). Na presença de quantidades adequadas de luz, concentrações mais altas de CO_2 sustentam taxas fotossintéticas maiores; o inverso também é verdadeiro, ou seja, as concentrações mais baixas de CO_2 podem limitar a taxa fotossintética (TAIZ; ZEIGER, 2004)

A concentração de CO_2 em que se iniciam os efeitos retardantes da fotossíntese varia com a espécie de planta, o estado de desenvolvimento do tecido em que se realiza a fotossíntese, a duração do período de exposição ao dióxido de carbono e outras condições ambientais (MEYER; ANDERSON; BOHNING, 1965). A concentração

ótima de CO_2 para o crescimento da maioria das espécies varia de 600 a 900 $\text{mmol CO}_2/\text{mol de ar}$, observando-se injúrias acima de 1000 $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ ar}$ (MORTENSEN, 1987).

As plantas estão expostas a uma quantidade de dióxido de carbono 30% maior do que a que havia na era pré-industrial. Um resultado dessa mudança comprovado por vários experimentos nos últimos 15 anos, é que o CO_2 promove o crescimento das plantas, ou seja, se o teor de gás carbono dobra, as colheitas aumentam 40% (LAWTON, 2005). A concentração atual de CO_2 da atmosfera está aumentando mais ou menos 1ppm por ano, principalmente por causa da queima de combustíveis fósseis, podendo, em 2020, alcançar 600ppm (TAIZ; ZEIGER, 2004).

2.5 Enriquecimento da atmosfera e da água de irrigação com CO_2

O enriquecimento do ar com CO_2 exige um manejo integrado da cultura, principalmente quanto ao fornecimento de água e de nutrientes. Com o aumento da concentração de CO_2 , reduz-se a transpiração e aumenta a fotossíntese, devido à diminuição da condutância estomática; já em consequência do aumento de CO_2 na câmara subestomática, ocorre, por sua vez, um aumento na absorção de nitrogênio, para satisfazer a demanda extra desse elemento, a qual se deve ao crescimento mais rápido, provocado pelo estímulo da fotossíntese (ANDRIOLO, 1999).

O enriquecimento do ar com CO_2 é uma prática amplamente utilizada em muitos países para aumentar o rendimento das hortaliças nas horas em que as estufas são mantidas fechadas, pois, com as laterais abertas, essa prática é inviável, porque o CO_2 injetado se perde na atmosfera (ANDRIOLO, 1999). Segundo Mortensen (1987), a concentração ótima de CO_2 para o crescimento da maioria das espécies varia entre 600 e 900 $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ de ar e causa injúrias acima de 1.000 $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ de ar.

A técnica de aplicação de CO_2 é praticada por agricultores europeus. Inicialmente, eles costumavam queimar querosene e propano nas estufas, para aumentar a concentração de dióxido de carbono, mas as impurezas produzidas no processo contaminavam as plantas. Atualmente, o CO_2 é ainda obtido por combustão, mas é purificado e engarrafado por indústrias. Além disso, foram desenvolvidos

equipamentos e técnicas adequadas para sua aplicação em diversas condições climáticas e de plantio. Na Europa, o CO₂ é aplicado dentro de estufas e, nos países tropicais, onde esse tipo de cultivo é menos utilizado, o CO₂ é dissolvido na água e levado às plantas por irrigação (KIMBALL, 1983).

O enriquecimento da atmosfera com dióxido de carbono faz que certas plantas sejam capazes de absorver, com mais eficiência, nutrientes escassos (NORBY, O'NEIL; LUXMOORE, 1986). Como a absorção desses nutrientes requer dispêndio de energia, o aumento de carboidratos disponíveis, proporcionados pela elevada concentração de dióxido de carbono, melhora o processo de absorção de nutrientes (RUFTY; MACKOWN; VOLK, 1989).

A aplicação de CO₂ via atmosfera no Brasil seria pouco viável, pois as estufas devem ser mantidas bem vedadas e, na agricultura brasileira, essa situação não acontece, funcionando as estufas como efeito guarda-chuva; o mais viável seria o enriquecimento com CO₂ via água de irrigação (ANDRIOLO, 2002; CAÑIZARES et al., 2005).

Outro efeito é a reação do CO₂, aplicado via irrigação, com os cátions da solução do solo, produzindo bicarbonatos, absorvidos pelas plantas. O CO₂ provoca redução do pH do solo, aumenta a disponibilidade de fósforo e cálcio na solução do solo e favorece a absorção de zinco e manganês (PINTO et al., 2000). Segundo Basile, Arienzo e Zena (1993), a concentração de CO₂ na rizosfera pode aumentar a concentração de íons bicarbonatos, diminuindo o pH da solução e disponibilizando alguns nutrientes. Essas variações da mobilidade dos nutrientes podem causar diferentes efeitos na absorção. Segundo Malavolta (1979), a variação da acidez do solo, até níveis adequados para a vida das plantas, pode aumentar ou diminuir a disponibilidade para as plantas de macro e de micronutrientes no solo.

A irrigação com água carbonatada aumenta a concentração de CO₂ no solo e no ar. Isso pode aumentar o crescimento da raiz, porque se reduz a inibição do etileno, e pode estimular a atividade de alguns microorganismos benéficos (BAKER, 1988).

Segundo Machado, Takane e Ferro (1999), não existe um padrão de resposta das plantas, em relação à absorção, à distribuição e ao acúmulo de nutrientes, quando irrigadas com água enriquecida com CO₂. A resposta da planta está relacionada ao tipo

de solo, ao substrato de cultivo, às doses de CO₂, à espécie, à temperatura e à acidez do solo.

Arteca, Poovaiah e Smith (1979) observaram incremento nos teores de cálcio e de magnésio, na cultura da batata submetida a alta concentração de CO₂ nas raízes. Arteca e Poovaiah (1982), aplicando CO₂ nas raízes de plantas de batata, observaram que o gás aplicado foi transportado para as folhas e fixado, na forma de ácido málico e de outros ácidos orgânicos.

Em experimento com plantas de pimentão submetidas a doses de 1,2 g L⁻¹ de CO₂, Storlie e Heckman (1996a), aplicando quatro doses de CO₂ com concentração de 0; 0,396; 0,804 e 1,2 g L⁻¹ na água da irrigação na cultura do pimentão, não verificaram aumento na produção e na qualidade dos frutos. Cararo (2000), trabalhando com a aplicação da dose de CO₂ de 7,73 g L⁻¹ na cultura do tomate, obteve um acréscimo nos teores de zinco e não observou efeito significativo na altura das plantas. Na cultura do algodão, Mauney e Hendrix (1988) aplicaram concentrações de CO₂ na água de irrigação entre 1,5 e 1,8 g L⁻¹ e observaram maior absorção de zinco. Stoffella, Pelosi e Hamner (1995), trabalhando com a dose de 1,36 mg L⁻¹ de CO₂, via água de irrigação, não obtiveram incrementos na concentração de macronutrientes nas folhas de citros.

Em experimento com tomate submetido a diferentes lâminas de irrigação com CO₂, Cararo e Duarte (2002) observaram que a condutividade elétrica, com a aplicação de água carbonatada, foi ligeiramente superior ao tratamento sem a aplicação do gás. Devido ao aumento da condutividade elétrica, a produtividade, o peso dos frutos e o conteúdo de massa seca tiveram incrementos médios com CO₂ de 8,2 %, devido à melhor absorção de nutrientes, independente das lâminas de irrigação aplicadas.

O tomate cultivado em ambiente enriquecido com CO₂ apresentou um aumento no peso dos frutos, devido ao aumento da fotossíntese, que proporcionou um maior acúmulo de carboidratos, com uma maior produção, devido ao aumento de tamanho dos frutos, e não ao número de frutos (ISLAM; MATSUI; YOSHIDA, 1996). Tognoni, Halevy e Wittwer (1967) observaram que a elevação da concentração de CO₂ no solo estimulou o sistema radicular do tomateiro, fez diminuir o pH do solo e incrementou a absorção de nutrientes.

D'Andria et al. (1990), aplicando CO₂ via irrigação por gotejamento e utilizando muching na cultura do tomate, obtiveram redução do pH do solo de 6,4 para 4,5, incrementando-se o rendimento, primeiramente em função do efeito significativo do CO₂ sobre o tamanho do fruto, e, depois, sobre o número de frutos. Hartz e Holt (1991) estudaram o efeito das doses de CO₂ (0; 0,5 e 1,0 g L⁻¹) na água de irrigação na cultura de tomate e do pepino e não observaram aumentos na produção, em função das doses de CO₂ e da diminuição do pH do solo de 7,3 para 5,3. Novero et al (1991), aplicando água carbonatada na cultura do tomate, observaram o aumento de 15,9% na produção, por causa da utilização de água carbonatada; o aumento no número e no tamanho dos frutos e o aumento no rendimento de massa seca. Observaram redução do pH solo, por um período de até cinco dias após a irrigação, com incremento na absorção dos nutrientes P, K, Ca, Mg, Zn, Fe, Mn, Cu e B.

Modolo et al. (2005) observaram que, com a aplicação de CO₂ na cultura da alface, a relação custo/benefício foi maior do que nas alfaces que não receberam a aplicação, havendo ganhos na produtividade. Segundo Furlan et al. (2001), o CO₂ promoveu um aumento da fotossíntese na alface, em ambiente protegido, com um rendimento máximo da cultura no ambiente com CO₂ de 59,5 Mg ha⁻¹ enquanto, em ambiente sem CO₂, de 46,2 Mg ha⁻¹, apresentando diferença de 28,8%. Enoch, Rylshi e Samish. (1970) também observaram acréscimo da ordem de 43% em matéria fresca na alface cultivada em túneis de plástico, sob o enriquecimento de CO₂. Tamagi et al. (2007), aplicando doses de CO₂ de 490,2, 1.470,6 e 2.941,2 kg ha⁻¹ de CO₂ via irrigação por gotejamento na cultura da alface cultivar "Vera", obtiveram aumentos na produtividade, respectivamente, de 26,52%, 14,47% e 10,78%, em comparação ao tratamento sem a aplicação de CO₂. Gomes et al. (2005), trabalhando com aplicações de 0; 52; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂ na cultura da alface, observaram que a dose de 153 kg ha⁻¹ de CO₂ foi a mais adequada empregar, na cultura da alface, via água de irrigação.

Furlan et al. (2001) analisaram os efeitos promovidos pela aplicação de CO₂ via água de irrigação na cultura da alface e registraram um aumento de 27% na área foliar e na matéria seca e 28,8% na produtividade de cabeça. Guri; Marfã; Save (1999), aplicando CO₂ via água de irrigação na cultura do pimentão, e verificaram o aumento na

área foliar das plantas, que resultou no aumento do número de frutos e num acréscimo de 10% da produtividade.

Rezende et al. (2002), estudando a cultura do pimentão o com enriquecimento do ambiente com CO₂, observaram que a área foliar foi menor e o crescimento vegetativo na fase inicial foi mais uniforme, com a redução no consumo de água, para as maiores produtividades encontradas. Isso pode ser devido a reduzir-se a transpiração das plantas, em ambiente enriquecido com CO₂, e, como consequência, a produzir-se maior eficiência no uso da água.

Pinto et al. (2001), trabalhando com oito tratamentos, observaram que o CO₂ aplicado, via água de irrigação, na cultura do melão influenciou positivamente a produtividade, o número de frutos e o peso médio dos frutos comerciais do meloeiro, comparativamente aos tratamentos sem a aplicação de CO₂, para os tratamentos com proteção lateral e solo coberto com plástico. A proteção lateral consistiu de plástico transparente, colocado perpendicular à superfície do solo, cercando cada parcela em toda a sua volta, e solo coberto com plástico preto, cobrindo uma faixa de solo de aproximadamente 1,2 m de largura.

No experimento com a aplicação de CO₂, via irrigação, na cultura da batata com diferentes doses (0; 205,2; 279,4; 353,5 e 425,7 kg ha⁻¹), Robles (2003) obteve o aumento nos teores de açúcar na cultivar *Jatte-Bintje* e de amido na cultivar *Atlantic*, não percebendo decréscimo temporário do pH durante a aplicação de CO₂.

Araújo (2002), aplicando quatro doses de CO₂ via irrigação, na cultura da abobrinha a céu aberto, com cobertura plástica sobre o solo, concluiu que, em temperaturas mais baixas, ocorreu uma redução da área foliar, da massa seca da parte aérea e das raízes, com maior número de frutos e maior rendimento, com a dose de 58,4 kg CO₂ ha⁻¹. Já, em temperatura do ar mais elevada, sem a cobertura plástica, o maior rendimento foi obtido na dose de 100 kg ha⁻¹ de CO₂. A aplicação de água carbonatada na cultura da abobrinha proporcionou uma maior extração de nutrientes do solo.

Cañizares et al. (2005), trabalhando com doses de CO₂ via irrigação em plantas de pepino enxertadas, observaram que não houve padrão de resposta consistente da enxertia sobre os teores de N, P, Mg e Zn, mas as plantas enxertadas apresentaram

maior teor de K e menor teor de Mg, S e Ca na sua parte aérea, ao final do ciclo da cultura; o fato, pode estar relacionado aos sintomas de deficiências nutricionais observados em plantas de pepino enxertadas. Ibrahim (1992), aplicando doses de CO₂ de 0, 50, 150 e 200ppm de CO₂ na cultura do pepino, verificou efeito linear entre a dose e a produção, com melhor qualidade de frutos e maior acúmulo de P, Zn Mn e Fe na planta.

D'Albuquerque Junior (2003), avaliando uma única dose de CO₂ aplicada na irrigação por gotejamento subsuperficial, em diferentes fases fenológicas da cultura do melão, observou que os tratamentos na frutificação e no florescimento proporcionaram um aumento de 18% e 17%, em relação ao tratamento sem CO₂, sendo o menor incremento, de 8,8%, o do T2 (aplicação de CO₂ do início do florescimento até o início da maturação) em relação ao T4 (controle, sem CO₂). Além disso, não observou efeito significativo na altura de planta entre as épocas de aplicação.

Kano (2002), aplicando a concentração de 301,8 kg ha⁻¹ de CO₂ via irrigação por gotejamento em uma estufa e, em outra estufa, mantida ao nível atmosférico de CO₂ (condições naturais), na cultura do melão, observou que a água carbonatada reduziu a extração acumulada de potássio e de magnésio e aumentou a extração de zinco, na parte aérea. Obteve incremento de 11% na produção total e de 23% no número de frutos comerciais.

Pinto et al. (1999), aplicando CO₂ via água de irrigação na cultura do melão, obtiveram maior produtividade (28,68 Mg ha⁻¹) e maior taxa de fotossíntese líquida, porém sem afetar as características químicas (teor de sólidos solúveis, acidez total e pH) dos frutos na colheita. Frizzone, Cardoso e Rezende (2005), estudando a cultura do melão com a aplicação de quatro doses de CO₂ via irrigação por gotejamento, observaram uma relação quadrática entre as doses de CO₂ aplicadas e o número de frutos comerciais, produtividade total e comercial, com aumento na eficiência do uso da água pela cultura. Cardoso (2002), aplicando quatro doses de CO₂ via irrigação na cultura do melão, observou um acréscimo de 11,1% na produtividade total para as plantas que receberam doses de CO₂ em relação ao tratamento sem CO₂. Frizzone, Albuquerque Junior e Rezende (2005) aplicando CO₂ via irrigação na cultura do melão,

não observaram efeito significativo sobre o peso médio dos frutos, ocorrendo, todavia, aumento na produtividade e melhor eficiência no uso da água.

Nakayama e Bucks (1986), aplicando água carbonatada via sistema de irrigação por gotejamento enterrado, observaram incremento de 20% na produção de trigo e decréscimo de 1,5 unidade no pH do solo.

Baron e Gorski (1986) variaram o $^{14}\text{CO}_2$ da atmosfera da raiz da cultura da berinjela, na concentração de 0,03%, 1%, 5%, 10% e 15% em 20% de oxigênio. Na concentração de 0,03%, obtiveram incremento na área foliar, na matéria seca e no diâmetro de caule; já quando utilizaram 15% de CO_2 em dias curtos e baixos níveis de luz, obtiveram redução no peso seco e na área foliar.

Andriolo (2002) relata que, do ponto de vista fisiológico, as explicações sobre o efeito do CO_2 aplicado na água da irrigação são escassas e pouco consistentes. As principais hipóteses são as seguintes: difusão do CO_2 do solo para o ar, absorção pelas raízes, aumento da absorção de nutrientes minerais pela modificação do pH do solo. As respostas à aplicação da água carbonatada variam em função da espécie estudada e das condições ambientais da região onde o experimento foi desenvolvido.

Storlie e Heckman (1996b) relatam que o uso de água carbonatada não tem sido recomendado comercialmente, devido às poucas pesquisas realizadas em campo e ao desconhecimento de certos mecanismos de ação, que promovem resultados diversos, dependendo das condições ambientais durante o experimento.

No Brasil, a aplicação de dióxido de carbono via irrigação é de uso recente, sendo necessário esclarecer aspectos importantes da aplicação de CO_2 na produtividade e na qualidade dos frutos. Foram realizados alguns trabalhos com as culturas da alface, da abobrinha, do melão, do pimentão, do tomate, da batata e do pepino com enriquecimento de CO_2 via irrigação, nos quais foram observadas diferentes respostas (MACHADO, TAKANE; FERRO. 1999; PINTO et al., 1999; FRIZZONE, ALBUQUERQUE JUNIOR; REZENDE, 2005; FRIZZONE; CARDOSO; REZENDE, 2005; GOMES, 2001, ARAÚJO, 2002, CARARO; DUARTE, 2002, CARDOSO, 2002; FURLAN et al., 2002, KANO, 2002; REZENDE et al., 2003; ROBLES et al., 2003; D'ALBUQUERQUE JUNIOR, 2003; CAÑIZARES et al., 2005). Quanto à pimenteira,

ainda não existem relatos sobre a resposta da cultura à aplicação de CO₂ via água de irrigação.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em ambiente protegido instalado na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ESALQ – USP, localizada no município de Piracicaba, São Paulo, a 22° 42’ 30” de latitude S, 47° 38’ 00” de longitude W e 580 m de altitude.

