**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**

DENIS CESAR CARARO
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. **SERGIO NASCIMENTO DUARTE**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, para a obtenção do Título de Mestre em Agronomia. Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil

Fevereiro - 2000

ERRATA

Página	Linha	Onde lê-se	Ler
xiv	5	8,7	8,2
xiv	5	11,5	13
xiv	6	7,8	8,5
xvi	4	8.7	8.2
xvi	4	11.5	13
xvi	4	7.8	8.5
13	5	n = 1189	n = 1,189
46	4	7,6	8,2
49	8	5,8	6,1
50	3	7,8	8,5
58	5	7,6	8,2
58	6	11,5	13
58	6	7,8	8,5
31	equação 11	kg.m ⁻³	R\$.m ⁻³
31	equação 12	do tomate, kg.m ⁻³	do tomate, R\$.m ⁻³

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/USP

Cararo, Denis Cesar

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 / Denis Cesar Cararo. - - Piracicaba, 2000.

70 p. : il.

Dissertação (mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2000.
Bibliografia.

1. Água de irrigação 2. Cultivo em estufa 3. Dióxido de carbono 4. Irrigação por gotejamento 5. Tensiómetro 6. Tomate I. Título

CDD 635.642

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

Este trabalho é fruto de grande dedicação e aplicação de conhecimentos adquiridos durante todas as fases que precederam à minha formação profissional, cujo conteúdo engrandece as pesquisas desenvolvidas em nosso país na adição e evolução de tecnologias para proveito do produtor rural

**A meus pais, Dionizio e Aldona que nunca
esqueceram e sempre dedicaram esforços
para a saúde e educação de seus filhos, e
ao meu irmão Gil pela grande amizade,
*MINHA HOMENAGEM***

**A DEUS, que pela fé a ele dedicada,
sempre me proporcionou forças
para vencer as etapas da vida
*OFEREÇO E DEDICO***

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas alegrias proporcionadas e por estar sempre presente, me auxiliando na superação dos momentos mais difíceis;

Ao Departamento de Engenharia Rural pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” por ter concedido a oportunidade de cursar o mestrado e desenvolver este trabalho;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos;

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo indispensável apoio financeiro;

Ao professor Sérgio Nascimento Duarte pela sua brilhante e indiscutível orientação no decorrer do curso;

À empresa CARBORUNDUM DO BRASIL Ltda., pela doação de emissores e tubulação de irrigação;

Ao professor João Lopes por ter concedido as estufas cobertas com plástico;

Ao funcionário Erreinaldo D. Bortolazzo por ter concedido maquinaria de grande valia para o preparo do solo;

Aos professores Keigo Minami, João Tessarioli Neto, Tarlei Botrel e José A. Frizzone pelas valiosas sugestões;

Aos professores Ricardo Ferraz, Lilian Amorim, Tamara M. Gomes e Leonardo Médici pela participação na realização das medidas fisiológicas;

Aos funcionários Hélio de T. Gomes, Antonio Cesar de Souza Rocha, José Figueiredo, Lino Stênico, Gersio Z. Júnior e Gilmar B. Grigolon pela disposição em auxiliar nos trabalhos de campo;

Ao colega Ênio Farias de Francisco e Silva pela instalação dos tensiômetros, pela coleta e pela análise das soluções do solo;

Ao professor Angelo P. Jacomino pela oportunidade em realizar as análises de pós-colheita;

Ao professor José E. Corrente pelo auxílio na discussão e elaboração das análises estatísticas;

À coordenação, aos professores e aos colegas do Curso de Pós-Graduação, pela amizade e pelo incremento científico dedicados;

Finalmente, à todos que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiii
SUMMARY	xv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Considerações gerais	3
2.2 Déficit de água em tomateiro	3
2.3 Excesso de água em tomateiro	4
2.4 Necessidades hídricas da cultura.....	5
2.5 Dióxido de carbono aplicado na agricultura	6
2.6 Resposta do tomateiro a diferentes níveis de irrigação	9
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1 Localização e características da área experimental	12
3.2 Delineamento experimental	14
3.3 Descrição das estruturas experimentais	14
3.4 Práticas adotadas antes do transplântio.....	17
3.5 Práticas culturais e cultivar utilizados	19

3.6	Condutividade elétrica e nutrientes da solução do solo.....	20
3.7	Sistema de irrigação.....	20
3.8	Manejo da irrigação	22
3.8.1	Manejo utilizando tanque evaporimétrico.....	22
3.8.2	Manejo utilizando tensiômetros.....	24
3.8.3	Tempo de irrigação e uso dos registros.....	25
3.8.4	Turno de rega.....	26
3.9	Fertirrigação	27
3.10	Aplicação do dióxido de carbono.....	27
3.11	Observações fenológicas.....	28
3.12	Observações fisiológicas.....	28
3.13	Produção e seus componentes	29
3.14	Eficiência no uso da água (E U A).....	30
3.15	Função de produção.....	30
3.15.1	Análise econômica e maximização da receita líquida.....	31
3.16	Análise qualitativa de frutos	32
3.17	Análise estatística	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	Duração do ciclo, estádios fenológicos e efeito da temperatura	34
4.2	Aplicação de CO ₂ via água de irrigação	34
4.3	Manejo da irrigação	41
4.4	Altura das plantas e diâmetro das hastes	44
4.5	Produtividade	46
4.6	Número de frutos.....	48

4.7	Peso médio dos frutos.....	49
4.8	Eficiência no uso da água	51
4.9	Função de produção.....	51
4.10	Maximização da receita líquida.....	53
4.11	Viabilidade econômica da aplicação de água carbonatada	54
4.12	Qualidade de frutos.....	55
5	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

LISTA DE FIGURAS

1	Curva de retenção de água do solo da área experimental.....	13
2	Diagrama esquemático do delineamento experimental e do sistema de irrigação utilizado.....	15
3	Estufas utilizadas no experimento.....	16
4	Estruturas de tutoramento de plantas de tomate utilizadas durante o cultivo.....	16
5	Localização do tanque evaporimétrico reduzido.....	23
6	Prática de medição adotada para a quantificação do fluxo de gás aplicado.....	28
7	Equipamento selecionador de frutos.....	29
8	Temperatura e umidade relativa do ar obtidas por termoigrômetro.....	35
9	Condutividade elétrica média na solução do solo coletada por extrator com cápsula pororosa.....	36
10	Teores médios de cálcio na solução do solo, ao longo do ciclo da cultura.....	36
11	Teores médios de nitrato na solução do solo, ao longo do ciclo da cultura.....	36
12	Teores médios de potássio na solução do solo, ao longo do ciclo da cultura.....	37
13	Radiação fotossinteticamente ativa (PAR) medida por quantômetro, fotossíntese e concentração de CO ₂ no ar antes, durante e após a aplicação do gás na linha de irrigação.....	39
14	Condutância estomática, transpiração e temperatura da folha antes, durante e após a aplicação do gás na linha de irrigação.....	40

15 Lâmina evaporada no tanque evaporimétrico reduzido, ao longo do ciclo da cultura.	42
16 Comportamento do potencial matricial de água do solo a 20 cm de profundidade, ao longo do ciclo da cultura.	43
17 Altura das plantas e diâmetro das hastes em diferentes épocas de medição.	45
18 Produtividade acumulada ao longo do período de maturação e de colheita dos frutos.	47
19 Funções de produção com e sem água carbonatada tendo a água como variável.....	52
20 Relação entre a fração preço da água e preço do produto com as lâminas economicamente ótimas	54

LISTA DE TABELAS

1	Atributos físicos do solo da área experimental.....	12
2	Caracterização química de solo realizada a diferentes profundidades.....	17
3	Recomendação de adubação e de correção de solo para tomate estaqueado com expectativa de produção de 150 toneladas por hectare	17
4	Valores de Kc estimados ao longo do ciclo do tomateiro	24
5	Médias de produtividade ($t \cdot ha^{-1}$) relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO_2	46
6	Médias do número total de frutos ($frutos \cdot m^{-2}$) relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO_2	48
7	Médias de número de frutos ($frutos \cdot m^{-2}$), conforme o tamanho selecionado relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO_2	49
8	Médias do peso de frutos de tamanho pequeno (g) relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO_2	50
9	Médias do peso dos frutos de tamanho médio (g), relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO_2	50
10	Médias da matéria seca de frutos (%) de tomate, relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO_2	50
11	Médias da eficiência no uso da água ($kg \cdot m^{-3}$) relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com enriquecimento de CO_2	51

- 12 Médias do teor de sólidos solúveis (Brix), de acidez titulável (g ácido.g polpa⁻¹), de pH, de murchamento e de perda de peso de frutos (g.dia⁻¹), relativas às diferentes lâminas de água de irrigação, sem e com o enriquecimento de CO₂ 56
- 13 Médias dos teores de macro e micronutrientes em frutos, relativas à água sem e com a aplicação de CO₂..... 56
- 14 Médias de fibra bruta (%), de proteína (%) e de extrato etéreo (%) em frutos, relativas à água sem e com a aplicação de CO₂..... 57

**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**

Autor: DENIS CESAR CARARO

Orientador: SERGIO NASCIMENTO DUARTE

RESUMO

A cultura do tomate apresenta grande importância para o Estado de São Paulo e para o Brasil, sendo também explorada sob cultivo protegido, nas quais é imprescindível a irrigação. A aplicação de quantidades adequadas de água e o uso de outras técnicas associadas melhoram a produtividade e a qualidade do produto final, além de assegurar melhores lucratividades ao empreendimento agrícola. O objetivo deste trabalho foi o de estudar o efeito da aplicação de diferentes lâminas de água sobre a cultura de tomate, com e sem a injeção de dióxido de carbono (CO₂) na água de irrigação. Para isso, foi conduzido um experimento em duas estufas de 100 m² cada, estudando-se o efeito de seis lâminas de água (40, 60, 80, 100, 120 e 140 % da lâmina requerida pela cultura) e de dois níveis de dióxido de carbono (presença e ausência de CO₂), aplicados via água. O delineamento experimental para o efeito das lâminas foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. Os tratamentos de CO₂ foram aplicados em estufas separadas, as quais dispunham de mesma disposição para os tratamentos de lâmina. A irrigação foi realizada utilizando-se o sistema de irrigação por gotejamento, sendo manejada por tanques

evaporimétricos reduzidos e por tensiômetros. A aplicação do gás foi realizada por intermédio de um cilindro de CO₂ comercial e de injetor tipo venturi, durante o tempo necessário à aplicação da lâmina mínima de água.