Pela classificação climática de Köppen, o clima da região é mesotérmico, tipo Cwa, subtropical úmido, com verões chuvosos e inverno seco. A temperatura média mensal varia de 24,8°C (verão) a 17,1°C (inverno), com média anual de 21,4°C. A umidade relativa média é 74%; a pluviosidade média anual, 1.278 mm e a velocidade do vento, 2,2 m s⁻¹.

3.2 Estrutura experimental

O experimento foi conduzido em duas estufas agrícolas, tipo arco, com orientação no sentido leste-oeste, com 3,0 m de pé direito, 7,0 m de largura, 17,5 m de comprimento e 4,7m de altura. As fachadas laterais e frontais foram feitas com malha de nylon preta de 1,0 mm e com rodapé de concreto de 0,3m de altura. A estufa foi coberta com polietileno transparente com 150 μ de espessura, com tratamento antiUV e com abertura sob cada arco das fachadas frontais para liberar o ar quente.

3.3 Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foram blocos casualizados, com quatro tratamentos e oito repetições, cujo esquema experimental se apresenta na Figura 1. Os tratamentos foram constituídos de quatro doses de CO₂ (Tabela 1). Em cada estufa, foram dispostos quatro blocos, com seis linhas de plantas de 3,2 m de comprimento, totalizando 30 plantas por bloco. A parcela útil foi constituída de 12 plantas.

Tabela 1 - Tratamentos empregados no experimento

Tratamentos	Doses de CO ₂ (kg ha ⁻¹)		
	Antes da poda (188 dias)	Após a poda (244 dias)	Total aplicado (432 dias)
T1	0,0	0,0	0,0
T2	206,6	245,35	451,95
T3	309,9	368,03	677,93
T4	413,2	490,72	903,92

O esquema para a análise de variância do experimento está apresentado na Tabela 2. Para a análise estatística, utilizou-se o programa SAS (SAS, 1999), realizando-se regressão para os tratamentos quantitativos (efeito de doses de CO₂) e teste de Tukey, a 5% de probabilidade, para o tratamento qualitativo (efeito-estufa), realizando-se a análise de variância para testar a interação entre as doses de CO₂ e o ambiente protegido (estufa agrícola).

Tabela 2 – Esquema para a análise de variância do experimento

Causas de variação	Graus de liberdade
Estufa	1
Tratamento (doses CO ₂)	3
Estufa x tratamento	3
Blocos	3
Resíduo	21
Total	31

Figura 1 - Croqui da área experimental

3.4 Monitoramento ambiental

Em uma das estufas, instalou-se um “datalogger”, tipo CR 10X, para a obtenção dos dados meteorológicos. O sinal emitido pelos sensores, a cada 5 segundos, foi armazenado a cada 30 minutos. Os sensores instalados foram dois psicrômetros com termopares de bulbo úmido e seco (temperatura e umidade relativa), sendo um por

estufa e um saldo radiômetro (radiação líquida). No centro da estufa, instalaram-se o “datalogger” e os sensores (Figura 2)

Figura 2 - “Datalogger” modelo CR 10X (a), saldo radiômetro e (b) psicrômetro com termopares de bulbos seco e úmido (c)

3.5 Características do solo

Foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-0,40 m antes da instalação do experimento, para obter as características físicas e químicas do solo (Tabelas 3, 4 e 5). O solo foi previamente classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Álico. As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas e as análises físicas, no Laboratório de Água e Solo do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ-USP.

Tabela 3 - Características físicas do solo utilizado no experimento

Granulometria (%)			Classe textural	Massa específica (g cm ⁻³)	
Argila	Silte	Areia		Solo	Partículas
15,23	8,67	76,10	Franco-arenoso	1,08	2,66

Tabela 4 - Análise química do solo para macronutrientes

Amostra	pH	M.O CaCl g. dm ⁻³	P mg dm ⁻³	S mg dm ⁻³	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺	H+Al ⁺	SB	T	V
					mmol _c dm ⁻³							(%)
Estufa 1	5,0	10	10	25	1,9	25	15	0	22	41,2	63,2	65
Estufa 2	5,9	17	20	35	2,9	53	25	0	16	80,9	96,9	83

Tabela 5 - Análise química do solo para micronutrientes: boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn)

Amostra	Micronutrientes (mg dm ⁻³)				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Estufa 1	0,28	1,5	26	14,8	1,4
Estufa 2	0,28	2,0	18	19,0	2,1

Com base na análise química e na recomendação de adubação pelo Boletim Técnico 100 (RAIJ van et al., 1997), 30 dias antes do transplântio, incorporou-se NPK nas doses de 40, 600 e 180 kg ha⁻¹ sob a forma de uréia, superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente. Os micronutrientes como: enxofre (72 kg ha⁻¹) e boro (1 kg ha⁻¹) foram incorporados na concentração contida na formulação do superfosfato simples e na forma de bórax, respectivamente.

3.6 Semeadura, transplântio e condução da cultura

As mudas de pimenta Tabasco, foram produzidas em bandejas de poliestireno expandido, com 128 células, utilizando substrato organomineral “Plantimax hortaliças”; foram colocadas três sementes por célula, e após a germinação, foi feito o desbaste (Figura 3). A semeadura foi realizada no dia 08/08/06, e o transplântio, aos 50 dias após a semeadura (DAS), quando apresentavam 6 folhas definitivas (Figura 4).

Figura 3 - Produção de mudas de pimenta Tabasco

Figura 4 - Transplântio das mudas para o ambiente protegido

As mudas de pimenta, foram transplantadas para as estufas com 6 folhas definitivas, ou aproximadamente 10cm de altura (Figura 4). O espaçamento utilizado foi de 0,80 m entre as plantas por 1,10 entre linhas, com uma densidade de plantas de 11.363 plantas ha⁻¹.

Foram realizadas duas podas apicais, a primeira 11 dias após o transplântio (10/10/06), com o objetivo de induzir a planta a emitir brotações laterais. A segunda, 16 dias após a primeira (26/10/06), tendo como finalidade aumentar o número de galhos e deixar a planta com arquitetura na forma de taça, visando a aumentar o número de frutos por planta. A poda foi realizada com tesouras e, entre uma planta e outra, a tesoura era desinfetada com oxicleto de cobre a 0,5%.

Após a poda, as plantas foram pulverizadas com oxicleto de cobre (Cuprogarb 350), com a finalidade de proteger os ferimentos e de acelerar a cicatrização. As podas são exigências básicas para a boa formação das pimenteiras, que possuem poucas ramificações naturais.

3.7 Controle fitossanitário

O controle fitossanitário foi realizado a cada quinze dias, seguindo as recomendações técnicas (EMBRAPA, 2007), por meio de aplicações preventivas. Quando ocorriam sintomas de doenças e de pragas, realizou-se o controle por meio de pulverizações curativas.

3.8 Irrigação

3.8.1 Sistema de irrigação

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento, composto de fitas gotejadoras IRRILOC, com diâmetro de 16,4 mm e vazão de $1,1 \text{ L h}^{-1}$, com gotejadores espaçados em 0,40m, sendo a água fornecida a partir de um reservatório de 2000 L. O sistema de bombeamento foi composto por bomba centrífuga (KSB, Hidrobloc C1000N), com potência de 0,736 kW, vazão de 0,5 a $11 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e pressão manométrica de 23 a 31 mca. O sistema foi composto de filtros, manômetros, hidrômetros e registros (Figura 5). Foram instalados reguladores de pressão de 105 kPa no início de cada uma das oito linhas de derivação.

Figura 5 - Disposição do sistema de irrigação, fertilirrigação e injeção de CO_2 , na estação de controle

3.8.2 Manejo da irrigação

As irrigações foram realizadas com turno de rega fixo de dois dias. A quantidade de água a aplicar foi determinada com base na curva de retenção da água no solo

(Figura 6) e nas leituras do potencial mátrico (ψ_m), obtidas em tensiômetros com vacuômetro digital (Figura 7). Em cada estufa, foram instalados quatro tensiômetros, na profundidade de 0,20 m e 0,40 m.

Figura 6 - Curva de retenção da água no solo a 0,20 m (a) e a 0,40m (b) de profundidade

Figura 7 - Leitura dos tensiômetros com tensímetro digital

Como limite superior de água disponível no solo, foi considerada a quantidade de água correspondente ao potencial mátrico de -10kPa; já como limite inferior, a quantidade de água equivalente ao potencial mátrico atual do solo, medido antes de cada irrigação. Antes da instalação do sistema de irrigação, determinou-se a uniformidade de distribuição de água do sistema de irrigação (UD) em cada estufa, utilizando-se as linhas úteis de gotejadores e quatro emissores por linha: o primeiro, o último e os situados a 1/3 e a 2/3 do comprimento da linha. Os resultados do teste de UD dos emissores são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultado do teste de uniformidade do sistema de irrigação

Estufa	Q_{25}^* (L h ⁻¹)	Q_m^{**} (L h ⁻¹)	$UD(\%) = \frac{Q_{25}}{Q_m} \times 100$
1	1,14	1,23	92,11
2	1,19	1,23	96,76
Média	1,16	1,23	94,43

* Vazão média das observações do menor quartil; ** Vazão média de todas as observações

A lâmina de irrigação foi obtida pela equação (1):

$$h = 10(\theta_{cc} - \theta_{cr})Z \quad (1)$$

sendo:

h - lâmina de irrigação (mm);

θ_{cc} - umidade do solo no ψ_m de -10kPa (cm³ cm⁻³);

θ_{cr} - umidade do solo no momento da irrigação (cm³ cm⁻³);

Z - profundidade da camada de irrigação (cm).

A lâmina de irrigação calculada foi transformada em volume (L), considerando-se a área total da estufa (122,5 m²); já o tempo de irrigação foi obtido através da equação (2):

$$Ti = 60 \times 10^{-3} \frac{h A}{Q} \quad (2)$$

sendo:

Ti - tempo de irrigação (min);

h - lâmina de irrigação (mm);

A - área total da estufa (122,5 m²);

Q - Vazão de água por estufa (m³ h⁻¹).

Pela curva de retenção da água no solo, determinou-se a umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}) e a umidade de saturação (θ_s) (Tabela 7). A relação entre os valores de tensão e a umidade volumétrica foi ajustada pelo modelo matemático proposto por Van Genuchten (1980), descrito pela equação 3.

$$\theta[\psi_m] = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + [\alpha|\psi_m|]^n\right]^m} \quad (3)$$

sendo:

$\theta[\phi_m]$ - umidade volumétrica estimada no solo;

θ_r - umidade residual; θ_s é a umidade de saturação;

ψ - tensão da água no solo (kPa.) e

α , n e m - parâmetros utilizados para o ajuste do modelo, obtendo-se m pela equação (4) (MUALEM, 1976):

$$m = 1 - \left(\frac{1}{n}\right) \quad (4)$$

Para o ajuste do modelo matemático, utilizou-se o programa computacional RETC (VAN GENUCHTEN et al., 1991), pelo qual foram obtidos os parâmetros θ_r , θ_s , α e n (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores dos parâmetros de ajuste do modelo de Van Genuchten (1980) relativos aos dados da curva de retenção de água do solo do experimento

Parâmetros	Profundidade (m)	
	0,20	0,40
θ_r (cm ³ cm ⁻³)	0,07	0,08
θ_s (cm ³ cm ⁻³)	0,43	0,40
α	0,08	0,06
m	0,32	0,30
n	1,48	1,43
r^2	0,94	0,96

OBS: θ_r , θ_s , α , n e m ($m = 1 - 1/n$) são parâmetros independentes

3.8.3 Aplicação do dióxido de carbono (CO₂)

O sistema de aplicação de CO₂ foi composto de um cilindro de 11 kg, equipado com uma válvula reguladora de pressão, um manômetro e um fluxômetro com escala de 0,2 a 2,0 L min⁻¹ para quantificar, com a frequência de quatro dias, o volume de CO₂

injetado via água de irrigação (Figura 8). As doses de CO₂ aplicadas foram quantificadas, a cada aplicação, por uma balança com precisão de 10g, pesando-se o cilindro durante a aplicação. A utilização da balança deveu-se ao fato de o fluxômetro não possibilitar rigoroso controle da dose de CO₂ injetada no sistema.

O tempo médio por aplicação de CO₂ foram quatro, oito e doze minutos, para os tratamentos T2, T3 e T4, respectivamente. Após esses tempos, aplicou-se apenas água para totalizar 30 minutos de irrigação. Adotou-se esse procedimento, para que o CO₂ fosse eliminado do sistema entre as aplicações sucessivas, uma vez que foram iniciadas pela menor dose (T2), para minimizar a interferência entre um tratamento e outro. Após a aplicação do CO₂, foi irrigado o tratamento sem CO₂ (T1), com a mesma quantidade de água.

As aplicações foram realizadas no período compreendido entre 8:00 e 11:00, e a primeira aplicação foi realizada aos 26 dias após o transplante (26/10/06), para que as plantas se estabelecessem e tivessem boa formação de raiz.

Figura 8 - Válvula reguladora de pressão e manômetro (a), sistema motobomba e entrada de CO₂ (b) e fluxômetro com escala de 0,2 a 2,0 L min⁻¹(c)

As doses de CO₂, utilizadas neste trabalho foram definidas com base em trabalhos prévios, desenvolvidos por Pinto et al. (2001), Frizzzone, Cardoso e Rezende (2005) e Frizzzone, D'Albuquerque Junior e Rezende (2005), D'Albuquerque Junior et al. (2007), em cultura de melão.

As doses de CO₂ correspondentes aos tratamentos (Tabela 1) foram parceladas em 32 aplicações antes da poda e 38 aplicações após a poda, resultando nas seguintes doses constantes a cada aplicação antes e depois da poda: 6,46, 9,68 e 12,91 kg ha⁻¹.

3.9 Fertirrigação

3.9.1 Sistema de fertirrigação

O sistema de fertirrigação operou independentemente do sistema de irrigação e de aplicação de CO₂, sendo o reservatório da calda independente do reservatório de irrigação (Figura 6). A calda foi preparada em baldes (20 litros), separadamente a cada fertirrigação, tendo sido adicionada em um reservatório de 200 litros, para posterior aplicação.

3.9.2 Manejo da fertirrigação

A fertirrigação foi realizada de acordo com a análise química do solo. A solução foi preparada no momento de cada fertirrigação, utilizando-se nitrato de potássio (KNO₃) e nitrato de cálcio (Ca (NO₃)₂), na concentração de 17 kg ha⁻¹ (RAIJ van et al., 1997) para ambos. Foram realizadas 12 aplicações, com frequência de 15 dias.

3.10 Parâmetros avaliados

3.10.1 Produção média de frutos

A massa total de frutos correspondeu ao somatório de todas as colheitas realizadas durante o ciclo da pimenta Tabasco.

3.10.2 Número de frutos por planta

Em cada colheita, foi contado o número de frutos por planta de cada tratamento da parcela, obtendo-se o número médio de frutos por parcela.

3.10.3 Peso médio de fruto

Obteve-se a partir da divisão da produção total pelo número de frutos da parcela.

3.10.4 Comprimento e diâmetro médio de fruto

Para estimar o comprimento e o diâmetro basal do fruto, foi utilizado um paquímetro digital e as medidas, expressas em milímetros (Figura 9). As medidas foram realizadas em 20 frutos, coletados aleatoriamente por parcela, em todas as colheitas.

Figura 9 - Medidas de comprimento e diâmetro dos frutos da pimenta Tabasco

3.10.5 Porcentagem de massa de matéria seca nos frutos

Foi obtida uma amostra de massa conhecida em cada parcela. Essas amostras foram levadas à estufa, a uma temperatura de 65°C, até atingirem peso constante.

3.10.6 Massa de matéria seca de frutos por planta

Foi obtida a partir da multiplicação dos valores da produção total de frutos de cada planta pela porcentagem de matéria seca nos frutos.

3.10.7 Concentração de capsaicina e dihidrocapsaicina no fruto

Foram determinadas em pimentas vermelhas, coletadas em três datas de colheita, nos dias 02/03/07; 12/03/07 e 28/03/07, que correspondem às 4^a, 6^a e 7^a colheitas. De cada colheita, foram utilizadas quatro amostras correspondentes aos

tratamentos (T1, T2, T3 e T4), totalizando 12 amostras. Para cada amostra, foram analisadas duas repetições de capsaicina e dihidrocapsaicina, totalizando 24 valores.

As análises de capsaicina e dihidrocapsaicina foram realizadas por Cromatografia Líquida com detecção por ultravioleta. Essas análises foram realizadas na Universidade de São Paulo, no Instituto de Química de São Carlos, no Laboratório de Cromatografia (CROMA).

3.10.8 Rendimento de capsaicina e dihidrocapsaicina por planta

Foi realizada a transformação dos valores, obtidos no teor de capsaicina e dihidrocapsaicina no fruto, para miligramas de capsaicina e dihidrocapsaicina por planta, pela multiplicação do valor anteriormente encontrado de matéria seca nos frutos, produzido por planta.

3.10.9 Altura da planta

A altura da planta, em intervalos de 15 dias, foi medida com o auxílio de uma trena, a partir do nível do solo até o ápice da planta, sendo avaliadas duas plantas na parcela.

3.10.10 Diâmetro do caule

Foi medido o diâmetro do caule próximo ao colo da planta na parcela, com o auxílio de um paquímetro digital, no intervalo de 15 dias. Essa análise foi realizada em duas plantas por parcela.

3.10.11 Área foliar (AF)

A área foliar foi avaliada pelo comprimento (C) e pela largura (L) da folha com o auxílio de uma régua. Utilizaram-se, para essa determinação, 4 plantas por estufa, uma de cada tratamento, totalizando 8 plantas, aleatoriamente. O produto do comprimento pela largura foi multiplicado por um fator de correção ($f = 0,5656$), obtido por regressão

linear (Figura 10) entre a área de um retângulo (comprimento x largura da folha) e a área foliar determinada por um medidor eletrônico LI-3100. Para a obtenção desse fator foram utilizadas 10 folhas destacadas das plantas da bordadura. A avaliação da área foliar foi realizada uma vez por mês, durante o ciclo da cultura.

Figura 10 - Relação entre a área foliar da pimenta Tabasco pelo LI-3100 e a área do retângulo resultante das medidas de comprimento e largura da folha

Devido à dificuldade de obter medidas de comprimento e de largura de todas as folhas de uma planta, optou-se por dividir a copa da planta em quatro partes iguais e, após a obtenção da área foliar de uma das partes, esse valor foi multiplicado por quatro, estimando-se, dessa forma, a área foliar total da planta.

3.10.12 Concentração de macro e micronutrientes nas folhas

Na última colheita, antes da poda (187 dias após o transplântio) e após a poda, no início da frutificação (404 dias após o transplântio) e outra no final do ciclo, correspondente à última colheita (484 dias após o transplante), determinou-se a

concentração de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) em folhas novas. As análises foram realizadas no Laboratório de Ecologia Aplicada da ESALQ-USP.

3.10.13 Variação do pH do solo

A avaliação do pH do solo foi realizada antes e depois da aplicação de CO₂ para quantificar o aumento da acidez no solo. Utilizou-se um aparelho de leitura direta (Figura 11), Soil Tester modelo DM-S, marca Demetra Tokyo, Japan, introduzido no solo a 0,10 m para a obtenção dos valores de pH nos tratamentos. Foram realizadas 32 avaliações antes da poda e 38 após a poda, sendo realizadas, em todas as aplicações de CO₂, leituras de pH. As medidas foram pontuais, devido a mudanças temporárias do pH do solo. Avaliou-se também o pH na solução do solo, utilizando-se amostras coletadas em extratores de solução, mas, como essas medidas de pH eram realizadas 24 horas após o vácuo, para se ter uma quantidade ideal de solução do solo para a análise, as amostras já se encontravam com os valores iniciais de pH do solo.

Figura 11 - Medidor de pH portátil, utilizado para a medição pontual

3.10.14 Eficiência no uso da água

A eficiência no uso da água, em função da produtividade, foi determinada pela equação (5) (DOORENBOS; KASSAN, 1994):

$$EUA = \frac{P}{W} \quad (5)$$

sendo:

EUA – eficiência do uso da água, kg m^{-3} ;

P – produtividade, kg ha^{-1} ;

W – quantidade total de água aplicada, $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características da cultura

O ciclo fenológico da pimenta foi de 188 dias após o transplântio, sendo realizadas oito colheitas, com início aos 127 dias após o transplântio (DAT), no intervalo de sete dias entre uma colheita e outra. Após os 188 DAT, foi realizada uma poda (04/04/07), devido ao estiolamento ocasionado pela baixa radiação no interior da estufa, adotando-se como estratégia para melhorar a radiação nesse ambiente, a retirada da manta termorrefletora (aluminete, 50%).

A semeadura foi realizada em 08 de agosto de 2006, ocorrendo a germinação 11 dias após a semeadura; o transplântio das mudas para a estufa aconteceu aos 51 dias após a semeadura (28/09/06). O início do florescimento ocorreu aos 70 dias DAT (07/12/06) e a maturidade dos frutos, aos 115 DAT (21/01/07). Antes da poda, a duração do ciclo da pimenta foi 8 meses (Figura 12).

Após a poda, o início da frutificação ocorreu aos 56 dias após a poda (DAP) (30/05/07) e a maturidade ocorreu 63 dias após o início da frutificação (01/08/07) enquanto a colheita teve início aos 134 DAP e aos 15 dias após o início da frutificação (16/08/07). A duração do ciclo da pimenta, após a poda, foi 8 meses (Figura 13). O ciclo total da pimenta foi de 1 ano e 4 meses. Os estádios do ciclo fenológico da pimenta antes e depois da poda estão apresentados nas Figuras 12 e 13, respectivamente.

Figura 12 - Estádios de desenvolvimento da pimenta Tabasco durante o ciclo fenológico de 239 dias, antes da poda

Figura 13 - Estádios de desenvolvimento da pimenta Tabasco durante o ciclo fenológico de 244 dias, após a poda

A formação de mudas compreende o período decorrido desde a semeadura até as mudas estarem prontas para o transplantio; o estágio vegetativo compreende desde o estabelecimento inicial das plantas até o florescimento pleno; o estágio de frutificação vai desde o florescimento pleno até o início da maturação dos frutos e a maturação, do início de maturação dos frutos (no caso de várias colheitas, considerar o início de maturação dos frutos colhidos na penúltima colheita) até a última colheita (MARQUELLI; SILVA, 2006).

4.2 Temperatura do ar e umidade relativa

As temperaturas máximas, mínimas, médias e a umidade relativa média nas duas estufas de cultivo estão apresentadas na Figura 14 e 15, respectivamente. Pelas condições climáticas das estufas antes da poda (até 188 DAT), pode-se observar que a temperatura média do ar foi de 26 e 27 °C para as estufas 1 e 2, respectivamente. As temperaturas mínimas ficaram entre 10 e 26°C e as máximas, entre 25 e 40°C. Após a poda (a partir dos 188 DAT), a temperatura média do ar foi 23 e 24 °C, para as estufas 1 e 2, respectivamente. As temperaturas mínimas ficaram entre 8 e 25°C e as máximas, entre 15 e 44°C. A temperatura mais adequada ao desenvolvimento da planta depende da cultura, do estágio de desenvolvimento da planta e da época do ano. No caso da pimenta, as temperaturas médias mensais ideais situam-se entre 21 °C e 30 °C, sendo a média das mínimas ideal 18 °C, e das máximas, em torno de 35 °C (EMBRAPA, 2007; PINTO et al., 2006).

Os valores de umidade relativa (UR) máxima, mínima e média podem ser observados nas Figuras 15 e 16, para as estufas 1 e 2, respectivamente. A umidade relativa média foi 73 %, variando de 49 % a 90 %. A umidade relativa no interior da estufa atingiu valores máximos de 99 % e mínimos de 13 % para ambas as estufas, condições observadas durante o ciclo da pimenta antes da poda.

Após a poda, a umidade relativa média foi de 60 %, variando de 45 % a 87 %, atingindo valores máximos de 97 % e mínimos de 10 %. A umidade relativa baixa, associada a temperaturas elevadas, pode levar ao déficit de água na planta e promover queda de flores e a formação de frutos pequenos (PINTO et al., 2006).

Figura 14 - Variação da temperatura do ar máxima, mínima, média e umidade relativa média, durante o ciclo da pimenta Tabasco, em ambiente protegido (Estufa1)

Figura 15 - Variação da temperatura do ar máxima, mínima, média e umidade relativa, durante o ciclo da pimenta Tabasco, em ambiente protegido (Estufa 2)

Sob condições de umidade relativa acima de 95%, Baer e Smeets (1978) observaram um aumento do peso dos frutos e do brilho e menor intervalo de tempo entre a polinização e a colheita. Observa-se que as condições de umidade relativa

durante o ciclo da pimenta, são consideradas ideais para uma boa qualidade dos frutos. A umidade relativa média, durante o ciclo da pimenta, foi 60%, ficando um pouco abaixo do valor de 80%, considerado o ideal para o cultivo (CRISÓSTOMO et al., 2006)

Durante o período de inverno, foi realizado o manejo das estufas, com a abertura e o fechamento das cortinas. No período da tarde, as cortinas foram fechadas, para manter, no interior das estufas, a temperatura do ar na faixa adequada ao cultivo, nas horas mais frias da noite. E, pela manhã, as cortinas foram abertas, para melhorar a ventilação no interior da estufa, como mecanismo de redução da UR e o controle da temperatura, como forma de manejo para o controle de doenças.

Com relação às temperaturas mínimas do ar, essas tendem a ser iguais ou ligeiramente superiores à observada externamente, sendo afetadas pelo manejo da ventilação das estufas durante o dia, por meio de abertura e do fechamento das cortinas laterais (BURIOL; STRECK; PETRY, 1993). O manejo adequado da estufa é importante, pois a elevada umidade relativa do ar, associada às altas temperaturas, propiciam condições para algumas doenças da parte aérea tornarem-se mais severas nos cultivos em estufa que nos convencionais (VIDA et al., 2004; ROBLEDO; MARTINS, 1981).

4.3 Radiação líquida

A radiação líquida durante o experimento está apresentada na Figura 16. Pode-se observar que a radiação líquida variou de 1 a 11 MJ.m⁻².dia⁻¹, com valor médio de 5,3 MJ.m⁻².dia⁻¹ e de 6,65 MJ.m⁻².dia⁻¹ antes e depois da poda, respectivamente. A porcentagem de radiação que passa pela cobertura do ambiente protegido varia em função do tipo de material utilizado na cobertura que absorve energia luminosa. Uma das medidas para aumentar a refletividade do material seria pintar o material de cobertura com tinta refletora branca ou metálica (ANDRIOLO, 1999) e eliminar a poeira que se deposita sobre a cobertura plástica, principalmente em épocas mais secas e com poucas chuvas, sendo recomendada a lavagem no período de inverno, para não causar estiolamento das plantas (PURQUERIO; TIVELLI, 2006). Essa prática deve ser

realizada durante o ciclo da planta, principalmente devido à poeira e à fuligem das queimadas que se acumulam na superfície do plástico da estufa.

Para hortaliças de verão, como o tomateiro, o melão e o pimentão, entre outras, considera-se o nível de radiação de $8,4 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ como o limite trófico da cultura. Esse limite é considerado como a produção mínima de assimilados, necessária para a manutenção da cultura (ANDRIOLO, 1999). Considerando-se esse valor para a cultura da pimenta, a radiação líquida média durante o ciclo ficou abaixo do limite trófico, o que pode explicar o estiolamento ocorrido nas plantas de pimenta no interior da estufa. Devido a isso, foi realizada uma poda e retirados os luminetes da cobertura das estufas, como uma alternativa de manejo para melhorar a radiação; entretanto a radiação líquida média durante o ciclo ainda permaneceu abaixo do limite trófico.

Uma das explicações para a baixa radiação no interior da estufa seria a sua localização, limitando o tempo de exposição ao sol ao horário das 9:00 às 16:00. Mesmo a radiação solar não sendo considerada um fator limitante para a cultura da pimenta (PINTO et al., 2006), a baixa luminosidade pode ter contribuído na competição das plantas por radiação, o que provocou alta taxa de crescimento. Deli e Tiessen (1969) observaram que plantas de pimenta expostas a maior radiação apresentaram maior número de flores que plantas expostas a menor radiação, devido ao maior número de ramificações emitidas pelas plantas.

Figura 16 - Radiação líquida durante o ciclo da pimenta Tabasco, em ambiente protegido

4.4 Manejo da irrigação

O monitoramento do teor de umidade do solo até os 50 DAT foi feito na camada de 0 - 0,20 m e, dos 51 DAT até final do ciclo, na camada de 0 - 0,40 m de profundidade. A variação da tensão da água no solo, durante o ciclo da cultura, na camada de 0,20 - 0,40 m está apresentada na Figura 17. O potencial mátrico da água no solo variou de - 4 a -13 kPa, a 0,20 m de profundidade, e de - 4 a -14 kPa, a 0,40m. Carrijo, Marouelli e Silva (1999) sugerem que, para hortaliças em solos arenosos, o potencial mátrico da água no solo deve estar na faixa de -5 a -15 kPa. A faixa de tensão média, durante o ciclo da pimenta, ficou nessa faixa, considerada ótima.

O controle adequado da irrigação na cultura da pimenta é importante, porque a deficiência de água, durante a floração e a frutificação, pode reduzir a produtividade e a qualidade dos frutos, enquanto o excesso de irrigação prejudica a aeração do solo e favorece o aparecimento de doenças do solo (MAROUELLI; SILVA, 2006; CARMO; ZERBINI JUNIOR; MAFFIA, 2006). Neste experimento, não se observaram sintomas de doenças; já quanto às pragas, foi observada a ocorrência de ácaro branco (*Polyphagotarsonemus latus*), potencializado pelo acúmulo de poeira sobre as folhas,

durante o período seco. Segundo Venzon et al. (2006) temperaturas elevadas e baixo teor de umidade favorecem o desenvolvimento de ácaro, sendo esta a principal praga da pimenta, que ocorre com frequência na maioria das áreas produtoras do Brasil.

Na Figura 18, pode-se observar a variação da lâmina de água aplicada e acumulada durante o ciclo da cultura antes e depois da poda. A poda foi realizada aos 188 DAT (04/04/07), considerando-se a demanda hídrica nesse período baixa, até o restabelecimento do cultivo. A lâmina de água aplicada durante o ciclo (188 dias) antes da poda, via irrigação por gotejamento, foi de 461,9 mm e, após a poda com duração do ciclo de 244 dias, a lâmina aplicada foi de 570,6 mm, totalizando uma lâmina aplicada de 1032,5mm. Trabalhando com a cultura da pimenta Tabasco em campo, para determinar a evapotranspiração (ETC) e o coeficiente da cultura (K_c), Chaves et al. (2005) aplicaram uma lâmina de 1.083 mm durante o ciclo de 135 dias em Pentecoste-CE. Essa lâmina de água foi superior àquela aplicada neste experimento, com um ciclo menor, em decorrência das condições de alta demanda atmosférica da região de Pentecoste-CE, em comparação com as condições ambientais de Piracicaba-SP.

Figura 17 - Variação do potencial mátrico da água no solo a 0,20m (a) e a 0,40m (b) nas duas estufas de cultivo

A irrigação iniciou-se após o transplante das mudas (28/09/06) com frequência de dois dias. A quantidade de água, aplicada durante a fase de estabelecimento das mudas, variou de 2 a 4 mm dia⁻¹. Durante o ciclo a lâmina aplicada foi 152,7 mm na fase vegetativa, 303,6 mm durante a frutificação e 5,7 mm durante a maturação dos frutos antes da poda. Após a poda, a lâmina aplicada foi de 113,8 mm na fase vegetativa, 447,5 mm na frutificação e 9,4 mm na maturação dos frutos.

A lâmina de água aplicada na cultura depende da duração do ciclo de desenvolvimento e do tipo de pimenta cultivada, podendo variar de 500 a 800 mm, e ultrapassar 1000 mm para cultivares de ciclo longo. A evapotranspiração varia de 3 a 10 mm dia⁻¹ no pico de demanda da cultura (MAROUELLI; SILVA, 2006). Segundo Doorenbos e Kassan (2000) a faixa varia 600 a 1250 mm para o gênero *Capsicum*.

Figura 18 - Lâminas de água aplicadas e acumuladas durante o ciclo da cultura da pimenta Tabasco, em ambiente protegido com aplicação de CO₂

Observa-se que a lâmina de água aplicada durante a fase de frutificação foi maior, antes e depois da poda. A demanda de água na fase de enchimento de frutos é maior que nos demais estádios de desenvolvimento, pois, para que os frutos adquiram tamanho comercial adequado, deve haver bom suprimento de água nessa fase. Segundo Marouelli e Silva (2006), o estágio vegetativo também é sensível à deficiência de água, pois, se ocorrer estresse hídrico nessa fase, pode-se limitar o desenvolvimento vegetativo das plantas, refletindo negativamente na produção da pimenteira, mesmo que o fornecimento de água seja adequado durante a fase de frutificação.

O estágio de frutificação é o mais crítico em relação à deficiência de água, principalmente na floração plena e no pegamento dos frutos. A deficiência de água provoca a queda e o abortamento de flores e de frutos, além de reduzir o tamanho dos frutos maduros; essa deficiência pode restringir a translocação de cálcio e favorecer a ocorrência de podridão apical. Esses sintomas não foram observados no experimento, pois o suprimento de água foi adequado à cultura. O estágio de maturação dos frutos é considerado o menos sensível à deficiência de água no solo, pois a pungência, a matéria seca e a melhor coloração podem ser adquiridas em condições de déficit moderado de água no solo (MAROUELLI; SILVA, 2006).

4.5 Variação do pH do solo

A variação do pH do solo antes e depois da aplicação de CO₂ está apresentada nas Figuras 19 e 20, para as estufas 1 e 2, respectivamente. Os valores de pH do solo, para o tratamento sem a aplicação de CO₂ (T1), estão apresentados na Figura 21, onde se observa que o pH ficou na faixa considerada ideal, quanto à disponibilidade dos nutrientes para a maioria das culturas (MALAVOLTA, 1979). O pH tem influência na atividade biológica de microrganismos livres, ou que vivem em simbiose com leguminosas, como também na oxidação da matéria orgânica por microrganismos heterotróficos. Em condição de alta acidez, a atividade biológica é reduzida, variando bastante a intensidade de influência (MALAVOLTA, 1985).

A amplitude média de variação pH do solo após a aplicação de CO₂ via irrigação foi de 0,5 (T2), 1,3 (T3); e 1,6 (T4). O CO₂ aplicado via água de irrigação modifica o pH do solo por ação de íons bicarbonatos, aumentando a disponibilidade de certos nutrientes, influenciando deste modo a fertilidade do solo (ANDRIOLO, 2002; PINTO; BOTREL; MACHADO, 2000; MACHADO; TAKANE; FERRO, 1999, BASILE; ARIENZO; ZENA, 1993). Observa-se que com o aumento das doses de CO₂ aplicada via irrigação, as diferenças entre o pH antes e após a aplicação de CO₂ foi maior (Figuras 19 e 20), com 32 e 38 aplicações de CO₂, antes e após a poda respectivamente.

Figura 19 - Variação do pH do solo para os tratamentos T2 (a), T3 (b) e T4 (c) antes e depois da aplicação de CO₂ na estufa 1

Figura 20 - Variação do pH do solo para os tratamentos T2 (a), T3 (b) e T4 (c) antes e depois da aplicação de CO₂ na estufa 2

Figura 21 - Valores de pH do solo para o tratamento T1 na estufa 1 (a) e na estufa 2 (b)

Quando se aplicou a maior dose de CO₂ (T4), o pH do solo reduziu-se de 6,0 para 4,4; essa diferença de 1,6 unidade de pH, pode ocasionar um desequilíbrio na disponibilidade e na absorção de alguns nutrientes, dentre eles o nitrogênio, o fósforo, o potássio, o molibidênio, o cálcio, o magnésio e o zinco (KIMBALL et al., 1983; LOPES, 1989, MALAVOLTA, 1979). Basile et al. (1993) observaram uma redução de 1,5 no pH do solo, com a aplicação de água carbonatada uma hora após o término da irrigação; já Frizzone, D'Albuquerque Junior e Rezende (2005) obtiveram uma redução de 1,6 unidades no pH com a aplicação de água carbonatada, voltando aos valores iniciais 40 minutos após a aplicação do gás carbônico, o que também foi observado neste experimento, quando aplicada a dose mais alta de CO₂ (T4).