Os resultados obtidos revelaram que a aplicação de CO₂ via água de irrigação proporcionou aumentos de 8,7 % na produtividade, 11,5 % no peso de frutos de tamanho pequeno e 7,8 % no conteúdo de matéria seca de frutos. Entretanto não foram verificados efeitos de precocidade de produção, aumento em número de frutos, no peso de frutos de tamanho médio e na eficiência no uso da água. Análises da solução do solo indicaram que o uso do CO₂ contribuiu para a possível melhoria das condições nutricionais do tomateiro. Verificou-se também que a aplicação do gás foi viável economicamente nas condições em que o experimento foi conduzido. As lâminas de irrigação não proporcionaram efeitos significativos sobre o número total, o peso médio e o conteúdo de matéria seca de frutos. As produtividades máximas estimadas, ajustando-se os dados a funções quadráticas, foram de 78,82 t.ha⁻¹ e 86,36 t.ha⁻¹, correspondentes à aplicação de 335,2 e 333,6 mm de água para as estufas sem e com a aplicação de CO₂, respectivamente. Para uma faixa de variação do produto físico marginal de 0 a 1, as lâminas economicamente ótimas variaram de 335,2 a 322,4 mm, na ausência de CO₂, e de 333,6 a 323,8 mm, com a utilização do gás. A lâmina correspondente a 40 % da requerida pela cultura apresentou maior eficiência no uso da água (46 e 47 kg.m⁻³ para estufa sem e com a aplicação de CO₂).

**EFFECT OF DIFFERENT WATER DEPTHS IN THE PRESENCE AND
ABSENCE OF CO₂ INJECTED IN THE IRRIGATION WATER ON
GREENHOUSE TOMATOES (*Lycopersicon esculentum* Mill.)**

Author: DENIS CESAR CARARO

Adviser: Prof. Dr. SERGIO NASCIMENTO DUARTE

SUMMARY

The tomato culture presents great importance for the São Paulo State and to Brazil, being cultivated under greenhouses too, in which it is indispensable the irrigation. The application of appropriate amounts of water and use of associated techniques improve the yield and quality of the final product, and they assure better profits to the farm. The objective of this work was to study the optimization of the effect of the application of different water depths on the tomato culture with and without injection of carbon dioxide (CO₂) in the irrigation water. For that, an experiment was conducted in two greenhouses of 100 m², studying the effect of six water depths (40, 60, 80, 100, 120 and 140% of the water depth requested by the culture) and two levels of carbon dioxide (presence and absence of CO₂) applied through irrigation water. The experiment was conducted in fully randomized blocks, with four replications. The treatments of CO₂ were in separate greenhouses, which had same disposition for the water depth treatments. The irrigation was accomplished using drip irrigation system, maneuvered for evaporimeters reduced and tensiometers. The application of gas was established in

function of the necessary time to the application of the minimum water depth, using a commercial cylinder of CO₂ and an injector kind venturi.

The results shown that the application of CO₂ through irrigation water increased 8.7 % the yield, 11.5 % the weight of small fruits and 7.8 % the content of dry matter of fruit. However effects in early production, number of fruits increasing, weight of medium fruits and water use efficiency were not verified. Analyses of the solution of the soil indicated that the use of the CO₂ possibly contributed to improvement of the tomato nutrient conditions. The application of this gas was economically viable in the conditions in that the experiment was conducted. The irrigation depths did not have significant effects on the total number, medium weight, content of dry matter of fruits. The maximum yields, being adjusted the data to quadratic functions, were of 78.82 t.ha⁻¹ and 86.36 t.ha⁻¹, corresponding to the application of 335.2 and 333.6 mm of water for greenhouses without and with application of CO₂, respectively. For a range of the marginal physical product from 0 to 1, the depths economically great varied of 335.2 to 322.4 mm in absence of CO₂ and of 333.6 to 323.8 mm with use of the gas. The water depth corresponding to 40 % of the requested by the culture presented larger water use efficiency (46 and 47 kg.m⁻³ for greenhouse without and with application of CO₂).

1 INTRODUÇÃO

Há muitos anos cultivam-se plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) para fins agrícolas. Novas técnicas foram sendo descobertas pela pesquisa e incorporadas ao cultivo pelos tomaticultores ao longo dos anos, de modo a obter melhor qualidade e maior produtividade de frutos, reduzindo os custos da produção e abastecendo um mercado consumidor crescente.

Dentre as tecnologias, surgiu o uso de cultivos protegidos, os quais permitem frutos de melhor qualidade em maior quantidade, quando comparados ao cultivo em campo aberto. Acrescentam-se, ainda, a possibilidade de colheitas na entressafra e a obtenção de melhores preços, a precocidade da colheita, o controle mais eficiente de pragas e de doenças, a menor perda de adubos por lixiviação e a proteção das plantas contra adversidades climáticas. Oliveira (1995) e Medeiros (1998) estimam que, no Brasil, existe uma superfície utilizada com cultivos protegidos superior a 1000 ha, havendo uma projeção de que a área irá dobrar a cada 5 anos, com o aumento significativo no uso de estufas cobertas com plástico, sobretudo nas regiões Sudeste e Sul, visando, principalmente, ao cultivo de hortaliças.

O uso da irrigação é de extrema importância nesse tipo de cultivo e indispensável durante todo o ciclo do tomateiro. Assim como outras hortaliças, essa planta tem desenvolvimento e rendimento intensamente influenciado pelas condições de clima e de solo, sendo portanto sensível à falta ou ao excesso de água. Considerando, ainda, que a conservação da água está tornando-se um fator muito importante na maioria dos setores da agricultura, e que a mesma é um recurso cada vez mais escasso e com crescente valorização econômica, seu uso deve ser otimizado, possibilitando aumentar a utilização dos demais insumos de produção, sem maiores riscos e, assim, obter maiores

produtividades. Segundo Bernardo (1998), o manejo racional da irrigação em bases técnicas e economicamente viáveis pode ser obtido utilizando-se funções de produção para o fator água.

O cultivo de tomate representa uma das principais hortaliças no Brasil (Castellani et al., 1993), evidenciado pela produção de 2,5 milhões de toneladas, das quais 794.000 no Estado de São Paulo (o maior produtor nacional); cerca de 70 % do montante são negociados em grandes entrepostos atacadistas, como tomate de mesa (FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO, 1999). Outras técnicas, porém, devem ser pesquisadas e inseridas no cultivo de tomate, visto que a produtividade média nacional em estufas apresenta possibilidades de aumento. Também se deseja a melhoria da qualidade do produto final, em relação a aspectos bromatológicos, minerais e de pós-colheita.

A aplicação de dióxido de carbono (CO_2) via água de irrigação vem sendo testada em várias culturas com sucesso como em hortaliças, em frutíferas e em espécies ornamentais, conforme relatado por vários autores, melhorando, inclusive, a eficiência no uso da água (Hunsaker et al., 1996 e Pinto, 1997). Tem-se verificado, também, que o custo de adoção dessa prática é pequeno em relação ao custo total de produção, havendo potencialidade para o aumento da receita do produtor (Pinto, 1997).

O objetivo deste trabalho, em face da importância da tomaticultura sob cultivo protegido no Estado de São Paulo e da necessidade de otimização do uso da água, foi o de verificar o efeito da aplicação de diferentes lâminas de água nessa cultura, associada à tecnologia da injeção de dióxido de carbono no sistema de irrigação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Considerações gerais

Em cultivo protegido, a irrigação torna-se imprescindível à produção de tomate, sendo também limitantes outros fatores, relacionados ao clima, ao solo ou à própria planta. Porém, como toda cultura, o tomateiro requer um manejo de irrigação com quantidades adequadas de água, que possibilitem a máxima receita líquida. Para isso, é necessário o uso de funções de produção, as quais podem ser expressas apenas considerando a água e a produtividade como fatores variáveis.

Segundo Kirda et al. (1994), a aplicação de água em excesso ou o déficit e a falta de drenagem são os maiores problemas relacionados à irrigação em estufas. A esse fato deve-se dar atenção, procurando-se realizar o manejo racional da irrigação, visando a minimizar o consumo de energia, maximizar a eficiência de uso da água e a manter favoráveis as condições de umidade do solo e de fitossanidade das plantas (Silva & Marouelli, 1998). Além disso, é importante associar técnicas que realmente incrementem a produtividade e a qualidade de frutos e, ao mesmo tempo, possibilitem a redução de custos.