Entretanto não foram observados sintomas de toxidez e de deficiência de nutrientes na cultura da pimenta. Nos tratamentos T2 e T3, os valores de pH ficaram na faixa de 5,5 a 6,0, valores próximos à faixa considerada ótima para o crescimento da maioria das plantas cultivadas (MALAVOLTA, 1979; LOPES, 1989). Esse fator contribuiu para o aumento da produção e do número de frutos por planta, observado nesses tratamentos. Nessa faixa de pH, considera-se que as concentrações de nitrogênio, de fósforo, de potássio, de cálcio, de molibdênio, de ferro e de manganês são fornecidas à planta na disponibilidade ideal para o desenvolvimento da cultura, sem causar toxidez ou deficiência

Os valores de pH do solo, favoráveis para a pimenteira, variam de 5,5 a 6,5 (PINTO et al., 2006), considerados ideais para a disponibilidade de nutrientes, sem causar toxidez ou deficiência. O valor médio do pH do solo, observado durante o experimento, foi de 5,9 para todos os tratamentos e, após a aplicação de CO₂, o valor foi de 5,4; 5,3 e 5,1 para T2, T3 e T4, respectivamente. O retorno do pH ao valor inicial, observado antes da aplicação de CO₂, ocorreu entre 15 e 20 minutos após a aplicação, comportamento observado por Ibrahim (1992), Frizzzone, D'Albuquerque Junior e Rezende. (2005) e Novero et al. (1991).

Moore (1990) comenta que o dióxido de carbono possui comportamento de quelato, podendo associar-se a elementos do solo, como cálcio, cobre, ferro, magnésio, manganês e cobalto, formando complexos facilmente carregáveis até as raízes das plantas para absorção. Com pH inferior a 5, a quantidade disponível desses íons (alumínio, ferro e manganês) pode tornar-se tóxicas às plantas. Num solo ácido em que o pH foi elevado de 5 para 7,5, a redução da solubilidade de nutrientes, como ferro, manganês e zinco, pode ocasionar deficiências nas plantas (MALAVOLTA, 1979).

4.6 Concentração de macro e micronutrientes nas folhas

A análise de regressão, aplicada aos dados sem repetição, para a concentração de macro e micronutrientes foi realizada pelo programa SAS (SAS, 1999) (Tabelas 8, 9 e 10). Verificou-se efeito quadrático significativo ($Pr < 0,05$) para as doses de CO₂ sobre a concentração de N, Fe, Mn e Zn, aos 187 DAT (Tabela 8 e Figura 22). Com relação à

concentração de Ca, houve efeito linear significativo ($Pr < 0,01$) das doses de CO₂ sobre o teor de Ca nas folhas da pimenta, aos 434 DAT (Tabela 10, Figura 23). Para os demais macro e micronutrientes, não ocorreram efeitos das doses de CO₂ sobre a concentração nas folhas da pimenta nas datas de amostragens realizadas durante o ciclo da cultura. Aos 404 DAT, não se observou efeito significativo ($Pr < 0,05$) das doses de CO₂ sobre os macro e micronutrientes nas folhas da pimenteira (Tabela 9).

As concentrações de macro e micronutrientes na folha têm a seguinte ordem decrescente: N, K, Ca, Mg, S, P, Cu, Fe, Mn, B e Zn. Segundo Pinto et al (2006), os macronutrientes mais absorvidos na cultura da pimenta são N, K, Ca, Mg, S e P, o que se observou neste experimento (Figuras 24 e 25). Os valores de macro e micronutrientes obtidos nas folhas da pimenteira, em função das doses de CO₂ e das épocas de amostragem, estão apresentados no ANEXO 1, os quais foram utilizados para a análise estatística dos dados e para a obtenção das Figuras 25 e 26, que representam a variação da concentração de macro e micronutrientes nas folhas da pimenteira, em função das datas de amostragem. Observa-se que a variação da concentração dos macronutrientes nas folhas foi semelhante entre os tratamentos nas datas de amostragem. Apenas o Ca em T4 foi constante durante as épocas de amostragem (Figura 24). A concentração dos nutrientes nas folhas foi menor ao final do ciclo, exceto a concentração de Ca, que aumentou durante o ciclo e diminuiu em função do aumento das doses de CO₂, aos 434 DAT (Figuras 23 e 24).

Tabela 8 - Resultado da análise de regressão aplicadas a dados sem repetição (quadrados médios) referente à concentração de macro e micronutrientes nas folhas da pimenta Tabasco aos 187 dias após o transplântio

Causas de variação	Macronutrientes (g kg ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Efeito Linear	43,93 [*]	0,005 ^{ns}	3,27 ^{ns}	0,817 ^{ns}	0,468 ^{ns}	0,025 ^{ns}
Efeito Quadrático	13,62 [*]	0,071 ^{ns}	10,54 ^{ns}	9,03 ^{ns}	0,982 ^{ns}	0,054 ^{ns}
CV(%)	0,25	5,18	17,68	9,91	7,01	2,18
Média	53,20	2,02	24,75	15,67	8,02	2,62
	Micronutrientes (mg kg ⁻¹)					
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
Efeito Linear	3,15 ^{ns}	1128,6 ^{ns}	235,58 [*]	3520,0 ^{**}	33,02 ^{ns}	
Efeito Quadrático	5,09 ^{ns}	1480,5 ^{ns}	53,77 [*]	2072,8 ^{**}	340,5 [*]	
CV(%)	12,76	35,77	0,239	0,12	0,81	
Média	56,75	335,1	238,37	244,5	83,00	

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo

Tabela 9 - Resultado da análise de regressão aplicados a dados sem repetição (quadrados médios) referente à concentração de macro e micronutrientes nas folhas da pimenta Tabasco aos 404 dias após o transplântio

Causas de variação	Macronutrientes					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Efeito Linear	1,22 ^{ns}	0,014 ^{ns}	0,018 ^{ns}	0,994 ^{ns}	0,151 ^{ns}	0,023 ^{ns}
Efeito Quadrático	1,94 ^{ns}	0,028 ^{ns}	6,64 ^{ns}	4,804 ^{ns}	30,20 ^{ns}	0,093 ^{ns}
CV(%)	1,08	3,50	8,62	8,86	13,78	5,32
Média	43,17	2,45	31,4	14,85	10,65	2,15

	Micronutrientes				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Efeito Linear	24,02 ^{ns}	1200,7 ^{ns}	594,5 ^{ns}	10,86 ^{ns}	34,01 ^{ns}
Efeito Quadrático	14,34 ^{ns}	685,87 ^{ns}	137,5 ^{ns}	34,60 ^{ns}	8,41 ^{ns}
CV(%)	5,20	11,78	7,57	4,02	4,45
Média	49,51	720,0	470,12	97,25	34,25

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F ; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo

Tabela 10 - Resultado da análise de regressão aplicados a dados sem repetição (quadrados médios) referente à concentração de macro e micronutrientes nas folhas da pimenta Tabasco aos 434 dias após o transplântio

Causas de variação	Macronutrientes					
	N	P	K	Ca	Mg	S
Efeito Linear	1,74 ^{ns}	0,402 ^{ns}	0,012 ^{ns}	83,7*	11,37 ^{ns}	0,012 ^{ns}
Efeito Quadrático	1,87 ^{ns}	0,242 ^{ns}	0,1496 ^{ns}	3,20 ^{ns}	0,156 ^{ns}	0,149 ^{ns}
CV(%)	1,57	16,34	20,03	0,85	11,05	20,03
Média	34,0	2,63	2,47	20,17	7,67	2,47

	Micronutrientes				
	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Efeito Linear	494,1 ^{ns}	24.0260,8 ^{ns}	242.328,3 ^{ns}	1843,31 ^{ns}	9,257 ^{ns}
Efeito Quadrático	132,8 ^{ns}	47.047,0 ^{ns}	38.403,5 ^{ns}	41,55 ^{ns}	0,233 ^{ns}
CV(%)	30,63	33,56	24,28	13,15	19,06
Média	78,75	682,22	1081,85	100,0	27,00

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F ; ^{ns} não significativo

** significativo pelo teste t ao nível de 1% de probabilidade; * significativo pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade

Figura 22 - Concentração de nitrogênio (a), ferro (b), manganês (c) e zinco (d) nas folhas da pimenta Tabasco aos 187 DAT em função da doses de CO₂ aplicadas via irrigação por gotejamento

**significativo pelo teste t ao nível de 1% de probabilidade; * significativo pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade,

Figura 23 - Concentração de Ca nas folhas da pimenta Tabasco aos 484 DAT em função das doses de CO₂ aplicadas via irrigação por gotejamento

Resultados semelhantes aos dos macronutrientes nas folhas foram observados em relação aos micronutrientes. A tendência foi reduzir a concentração dos micronutrientes durante o ciclo, independente da dose de CO₂ (Figura 25). Essa tendência não foi observada para o ferro, que aumentou durante o ciclo. Observou-se efeito significativo das doses de CO₂ sobre a concentração, nas folhas, de ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) aos 187 DAT (Figura 22 b, 22 c e 22 d).

Figura 24 - Concentração de macronutrientes nas folhas da pimenta Tabasco para os tratamentos T1 (a), T2(b), T3(c) e T4(d) aos 187, 404 e 484 dias após o transplante

Figura 25 - Concentração de micronutrientes nas folhas da pimenta Tabasco para os tratamentos T1 (a), T2(b), T3(c) e T4(d) aos 187, 404 e 434 dias após o transplântio

Observou-se que a concentração de N nas folhas, aos 189 DAT aumentou em função das doses de CO₂, com valores de 49,3, 50,3, 53,7 e 59,5 g kg⁻¹ para T1, T2, T3 e T4, respectivamente. Branco et al. (2007) aplicaram uma dose de CO₂ de 12 L min⁻¹ na água de irrigação na cultura do tomate e observaram que o CO₂ não alterou o transporte de ¹⁵N, mas resultou em aumento na produção de frutos comerciais por planta. No caso da pimenta a resposta à concentração de N nas folhas foi crescente, em função das doses de CO₂ aplicadas através da água de irrigação, quando comparada a do tratamento sem CO₂ (Figura 22a). Essa resposta é semelhante à encontrada por Ibraim (1992), que observou incremento no conteúdo de N em folhas de pepino, em função da irrigação carbonatada. O incremento da absorção do nitrogênio pela pimenteira pode ser explicado pelo efeito do rebaixamento do pH do solo, em resposta à aplicação do CO₂.

Quanto ao Fe, observou-se que a concentração na folha diminuiu, em função das doses de CO₂ (Figura 22b); o mesmo comportamento foi observado, em relação ao Mn, porém com um aumento em T4, em relação a T3 e T2 (Figura 22c), aos 187 DAT. Essa redução na absorção deveu-se ao fato de os teores de Fe e Mn estarem com sua concentração na folha próxima ao limite considerado máximo para a cultura. Segundo Trani (2007), a faixa de concentração de Fe nas folhas varia de 50 a 300 mg kg⁻¹ e, de Mn varia de 30 a 250 mg kg⁻¹ na cultura do pimentão (ANEXO B). A concentração de Zn (Figura 22d), diminuiu nos tratamentos T2 e T3, em relação a T1, o que não foi observado em T4, no qual a concentração de Zn foi maior, quando comparada à do tratamento sem CO₂ (T1), resultado semelhante aos obtidos por Mauney e Hendrix (1988), Novero et al. (1991), Cararo (2000) e Ibrahim (1992) para as culturas do algodão, do tomate e do pepino, respectivamente.

O Ca na folha apresentou uma resposta linear, em função das doses de CO₂, observando-se que o teor desse macronutriente diminuiu quando se aumentaram as doses de CO₂ (Figura 23), semelhante ao encontrado por Kano (2002), que observou menor concentração de Ca em melão rendilhado. O CO₂ aplicado via irrigação promove a redução momentânea do pH do solo, aumentando a disponibilidade de nutrientes, como fósforo e cálcio, e favorecendo a absorção de zinco e de manganês (PINTO et al., 2000). Não foram registrados sintomas de deficiência de Ca nos frutos. Segundo Machado, Takane e Ferro (1999), não existe um padrão de resposta da planta em relação à absorção, à distribuição e ao acúmulo de nutrientes em plantas irrigadas com água enriquecida de CO₂. A resposta da planta está relacionada ao tipo de solo, ao substrato de cultivo, às doses de CO₂, à espécie, à temperatura e à acidez do solo.

4.7 Características morfológicas

4.7.1 Variáveis de crescimento

Foram analisadas medidas de crescimento em intervalos de quinze dias para cada tratamento. As variáveis analisadas foram: altura das plantas, diâmetro do caule e área foliar. Para analisar as variáveis altura da planta e diâmetro do caule, foram

utilizadas 16 plantas por tratamento, sendo duas plantas por repetição para cada tratamento. Para a variável área foliar, foram utilizadas duas plantas aleatoriamente por tratamento, sendo uma de cada estufa. Essas análises foram realizadas antes da poda (até 188 DAT) e, após a poda, realizou-se somente a análise da produção.

4.7.2 Diâmetro do caule

As medidas de diâmetro do caule foram feitas aos 27, 54, 61, 78, 103 e 137 DAT (Figura 26). Observou-se que o diâmetro do caule, no início do ciclo de crescimento, apresentou valores semelhantes para todas as doses de CO₂, sem diferença estatística na estufa 1. Na estufa 2, verificou-se efeito quadrático significativo ($P_r < 0,05$) aos 54 e 78 DAT (Tabela 11). A interação entre as doses de CO₂ e as estufas não foi significativa para o diâmetro do caule (Tabela 11).

O diâmetro do caule teve um crescimento sigmoidal até os 137 DAT, com tendência à estabilização após esse tempo (Figura 26), independente do ambiente. Devido ao efeito significativo do ambiente (Tabela 12), realizou-se a comparação de médias pelo teste de Tukey (5%) aos 27, 54, 61 e 78 DAT, e observou-se que, na estufa 2, os diâmetros do caule foram superiores aos da estufa 1.

Na estufa 2, os pontos de máxima eficiência técnica (MET), obtidos pelas equações de regressão, foram 176,2 e 185 kg ha⁻¹ de CO₂ com valores de 15 e 30 mm de diâmetro de caule, ao 54 e 78 DAT, respectivamente (Figura 27). Os valores de diâmetros de caule aos 54 e 78 DAT foram maiores em T2 do que nos demais tratamentos.

Figura 26 - Evolução do crescimento médio do diâmetro do caule (mm) da pimenta Tabasco em função da duração do ciclo

Tabela 11 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente ao diâmetro do caule (mm) da pimenta Tabasco

Causas de variação	Dias após o transplatio (DAT)					
	27	54	61	78	103	137
Estufa 1						
Doses de CO ₂ (D)	0,229 ^{ns}	0,229 ^{ns}	1,66 ^{ns}	2,39 ^{ns}	2,91 ^{ns}	14,16 ^{ns}
Efeito linear	0,215 ^{ns}	0,044 ^{ns}	4,82 ^{ns}	1,10 ^{ns}	2,07 ^{ns}	0,25 ^{ns}
Efeito quadrático	0,197 ^{ns}	0,414 ^{ns}	0,16 ^{ns}	5,84 ^{ns}	4,04 ^{ns}	8,37 ^{ns}
Desvio	0,274 ^{ns}	0,227 ^{ns}	0,009 ^{ns}	0,22 ^{ns}	2,63 ^{ns}	33,86 ^{ns}
Estufa 2						
Doses de CO ₂ (D)	0,916 ^{ns}	2,91 ^{ns}	3,41 ^{ns}	12,22 ^{ns}	15,75 ^{ns}	18,06 ^{ns}
Efeito linear	1,21 ^{ns}	1,19 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,58 ^{ns}	18,93 ^{ns}
Efeito quadrático	0,006 ^{ns}	7,51*	9,62 ^{ns}	34,15*	26,95 ^{ns}	0,837 ^{ns}
Desvio	1,53 ^{ns}	0,037 ^{ns}	0,27 ^{ns}	1,89 ^{ns}	19,71 ^{ns}	34,41 ^{ns}
Estufa (E)	9,03**	57,78**	10,12*	15,12*	24,50 ^{ns}	0,28 ^{ns}
E x D	0,95 ^{ns}	1,03 ^{ns}	2,54 ^{ns}	2,54 ^{ns}	15,58 ^{ns}	3,11 ^{ns}
Bloco	1,53 ^{ns}	7,69*	11,87**	12,08*	17,25 ^{ns}	0,95 ^{ns}
Resíduo	0,60	2,05	2,08	2,98	7,22	35,53
CV (%)	16,89	11,21	7,48	6,40	8,46	15,22
Média geral (mm)	4,59	12,78	19,31	27,00	31,75	39,15

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F ^{ns} não significativo

Tabela 12 - Resultado da comparação de médias do efeito estufa pelo teste de Tukey (5%) do diâmetro de caule da pimenta Tabasco (cm)

Ambiente	Dias após Transplante			
	27	54	61	78
Estufa 2	5,12 ^a	14,12 ^a	19,87 ^a	27,68 ^a
Estufa 1	4,06 ^b	11,43 ^b	18,75 ^b	26,31 ^b

O tratamento T2, quando comparado aos demais tratamentos, aos 54 DAT, apresentou um acréscimo de 7% no diâmetro em relação a T3 e T1 e de 15% em relação a T4. Aos 78 DAT, os acréscimos foram 7, 15 e 11% para T3, T4 e T1, respectivamente. Os diâmetros do caule foram semelhantes entre os tratamentos nas datas avaliadas, com variação média de 1 a 2 mm. Os coeficientes de variação (CV) foram considerados baixos (<10%) aos 61, 78 e 103 DAT; nas demais avaliações, os CVs foram considerados médios (10 a 20%), segundo Gomes e Garcia (2002).

(ns); (*) (**) representam não significativo, significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente.

Figura 27 - Diâmetro do caule em função das doses de CO₂ aos 54 (a) e 78 (b) DAT na cultura da pimenta Tabasco na estufa 2

Rezende et al. (2002) aplicaram quatro concentrações de CO₂ via atmosfera e variaram o volume de água aplicado, em relação à evapotranspiração das plantas de pimentão. Observaram que o diâmetro do caule, no início do ciclo, não foi afetado significativamente pelas doses de CO₂, principalmente nos tratamentos que receberam

o maior volume de água. No caso da cultura da pimenta, com a aplicação de CO₂ via água de irrigação, o efeito do CO₂ sobre o diâmetro do caule foi observado apenas em uma estufa de cultivo e em algumas datas avaliadas. Cararo e Duarte (2002) e Frizzzone, D'Albuquerque Junior e Rezende.(2005) também não obtiveram efeito significativo do CO₂ aplicado via água sobre o diâmetro de caule de plantas de tomateiro e meloeiro, respectivamente.

Cardoso (2002) estudou a aplicação de CO₂ através da irrigação em cultura de melão e observou efeito significativo sobre os diâmetros de caule, exceto aos 17 DAT. Este efeito também foi observado por Baron e Gorski (1986), que aplicaram ¹⁴CO₂ na rizosfera de plantas de berinjela e observaram que concentrações de CO₂ superiores a 0,03% promoveram incrementos significativos no diâmetro do caule.

4.7.3 Altura das plantas

Medidas de altura das plantas foram feitas aos 27, 54, 61, 78, 103 e 137 DAT (Figura 28). Na estufa 1, o CO₂ teve efeito quadrático significativo ($Pr < 0,05$) sobre a altura das plantas, aos 54, 61 e 137 DAT. Já na estufa 2, o CO₂ teve efeito quadrático significativo ($Pr < 0,01$) aos 27, 54 e 103 DAT (Tabela 13), não se evidenciando um padrão de resposta ao CO₂.

Figura 28 - Evolução do crescimento médio da altura das plantas da pimenta Tabasco em função da duração do ciclo

Tabela 13 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à altura das plantas da pimenta Tabasco (cm)

Causas de variação	Dias após o transplante					
	27	54	61	78	103	137
Estufa 1						
Doses de CO ₂ (D)	3,56 ^{ns}	91,72**	66,16*	217,17*	181,39 ^{ns}	1.417,83*
Efeito linear	4,63 ^{ns}	18,03 ^{ns}	11,30 ^{ns}	136,68 ^{ns}	46,98 ^{ns}	87,15 ^{ns}
Efeito quadrático	5,47 ^{ns}	194,72*	157,26*	331,59 ^{ns}	447,36 ^{ns}	1703,76*
Desvio	0,57 ^{ns}	62,42 ^{ns}	29,93 ^{ns}	182,71 ^{ns}	50,12 ^{ns}	2462,57*
Estufa 2						
Doses de CO ₂ (D)	29,22*	68,5 ^{ns}	61,39 ^{ns}	100,2 ^{ns}	354,22 ^{ns}	64,89 ^{ns}
Efeito linear	21,12*	0,10 ^{ns}	181,66 ^{ns}	3,69 ^{ns}	137,97 ^{ns}	64,90 ^{ns}
Efeito quadrático	44,34**	162,28*	2,52 ^{ns}	137,70 ^{ns}	917,25*	129,32 ^{ns}
Desvio	22,22*	43,11 ^{ns}	0,002 ^{ns}	159,29 ^{ns}	7,45 ^{ns}	0,45 ^{ns}
Estufa (E)	55,12**	472,78**	675,28*	1.339,03**	648,0*	166,53 ^{ns}
E x D	6,7 ^{ns}	3,11 ^{ns}	42,11 ^{ns}	23,03 ^{ns}	21,08 ^{ns}	883,94*
Bloco	7,08 ^{ns}	19,28*	229,61 ^{ns}	211,03 ^{ns}	121,54 ^{ns}	199,11 ^{ns}
Resíduo	5,96	31,78	93,90	83,69	116,25	294,37
CV (%)	13,75	10,65	11,25	7,19	6,11	7,62
Média geral (cm)	17,75	52,90	86,09	127,21	176,18	225,00

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo

Aos 27, 54, 61, 78 e 103 DAT, ocorreu o efeito do ambiente (estufa) sobre a altura das plantas, independente das doses de CO₂. Realizando a comparação de médias pelo teste de Tukey (5%), observou-se que a estufa 2 apresentou altura das

plantas superior à da estufa 1 (Tabela 14 e Figura 28), com diferenças estatísticas pelo teste de Tukey (5%) em todas as datas avaliadas.

Tabela 14 - Resultado da comparação de médias pelo teste de Tukey (5%) da altura das plantas da pimenta Tabasco (cm)

Estufas	Dias após Transplante				
	27*	54*	61*	78*	103*
2	19,06 ^a	56,75 ^a	90,68 ^a	133,68 ^a	180,68 ^a
1	16,43 ^b	49,06 ^b	81,50 ^b	120,75 ^b	171,68 ^b

* médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%)

As equações de regressão para a altura das plantas, em função das doses de CO₂, estão apresentadas na Figura 29. Observa-se que a dose T2 (206,6 kg ha⁻¹) proporcionou plantas maiores aos 54 e 61 DAT, na estufa 1 (Figuras 29 b e d) e aos 27, 54 e 103, na estufa 2 (Figuras 29 a; c, e). Na estufa 1, aos 137 DAT (última avaliação), o tratamento T3 (309,9 kg ha⁻¹) proporcionou maior altura das plantas quando comparado aos demais tratamentos (Figura 29 f).

(ns); (*) (**) representam não significativo, significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente.

Figura 29 - Altura das plantas em função das doses de CO₂ na estufa 2 aos 27 (a), 54 (c), 103 DAT (e) e, na estufa 1, aos 54 (b), 61 (d) e 137 DAT (f) na cultura da pimenta Tabasco

Aos 137 DAT, a interação entre a dose de CO₂ e a estufa foi significativa (Tabela 13). A se realizar o desdobramento da interação, observou-se que não houve diferenças significativas entre as estufas pelo teste de Tukey (5%). Na estufa 1, ocorreram diferenças significativas entre as doses de CO₂ e o tratamento T3 (309,9 kg ha⁻¹) apresentou maior altura das plantas, diferindo de T1 e T4 pelo teste de Tukey (5%), mas sem diferenças em relação ao T2 (Tabela 15). Na estufa 2, não se obteve diferença estatística entre as alturas das plantas nas doses avaliadas aos 137 DAT.

Tabela 15 - Resultado do desdobramento da interação entre estufas e doses pelo teste de Tukey ajustado (5%) da altura das plantas da pimenta Tabasco (cm) aos 137 DAT

Estufas**	Doses*			
	T1	T2	T3	T4
1	215,50 ^{b A}	223,75 ^{ab A}	251,75 ^{a A}	209,00 ^{b A}
2	228,75 ^{a A}	225,75 ^{a A}	228,50 ^{a A}	235,25 ^{a A}

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey ajustado (5%) entre as doses de CO₂; **Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ajustado (5%) entre as estufas

Rezende et al. (2002) obtiveram maiores alturas das plantas de pimentão quando aplicaram, na atmosfera, as concentrações 800 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e 600 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ de CO₂, até os 133 DAT. A altura das plantas foi mais influenciada pelo volume de água aplicado do que pela concentração de CO₂ e o efeito do gás foi mais evidenciado nos menores volumes de água aplicados. Cararo (2000), Frizzzone, D'Albuquerque Junior e Rezende (2005), Cardoso (2002) não observaram efeito significativo do CO₂, aplicado via água de irrigação, sobre a altura das plantas de tomate e de melão, respectivamente. Os resultados obtidos nesses trabalhos e nesta pesquisa não evidenciam um efeito padrão do CO₂ sobre a altura das plantas.

4.7.4 Área foliar

A área foliar e o número de folhas foi determinada aos 22, 55, 118, 137 e 163 DAT, cuja relação está mostrada na Figura 30. Para a análise estatística, avaliou-se, por tratamento a área foliar nas duas estufas de cultivo, utilizando-se uma planta de cada tratamento, devido à dificuldade de obter esse parâmetro.

O resumo da análise de variância está apresentado na Tabela 16. Observa-se que não houve efeito significativo do CO₂ sobre a área foliar aos 22, 55, 137 e 163 DAT. Somente se observou efeito linear significativo ($Pr < 0,05$) aos 118 DAT.

Observa-se, na Figura 30, que a área foliar se manteve constante até aproximadamente 100 DAT. A partir dos 118 DAT, a área foliar aumentou rapidamente até aproximadamente os 150 DAT, e com acréscimos menores até os 163 DAT. Esse comportamento pode ser explicado em função do crescimento indeterminado da planta, que emite ramos vegetativos nas axilas da folhas após a floração, que continuaram crescendo até a formação de novas flores (CARVALHO; BRANCHETTI, 2008).

Figura 30 - Área foliar (m^2) da pimenteira, obtida por funções sigmoidais ao longo do ciclo da cultura, nos diferentes tratamentos CO_2

Tabela 16 - Resultados da análise de variância (quadrados médios) referente à área foliar de plantas da pimenta Tabasco (m^2)

Causas de variação	GL	Dias após o transplântio				
		22	55	118	137	163
Doses de CO_2	3	0,0003 ^{ns}	0,0517 ^{ns}	0,2315 ^{ns}	0,9024 ^{ns}	1,17 ^{ns}
Efeito linear	1	0,00005 ^{ns}	0,0685 ^{ns}	0,4686 [*]	2,048 ^{ns}	22,97 ^{ns}
Efeito quadrático	1	0,00023 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	0,1269 ^{ns}	0,011 ^{ns}	0,307 ^{ns}
Desvio	1	0,00064 [*]	0,0862 ^{ns}	0,099 ^{ns}	0,647 ^{ns}	0,255 ^{ns}
Bloco	1	0,00004 ^{ns}	0,024 ^{ns}	0,0058 ^{ns}	0,300 ^{ns}	8,904 [*]
Resíduo	3	0,00005	0,0229	0,062	1,39	0,653
CV (%)	---	13,75	20,92	15,33	5,89	13,29
Média geral (cm)	---	0,054	0,724	1,63	4,56	6,08

*significativo ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo

Aos 22 dias após o transplântio a área foliar da pimenteira foi de 0,08; 0,07, 0,11 e 0,06 m^2 nos tratamentos T1, T2, T3 e T4, respectivamente. O tratamento T3, correspondente à dose de 309,9 kg ha^{-1} , apresentou área foliar superior à dos demais tratamentos. A menor área foliar foi obtida no tratamento com maior dose de CO_2 . A partir dos 118 DAT, houve tendência de maior área foliar no tratamento sem aplicação de CO_2 (T1). Entre os tratamentos com aplicação de CO_2 , T3 apresentou a área foliar (2,5 m^2) superior à de T2 (2,0 m^2) e à de T4 (2,2 m^2). Observa-se, na Figura 31, que a

área foliar teve crescimento sigmoidal, em função do número de dias após o transplântio. Araújo (2002) encontrou redução significativa da área foliar da abobrinha com o aumento da dose de CO₂ aplicada por irrigação, aos 64 DAT. Canizares, Rodrigues e Goto (2004) não encontraram diferenças estatísticas significativas na área foliar em plantas de pepino irrigadas com água enriquecida com CO₂.

Na Figura 31, está representado o número médio de folhas por planta, em cinco avaliações, não tendo havido em cada DAT diferença significativa em função das doses de CO₂. Efeito semelhante foi encontrado por Furlan et al. (2001) com a aplicação de CO₂ na cultura da alface.

Figura 31 - Número médio de folhas da pimenteira para as doses de CO₂

Manuey e Hendrix (1988) e Guri, Marfã e Savé (1999) obtiveram incremento na área foliar com o uso da água carbonatada em algodão e pimentão, respectivamente, utilizando apenas uma única dose de CO₂. Acock, Acock e Pasternak (1990) também observaram aumento na área foliar, aplicando CO₂ via atmosfera, na cultura do melão.

Segundo Storlie e Heckman (1996b), a resposta das plantas à aplicação de CO₂ durante o seu desenvolvimento é muito variável, devido às diferenças entre as espécies às limitações à resposta da cultura por porque o efeito dos fatores.

4.8 Aspectos produtivos

4.8.1 Produção de frutos

As pimentas não foram separadas em produção comercial e não comercial porque não existe nenhuma norma oficial de classificação e de padronização para as pimentas no Brasil (EMBRAPA, 2007). Na Tabela 17, encontra-se a análise de variância para a produção. Verificou-se efeito quadrático significativo ($Pr<0,01$) das doses de CO_2 sobre a produção das plantas antes da poda. Após a poda, não se observou efeito significativo ($Pr<0,05$) das doses de CO_2 sobre a produção. Em relação à produção total, verificou-se efeito quadrático significativo ($Pr<0,05$) das doses de CO_2 . O efeito do ambiente (estufa) foi significativo ($Pr<0,05$) após a poda e na produção total.

Tabela 17 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à produção média por plantas da pimenta Tabasco

Causas de variação	GL	Produção (g planta ⁻¹)		
		Antes da poda	Após a poda	Total
Doses de CO_2 (D)	3	1.979,41 ^{ns}	18.613,87 ^{ns}	50.112,59 ^{ns}
Efeito linear	1	471,78 ^{ns}	12.773,63 ^{ns}	8.335,87 ^{ns}
Efeito quadrático	1	43.850,62 ^{**}	26.844,50 ^{ns}	139.315,1 [*]
Desvio	1	15,65 ^{ns}	2.292,44 ^{ns}	2686,86 ^{ns}
Estufa (E)	1	4.456,17 ^{ns}	76.655,21 ^{**}	118.075,6 [*]
Bloco	3	14.779,35 ^{ns}	13.970,21 ^{ns}	12.149,1 ^{ns}
E x D	3	10.133,0 ^{ns}	1.192,29 ^{ns}	16.063,5 ^{ns}
Resíduo	21	10.287,15	11.145,86	19.268,8
Cv (%)	—	23,54	43,83	20,67
Média (g planta ⁻¹)	—	430,72	240,83	671,55

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo

Pode-se observar que o T2 antes da poda foi o tratamento que proporcionou a maior produção (477,01 g planta⁻¹) (Figuras 32 e 33a). O valor de máxima eficiência técnica (MET), obtido pela equação de regressão, foi 201,2 kg CO_2 ha⁻¹ para produzir 476,1 g planta⁻¹ (Figura 33a). Quando comparam os totais produzidos das duas épocas de colheitas (antes e após a poda), em decorrência do efeito significativo antes da poda, observou-se que o tratamento T2 continuou apresentando a maior produção

(748,9 g planta⁻¹) (Figura 32 e 33b). O valor da MET, obtido pela equação de regressão, foi 421,4 kg ha⁻¹ com uma produção de 767,3 kg ha⁻¹ (Figura 33b).

Figura 32 - Variação da produção média de frutos por planta em função das doses de CO₂, antes da poda, após a poda e o total produzido na cultura da pimenta Tabasco

(*) e (**) representam significativos a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente

Figura 33 - Produção média de frutos por planta em função das doses de CO₂, antes da poda (a) e a produção total (b) na cultura da pimenta Tabasco

Quanto ao efeito do ambiente (estufa), verificou-se, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, que, na estufa 1, a produção foi maior que na estufa 2 após a poda e na produção total (Figura 34).

Figura 34 - Resultado do teste de Tukey a 5% para produção por planta, nas duas estufas de cultivo

Com a utilização de CO₂ via irrigação, obteve-se um aumento na produção da pimenta Tabasco de 21% e 16% para o tratamento T2 antes da poda e para a produção total, respectivamente, quando comparada à do tratamento sem a aplicação de CO₂. O tratamento T4 apresentou produção inferior à do T1 (sem CO₂), significando que a dose de CO₂ utilizada pode ser considerada alta, induzindo a planta a responder negativamente à aplicação de CO₂. Um dos fatores que pode ter influenciado negativamente na produção por planta no T4 é o pH do solo, que se reduziu de 6,0 para 4,9, após a aplicação de CO₂, com uma diferença de 1,1 unidade de pH (PAULA, et al. 2007).

Acréscimos de produtividade pela aplicação de CO₂ também foram obtidos por Cardoso (2002) na cultura do melão (10,4%), aplicando uma dose de 301,8 kg ha⁻¹, e por Cararo e Duarte (2002) na cultura do tomateiro (8,2%), aplicando uma dose de CO₂ de 7,73 g L⁻¹. D'Albuquerque Junior (2003) obteve incremento de até 18% na cultura do melão, em relação ao tratamento sem CO₂ aplicando três doses de CO₂ em diferentes

estádios de desenvolvimento da cultura. Guri, Marfã e Savé (1999), aplicando a concentração de 400 ppm de CO₂ em solução nutritiva, na cultura do pimentão, observaram acréscimo de 10% na produtividade. Novero et al. (1991) utilizando água carbonatada via irrigação por gotejamento na cultura do tomateiro, obtiveram incrementos na produção comercial e total de 16,4 e 15,9%, respectivamente.

Outros autores encontraram aumento na produção de algumas culturas, superior ao observado neste experimento, como Araújo (2002), que, avaliando a aplicação de água carbonatada na cultura da abobrinha, obteve incremento na produção de 65%, quando comparado ao tratamento sem a aplicação de CO₂. Ibrahim (1992) obteve incremento de 30% na cultura do pimentão, enquanto Furlan et al. (2002) obtiveram incremento de 54,8% na produção de pimentão, quando comparado ao tratamento sem a aplicação de CO₂.

Na cultura da alface, Furlan et al. (2001) obtiveram, aplicando uma dose de CO₂ na água de irrigação de 50,5 L m⁻² dia⁻¹, o máximo rendimento na estufa com a aplicação de CO₂ via irrigação, com o aumento de 28,8% na produção, quando comparada à do tratamento sem a aplicação de CO₂. Pinto et al. (2001), aplicando CO₂ via irrigação na cultura do meloeiro, três vezes por semana, em três formas de condução da cultura (com proteção lateral, solo coberto com plástico e solo sem proteção), e comparando esse tratamento ao sem a aplicação de CO₂ e ao com a aplicação diária de CO₂, observaram que o tratamento com a aplicação diária e com a proteção lateral proporcionou aumento de 18,66%; já, quando compararam solo coberto com plástico preto e solo descoberto, verificaram aumentos de 14,7 e 25,7 %, respectivamente, em relação ao tratamento sem a aplicação de CO₂.

Por outro lado, autores como Hartz e Holt (1991) não verificaram incrementos na produção de tomate e de abobrinha em campo, com a aplicação de água carbonatada. Storlie e Heckman (1996a) também não encontraram efeito significativo das doses de CO₂ na produtividade de plantas de pimentão, irrigadas com água carbonatada em concentração de 1,2 g CO₂ L⁻¹.