2.2 Déficit de água em tomateiro

De acordo com Locascio & Smajstrla (1996), a irrigação deve ser aplicada para minimizar o estresse hídrico e para obter a máxima produção de frutos de alta qualidade. Portanto, o fornecimento insuficiente de água à cultura não é desejável, pois torna o fruto mais ácido e prejudica o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo do tomateiro, culminando numa menor produtividade e na baixa qualidade do produto (Manzan, 1980).

Pulupol et al. (1996), conduzindo tratamentos com déficit, com potenciais matriciais de - 0,5 a -1,2 MPa, verificaram a redução no crescimento das plantas, na produtividade, no tamanho e no peso de frutos e na incidência de podridão apical. Os frutos de plantas com déficit hídrico, apresentaram maior intensidade de cor, menor conteúdo de água, alta concentração de sacarose, de glicose e de frutose, em relação aos frutos do tratamento controle. Os teores de Ca, de Mg e de K nos frutos foram semelhantes, quando se analisou a matéria seca, porém foram superiores no tratamento com déficit quando analisados em base de peso fresco.

Pascual et al. (1999), estudando a influência da irrigação e do potencial mátrico do solo em dois cultivares, verificaram que valores muito negativos de potencial matricial seguidos de flutuações na umidade do solo provocam a incidência de rachadura de frutos. Segundo Peet (1992), a rachadura é caracterizada pelo aparecimento de fendas na superfície dos frutos e sua conseqüente redução da qualidade comercial e está associada a muitos fatores ambientais, genéticos, anatômicos e culturais. Pascual et al. (1999) também verificaram uma redução significativa de produção e de peso médio de frutos no tratamento com déficit hídrico, correspondente à aplicação de 0,5 da evapotranspiração da cultura. Daker (1988) relata que a elevação brusca do teor de água no solo, durante a floração, acentua a queda de flores e ocasiona a tendência de aparecimento de podridão apical nos frutos, o qual consiste em um distúrbio fisiológico comum na cultura em questão. Segundo Lopes & Santos (1994), a podridão apical é provocada pela deficiência de cálcio nos frutos, em decorrência da insuficiência de água, da salinidade excessiva, da adubação nitrogenada excessiva e/ou de danos nas raízes, provocados por excesso de água, por doenças ou por insetos.

2.3 Excesso de água em tomateiro

Em geral, as hortaliças, seja em condições de campo, seja em ambientes protegidos, têm seu desenvolvimento intensamente influenciado pelas condições de umidade no solo. A deficiência de água, normalmente, é o fator mais limitante para a obtenção de produtividades elevadas e de produtos de boa qualidade, mas o excesso também pode ser prejudicial (Silva & Marouelli, 1998).

Além dos danos indiretos ocasionados às raízes, como relatado por Lopes & Santos (1994), Alvino et al. (1986) apontam que irrigações em abundância provocam baixos rendimentos e menor qualidade de frutos, bem como maiores custos de produção. Entretanto Camp et al. (1991) não constataram decréscimos na produção e na qualidade de frutos, em tensões observadas de 0 a 10 kPa, mas afirmam que irrigações excessivas em tomate encarecem a produção, podem ocasionar a perda de nutrientes por lixiviação e a contaminação de águas subterrâneas.

Adams (1990) também constatou pequeno efeito na produtividade, quando foram aplicados 120 % da lâmina requerida pela cultura; detectou-se, porém, deficiência em manganês nas plantas de tomate desse tratamento. Outros efeitos, como a redução do crescimento e o aparecimento de clorose, ocorrem quando as plantas são submetidas à inundação por períodos superiores a 12 horas, conforme exposto por Kramer (1951)¹ e Jackson & Campbell (1976)², citados por Wang & Arteca (1992).

Trani et al. (1997), realizando um levantamento sobre a produção de hortaliças em 210 municípios do Estado de São Paulo, verificaram que 73 % dos entrevistados (engenheiros agrônomos da assistência técnica e da extensão rural do governo) consideraram que ocorrem problemas relacionados ao excesso de água aplicado e ao encharcamento do solo, aumentando a incidência de doenças e de pragas de solo, como rizoctoniose, fusariose, bacterioses diversas e nematóides, na área cultivada.

2.4 Necessidades hídricas da cultura

O tomate, como qualquer hortaliça, pertence a um grupo de culturas muito exigentes em água, a qual representa mais de 80 % do peso da planta (Filgueira, 1972), participando em 94 % dos constituintes do fruto maduro (Manzan, 1980).

Segundo Manzan (1980) e Doorenbos & Kassam (1994), a exigência de água pela cultura de tomate, com crescimento indeterminado, do transplantio ao final da colheita (150 dias), está em torno de 600 mm, ou seja, 4 mm.dia⁻¹ em média. Necessidade hídrica

¹ KRAMER, P. Causes of injury to plants resulting from flooding of the soil. *Plant Physiology*, n.26, p.722-36, 1951.

² JACKSON, M.B.; CAMPBELL, D.J. Waterlogging and petiole epinasty in tomato: the role of ethylene and low oxygen. *New Phytology*, n.76, p.21-9, 1976.

semelhante foram obtidas por Duarte (1976), correspondendo a 522 mm durante 169 dias para plantas de tomate cultivadas em lisímetros a céu aberto e, Michelakis & Chartzoulakis (1988), aplicando 390 mm, realizaram uma pesquisa com o objetivo de determinar o consumo ótimo de água para o tomate cultivado sob casa-de-vegetação.

Quando se visa à produção do tomate de mesa, obtém-se melhor desenvolvimento da cultura com irrigações leves e freqüentes, bem distribuídas durante o período de crescimento. A demanda máxima de água geralmente ocorre durante a floração (Doorenbos & Kassam, 1994), a formação e o crescimento dos frutos (Marouelli et al., 1996).

Marouelli et al. (1996) também apresentam as tensões de água no solo que se devem promover para obter-se a produtividade máxima em diversas hortaliças; ressaltam-se, todavia, que os valores apresentados devem ser adotados com reserva, caso a irrigação seja por gotejamento. Neste caso, as culturas irrigadas apresentam melhor desempenho quando submetidas a tensões inferiores às aquelas consideradas satisfatórias para outros sistemas. Para tomate salada, o autor cita Silva & Simão (1973)³, os quais indicam valores superiores a 30 kPa, sendo que os menores entre eles se referem aos períodos críticos ao déficit de umidade do solo, em que a evapotranspiração é maior que 5 mm.dia⁻¹.

2.5 Dióxido de carbono aplicado na agricultura

Presente na atmosfera terrestre em baixas concentrações (340 ppm), este gás tem sofrido aumentos gradativos ao longo dos anos (Gammon et al., 1985) e provocado a elevação da temperatura média global da atmosfera, devido à utilização de combustíveis fósseis, à manufatura de cimento, ao desflorestamento e ao cultivo do solo pela exposição da matéria orgânica e pela subsequente oxidação do dióxido de carbono (CO₂). No entanto os excessos podem ser transferidos para a biosfera pelo aumento da produtividade, e para os oceanos, muito embora estes neutralizem somente uma fração do gás (Rebello, 1986). Assim, muitos pesquisadores desenvolveram estudos para verificar a

³ SILVA, A.M.; SIMÃO, S. Influência da umidade do solo na produção do tomateiro. **Boletim Técnico. DNOCS**, Fortaleza, v.31, n.2, p.159-93, 1973.

utilização do CO₂ na agricultura e o conseqüente efeito da sua aplicação em relação à produtividade e a outros fatores associados à planta, ao solo e ao clima.

O enriquecimento com CO₂ teve seu uso largamente difundido em culturas sob ambiente protegido, devido à melhora na produtividade, na qualidade, na maturação acelerada das plantas, tal como em flores ornamentais e em culturas hortícolas. Como fatores que possibilitaram essa difusão, devem-se citar o uso de formas relativamente puras e o monitoramento desse gás, os avanços na confecção da tubulação distribuidora, e o desenvolvimento de tecnologias para a compreensão do efeito de fatores como luz, temperatura, umidade, nutrientes do solo, doenças e pragas (Wittwer, 1970).

Outros efeitos do CO₂ interferem a nível radicular, interrompendo a ação do etileno na maturação, na abscisão, na senescência e no estresse das plantas, restabelecendo o crescimento de raízes e aumentando a resistência de plantas a estresses hídricos, conforme exposto por Lemon (1983)⁴, citado por Moore (1991).

Muitos estudos mostram que a resposta das plantas à elevação de CO₂ varia conforme a espécie, a temperatura e a nutrição mineral. Assim, diversas culturas foram avaliadas (Kretchman & Howlett, 1970; Jiao et al., 1988; Strain & Cure (1986)⁵, citados por Enoch, 1990; Ham et al., 1995; Matysiak & Nowak, 1995; Biswas et al., 1996; Centrito, 1997; Mjwara & Botha, 1997 e Jitla et al., 1997), seja em casas de vegetação, seja em câmaras de crescimento ou mesmo em campo aberto, pela adição de CO₂ via aérea. No entanto, em alguns estudos, pode ser constatada uma forma diferenciada de aplicação do gás, ou seja, via água de irrigação (D'Andria, 1990; Novero et al., 1991; Arienzo et al., 1993; Hunsaker et al., 1994 e 1996; Durão & Galvão, 1995; Storlie & Heckman, 1996; Pinto, 1997; e Alvino et al., 1998). O processo tornou-se possível após a década de 80, pelo desenvolvimento de novas tecnologias de irrigação localizada e de métodos mais eficientes de carbonatação da água (Durão & Galvão, 1995).