Os resultados apresentados na literatura, com relação ao efeito da aplicação de CO₂ sobre a produtividade das culturas, variam em função da cultura estudada, das doses aplicadas, do parcelamento da aplicação durante os estádios fenológicos e das

condições climáticas, não existindo um padrão de resposta. Storlie e Heckman (1991b) salientam a necessidade de estudos sobre a “aplicação de CO₂ via água de irrigação, antes de recomendar essa técnica comercialmente.

4.8.2 Número de frutos por planta

Na Tabela 18, encontra-se a análise de variância para o número de frutos por planta. Verificou-se efeito quadrático significativo para as doses de CO₂ sobre o número de frutos por planta, antes e depois da poda e para a produção total. Observou-se efeito significativo do ambiente (estufa), após a poda e no avaliar-se a produção total de frutos por planta. A interação entre o ambiente e as doses de CO₂ não foi significativa.

Tabela 18 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente ao número de frutos por plantas da pimenta Tabasco

Causas de variação	Número de frutos (planta ⁻¹)			
	GL	Antes da poda	Após a poda	Total
Dose de CO ₂ (D)	3	4.582,68 ^{ns}	33.846,86 ^{ns}	23.205,4 ^{ns}
Efeito linear	1	13.455,24 ^{ns}	69.591,52 ^{ns}	21.846,34 ^{ns}
Efeito quadrático	1	133.816,10 ^{**}	202.006,15 [*]	644.655,7 ^{**}
Desvio	1	3.331,28 ^{ns}	1.650,95 ^{ns}	9.672,34 ^{ns}
Estufa (E)	1	12.012,46 ^{ns}	257.219,47 [*]	380.404,57 [*]
Bloco	3	50.200,87 [*]	91.082,88 ^{ns}	13.898,61 ^{ns}
E x D	3	32.976,31 ^{ns}	21.990,51 ^{ns}	107.965,6 ^{ns}
Resíduo	21	16.818,00	48.036,16	64.291,01
Cv (%)	—	21,08	36,79	20,94
Média (planta ⁻¹)	—	615,10	595,61	1.210,72

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo

A produção total de frutos seguiu a tendência do número de frutos por planta (Figuras 35 e 36). O número de frutos por planta foi maior em T2, com valor de 707; 714 e 1421 frutos por planta antes da poda, após a poda e para a produção total das duas épocas, respectivamente. Observa-se que, sem a aplicação de CO₂ (T1) e na maior dose (T4) ocorreu o menor número de frutos, quando se comparam aos demais tratamentos (Figura 35). O tratamento T4 foi inferior ao T1, tanto em produção por

planta quanto em número de frutos, produzindo 64 frutos planta⁻¹ e 57,93 g planta⁻¹ a menos que T1.

Figura 35 - Variação do número médio de frutos por planta em função das doses de CO₂ antes da poda, após a poda e o total produzido na cultura da pimenta Tabasco

O aumento do número de frutos por plantas em função das doses de CO₂ aplicadas via irrigação foi observado por vários autores em diferentes culturas. Pinto et al. (1999) obtiveram um aumento de 14,35% no número de frutos comerciais do meloeiro; Frizzzone, Cardoso e Rezende (2005) observaram que a dose de CO₂ de 301,8 kg ha⁻¹ apresentou maior número de frutos, comparando-se aos demais tratamentos. Furlan et al., (2002) ao aplicarem CO₂ via irrigação na cultura do pimentão, verificaram incremento de 26,7 % no número de frutos, ao se comparar ao tratamento sem a aplicação de CO₂. Já Cararo e Duarte (2002) e Frizzzone, D'Albuquerque Junior e Rezende (2005) não observaram efeito significativo da aplicação de CO₂ sobre o número de frutos na cultura do tomateiro e do melão, respectivamente. Esses autores explicam que o aumento da produção observado na cultura do melão e do tomate pela aplicação de CO₂ foi devido ao efeito significativo do peso dos frutos e não do número deles.

(ns); (*) (**) representam não significativo, significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente.

Figura 36 - Número de frutos por planta em função das doses de CO₂, antes da poda (a), após a poda (b) e total (c)

Entre as estufas de cultivo, o efeito foi significativo ($Pr < 0,05$), mostrando, pelo teste de Tukey (5%), que a estufa 1 produziu maior número de frutos que a estufa 2, refletindo-se o fato positivamente na maior produção observada nessa estufa (Figura 37).

Figura 37 - Variação do número de frutos por planta, nas duas estufas de cultivo, após a poda e para o total produzido

4.8.3 Massa verde média dos frutos

Na Tabela 19, encontra-se a análise estatística para a massa verde dos frutos. A análise não mostrou significância ($Pr < 0,05$) para as doses de CO_2 sobre a massa verde de frutos, em todas as épocas avaliadas. Os valores médios da massa verde dos frutos estão apresentados na Figura 38.

Os efeitos da irrigação carbonatada sobre a massa dos frutos obtidas por diferentes pesquisadores são diversos, revelando respostas significativas e não significativas para as culturas estudadas. D'Albuquerque Junior et al. (2007) encontraram efeito significativo do CO_2 ($Pr < 0,01\%$) para a massa média de frutos comerciais de melão por planta, com aplicações em diferentes estádios de desenvolvimento. A maior massa de frutos ocorreu quando foram realizadas seis

aplicações de 11,65 kg ha⁻¹ de CO₂, no período entre o início da frutificação e o início da maturação. Também Pinto et al. (1999, 2001) observaram efeito significativo da aplicação de CO₂ no meloeiro, para a massa média dos frutos. Cararo e Duarte (2002) obtiveram incremento de 13% na massa dos frutos de tomate de tamanhos pequenos com a aplicação de CO₂ e não observaram efeito para os frutos de tamanhos médios. D'Adria et al. (1990) e Islam, Matsui e Yoshida (1996) observaram aumento na massa média de frutos do tomate cultivado em ambiente enriquecido com CO₂, devido ao aumento da fotossíntese, que proporcionou maior acúmulo de carboidratos. Já Frizzone, Cardoso e Rezende (2005) não obtiveram efeito significativo sobre a massa de frutos de melão, em resposta ao CO₂, conforme se observou neste trabalho com a cultura da pimenta.

O peso de frutos na pimenta Tabasco não foi influenciado pelas doses de CO₂ aplicadas durante o ciclo da cultura. O aumento obtido em produção não foi devido ao peso de frutos, mas ao do número dele (CARDOSO 2002; FRIZZONE; CARDOSO; REZENDE, 2005).

Tabela 19 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à massa verde de frutos da pimenta Tabasco

Causas de variação	GL	Massa verde (g fruto ⁻¹)		
		Antes da poda	Após a poda	Total
Doses de CO ₂ (D)	3	0,0063 ^{ns}	0,0044 ^{ns}	0,003 ^{ns}
Efeito linear	1	0,0126 ^{ns}	0,0005 ^{ns}	0,00004 ^{ns}
Efeito quadrático	1	0,0003 ^{ns}	0,0091 ^{ns}	0,0043 ^{ns}
Desvio	1	0,0032 ^{ns}	0,0087 ^{ns}	0,0046 ^{ns}
Estufa (E)	1	0,00003 ^{ns}	0,0138 ^{ns}	0,00005 ^{ns}
Bloco	3	0,00063 ^{ns}	0,0141 ^{**}	0,0035 ^{ns}
E x D	3	0,01084 ^{ns}	0,0025 ^{ns}	0,0044 ^{ns}
Resíduo	21	0,00446	0,0028	0,0055
Cv (%)	—	9,52	13,05	13,23
Média (g)	—	0,70	0,41	0,56

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F ^{ns} não significativo

Figura 38 - Variação do peso médio verde de frutos por planta em função das doses de CO₂ antes da poda, após a poda e o total produzido na cultura da pimenta Tabasco

4.8.4 Massa seca do fruto

A análise estatística em relação à massa seca do fruto está apresentada na Tabela 20. A análise não revelou efeito significativo ($Pr < 0,05$) das doses de CO₂ aplicadas sobre a massa seca, para todas as épocas avaliadas. Observa-se apenas efeito entre estufas após a poda. Os valores de massa seca média do fruto por tratamento estão apresentados na Figura 39.

A massa seca do fruto corresponde, em média, a 4,26 (T1); 4,08 (T2); 4,10 (T3) e 4,09 % (T4) da massa total do fruto. Observa-se que a maior porcentagem de matéria seca ocorreu nos frutos produzidos sem a aplicação de CO₂, quando comparados aos dos tratamentos com aplicação de CO₂.

Tabela 20 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente para massa seca do fruto da pimenta Tabasco

Causas de variação	Massa seca do fruto (g fruto ⁻¹)			
	GL	Antes da poda	Após a poda	Total
Doses de CO ₂ (D)	3	0,00021 ^{ns}	0,00024 ^{ns}	0,00014 ^{ns}
Efeito linear	1	0,00028 ^{ns}	0,00030 ^{ns}	0,0001 ^{ns}
Efeito quadrático	1	0,00007 ^{ns}	0,00005 ^{ns}	0,00008 ^{ns}
Desvio	1	0,00026 ^{ns}	0,00029 ^{ns}	0,00023 ^{ns}
Estufa (E)	1	0,00018 ^{ns}	0,00220 ^{**}	0,00041 ^{ns}
Bloco	3	0,00025 ^{ns}	0,00096 [*]	0,0040 ^{ns}
E x D	3	0,0008 ^{ns}	0,0006 ^{ns}	0,0004 ^{ns}
Resíduo	21	0,00031	0,00021	0,00039
Cv (%)	—	10,82	14,38	14,76
Média (g)	—	0,16	0,11	0,13

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F ^{ns} não significativo

Figura 39 - Variação da massa seca média de fruto por planta em função das doses de CO₂, antes da poda, após a poda e o total produzido na cultura da pimenta Tabasco

Quanto ao efeito do ambiente (estufa), após a poda, observou-se que, na estufa 1, a massa seca do fruto ($0,11\text{g fruto}^{-1}$) foi maior que na estufa 2 ($0,09\text{g fruto}^{-1}$), sendo essa diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Na Figura 40, apresenta-se a massa média do fruto para os diferentes tratamentos de CO_2 nos dois ambientes.

Figura 40 - Massa de frutos por planta em função das doses de CO_2 , após a poda, na cultura da pimenta Tabasco

4.8.5 Massa seca de frutos por planta

A análise de variância para a produção de massa seca dos frutos por planta está apresentada na Tabela 21. Verificou-se efeito quadrático significativo ($Pr < 0,05$) para as doses de CO_2 sobre a produção de massa seca, antes da poda e para a produção total. Após a poda, não se verificou efeito significativo das doses de CO_2 sobre essa variável. Observa-se que ocorreu efeito do ambiente (estufa) após a poda e para a produção total. A interação entre a estufa e a dose de CO_2 não foi significativa ($Pr < 0,05$).

Os valores médios de massa seca dos frutos por planta estão apresentados na Figura 41. Observa-se que, como reflexo da maior produção de frutos por planta, o tratamento T2 também apresentou maior massa seca de frutos por planta, antes da poda e para o total produzido (Tabela 21).

Tabela 21 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à produção de massa seca dos frutos por plantas da pimenta Tabasco

Causas de variação	GL	Massa seca de frutos (g planta ⁻¹)		
	3	Antes da poda	Após a poda	Total
Doses de CO ₂ (D)	1	89,45 ^{ns}	1.293,77 ^{ns}	3.363,66 ^{ns}
Efeito linear	1	86,32 ^{ns}	445,93 ^{ns}	139,85 ^{ns}
Efeito quadrático	1	2.662,14*	2.247,97 ^{ns}	9.802,81*
Desvio	1	17,16 ^{ns}	64,57 ^{ns}	148,33 ^{ns}
Estufa (E)	1	587,96 ^{ns}	6.918,14*	11.539,76*
Bloco	3	921,87 ^{ns}	919,49 ^{ns}	1.405,85 ^{ns}
E x D	3	527,21 ^{ns}	153,50 ^{ns}	585,83 ^{ns}
Resíduo	21	719,09	587,57	1.452,81
Cv (%)	—	24,87	47,42	23,55
Média (g planta ⁻¹)	—	100,62	61,22	161,84

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo

Figura 41 - Variação da produção média de frutos por planta em função das doses de CO₂ antes da poda, após a poda e o total produzido na cultura da pimenta Tabasco

Observa-se, nas Figuras 42a e 42b, que, quando aplicados os tratamentos sem CO₂ (T1) e com maior dose de CO₂ (T4), foram obtidos os menores valores de massa seca de frutos por planta. A aplicação da dose T4 resultou em massa seca dos frutos

inferior à obtida no tratamento T1. Os valores obtidos pelas equações de regressão para a MET foram 112,2 g planta⁻¹ com uma dose de CO₂ de 211,3 kg ha⁻¹ antes da poda (Figura 43a) e 183,8 g planta⁻¹ com 405,7 kg ha⁻¹ de CO₂ para o total produzido (Figura 42b).

(ns); (*) (**) representam não significativo, significativo a 5% 1% de probabilidade, respectivamente

Figura 42 - Produção média de massa seca de frutos por planta em função das doses de CO₂ antes da poda (a) e o total produzido (b) na cultura da pimenta Tabasco

Os incrementos médios em massa seca de frutos por planta, em função das doses de CO₂, foram 22 e 19% (T2) e 20 e 16% (T3) antes da poda e a produção total, respectivamente. Novero et al. (1991) observaram incrementos de 12,8; 13,6 e 23,3 % no rendimento total de massa seca de frutos de tomate, em resposta à aplicação de CO₂ via irrigação, com frequências de 2, 4 e 6 dias, respectivamente.

O efeito do ambiente (estufa) foi comparado, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Observa-se que, também para essa variável, a estufa 1 proporcionou maior produção de massa seca de frutos, quando comparada à estufa 2 (Figura 43). A maior produção de frutos por planta, observada na estufa 1, refletiu-se na maior produção de massa seca de frutos por planta.

Figura 43 - Produção de massa seca de frutos por planta nas duas estufas de cultivo

Efeitos significativos da aplicação de água carbonatada sobre a produção de massa seca na cultura da alface foram encontrados por Gomes et al. (2005) e Furlan et al. (2001). Baron e Gorski (1986) obtiveram incremento de massa seca total de frutos de berinjela, ao elevar o nível de ¹⁴CO₂ na zona radicular da planta. Rezende et al. (2002), em ambiente enriquecido com CO₂, observaram incremento na produção de massa seca de plantas de pimentão.

4.8.6 Comprimento e diâmetro de frutos

A análise estatística para o comprimento e o diâmetro dos frutos está apresentada nas Tabelas 22 e 23, respectivamente. Não foram observados efeitos significativos ($Pr < 0,05$) das doses de CO_2 sobre o comprimento e o diâmetro dos frutos nas épocas avaliadas. Verificou-se efeito significativo do ambiente para o comprimento e o diâmetro dos frutos, obtendo-se comprimentos médios de frutos de 24,53 mm (estufa 1) e 23,53 mm (estufa 2) e diâmetros de 7,58mm (estufa 1) e 7,29 mm (estufa 2). Os valores médios de comprimento e de diâmetro dos frutos, nas duas estufas de cultivo, estão apresentados nas Figuras 44 e 45, sendo característicos da variedade estudada (MOREIRA et al., 2006).

Tabela 22 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente ao comprimento de frutos da pimenta Tabasco

Causas de variação	GL	Comprimento de frutos (mm)		
		Antes da poda	Após a poda	Total
Doses de CO_2 (D)	3	1,1760 ^{ns}	3,8138 ^{ns}	1,4242 ^{ns}
Efeito linear	1	0,7884 ^{ns}	6,49 ^{ns}	2,95 ^{ns}
Efeito quadrático	1	0,2914 ^{ns}	3,06 ^{ns}	1,31 ^{ns}
Desvio	1	2,44 ^{ns}	1,88 ^{ns}	0,009 ^{ns}
Estufa (E)	1	2,9599 ^{ns}	7,9808*	0,3047 ^{ns}
Bloco	3	1,1760 ^{ns}	3,8138**	1,6615 ^{ns}
E x D	3	1,5293 ^{ns}	0,8519 ^{ns}	0,4288 ^{ns}
Resíduo	21	1,1860	1,4588	0,8299
Cv (%)	—	3,76	5,02	3,49
Média (mm)	—	28,93	24,03	26,48

*significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F; ** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F^{ns} não significativo

Tabela 23 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente ao diâmetro de frutos da pimenta Tabasco

Causas de variação	GL	Diâmetro de frutos (mm)		
		Antes da poda	Após a poda	Total
Doses de CO_2 (D)	3	0,0669 ^{ns}	0,1544 ^{ns}	0,0599 ^{ns}
Efeito linear	1	0,1292 ^{ns}	0,2833 ^{ns}	0,0004 ^{ns}
Efeito quadrático	1	0,0496 ^{ns}	0,8294 ^{ns}	0,0253 ^{ns}
Desvio	1	2,44 ^{ns}	0,2760 ^{ns}	0,0514 ^{ns}
Estufa (E)	1	0,6633**	0,0522 ^{ns}	0,0618 ^{ns}
Bloco	3	0,1654 ^{ns}	0,5842**	0,2642 ^{ns}
E x D	3	0,0512 ^{ns}	0,1605 ^{ns}	0,5291 ^{ns}
Resíduo	21	0,0758	0,0782	0,1542
Cv (%)	—	4,33	4,12	3,85
Média (mm)	—	7,43	6,78	7,10

** significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo

Figura 44 - Comprimento médio dos frutos em função das doses de CO₂, antes da poda (a), após a poda (b) e produção total (c)

Figura 45 - Diâmetro médio dos frutos em função das doses de CO₂, antes da poda (a), após a poda (b) e as duas juntas (c)

4.8.7 Concentração de capsaicina e dihidrocapsaicina no fruto

As análises estatísticas de capsaicina e de dihidrocapsaicina nos frutos estão apresentadas nas Tabelas 24, respectivamente. Observa-se efeito quadrático significativo ($Pr < 0,05$) das doses de CO_2 sobre a concentração de capsaicina nos frutos, tendo-se reduzido a concentração, com a aplicação de CO_2 , até um valor mínimo de 0,17 mg por fruto para 244,8 kg $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 46). A interação entre a estufa e as doses de CO_2 também foi significativa. Quanto à concentração de dihidrocapsaicina nos frutos, observou-se efeito quadrático significativo ($Pr < 0,0$ e 0,01) das doses de CO_2 sobre a concentração de dihidrocapsaicina (Tabela 24). A concentração de dihidrocapsaicina diminuiu com o aumento da dose de CO_2 , atingindo o mínimo de 0,06 mg para 213,1 kg $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 47).

Tabela 24 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à análise de capsaicina e de dihidrocapsaicina nos frutos da pimenta Tabasco

Causas de variação	GL	Capsaicina (mg fruto ⁻¹)	Dihidrocapsaicina (mg fruto ⁻¹)
Doses de CO_2 (D)	3	0,00095**	0,00013**
Efeito linear	1	0,00096 ^{ns}	0,00002 ^{ns}
Efeito quadrático	1	0,00171*	0,00039**
Desvio	1	0,00012 ^{ns}	0,0000006 ^{ns}
Estufa (E)	1	0,00006 ^{ns}	0,000007 ^{ns}
Bloco	3	0,00032 ^{ns}	0,00004 ^{ns}
E x D	3	0,00111**	0,00016**
Resíduo	21	0,00019	0,000027
Cv (%)	—	7,76	7,95
Média (mg fruto ⁻¹)	—	0,18	0,066

** significativo a 1% de probabilidade pelo teste F; * significativo a 5 % de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo

(ns); (*) (**) representam não significativo, significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente

Figura 46 - Concentração de capsaicina por fruto em função das doses de CO₂, antes da poda

(ns); (*) (**) representam não significativo, significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente.

Figura 47 - Concentração de dihidrocapsaicina por fruto em função das doses de CO₂, antes da poda

O desdobramento da interação entre o ambiente (estufa) e as doses de CO₂ para a produção de capsaicina nos frutos está apresentado na Tabela 25. Observa-se que, na estufa 1, quando avaliadas as doses de CO₂, verificaram-se diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. O T1 (sem CO₂) apresentou a maior concentração de capsaicina nos frutos, mas sem diferenças significativas entre T3 e T4, diferindo apenas de T2 que, apresentou a menor concentração de capsaicina nos frutos e que não diferiu significativamente de T3. Na estufa 2, a concentração de capsaicina nos frutos não diferiu a 5% pelo teste de Tukey entre as doses de CO₂ aplicadas. Quando se compararam os dois ambientes de cultivo em cada dose aplicada, observou-se efeito significativo entre as estufas de cultivos para T2. Na estufa 2, a concentração de capsaicina nos frutos foi maior que na estufa 1.

Tabela 25 - Resultado do desdobramento da interação entre estufas e doses de CO₂ pelo teste de Tukey ajustado (5%) para o teor de capsaicina em frutos da pimenta Tabasco

Estufas**	Doses*			
	T1	T2	T3	T4
1	0,1965 ^{Aa}	0,1508 ^{Bb}	0,1766 ^{Aab}	0,1912 ^{Aa}
2	0,1933 ^{Aa}	0,1878 ^{Aa}	0,1746 ^{Aa}	0,1708 ^{Aa}

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey ajustado (5%) entre as doses de CO₂

**Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ajustado (5%) entre as estufas

Para a concentração de dihidrocapsaicina, o desdobramento da interação entre a estufa e as doses de CO₂ está apresentado na Tabela 26. Observa-se que, na estufa 1 de cultivo, a diferença entre as doses de CO₂ foi significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Nessa estufa, o tratamento T4 apresentou a maior concentração de dihidrocapsaicina nos frutos, diferindo apenas de T2, que apresentou a menor concentração nos frutos. Na estufa 2, não se observaram diferenças entre as doses de CO₂ aplicadas. Quanto ao ambiente (estufa), observou-se diferença significativa quando aplicada a dose T2, com a maior concentração de dihidrocapsaicina na estufa 2.

Tabela 26 - Resultado do desdobramento da interação entre as estufas e as doses pelo teste de Tukey ajustado (5%) do teor de dihidrocapsaicina em frutos da pimenta Tabasco, antes da poda

Estufas**	Doses*			
	T1	T2	T3	T4
1	0,0706 ^{Aa}	0,0551 ^{Bb}	0,0635 ^{Aab}	0,0731 ^{Aa}
2	0,0695 ^{Aa}	0,0685 ^{Aa}	0,0628 ^{Aa}	0,0653 ^{Aa}

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem pelo teste de Tukey ajustado (5%) entre as doses de CO₂

**Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ajustado (5%) entre as estufas

4.8.8 Rendimento de capsaicina e de dihidrocapsaicina por planta

As análises estatísticas de capsaicina e de dihidrocapsaicina nos frutos estão apresentadas na Tabela 27. Observa-se efeito quadrático significativo ($P < 0,05$) das doses de CO₂ sobre o rendimento de capsaicina por planta (Figura 48). Observa-se que o rendimento de capsaicina por planta foi maior no tratamento onde se obteve a maior produção. Mesmo que o teor de capsaicina nos frutos tenha sido menor nos tratamentos com CO₂, decorrente da maior produtividade, o rendimento de capsaicina por planta foi maior no tratamento T2.

O rendimento de dihidrocapsaicina por planta não apresentou efeito significativo em função das doses de CO₂.

Tabela 27 - Resultado da análise da variância (quadrados médios) referente à análise de capsaicina por planta da pimenta Tabasco

Causas de variação	GL	Capsaicina (mg fruto ⁻¹)	Dihidrocapsaicina (mg fruto ⁻¹)
Doses de CO ₂ (D)	3	1.112,86 ^{ns}	128,13 ^{ns}
Efeito linear	1	4,246 ^{ns}	19,13 ^{ns}
Efeito quadrático	1	3.273,33*	332,98 ^{ns}
Desvio	1	61,02 ^{ns}	32,25 ^{ns}
Estufa (E)	1	718,34 ^{ns}	100,22 ^{ns}
Bloco	3	109,64 ^{ns}	16,64 ^{ns}
E x D	3	649,56 ^{ns}	86,96 ^{ns}
Resíduo	21	846,25	113,92
Cv (%)	—	26,54	26,58
Média (mg planta ⁻¹)	—	109,56	40,14

** significativo no nível de 1% de probabilidade pelo teste F; * significativo ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste F; ^{ns} não significativo

(ns); (*) (**) representam não significativo, significativo a 5% e a 1% de probabilidade, respectivamente

Figura 48 - Rendimento de capsaicina por planta, em função das doses de CO₂

4.9 Eficiência do uso da água

Na Figura 49, estão apresentados os valores médios de eficiência no uso da água (kg m⁻³). Em média, a eficiência no uso da água aumentou até T2, com uma redução em T3 e T4, na primeira época de cultivo (antes da poda) e para o total produzido (Figura 50). Após a poda, as eficiências no uso da água foram menores, com pequenas variações entre os tratamentos, em decorrência das menores produtividades de frutos e do maior consumo de água. Azevedo et al. (2005), avaliando o efeito de diferentes lâminas de água no rendimento da pimenteira, cv. Tabasco McIlhenny, obtiveram um valor médio de eficiência no uso da água de 1,74 kg m⁻³ e a amplitude de variação de 0,24 kg m⁻³, entre as lâminas de irrigação, variando de 60 a 80% da evaporação no tanque Classe A.

Figura 49 - Valores médios de eficiência do uso da água em função das doses de CO₂

O aumento da eficiência no uso da água, em função da aplicação de CO₂ também foi verificado por Frizzone, Cardoso e Rezende (2005) e Frizzone, D'Albuquerque Junior e Rezende (2005), em meloeiro. Para o pimentão, Doorenbos e Kassan (2000) citam eficiência no uso da água, no intervalo de 1,5 a 3,0 kg m⁻³.

5 CONCLUSÕES

A aplicação de 207 kg CO₂ ha⁻¹ antes da poda proporcionou aumento de 21% na produção de frutos da pimenta Tabasco. Durante os dois ciclos de cultivo, a aplicação de 452 kg CO₂ ha⁻¹ proporcionou aumento de 16%, em relação ao tratamento sem CO₂.

O número de frutos produzidos por planta, durante os dois ciclos, aumentou segundo uma relação quadrática, com o aumento da dose de CO₂ aplicada via água de irrigação, decrescendo a partir da dose de 409 kg CO₂ ha⁻¹. A resposta ao CO₂ foi maior no primeiro ciclo (antes da poda) atingindo um máximo de 696 frutos por planta, com a aplicação de 220 kg CO₂ ha⁻¹.

A aplicação de CO₂ via água de irrigação não alterou a massa verde, a massa seca, o comprimento e o diâmetro dos frutos.

As concentrações de capsaicina e de dihidrocapsaicina nos frutos reduziram-se com a aplicação de CO₂, mas o rendimento desses capsaicinóides por planta aumentou em decorrência do aumento do número de frutos e da produção, com a aplicação de CO₂.

A eficiência no uso da água elevou-se, com o aumento da aplicação de CO₂, atingindo um máximo para a aplicação de 207 kg CO₂ ha⁻¹ no primeiro ciclo e de 452 kg CO₂ ha⁻¹ para os dois ciclos.

A aplicação de CO₂ não proporcionou efeito consistente sobre as variáveis de crescimento.

Na última colheita (484 dias após o transplantio), a concentração de cálcio nas folhas reduziu-se linearmente, com o aumento das doses de CO₂ aplicadas.

Ao final do primeiro ciclo de colheita (187 dias após o transplantio), os teores de Zn, de Fe e de Mn na folhas apresentaram redução quadrática em função do aumento das doses de CO₂, enquanto o teor de nitrogênio apresentou aumento quadrático.

REFERÊNCIAS

- ACOCK, B.; ACOCK, M.C.; PASTERNAK, D. Interactions of CO₂ enrichment and temperature on carbohydrate production and accumulation in muskmelon leaves. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Washington, v. 115, n. 4, p. 525-529, 1990.
- ANDRIOLO, J.L. **Fluxo de carbono da planta**: fisiologia das culturas protegidas. Santa Maria: Ed. da UFSM, 1999. cap. 1, p. 13-46.
- _____. **Emprego de CO₂ na produção de hortaliças**: olericultura geral, princípios e técnicas. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2002. cap. 6, p. 121-142.
- ANDRIOLO, J.L.; DUARTE, T.S.; LUDKE, L.; SKREBSKY, E.C. Crescimento e desenvolvimento do tomateiro cultivado em substrato com fertirrigação. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 15, n. 1, p. 28-32, 1997.
- ARAÚJO, N.C. **Sistema brasileiro de resposta técnicas**. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC). Disponível em: <<http://sbrt.ibict.br/upload/sbrt475.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2005.
- ARAÚJO W.F. **Aplicação de água carbonatada em abobrinha cultivada em solo com e sem cobertura plástica**. 2002. 86 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- ARTECA, R.N.; POOVAIAH, B.W. Absorption of ¹⁴CO₂ by potato roots and its subsequent translocation. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Washington, v. 3, n. 107, p. 398-401, 1982.
- ARTECA, R.N.; POOVAIAH, B.W.; SMITH, O.E. Changes in carbon fixation, tuberization and growth induced by CO₂ application to the root zone of potato plants. **Science**, Washington, n. 205, p. 1279-1280, 1979.
- AZEVEDO, B.M.; CHAVES, S.W.P.; MEDEIROS, J.F.; AQUINO, B.F.; BEZERRA, F.M.L.; VIANA, T.V.A. Rendimento da pimenteira em função de lâminas de irrigação. **Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 36, n. 3, p. 268-273, 2005.
- BAER, J. SMEETS, L. Effects of relative humidity on fruit set and seed set in pepper (*Capsicum annum* L.). **Horticultura Abstracts**, Wageningen, v. 48, n. 8, p. 645, 1978.
- BAKER, R. *Trichoderma* spp. as plant-growth stimulants. **Critical Reviews in Biotechnology**, Boca Raton, v. 7, n. 2, p. 97-107, 1988.

BARON, J.J.; GORSKI, S.F. Response of eggplant to a root environment enriched with CO₂. **HortScience**, Alexandria, v. 21, n. 3, p. 495-498, 1986.

BASILE, G., ARIENZO, M., ZENA, A. Soil nutrient mobility in response to irrigation with carbon dioxide enriched water. **Communications Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 24, n. 11/12, p. 1183-1195, 1993.

BASSALO, J.M.F. **Curiosidades da física**. Fundação minerva. P.537, 2007. Disponível em: <<http://www.seara.ufc.br/folclore/folclore164.htm>>. Acesso em: 04 maio 2008.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, 2006. 625 p.

BRANCO, R.B.F.; GOTO, R.; CARNEIRO JUNIOR, A.G.; GUIMARÃES, V.F.; RODRIGUES, J.D.; TRIVELIN, P.C.O.; SILVEIRA, L.V. Enxertia e água de irrigação carbonatada no transporte de ¹⁵N e na produção do tomateiro. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 4, p. 374–379, 2007.

BURIOL, G.A.; STRECK, N.A.; PETRY, C. Transmissividade à radiação solar do polietileno da baixa densidade utilizado em estufas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 1-4, 1993.

CANIZARES, A.L.; RODRIGUES, J.D.; GOTO, R. Crescimento e índices de troca gasosa em plantas de pepino irrigadas com água enriquecida com CO₂. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 4, p. 706-711, 2004.

CAÑIZARES, K.A.L.; RODRIGUES, J.D.; GOTO, R.; VILAS BÔAS, R.L. Influência da irrigação com água enriquecida com dióxido de carbono e da enxertia sobre o estado nutricional de plantas de pepino. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 1, p. 9-14, 2005.

CARARO, D.C. **Efeito de diferentes lâminas de água na presença e ausência de CO₂ injetado na água de irrigação sobre a cultura do tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado em estufa**. 2000. 70 p. Dissertação (Mestrado Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

CARARO, D.C.; DUARTE, S.M. Injeção de CO₂ e lâminas de irrigação em tomateiro sob estufa. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 3, p. 432- 437, 2002.

CARDOSO, S.S. **Doses de CO₂ e de potássio aplicadas através da irrigação no meloeiro rentilhado (*Cucumis melo* L.) cultivado em ambiente protegido**. 2002. 101 p. Tese (Doutorado Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

CARMO M.G.F.; ZERBINI JUNIOR, F.M.; MAFFIA, L.A. Principais doenças da cultura da pimenta. In: **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 235, p. 87-98, 2006.

CARRIJO, O.A.; MAROUELLI, W.A.; SILVA, H.R. Manejo da água na produção de hortaliças em cultivo protegido. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 20, 200/201, p. 45-51, 1999.

CARVALHO, S.I.C.; BRANCHETTI, L.B. Botânica. In: EMBRAPA. **Sistema de produção de pimentas (*Capsicum* sp)** Disponível em: <<http://www.cnph.embrapa.br/capsicum/cultivo.htm>>. Acesso em: 02 jul. 2008.

CASAS, F.R.; RIQUELME, G.O.L. Chilli: la especia del nuevo mundo. **Ciência**, Santiago n. 69, p. 69-75, 2003.

CENTRAIS DE ABASTECIMENTO DE CAMPINAS. **Boletim informativo diário de preço**. Disponível em: <<http://www.ceasacampinas.com.br/cotacoes/cotacao.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2008.

CHAVES, S.W.P.; AZEVEDO, B.M.; MEDEIROS, J.F. de; BEZERRA, L.M.F.; MORAIS, N.B. de. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da pimenteira em lisímetro de drenagem. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 36, n. 3, p. 262-267, 2005.

CHILE. Ministério da Agricultura. **Cultivo del aji y del pimento**. Santiago, 1976. 73 p. (Boletim Técnico, 70).

CRISÓSTOMO, J.R.; FURTADO, R.F.; ABREU, F.R. de; CRISÓSTOMO, L.A.; MIRANDA, F.R. de; BLEICHER, E.; RODRIGUES, S.M.M.; WEBER, O.B.; REIS, A.; ROCHA FILHO, R.R.; GONDIM, R.S.; GIRÃO, E.G. **Sistemas 3 de produção**: cultivo de pimenta Tabasco no Ceará. Fortaleza : Embrapa Agroindústria Tropical, 2006. 40 p. Disponível em: <www.cnpat.embrapa.br/home/dow/index.php?pub/sp_3.pdf>. Acesso em: 15 jun.2008.

CUNHA, A.R. da; ESCOBEDO, J.F. ; KLOSOWSKI, E.S. ; GALVANI, E. Saldo de radiação e produtividade da cultura de pimentão em ambientes protegidos e a campo.. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE BIOMETEOROLOGIA, 3., 2001, Maringá: **Anais...** p. 1-7.

CURRY, J.; ALURU, M.; MENDOZA, M.; NEVAREZ, J.; MELENDREZ, M.; O'CONNELL, M.A. Transcripts for possible capsaicinoid biosynthetic genes are differentially accumulated in pungent and non-pungent *Capsicum* spp. **Plant Science**, Lincoln, v. 148, n. 1, p. 47-57, 1999.

D'ADRIA, R.; NOVERO, R.; SMITH, D.H.; SHANAHAN, J.F.; MOORE, F.D. Drip irrigation of potato using carbonated water and mulch in colorado. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 278, p. 179-185, 1990.

D'ALBULQUERQUE JUNIOR, B.S. **Efeito da aplicação de CO₂ na água de irrigação em diferentes fases fenológicas da cultura do melão (*Cucumis melo* L. var. *Reticulatus*) cultivado em ambiente protegido**. 2003. 65 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

D'ALBUQUERQUE JUNIOR, B.S.D.; FIZZONE, J.A.; DUARTE, S.N.; MINGOTI, R.; DIAS, N.S.; SOUSA, V.F. de. Qualidade física e química de frutos de meloeiro rendimento cultivado sob diferentes épocas de aplicação de CO₂ via água de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 3, p. 273-280, 2007.

DELI, J.; TIESSEN, H. Interaction of temperature and light intensity on flowering of *Capsicum frutescens* var. *groszum* cv. 'California Wonder'. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 94, n. 4, p. 349-351, 1969.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina grande: UFPB, 1994. 306 p.

_____. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. de H.R. Gheyi et al. Campina Grande: UFPB, 2000. 221 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

EMBRAPA. **Sistema de produção de pimentas (*Capsicum* sp)**. Disponível em: <<http://www.cnph.embrapa.br/capsicum/cultivo.htm>>. Acesso em: 18 ago. 2007.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA. A cultura do pepino. In: _____. **Curso profissionalizante de olericultura**. Florianópolis, 1993. p. 1-11.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS. Cultivo da pimenta. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 235, p. 7-15, 2006.