⁴ LEMON, E.R. CO₂ and plants. AAAS Select Symposium, 84. Westview Press, Boulder, CO, 1983, 280p.

⁵ STRAIN, B.R.; CURE, J.D. 1986. Direct effects of atmospheric CO₂ enrichment on plants and exosystems: A bibliography with abstracts. ORNL/CDIC, 13p. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA.

Segundo Nederhoff (1990), os experimentos realizados em cultivos protegidos ou campo aberto, têm mostrado diferentes respostas das plantas ao uso de água carbonatada na irrigação. A maioria dos efeitos positivos constitui-se de maior crescimento das raízes e/ou maior absorção de nutrientes. Muitos autores relatam que a diferença em produção não é significativa e que os resultados positivos encontrados não são devidos a realces na fotossíntese.

Machado et al. (1999) relatam, de forma objetiva, algumas hipóteses, na tentativa de justificar as causas dos efeitos positivos sobre a produtividade das culturas promovida pela aplicação de CO₂, via água de irrigação. Entre as hipóteses apresentadas estão: a difusão do gás do solo para o ar e a absorção do gás pelas raízes favorecendo a fotossíntese, a maior absorção, a distribuição e o acúmulo de nutrientes na planta, e agindo como um fitormônio, competindo com o etileno no ar do solo. Moore (1991) sugere que possa ocorrer uma dissolução de carbonato de cálcio no solo, pela ação de ácido carbônico (originado da reação reversível de dióxido de carbono com água).

D'Andria et al. (1990) estudaram os efeitos da água carbonatada e o uso de "mulching" em tomateiro cultivado no Colorado, Estados Unidos, e notaram incremento em produtividade de frutos comerciáveis de 7 t.ha⁻¹ no tratamento com aplicação do gás, em relação ao não coberto e sem adição de CO₂. Segundo os autores, o incremento foi principalmente devido ao maior peso dos frutos. Novero et al. (1991), também utilizando cobertura morta de polietileno e aplicação de água carbonatada, obtiveram resultados positivos, com acréscimos de 9 % na produtividade do tomateiro.

Reinert et al. (1997) obtiveram aumento de 24% na produtividade do tomateiro, com tratamentos de até 675 µmol.mol⁻¹ de CO₂, em câmaras de ambiente controlado. Pinto (1997) obteve um incremento de 25,5% na produtividade de melão, cultivado em estufa, e maior eficiência no uso da água com a aplicação de CO₂ no sistema de irrigação.

D'Andria et al. (1993) verificaram ligeiro aumento de cálcio e redução de magnésio, em frutos de tomateiros que receberam água carbonatada. Também foram notados maiores teores de cálcio, de magnésio e de zinco, e menores de cobre, de ferro e de manganês nas folhas, após a primeira colheita. ♡

Novero et al. (1991) verificaram um enriquecimento do CO₂ atmosférico durante a aplicação de água carbonatada, em tratamento com cobertura morta de polietileno, mas encontraram dificuldades em detectar o enriquecimento entre as irrigações. No solo, o incremento do gás foi significativo; houve redução de pH e uma absorção aparentemente maior de fósforo, de potássio, de cálcio, de magnésio, de zinco, de ferro, de manganês, de cobre e de boro. Neste experimento, constatou-se um incremento de 16,4 e 15,9 % na produtividade total e comercial de frutos de tomate, respectivamente, no tratamento com a aplicação de CO₂, via água de irrigação. Os autores concluem que esse fato é resultado da combinação entre os efeitos de enriquecimento limitado do CO₂ atmosférico e as modificações ambientais no solo, melhorando a absorção dos nutrientes pelas plantas.

Basile et al. (1993) encontraram decréscimo do pH do solo em cerca de 1,5 unidade, uma hora após as irrigações carbonatadas, induzindo ao aumento na mobilidade da maioria dos nutrientes, com destaque para o cálcio e o magnésio. Concluíram que a irrigação com água carbonatada tem diversas consequências agronômicas relacionadas com o incremento na absorção de certos nutrientes.

Islam et al. (1996) estudaram o efeito do enriquecimento de CO₂ de 700 a 900 ppm durante o cultivo de tomate nas características de pós-colheita e não detectaram diferenças significativas entre a firmeza e o teor de sólidos solúveis dos frutos, ocorrendo o mesmo com o conteúdo mineral, segundo trabalho desenvolvido por Gary et al. (1998).

2.6 Resposta do tomateiro a diferentes níveis de irrigação

Há um grande número de variáveis que influenciam a produtividade das culturas e as relações que afetam a quantidade e a qualidade do produto são complexas. Entretanto a produtividade pode ser expressa exclusivamente em função da água utilizada pelo cultivo, contanto que os demais fatores de produção permaneçam fixos, em nível ótimo (Frizzzone, 1998).

A resposta de qualquer cultura à aplicação de água, incluindo a precipitação natural quando em campo aberto, depende de muitos fatores, tais como o tempo de irrigação, a qualidade da água, o método de aplicação, os períodos críticos da cultura, a heterogeneidade do solo e as condições climáticas. Contudo o uso de funções de

produção permite determinar a relação entre as quantidades de água aplicada e a máxima receita líquida (Helweg, 1991).

Muitos pesquisadores vêm obtendo tais funções para diversas culturas, entre eles Heady & Pesek (1954), Alves (1980), Frizzone (1986), Clumpner & Solomon (1987)⁶ citados por Helweg (1991) e, Bertonha (1997). Tais expressões também permitem a realização de análises econômicas, considerando a máxima produtividade, a máxima eficiência no uso da água ou a maximização da receita líquida por unidade de área (Vaux & Pruitt (1983)⁷, citados por Frizzone, 1998).

Alves (1980) obteve funções de produção de três cultivares de tomate, avaliando o efeito de seis lâminas de irrigação. As maiores produtividades foram obtidas com a aplicação das lâminas correspondentes a uma faixa entre 1,0 e 1,1 vez a evaporação do tanque classe "A", para a cultivar tipo 'Salada' em campo aberto, em Viçosa (MG). Entretanto, segundo Frizzone (1998), a resposta das culturas à irrigação pode variar em diferentes solos e climas. Sentelhas & Santos (1995) e Pezzopane et al. (1995) reforçam que vários aspectos microclimáticos são alterados nos cultivos sob coberturas de plástico.

Coelho et al. (1994) estudaram o efeito de quatro regimes de irrigação em tomateiro a céu aberto, em função da evaporação do tanque classe "A", e verificaram que, para o regime 4, ou seja, para um fator de multiplicação de 0,85 em relação à evaporação do tanque, durante o período vegetativa, e 1,15 na floração e na frutificação, o início da floração atrasou 15 dias em relação aos demais regimes (0,25 e 0,55; 0,40 e 0,70; e 0,55 e 0,85 para período vegetativo e floração, respectivamente). Encontraram uma maior produtividade total para o regime 4. Entretanto, quando efetuaram a análise estatística, não constataram diferenças significativas entre os tratamentos quanto à acidez, ao teor de sólidos solúveis e à produtividade. Os autores, justificam o maior valor numérico de produtividade do regime 4 pela manutenção mais freqüente da umidade próxima à capacidade de campo. Relatam ainda que este tratamento apresentou maior

⁶ CLUMPNER, G.; SOLOMON, K. Accuracy and geographic transferability of crop water production functions. p.285-92. In: *Irrigation systems for the Twenty-First Century*, Portland, OR. American Society Civil Engineering, New York, NY. 1987.

⁷ VAUX, H.J.; PRUITT, W.O. Crop-water production functions. In: HILLEL, D. (ed.) *Advances in irrigation*. New York : Academic Press, v.2, 1983. p.61-97.

viabilidade econômica de uso, com um incremento de 17,98 % da receita líquida em relação ao regime correspondente à menor lâmina, apesar de este possuir a maior eficiência no uso da água.

Ferreira (1987) conduzindo ensaios de campo com sistema de aspersão, durante dois anos, testou 11 lâminas de água que variaram de tratamentos sem irrigação a irrigados com 130 % da evaporação do tanque classe "A". Observou uma relação linear entre o rendimento e a água aplicada. Locascio et al. (1989), relatam máximos rendimentos de tomate, quando aplicaram-se 0,5 e 1,0 vez a evaporação do tanque classe "A", para anos de normais a chuvosos e secos, respectivamente.

Smajstrla & Locascio (1996), estudando o controle de irrigação com o uso de tensiômetros, obtiveram produtividades de frutos total e comercial correspondentes ao dobro e ao triplo do tratamento não irrigado. Os mesmos autores verificaram um declínio de 8 % na produtividade de frutos comerciais quando a tensão foi de 10 para 20 kPa, e afirmaram que diferenças de aproximadamente 5 kPa na tensão matricial produzem reduções significativas na produtividade de frutos de alto valor. Michelakis & Chartzoulakis (1988) aplicaram de 310 a 610 mm de água e obtiveram de 135 a 146 t.ha⁻¹ de frutos de tomate durante o período de setembro a junho, porém não encontraram diferença significativa entre as produtividades e o peso médio dos frutos que variou de 146 a 154 g.