ENOCH, H.Z.; RYLSKI, I.; SAMISH, Y. CO₂ enrichment of cucumber, lettuce and sweet pepper plants grown in low plastic tunnels in a subtropical climate. **Journal of Agriculture Research**, Washington, v. 20, p. 63-69, 1970.

ESTRADA, B.; POMAR, F.; DÍAZ, J.; MERINO, F.; BERNAL, M.A. Pungency level in fruits of the pardon pepper with different water supply. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 81, p. 385-396, 1999.

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

FRAIFE, A.G.F. **Pimenta**. Disponível em: <<http://www.ceplac.gov.br/radar/pimenta.htm>>. Acesso em: 29 abr. 2006.

FRIZZONE, J.A.; CARDOSO, S.S.; REZENDE, R. Produtividade e qualidade de frutos de meloeiro cultivado em ambiente protegido com aplicação de dióxido de carbono e de potássio via água de irrigação. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 4, p. 707-717, 2005.

FRIZZONE, J.A.; D'ALBUQUERQUE JUNIOR, B.S.; REZENDE, R. Aplicação de dióxido de carbono via água de irrigação em diferentes fases fenológicas da cultura do meloeiro cultivado em ambiente protegido. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 27, n. 4, p. 667-675, 2005.

FURLAN, R.A.; REZENDE, F.C.; ALVES, D.R.B.; FOLEGATTI, M.V. Dióxido de Carbono aplicado via água de irrigação na cultura da alface. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 19, n.1, p. 25-29, 2001.

_____. Lâmina de irrigação e aplicação de CO₂ na produção de pimentão CV Mayata, em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 4, p. 547-550, 2002.

GOMES, F.P.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

GOMES, T.M. **Efeito do CO₂ aplicado na água de irrigação e no ambiente sobre a cultura da alface (*Lactuca sativa* L.)**. 2001. 83 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

_____. Aplicação de CO₂ via água de irrigação na cultura da alface. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 23, n. 2, p. 316-319, 2005.

GURI, S.; MARFÃ, O.; SAVÉ, R. **Efecto de la irrigación carbónica en la producción de un cultivo de pimiento**. Barcelona: IRTA, Departamento de Tecnología Hortícola, 1999. 6 p.

HARTZ, T.K.; HOLT, D.B. Root-zone carbon dioxide enrichment in field does not improve tomato or cucumber yield. **HortScience**, Alexandria, v. 26, n. 11, p. 1423, 1991.

HELDWEIN, A.B.; STRECK, N.A.; BURIOL, G.A.; SCHNEIDER, F.M.; ESTEFANEL, V.; DALMAGO, G.A. Efeito da cobertura plástica sobre a temperatura mínima do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 1995, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia/ Universidade Federal da Paraíba, 1995. p. 304-306.

HERMES, C.C.; MEDEIROS, S.L.P.; MANFROM, P.A.; CARON, B. POMMER, S.F.; BIANCHI, C. Emissão de folhas de alface em função de soma térmica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 269-275, 2001.

IBRAHIM, A. Response of plant irrigation with CO₂ enrichment water. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 323, p. 205-214, 1992.

IMPORTADORA DE SEMENTES PARA LAVOURA. **Pimentas saborosas e saudáveis 2008**. Disponível em : <http://www.isla.com.br/cgi-bin/artigo.cgi?id_artigo=584>. Acesso em: 11 jul. 2008.

ISLAM, M.S.; MATSUI, T.; YOSHIDA, Y. Effects carbon enrichment on physico-chemical and enzymatic changes in tomato fruits at various stage of maturity. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 65, n. 2, p. 137-149, 1996.

KANO, C. **Extrações de nutrientes pelo meloeiro rendilhado cultivado em ambiente protegido com adição de potássio e CO₂**. 2002. 102 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

KIMBALL, B.A. Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, n. 5, p. 779-788, 1983.

KUMAGAIA, P. Plasticultura na Cooperativa Agrícola de Cotia – Cooperativa Central. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE PLASTICULTURA, 1989, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal: FUNEP, 1989. p. 53-55.

LAMONT JUNIOR, W.J. What are the components of a plasticulture vegetable system. **Hort Technology**. Alexandria, v. 6, n. 3, p. 150-154, 1996.

LARCHER, W. O balanço de carbono nas plantas. In: LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000. p. 69-182

LAWTON, G. **Gás do efeito estufa diminui acúmulo de nutrientes em plantas**. Disponível em: <<http://www.folha.uol.com.br/folha/ciência>>. Acesso em: 08 ago. 2005.

LE BOT, J.; ADAMOWICZ, S.; ROBIN, P. Modelling plant nutrition of horticultural crops. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 74, p. 47-82, 1998.

LOPES, A.S. **Manual de fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA; POTAFOS, 1989. 153 p.

MACHADO, E.C.; TAKANE, R.J.; FERRO, R. Aplicação de CO₂ via água de irrigação em agricultura. In: FOLEGATTI, M.V. (Coord.). **Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 345-353.

MALAVOLTA, E. **ABC da adubação**. 4. ed. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1979. 255 p.

_____. A prática da calagem. In: SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS AGRÍCOLAS, 1985, Campinas. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 313-357.

MARQUELLI, W.A.; SILVA, H.R. Irrigação da cultura da pimenta. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 235, p. 58-67, 2006.

MARQUELLI, W.A.; SILVA, W.L.; SILVA, H.R. **Manejo da irrigação em hortaliças**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 1996. 72 p.

MAUNEY, J.R.; HENDRIX, D.L. Responses of glasshouse grown cotton to irrigation with carbon dioxide-saturated water. **Crop Science**, Madison, v. 28, n. 5, p. 835-838, 1988.

MEYER, B.S.; ANDERSON, D.B.; BOHNING, R.H. **Introdução à fisiologia vegetal**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbeukian, 1965. 564 p.

MODOLO, V.A.; GOMES, T.M.; BOTREL, T.A.; ROJAS, J.S.D. Avaliação econômica da produtividade de alface sob aplicação de CO₂ via água de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 45., Fortaleza, 2005. p. 1-4.

MOORE, P.D. Potential for irrigation with carbon dioxide. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 278, p. 171-178, 1990

MOREIRA, G.R.; CALIMAN, F.R.B.; SILVA, D.J.H.; RIBEIRO, C.S.C. Espécies e variedades de pimenta. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 235, p. 16-29, 2006.

MORISON, J.I.L.; GIFFORD, R.M. Plant growth and water use with limited water supply in high CO₂ concentrations. I. Leaf area, water use and transpiration. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 11, n. 5, p. 361-374, 1984.

MORTENSEN, L.M. Review: CO₂ enrichment in greenhouses crop responses. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v. 33, n. 1, p. 1-25, 1987.

MUALEM, Y.A. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**, Washington, v. 12, p. 513-522, 1976.

NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. New York: Elsevier, 1986. 383 p.

NORBY, R.J.; O'NEIL E.G.; LUXMOORE, R.J. Effects of atmospheric CO₂ enrichment on the growth and mineral nutrition of *Quercus alba* seedlings in nutrient-poor soil. **Plant Physiology**, Washington, v. 82, n. 1, p. 83-89, 1986.

NOVERO, R.; SMITH, D.H.; MOORE, F.D.; SHANAHAN, J.F.; D'ANDRIA, R. Field-Grown Tomato Response to Carbonated Water Application. **Agronomy Journal**, Madison, v. 5, n. 83, p. 911-916, 1991.

NUEZ, F., ORTEGA, R.G., GARCIA, J.C. **El cultivo de pimientos**: chiles y ajies. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 607 p.

OLIVEIRA, M.R.V. O emprego de casas de vegetação no Brasil: vantagens e desvantagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 8, p. 1049-1060, 1995.

PAULA, F.L.M.; FRIZZONE, J.A.; PAULA, A.L. de; BOTREL, T.A.; PAULUS, D.; BORGES, A.C.F. Influência da irrigação com água enriquecida com dióxido de carbono (CO₂) no pH do solo. In: WORKSHOP INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA IRRIGAÇÃO; CONFERÊNCIA SOBRE RECURSOS HÍDRICOS DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO, 1., 2007, Fortaleza. p. 485-489.

PINTO, C.M.F.; PUIATTI, M.; CALIMAN, F.R.B.; MOREIRA, G.R.; MATTOS, R.N. Clima, época de semeadura, produção de mudas, plantio e espaçamento na cultura da pimenta. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 235, p. 40-49, 2006.

PINTO, J.M.; BOTREL, T.A.; MACHADO, E.C. Uso do dióxido de carbono na agricultura: revisão bibliográfica. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 4, p. 919-925, 2000.

PINTO, J.M.; BOTREL, T.A.; MACHADO, E.C.; FEITOSA FILHO, J.C. Aplicação de CO₂ via água de irrigação em relação à produtividade do meloeiro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 1, p. 33-38, 2001.

PINTO, J.M.; BOTREL, T.A.; MACHADO, E.C.; FEITOSA FILHO, J.C.; MEDINA, C.L. Aplicação de CO₂ via água de irrigação na cultura do melão em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, Sorocaba, v. 18, n. 3, p. 1-10, 1999.

PRADOS, N.C. El microclima de los invernaderos de plástico de la costa del sureste español. **Horticulture**, Boston, v.51, p.60-71, 1989.

PURQUERIO, L.F.V.; TIVELLI, S.W. **Manejo do ambiente em cultivo protegido**. 2006. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/MANEJO_Cultivo_Protegido/Manejo_Cultivo_protegido.htm>. Acesso em: 11 jul. 2008.

RADIN, B.; REISSER JÚNIOR, C.; MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H. Crescimento de cultivares de alface conduzidas em estufa e a campo. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 22, n. 2, p. 178-181, 2004.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo; FUNDAG, 1997. 285 p. (IAC. Boletim, 100).

REZENDE, F.C.; FRIZZONE, J.A.; BOTREL, T. A.; PEREIRA, A. S. Plantas de pimentão cultivadas em ambiente enriquecido com CO₂. I. Crescimento vegetativo. **Acta Scientiarum**, Maringa, v. 24, n. 5, p. 1517-1526, 2002.

REZENDE, F.C.; FRIZZONE, J.A.; OLIVEIRA, R.F.; PEREIRA, A.S. CO₂ and irrigation in relation to yield and water use of the bell pepper. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 1, p. 7-12, 2003.

REZENDE, F.C.; FRIZZONE, J.A.; PEREIRA, A.S.; BOTREL, T.A. Plantas de pimentão cultivadas em ambiente enriquecido com CO₂. II. Produção de matéria seca. **Acta Scientiarum**, Maringa, v. 24, n. 5, p. 1527-1533, 2002.

ROBLEDO, F.P.; MARTIN, L.V. **Aplicación de los plásticos en la agricultura**. 2. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1981. 572 p.

ROBLES, W.G.R. **Dióxido de carbono via fertirrigação em batateira (*Solanum tuberosum* L.) sob condições de campo**. 2003. 102 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

RUFINO, J.L.S.; PENTEADO, D.C.S. Importância econômica, perspectivas e potencialidades do mercado para pimenta. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 235, p. 7-15, 2006.

RUFTY, T.W. Jr., MACKOWN, C.T., VOLK, R.M. Effects of altered carbohydrate availability on whole-plant assimilation of 15 NO₃. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 89, n. 2, p. 457-463, 1989.

SAS INSTITUTE. **SAS**: user's guide statistics; version 8.0 edition. Cary, 1999. 956 p.

SCATOLINI, M.E. **Estimativa da evapotranspiração da cultura de crisântemo em estufa a partir de elementos meteorológicos**. 1996. 71 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

SERRANO CERMEÑO, Z. Controle da atmosfera da casa de vegetação. In: SERRANO CERMEÑO, Z. **Casa de vegetações**: instalação e manejo. Lisboa: Liteza, 1990. p. 238-301.

_____. **Cultivo de hortaliças em invernadero**. Barcelona: AEDOS, 1979. 361 p.

SGANZERLA, E. **Nova agricultura**: a fascinante arte de cultivar com os plásticos. 5. ed. Guaíba: Agropecuária, 1995. 342 p.

SHAKHASHIRI, B.Z. **Chemical of the week: carbon dioxide** 2008. Disponível em: <<http://scifun.chem.wisc.edu/chemweek/pdf/CarbonDioxide.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2008.

SILVA, E.C.; SOUZA, J.R. **Cultura da pimenta**. Disponível em: <http://www.editora.ufla.br/Boletim/pdfestensao/bol_68.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2006.

SILVA, W. L. C.; MAROUELLI, W. A. Manejo da irrigação em hortaliças no campo e em ambientes protegidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Lavras: UFLA; SBEA, 1998. p. 311-348.

STANGHELLINI, C. Evapotranspiration in greenhouse with special reference to Mediterranean conditions. **Acta Horticulturae**, The Hague, n. 335, p. 296-304, 1993.

STANHILL, G.; HOFSTEDE, G.J.; KALMA, J.D. Radiation balance of natural and agricultural vegetation. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, London, v. 92, p. 128-140, 1966.

STOFFELLA, P.J.; LI, Y.; PELOSI, R.R.; HAMNER, A.M. Citrus rootstock and carbon dioxide enriched irrigation influence on seedling emergence, growth, and nutrient content. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 18, n. 7, p. 1439-1448, 1995

STORLIE, C.A.; HECKMAN, J.R. Bell pepper yield response to carbonated irrigation water. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 19, n. 10/11, p. 1477-1484, 1996a.

_____. Soil, plant, and canopy responses to carbonated irrigation water. **HortTechnology**, Alexandria, v. 6, n. 2, p. 111-124, 1996b.

SUKRASMO, N.; YEOMAN, M.M. Phenylpropainoid metabolism during growth and development of *Capsicum frutescens* fruits. **Phytochemistry**, New York, v. 32, n. 4, p. 839-844, 1993

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fotossíntese. In: _____. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. p. 139-219.

TAMAGI, J.T.; VILAS BOAS, M.A.; SAMPAIO, S.C.; DAMASCENO, S.; GUIMARÃES, V.F. Efeito do CO₂ aplicado via água de irrigação sobre a cultura da alface (*lactuca sativa* L.) **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 492-504, 2007.

TOGNONI, F.; HALEVY, A.H.; WITTEWER. Growth of bean and tomato plants as affected by root absorbed growth substances and atmospheric carbon dioxide. **Planta**, Berlin, v. 72, p. 43-52, 1967.

TRANI, P.E. **Calagem e adubação para hortaliças sob cultivo protegido**. 2007.

Disponível em:

<http://www.infobibos.com/Artigos/2007_1/CalagemHortalicas/Index.htm> Acesso em: 05 maio 2008.

UNIMED. **O uso da pimenta no combate as doenças**. 2008. Disponível em:

http://www.unimedvsf.com.br/secao_clientes/dica.php?id=28. Acesso em 10 jul. 2008.

VAN GUENUCHEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAN GENUTCHTEN, M. Th.; LEIJ, F.J.; YATES, S.S. **The RETC code for quantifying the hydraulic function of unsaturated soils**: version 10 V.S. Riverside: USDA, Salinity Laboratory, 1991. Disponível em: <<http://www.usssl.ars.usda.gov/models.htm>>. Acesso em: 15 abr. 2007.

VECCHIA, P.T.D.; KOCH, P.S. História e perspectivas da produção de hortaliças em ambiente protegido no Brasil. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 20, n. 200/201, p. 5-10, 1999.

VENZON, M.; OLIVEIRA, C.H.C.M.; ROSADO, M.C.; PALLINI FILHO, A.; SANTOS, I.C. dos. Pragas associadas à cultura da pimenta e estratégia de manejo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 27, n. 235, p. 75-86, 2006.

VIDA, J.B.; ZAMBOLIN, L.; TESSMANN, D.J.; BRANDÃO FILHO, J.U.T.; VERZIGNASSI, J.R.; CAIXETA, M.P. Manejo de doenças de plantas em cultivo protegido. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 4, p. 355-372, 2004.

ANEXOS

ANEXO A - Valores de concentração de macro e micronutrientes nas folhas da pimenta Tabasco em função das doses de CO₂ nas épocas de amostragem.

Macronutrientes (g kg ⁻¹)							
DAT	trat	N	P	K	Ca	Mg	S
187	0	49,3	2,2	25,1	15,3	8,2	2,4
404	0	43,5	2,3	32,8	14,6	8,0	2,4
484	0	33,6	2,3	20,1	26,4	10,0	2,5
187	206,6	50,3	1,8	20,0	16,8	8,4	2,8
404	206,6	43,9	2,5	28,2	17,1	15,0	1,9
484	206,6	32,7	2,5	20,7	22,2	8,7	2,5
187	309,9	53,7	2,0	27,5	17,6	8,6	2,7
404	309,9	43,7	2,6	32,6	14,3	11,4	2,1
484	309,9	34,3	2,3	19,8	18,3	6,3	2,0
187	413,2	59,5	2,1	26,4	13,0	6,9	2,6
404	413,2	41,6	2,4	32,0	13,4	8,2	2,2
484	413,2	35,4	3,4	21,9	13,8	5,7	2,9
Micronutrientes (mg kg ⁻¹)							
DAT	trat	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
187	0	57	305,5	255,0	308	86	
404	0	55	765,0	490,0	92	40	
484	0	98	989,5	1560,3	134	24	
187	206,6	51	288,5	235,5	220	71	
404	206,6	46	657,5	485,0	103	32	
484	206,6	87	732,5	846,8	107	30	
187	309,9	62	447,5	231,0	215	78	
404	309,9	49	767,5	433,0	97	33	
484	309,9	51	802,5	1094,3	77	24	
187	413,2	57	299,0	232,0	235	97	
404	413,2	48	690,0	472,5	97	32	
484	413,2	79	204,4	826,0	82	30	

ANEXO B - Faixa de teores adequados de macro e micronutrientes em folhas de pimentão (TRANI, 2007)

Macronutrientes (g kg⁻¹)					
N	P	K	Ca	Mg	S
30 – 60	3 – 7	40 – 60	10 – 35	3 – 12	–
Micronutrientes (mg kg⁻¹)					
B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
30 – 100	8 – 20	50 – 300	30 – 250	–	30 – 100