Santos (1986), estudando quatro níveis de irrigação para consumos em torno de 10, 30, 50 e 70 % da água disponível do solo, em condições de campo e em casa de vegetação com cobertura de polietileno, concluiu que o tratamento de 50 % de água disponível foi superior em ambas as condições de cultivo, com relação ao aumento da produção, à qualidade dos frutos e ao desenvolvimento vegetativo do tomateiro.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e características da área experimental

O experimento foi conduzido de março a outubro de 1999, em duas estufas para cultivo protegido de 20 x 5 m, cobertas com plástico, localizadas na Área Experimental de Irrigação do Departamento de Engenharia Rural, na Fazenda Areão, pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ / USP, no município de Piracicaba – SP, situado a 22°42’ de latitude Sul, 47°38’ de longitude Oeste e altitude de 540 m. Segundo a classificação climática proposta por Köeppen, o clima é do tipo CWa, ou seja, subtropical úmido com três meses mais secos (junho, julho e agosto), chuvas de verão, seca no inverno, temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e a do mês mais frio inferior a 18°C (Bezerra, 1995).

O solo da área foi caracterizado como Terra Roxa Estruturada e foi descrito por Medeiros (1998). Alguns de seus atributos físicos podem ser verificados na Tabela 1, cujos dados foram obtidos a partir de amostras de solo, coletadas ao acaso.

Tabela 1 - Atributos físicos do solo da área experimental

Estufa	Profundidade cm	Granulometria			Densidade global do solo g.cm ⁻³
		Areia %	Silte %	Argila %	
Sem CO ₂	0-20	24,05	19,46	56,49	1,24
	20-40	26,35	15,37	58,28	1,47
Com CO ₂	0-20	26,65	16,84	56,51	1,32
	20-40	25,97	15,96	58,07	1,42

A curva de retenção de água no solo, apresentada na Figura 1, foi obtida em laboratório a partir de amostra de solo indeformada retirada a 20 cm de profundidade,

utilizando-se mesas de tensão e membrana de pressão, segundo recomendações de Richards (1960).

Figura 1 - Curva de retenção de água do solo da área experimental.

A curva de retenção foi ajustada ao modelo proposto por Van Genuchten (1980), o qual é dado pela equação 1:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha \cdot \Psi)^n)^m} \quad (1)$$

em que

- θ = umidade, $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$;
- θ_r = umidade residual, $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$;
- θ_s = umidade de saturação, $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$;
- α = parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, cm^{-1} ;
- n, m = Parâmetros da equação, adimensionais; e
- Ψ = Potencial matricial, cm.

Os parâmetros de ajuste foram: $\theta_s = 0,5676$, $\theta_r = 0,1906$, $\alpha = 0,2271$, $n = 1189$ e $m = 0,1586$.

3.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, formado por 12 tratamentos divididos nas duas estufas, com quatro repetições por estufa, correspondendo aos quatro blocos. A disposição no campo pode ser visualizada por um diagrama esquemático, apresentado na Figura 2, o qual mostra apenas uma das áreas. Utilizou-se o mesmo delineamento para ambas as estufas.

Os 12 tratamentos consistiram na combinação de seis lâminas totais de água (L_i) localizadas nas parcelas que corresponderam a $L1 = 40 \%$, $L2 = 60 \%$, $L3 = 80 \%$, $L4 = 100\%$, $L5 = 120 \%$ e $L6 = 140 \%$ da lâmina requerida pela cultura, e de dois níveis de dióxido de carbono nas estufas sem (estufa 1) e com a aplicação do gás (estufa 2).

Cada parcela, conforme visualizado na Figura 2, apresentou um total de seis plantas, incluindo quatro úteis numa área de $1,6\text{m}^2$ ($0,8 \times 2 \text{ m}$). Assim, para o experimento, foram necessários $76,8 \text{ m}^2$ de área útil.

3.3 Descrição das estruturas experimentais

As estufas utilizadas foram do tipo arco de $20 \times 5 \times 3 \text{ m}$ e altura central de $4,5 \text{ m}$, orientadas leste-oeste, cobertas por polietileno de baixa densidade (PEbd) transparente com 150μ de espessura e três anos de uso. As laterais foram constituídas por rodapé de PEbd, com $0,5 \text{ m}$ de altura e telas anti-afídio, sendo estas também utilizadas nas portas de acesso da antecâmara. A Figura 3 apresenta essas estruturas.

Estruturas adicionais foram necessárias para o cultivo do tomateiro, e constituíram-se da instalação de um sistema de tutoramento e da cobertura do solo (“mulching”).

A cobertura do solo foi de polietileno preto com 200μ de espessura, e o sistema de tutoramento, em cada estufa, compreendeu a instalação de 12 mourões de eucalipto, de 20 cm de diâmetro por $2,2 \text{ m}$ de comprimento, à profundidade de 55 cm ; 120 m de arame de aço galvanizado “14”, distribuído em seis linhas de plantio, a $1,9 \text{ m}$ de altura, para a sustentação das plantas; seis esticadores; 216 arames de sustentação e 216 fitilhos plásticos, de dois metros, para a condução das plantas, apresentados na Figura 4.

Figura 2 - Diagrama esquemático do delineamento experimental e do sistema de irrigação utilizado.

Figura 3 - Estufas utilizadas no experimento.

Figura 4 - Estruturas de tutoramento de plantas de tomate utilizadas durante o cultivo.

Após certo período de cultivo e com a finalidade de proporcionar uma melhor sustentação das plantas, instalou-se um segundo arame 35 cm acima do mencionado inicialmente. Ripas de madeira de 1,9 m de altura, foram instaladas sobre camalhões de solo a cada 2,5 m, com a mesma finalidade.

As demais estruturas compreenderam o sistema de irrigação e o sistema de aplicação de dióxido de carbono (CO_2), os quais serão mais bem explanados posteriormente.

3.4 Práticas adotadas antes do transplantio

Realizaram-se a limpeza da área e a retirada das amostras compostas de solo, com estrutura deformada, ao acaso, para análise química, entre os dias 13 e 23 de fevereiro. A amostragem foi executada às profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm, requerendo o prévio umedecimento do solo e a utilização de trado tipo sonda. O solo amostrado foi seco em estufa, à temperatura de 60°C por dois dias, moído e peneirado a 2 mm. Posteriormente, as amostras foram submetidas às análises químicas e à recomendação de correção e adubação no Laboratório de Química do Solo do Departamento de Solos, Geologia e Fertilizantes da ESALQ. Os resultados são apresentadas na Tabela 2 e a recomendação de correção e de adubação na Tabela 3.

Tabela 2 - Caracterização química de solo realizada a diferentes profundidades

Estufa	Prof. cm	pH	M.O.	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V
		CaCl_2	g.dm^{-3}	mg.dm^{-3}	mmolc.dm^{-3}						%
Sem CO_2	0-20	5,7	31	63	8,3	72	36	28	116,3	144,3	81
	20-40	5,2	25	25	4,3	48	24	34	76,3	110,3	69
Com CO_2	0-20	5,5	32	13	3,4	39	21	31	63,3	94,3	67
	20-40	5,1	24	7	2,4	38	20	36	59,8	95,9	62

Tabela 3 - Recomendação de adubação e de correção de solo para tomate estaqueado com expectativa de produção de 150 toneladas por hectare

Estufa	Profundidade cm	Calagem t.ha^{-1}	Adubação mineral	
			Pré-plantio (NPKS)* kg.ha^{-1}	Cobertura (NK)** kg.ha^{-1}
Sem CO_2	0-20	dispensada	60 + 400 + 100 + 30	50 + 36
Com CO_2	0-20	2,5	60 + 800 + 100 + 30	50 + 36

* Nitrogênio, fósforo, potássio e enxofre

** Nitrogênio e potássio

A recomendação de adubação e de calagem indicada para a estufa com CO₂ foi adotada para ambas as estufas.

A correção do solo foi realizada em aplicação única a lanço de calcário, com PRNT de 90,6 %, em 16 de março. O destorroamento e a incorporação do corretivo foi realizado em seguida pelo uso de enxada rotativa à profundidade de 20 cm.

Em 15 de maio, marcaram-se as linhas de transplântio e abriram-se sulcos, adubando-os à profundidade de 10 cm. No local dos sulcos, foram confeccionados camalhões, elevando-se o solo a 10 cm de altura.

Seguindo-se a maior recomendação, apresentada por estufa na Tabela 3, aplicaram-se uma mistura de 13 kg da fórmula 4-14-8, 39 kg de superfosfato simples e 222 g de uréia para cada estufa, procurando-se uniformizar o solo de ambas as estufas. As adubações de cobertura foram realizadas utilizando-se fertirrigação, conforme mencionado posteriormente.

Durante os dias 12 e 13 abril efetuou-se a instalação do sistema de tutoramento.

Realizaram-se aplicações preventivas de brometo de metila nos dias 20 de março e 29 de abril, após ter sido constatada a infestação de nematóide-das-galhas (*Meloidogyne spp.*) em solo próximo ao da área experimental. Julgou-se que tais aplicações eram necessárias, tendo em vista a sensibilidade do tomateiro a este patógeno de solo.

Durante o período do pré-transplântio, efetuaram-se a montagem do sistema de irrigação, os ensaios de uniformidade, a calibração de manômetro, a instalação do sistema de irrigação em campo e a eliminação de vazamentos de água, utilizando-se tiras de borracha e arame.

As linhas laterais gotejadoras foram dispostas no centro dos camalhões e fixadas na extremidade final por ferro de construção retorcido. Detalhes quanto ao sistema de irrigação serão explanados em capítulo a parte.

Como última prática, anterior ao transplântio, realizaram-se a colocação, de polietileno preto de 200 µ de espessura, como “mulching” e o corte do mesmo para a colocação das mudas, distantes do emissor em aproximadamente 7 cm.

3.5 Práticas culturais e cultivar utilizados

Utilizaram-se mudas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), cultivar Débora-Plus, produzidas em bandejas de polipropileno sob cultivo protegido. O transplântio das mudas foi realizado no dia 25 de maio.

Durante o transplântio, foram escolhidas as mudas que apresentavam melhor aspecto de sanidade e maior uniformidade, com aproximadamente 17 cm de altura e 4-5 folhas definitivas, sendo as demais mantidas na área até o completo estabelecimento das transplantadas.

Durante o desenvolvimento da cultura, executou-se o controle fitossanitário químico-cultural de insetos e de doenças fúngicas, conforme recomendado por Lopes & Santos (1994) e Andrei (1996). Como medidas preventivas, aplicaram-se técnicas de assepsia em tesoura a cada planta desbrotada, utilizando-se solução de álcool-iodado 0,18%, e aplicações semanais de fungicida oxicleto de cobre e inseticida imidacloprid.

Como medida curativa, efetuaram-se aplicações de metalaxil + mancozeb, procimidone e cymoxanil + maneb + sulfato de zinco, para controle de requeima (*Phytophthora infestans* L.). O uso do polietileno preto, como cobertura de solo, permitiu o controle de plantas daninhas. Pulverizações semanais de cloreto de cálcio (0,6 %), juntamente com o oxicleto de cobre, tiveram a finalidade de prevenir o aparecimento de podridão apical nos frutos.

Durante todo o crescimento das plantas foram necessários o tutoramento das mesmas em um fitilho plástico vertical, iniciado 35 dias após o transplântio (DPT), e constantes desbrotas de ramos axiais a partir do 24º DPT, com a finalidade de condução em haste única, facilitando as práticas de pulverização, de manejo de registros e de trânsito dentro da estufa.

No 75º DPT instalou-se o segundo arame e realizou-se o desponte acima da oitava inflorescência, conforme sugerido por Sganzerla (1995), no 82º DPT.

No 130º DPT, executou-se a retirada de folhas secas, como medida fitossanitária preventiva, e com a intenção de melhorar o trânsito entre as linhas de plantas.

Dados de temperatura e de umidade relativa do ar foram obtidos a partir de leituras realizadas em um conjunto psicrométrico (termoigrômetro) constituído por

termômetros de bulbo seco e úmido, localizado a 1,9 m de altura e em posição central nas estufas. As leituras foram efetuadas diariamente, próximas às 12 horas e iniciadas no 31° DPT.

Foram realizadas, ao todo, 17 colheitas, em média duas vezes por semana, estendendo-se no período entre o 93° e o 157° DPT. Elas consistiram na retirada de frutos em estágio de mudança de coloração. Dos frutos colhidos, efetuaram-se a classificação e a pesagem por tamanho, verificando-se a ocorrência de frutos doentes ou mal formados, conforme explanado no item “Produção e seus componentes”. O experimento foi finalizado no dia 29 de outubro, ou seja, no 158° DPT, com o corte das plantas.

3.6 Condutividade elétrica e nutrientes da solução do solo

Durante o experimento, foram coletadas soluções do solo, ao longo do ciclo da cultura, utilizando-se quatro extratores por estufa, feitos com cápsula porosa, conforme Silva et al. (1999), localizados junto aos tensiômetros referentes ao tratamento com a aplicação de 100 % da lâmina requerida e instalados a 20 cm de profundidade. A extração foi realizada uma vez a cada semana e em dia posterior à fertirrigação. As soluções foram armazenadas em refrigerador e submetidas à análise de condutividade elétrica e de teores de cálcio, de nitrato, de potássio e de pH, com a finalidade de auxiliar na interpretação dos efeitos referentes à aplicação de CO₂.

3.7 Sistema de irrigação

Dentre as diversas práticas adotadas durante o ciclo do tomateiro, a aplicação de água necessitou de uma estrutura experimental própria. O sistema de irrigação localizada foi dimensionado, montado, testado e instalado para essa finalidade. Muita atenção foi destinada ao sistema, de modo a assegurar a correta aplicação das lâminas nas parcelas correspondentes a cada tratamento.

Na montagem, elaborou-se um esquema que pode ser visualizado em forma de diagrama na Figura 2. Cortaram-se tubulações e conectaram-se registros às mesmas, realizaram-se orifícios e inseriram-se emissores nas linhas gotejadoras. Para isso, utilizaram-se:

- Um reservatório de cimento-amianto com capacidade para 1000 L;
- Emissores do tipo gotejadores autocompensantes marca CARBORUNDUM, com vazão de $2,4 \text{ L.h}^{-1}$ e pressão de serviço variando de 60 a 350 kPa, espaçados a cada 50 cm;
- Tubulações da marca CARBORUNDUM, feitas de polietileno preto, com diâmetro interno de 13 e 20 mm, e comprimento de 3 e 18 m, para linhas de irrigação e de derivação, respectivamente;
- Manômetro metálico, com precisão de 20 kPa, calibrado por manômetro de peso morto, com precisão de 0,1%;
- Bomba d'água marca KSB, linha Hydrobloc, modelo P1000, vazão máxima de $2,4 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, altura manométrica de até 900 kPa, motor monofásico de 110 V, potência de 1 hp e rotação de 3450 rpm e
- Tubulações de PVC de 1" e acessórios, como tês, uniões e registros de gaveta para o retorno da água ao reservatório, e de esfera para o controle da irrigação na entrada de cada parcela.

Considerando-se apenas uma das estufas e o fato de o sistema composto por tubulações de polietileno preto ser o mesmo para ambas, foram necessários 216 emissores, 24 linhas de irrigação para os tratamentos, 2 linhas de irrigação para as bordaduras e 27 registros tipo esfera. Dentre estes, um registro foi utilizado como geral, dois para as bordaduras laterais e 24 para as demais parcelas.

O teste de uniformidade do sistema de irrigação foi realizado em laboratório, anteriormente à montagem do sistema em campo, e consistiu na realização de leituras do volume aplicado em cada gotejador, durante o tempo de um minuto, sob a pressão, ao longo das linhas de irrigação, de 200 kPa, a mesma utilizada em campo. Dessa forma, calculou-se a vazão dos gotejadores e identificaram-se quais emissores apresentavam variação maior do que 10 %, em relação à apresentada pelo fabricante. Os gotejadores fora da faixa tolerada foram substituídos por outros, sendo estes também submetidos ao mesmo teste.

A calibração do manômetro metálico consistiu em verificar-se a posição exata do marcador quando submetido à pressão de trabalho de 200 kPa, permitindo sua posterior operação em campo.

3.8 Manejo da irrigação

Durante o período anterior ao transplântio, foi necessária a manutenção diária da umidade nas bandejas, utilizando-se mangueira. A aplicação cessava após constatada a ocorrência de gotejamento na parte inferior da bandeja.

Com a finalidade de promover o desenvolvimento de raízes, não foram realizadas irrigações durante o período entre o 10º e o 15º DPT. Do 1º ao 9º DPT e do 16º ao 28º DPT, foram aplicadas lâminas uniformes nos tratamentos que, somadas, totalizaram 22 mm, evitando-se os sintomas de estresse pós-transplântio. No dia 22 de junho, ou seja no 29º DPT, iniciaram-se a individualização dos tratamentos, o controle e o manejo da irrigação por tanque evaporimétrico e, posteriormente, o uso de tensiômetros. O manejo da irrigação foi realizado de forma independente, para cada uma das estufas.

3.8.1 Manejo utilizando tanque evaporimétrico

Inicialmente, utilizou-se o método do balanço de água do solo, baseado na reposição diária da água evapotranspirada pela cultura, realizando-se leituras da lâmina evaporada em dois tanques evaporimétricos reduzidos, de 0,6 m de diâmetro, um em cada estufa, como apresentado na Figura 5. Utilizou-se de um micrômetro de gancho, com sensibilidade para medir variações de até 0,02 mm. A lâmina foi convertida para a evaporação do tanque “Classe A”, pela equação 2, obtida por Medeiros et al. (1997).

Figura 5 - Localização do tanque evaporimétrico reduzido.

$$ECA = 0,88.Ev - 0,33 \quad (2)$$

em que

ECA = Evaporação referente ao tanque classe “A”, dentro da estufa, mm e

Ev = Evaporação do tanque evaporimétrico reduzido, dentro da estufa, mm.

Para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc), foram utilizados os valores de coeficiente da cultura (Kc) de acordo com o estágio fenológico, conforme recomendados por Doorembos & Kassam (1994) para o tomateiro; eles são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de Kc estimados ao longo do ciclo do tomateiro

Hortaliça	Estádios de desenvolvimento			
	I	II	III	IV
Tomate	0,40-0,50	0,70-0,80	1,05-1,25	0,60-0,65

O valor do coeficiente do evaporímetro (Kp) foi adotado segundo o coeficiente referente ao tanque classe “A” (Doorembos & Pruitt, 1977), em função da umidade do ar, da velocidade do vento e da cobertura do solo, do tipo solo nu. O fator de redução (Kr) foi calculado pela equação 3, citada por Pizarro (1986):

$$K_r = 0,1 + GC \quad (3)$$

em que

Kr = Fator de redução, no máximo igual a 1, adimensional e
GC = Fração de área sombreada, decimal.

A equação 3 desconsidera a evaporação do solo, fato pelo qual foi escolhida, visto que se utilizou “mulching” plástico sobre toda a superfície do solo.

A evapotranspiração foi calculada diariamente pela equação 4, e ajustada conforme o tratamento, ou seja, multiplicando-se por 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 e 1,4:

$$ET_c = LR = K_c \cdot K_p \cdot K_r \cdot ECA \quad (4)$$

em que

Etc = Evapotranspiração da cultura, mm.dia⁻¹;
LR = Lâmina requerida, mm;
Kc = Coeficiente da cultura segundo o estágio fenológico, adimensional;
Kp = Coeficiente do tanque, adimensional;
Kr = Fator de redução, adimensional e
ECA = Evaporação do tanque classe “A”, mm.

3.8.2 Manejo utilizando tensiômetros

Posteriormente ao 51º DPT, os tanques evaporimétricos reduzidos, ficaram sombreados, o que os tornou inadequados para a indicação da quantidade de água consumida pelas plantas. O fato conduziu à decisão de continuar o controle por tensiometria. Assim, confeccionaram-se e instalaram-se tensiômetros a 20 cm de profundidade, nos tratamentos de aplicação de 100 % da lâmina requerida. Outros

tensiômetros foram instalados, nos tratamentos de 40 % e 120 %, e à profundidade de 20 e 45 cm, com a finalidade de auxiliar na análise da umidade do solo e no manejo da irrigação ao longo do ciclo da cultura. Para o cálculo da lâmina requerida, utilizou-se a equação 5:

$$LR = \frac{(\theta_{CC} - \theta_a) \cdot FM \cdot 1000}{S2} \quad (5)$$

em que

- θ_{CC} = umidade na capacidade de campo, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;
- θ_a = umidade atual, $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$;
- FM = largura da faixa de solo molhada na capacidade de campo, m e
- S2 = espaçamento entre linhas laterais, m.

Para o cálculo da umidade na capacidade de campo e atual, utilizou-se a fórmula de Van Genuchten, apresentada na equação 1.

A largura da faixa molhada e a tensão na capacidade de campo foram constatadas na manhã seguinte a uma irrigação realizada à noite, retirando-se parte da cobertura plástica sobre o tratamento L4, medindo-se a largura da faixa molhada e efetuando-se a leitura do tensiômetro da mesma parcela.

De forma a facilitar a operação da irrigação em campo, confeccionou-se uma planilha, relacionando a tensão média, lida nos tratamentos L4 em milibar, com o tempo de irrigação em minutos, utilizado para cada tratamento de lâmina de irrigação. Nos dias nos quais a tensão matricial média tornava-se menor ou igual à tensão na capacidade de campo (100mb ou 10kPa para este solo), não eram realizadas irrigações.

3.8.3 Tempo de irrigação e uso dos registros

O controle da irrigação foi realizado a partir do tempo de irrigação (T_i) correspondente a cada tratamento, calculado pela equação 6:

$$T_i = \frac{LB \cdot S1 \cdot S2}{q} \quad (6)$$

em que

- T_i = tempo de irrigação, horas e
- LB = lâmina bruta, mm;
- S1 = espaçamento entre gotejadores ao longo da linha lateral, m; e
- Q = vazão do gotejador, $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$.

A lâmina bruta foi calculada conforme a equação 7, considerando-se a eficiência de irrigação igual a 90 %:

$$LB = \frac{LR}{Ei} \quad (7)$$

em que

Ei = Eficiência de irrigação do sistema, adimensional.

A irrigação foi inteiramente individualizada em cada tratamento, efetuando-se o manejo por registros de esfera instalados no início de cada parcela, conforme mostra a Figura 2. Assim, à medida que terminava o tempo relativo a um determinado tratamento, fechavam-se as quatro parcelas correspondentes e abriam-se outras, ou seja, inicialmente abriam-se os registros correspondentes ao tratamento L1, fechando-os após finalizado o T1; abriam-se os registros correspondentes ao tratamento L2, fechando-os após o T2, e assim por diante, até o tratamento L6. Esse controle foi idêntico para as 2 estufas, sendo cada estufa irrigada separadamente. Para as bordaduras laterais, procurou-se aplicar a lâmina correspondente ao tratamento L4.

Independentemente da forma de controle de irrigação, efetuaram-se leituras da lâmina evaporada a partir do 29º DPT, ou seja, após a instalação dos tanques evapormétricos reduzidos.

A irrigação foi suspensa no dia 28 de outubro, juntamente com as demais práticas culturais, finalizando-se o experimento de campo no dia 29 de outubro, ou seja, no 158º DPT.

3.8.4 Turno de rega

As irrigações tiveram frequência média de 1,3 e 1,5 dia para as estufas sem e com a aplicação de gás, respectivamente, e foram realizadas durante o período entre as 9 e as 14 horas.

3.9 Fertirrigação

A adubação de cobertura foi realizada por fertirrigações semanais, a partir da abertura das primeiras inflorescências, e segundo a marcha de absorção de nutrientes apresentada por Ferreira et al. (1993). Utilizou-se uma bomba injetora da marca T.M.B., modelo “WP-10”, com capacidade de injeção de 8 a 60 L.h⁻¹ e pressão de trabalho de 140 a 700 kPa, além de acessórios.

A aplicação consistiu em injetar uma solução concentrada de 2 L diluída em balde graduado, por tratamento, correspondendo a 52,2 g de nitrato de cálcio e a 3,22 g de cloreto de potássio até 140 dias, e a 52,2 g de nitrato de cálcio e a 6,4 g de cloreto de potássio de 140 até 158 dias após o transplântio. O tempo de injeção correspondeu a 80 % do tempo mínimo de irrigação, para permitir a lavagem do sistema e para prevenir o entupimento dos emissores. A injeção foi realizada em tratamentos de forma independente, procurando-se adicionar o fertilizante a uma mesma profundidade.

3.10 Aplicação do dióxido de carbono

O dióxido de carbono (CO₂) foi aplicado do 53° ao 151° DPT, pelo uso de cilindro com capacidade de 25 kg de gás, de válvula reguladora de pressão com precisão de 1000 kPa e de injetor tipo venturi, localizados no interior da estufa 2 e no início do sistema de irrigação.

A quantificação do CO₂ foi realizada medindo-se a vazão do gás em campo pelo método volumétrico, ou seja, utilizando-se um balde preenchido com água e submerso num recipiente maior, também com água; a mangueira do cilindro de gás foi desconectada do mesmo e inserida sob o balde, como apresentado na Figura 6, e então, abriu-se o registro do gás e verificou-se o tempo para atingir um determinado volume de água deslocado.

A quantidade de gás aplicada em cada irrigação variou em função do tempo de irrigação relativo à lâmina mínima, correspondendo a 80 % do mesmo. Assim, o tempo total de aplicação de gás correspondeu à soma dos tempos registrados a cada dia. Ao final do ciclo, pesou-se a quantidade de gás restante e efetuou-se o cálculo da quantidade total de CO₂ aplicado durante o ciclo da cultura.

Figura 6 - Prática de medição adotada para a quantificação do fluxo de gás aplicado.

3.11 Observações fenológicas

Após o transplântio das mudas, realizaram-se 5 medições do número das flores fechadas e das totalmente abertas, do número de frutos, do diâmetro de haste e da altura em quatro plantas por tratamento, correspondente a cada repetição. Desses valores, puderam-se analisar a abertura de flores, a formação de frutos e o crescimento vegetativo e, em consequência, a duração do ciclo e o início de estádios fenológicos.

3.12 Observações fisiológicas

Realizaram-se leituras de fotossíntese, de condutância estomática, da concentração de CO_2 no ar, da transpiração, da temperatura da folha e da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), utilizando-se um analisador, marca LI-COR, modelo LI-6400, no 144° e 150° DPT. As leituras foram efetuadas em local centralizado no interior da estufa com a aplicação de gás.

3.13 Produção e seus componentes

Foram avaliados a produtividade, o número total e o peso médio dos frutos a cada colheita, nos diferentes tratamentos. Tais avaliações também foram realizadas separadamente para cada tamanho de fruto. Como auxílio às avaliações, obteve-se percentagem de matéria seca dos frutos de três colheitas, secando-os em estufa com circulação de ar forçada, a 60°C, durante cinco dias.

Os frutos foram classificados conforme normas de classificação propostas pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento, junto ao CEAGESP, para frutos do grupo oblongo, compreendendo os calibres pequeno (<50 mm), médio (50 a 60 mm) e grande (>60 mm). Para tanto, desenvolveu-se um equipamento selecionador, apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Equipamento selecionador de frutos.

3.14 Eficiência no uso da água (E U A)

Analisou-se a EUA nos diferentes tratamentos, ou seja, calculou-se a relação entre a produtividade de tomate e a lâmina total de água aplicada, correspondente ao somatório das lâminas brutas diárias (Frizzzone, 1986). A equação 8 representa essa relação:

$$EUA = \frac{Y}{10.W} \quad (8)$$

em que

EUA = Eficiência no uso da água, kg.m^{-3} ;
 Y = Produção de tomate, kg.ha^{-1} e
 W = lâmina total de água aplicada, mm.

3.15 Função de Produção

A produção de uma cultura depende de muitas variáveis. Do ponto de vista da irrigação, a produção pode ser expressa mediante uma função na forma da equação 9, denominada função de produção água-cultura:

$$Y = \sum_{i=0}^n R_i X^i \quad (9)$$

em que

Y = Produção da cultura, kg.ha^{-1} , ou outro componente da produção;
 N = Grau do polinômio, adimensional;
 R = Constantes, $\text{kg.ha}^{-1}.\text{mm}^{-i}$ e
 X = Fator variável que afeta a produção (água), mm.

As funções de produção são relações empíricas, geralmente obtidas mediante uma análise de regressão entre uma variável dependente e uma, ou muitas, variáveis independentes, seguindo-se um determinado modelo que pretende representar um sistema de produção.

Utilizaram-se regressões quadráticas para a produtividade da cultura do tomate, considerando a água como fator variável, estabelecendo-se curvas de resposta de produtividade, com e sem a injeção de CO_2 , na forma apresentada na equação 10:

$$\bar{Y}(W) = a + b.W + c.W^2 \quad (10)$$

em que

$\bar{Y}(W)$ = Estimativa da produção de tomates, kg.ha^{-1} ;
 a, b e c = Parâmetros da equação, adimensional e
 W = Lâmina total de água aplicada, mm.

3.15.1 Análise econômica e maximização da receita líquida

A partir das funções de produção, foram realizadas as considerações econômicas sobre a irrigação para um determinado sistema de produção, utilizando-se o conceito de lâmina ótima econômica, introduzido por Peri et al. (1979), e utilizado por Frizzone (1986) e Bertonha (1997). Segundo tal conceito, a lâmina a ser aplicada deve-se determinar em função da máxima receita líquida, obtida com um dado fator (água), a qual é definida, no caso da função água-cultura, como mostra a equação 11:

$$RL(W) = \bar{Y}(W).Py - (10.W.Pw + C) \quad (11)$$

em que

$$\begin{aligned} RL(W) &= \text{Receita líquida, R\$.ha}^{-1}; \\ Py &= \text{Preço do tomate pago ao produtor, R\$.kg}^{-1}; \\ Pw &= \text{Preço do volume unitário da água, kg.m}^{-3} \text{ e} \\ C &= \text{Despesas fixas, R\$.ha}^{-1}. \end{aligned}$$

Para a obtenção de uma máxima receita líquida, utilizou-se o produto físico marginal da água, o qual representa o acréscimo na produtividade, resultante do uso de uma unidade a mais do fator água, o qual pode ser obtido pela derivada da função de produção e ser igual à relação do preço da água e do produto (tomate), conforme apresentado na equação 12, demonstrada por Frizzone (1986):

$$\frac{d\bar{Y}}{dW} = \frac{b + 2.c.W}{10} = \frac{Pw}{Py} \quad (12)$$

em que

$$\begin{aligned} d\bar{Y}/dW &= \text{Derivada primeira da função de produção em relação à água, kg.m}^{-3} \text{ e} \\ Pw/Py &= \text{Relação entre preço do volume unitário de água e do tomate, kg.m}^{-3}. \end{aligned}$$

Considerou-se uma variação de 0 a 1 na relação Pw/Py , também utilizada por Frizzone (1986), a qual permitiu analisar a lâmina ótima econômica e sua correspondente produtividade, dados o preço do metro cúbico de água e do quilograma de frutos de tomate.

Em seguida verificou-se a viabilidade da adoção da técnica de aplicação de CO_2 na cultura de tomate para as condições em que o experimento foi conduzido, considerando-se o incremento em receita gerado e as despesas com a mesma. Para isso, utilizou-se a média de 5 anos de preço pago ao produtor, por quilograma de tomate, nos

meses em que ocorreram as colheitas, conforme apresentado por FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO (2000); utilizaram-se também os custos do CO₂.

3.16 Análise qualitativa de frutos

Realizaram-se análises de pós-colheita, avaliando-se os teores de sólidos solúveis (TSS) por refratometria, o pH, a acidez titulável por hidróxido de sódio, o murchamento por uma escala de notas e a perda de peso diária em frutos retirados da 10ª colheita. A escala de notas para o murchamento foi subjetiva variando de 0 a 6, ou seja, sem sintomas até com murchamento muito intenso.

Realizaram-se análises de macro e de micronutrientes, conforme a metodologia apresentada por Malavolta et al. (1997), e dos valores de fibra bruta, de extrato etéreo e de proteína, conforme AOAC (1975).

3.17 Análise estatística

Realizou-se a análise estatística de forma independente, visto não ter sido constatada a interação entre os tratamentos de aplicação de água carbonatada e as lâminas de água. Para isso, utilizaram-se testes não paramétricos, ou seja, Kruskal-Wallis, para a análise entre lâminas, e Wilcoxon entre estufas, ambos a 5 % de significância.

A falta de casualização entre os tratamentos de gás, devido à não utilização de repetições para os mesmos, pela dificuldade em se conduzir o experimento em um número mínimo de quatro estufas (2 para cada nível de CO₂), e a falta de normalidade entre os dados justificam a utilização da análise estatística não-paramétrica, o que é confirmado por Campos (1979). Segundo o autor, os testes não-paramétricos são mais eficientes do que os demais, quando os dados da população não têm distribuição normal.

O teste de Kruskal-Wallis tem por finalidade verificar se “k” amostras independentes são provenientes de uma mesma população ou de populações idênticas, ou têm origem em populações distintas. Quando existem apenas duas amostras independentes, então o teste tem a denominação de teste da soma das ordens, ou bilateral de Wilcoxon. O teste verifica se existe superioridade de um tratamento em relação ao outro, quanto à natureza dos dados levantados. O primeiro teste parte da pressuposição de

que são todas independentes, todas as observações são provenientes da mesma população em uma dada amostra e as “k” populações são semelhantes e contínuas. O teste de Wilcoxon, por sua vez, considera as duas amostras como casualizadas e independentes e as variáveis X_i e Y_j das populações X e Y como contínuas (Campos, 1979).

Os fatores analisados foram: produtividade, número total, peso médio e percentagem de matéria seca dos frutos e eficiência no uso da água.

Para os valores de pH, de condutividade elétrica, e teores de cálcio, de nitrato e de potássio, usou-se a análise de variância utilizando a distribuição de F e teste de comparação de médias por Tukey a 5 % de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Duração do ciclo, estádios fenológicos e efeito da temperatura

Cultivou-se o tomateiro durante 158 dias, após os 30 dias iniciais relativos à formação da muda. Os estádios fenológicos de florescimento, de frutificação e de colheita iniciaram-se 34, 42 e 93 dias após o transplântio (DPT), respectivamente.

Fatores relacionados possivelmente a menores temperaturas do ar, ocorridas no período de inverno, nos meses de maio a agosto, tendem a limitar o desenvolvimento do tomateiro, cuja temperatura ótima do ar, para crescimento, situa-se próxima a 25°C (Minami, 1989). Dados externos, obtidos em estação meteorológica na área da ESALQ, indicaram médias de 18,3°C, 17,3°C, 19,2°C e 19,1°C em maio, junho, julho e agosto, respectivamente. Tais valores ressaltam a importância do uso de ambiente protegido, no cultivo de tomateiro, durante o período, para o Estado de São Paulo, visto que as temperaturas medidas dentro das estufas são maiores (Sentelhas et al., 1995). Na análise da Figura 8, verifica-se que a temperatura do ar, dentro das estufas, situou-se próxima às condições ideais e que, apesar de não se terem registrado dados antes dos primeiros 31 DPT, confirma-se uma condição favorável ao cultivo do tomateiro, conduzido na área experimental.

4.2 Aplicação de CO₂ via água de irrigação

Os níveis de CO₂, aplicados durante o ciclo completo da cultura, foram: CD₀ = 0 g.L⁻¹ e CD₁ = 7,73 g.L⁻¹. O peso do gás aplicado totalizou 25 kg para uma área de 100 m², ao final do experimento. A concentração utilizada foi próxima à mencionada por Nederhoff (1990), que cita valores de até 5,5 g.L⁻¹.

Figura 8 - Temperatura e umidade relativa do ar obtidas por termogrômetro.

Verificou-se que os aumentos da produção constatados, podem ter ocorrido devido ao efeito do CO_2 sobre o equilíbrio químico do solo. O fato pode ser constatado devido uma tendência de incremento, embora não significativo, na condutividade elétrica e no teor de alguns nutrientes na solução do solo, avaliados utilizando-se extratores de cápsula, conforme apresentado nas Figuras 9, 10 e 11.

Figura 9 - Condutividade elétrica média na solução do solo coletada por extrator com cápsula porosa.

Figura 10 - Teores médios de cálcio na solução do solo, ao longo do ciclo da cultura.

Figura 11 - Teores médios de nitrato na solução do solo, ao longo do ciclo da cultura.

Verifica-se que os teores de cálcio seguiram a tendência da condutividade elétrica, o que é explicado pela possível solubilização de compostos de cálcio, por ação do ácido carbônico, durante a irrigação. Tal hipótese pode ser considerada, pois Novero et al.(1991) constataram redução do pH, durante a irrigação com água carbonatada, e Moore (1991) demonstrou a possibilidade de o ácido carbônico reagir com carbonato de cálcio no solo, disponibilizando o cálcio em uma forma mais solúvel e prontamente disponível para a planta. Entretanto, também, não foram detectadas diferenças estatísticas entre os valores de pH na solução do solo, possivelmente devido à redução deste fator ser momentânea, como constataram Novero et al. (1991).

Analisando-se os teores de potássio na solução do solo, conforme apresentado na Figura 12, verifica-se que apresentam um comportamento decrescente ao longo do ciclo e semelhante para ambas estufas. O fato possivelmente se deve a grande extração desse elemento pela planta, tendo em vista a grande massa vegetativa desenvolvida pela cultura. Apesar de não se observar deficiência desse nutriente nas plantas durante a condução do experimento, notou-se que a curva de absorção de potássio, sugerida por Ferreira et al. (1993) e utilizada neste trabalho não foi ideal para este cultivar, o qual tem característica vigorosa. Contudo, esse fato possivelmente não se caracterizou como fator limitante ao cultivo, ou à obtenção dos resultados entre os tratamentos analisados.

Figura 12 - Teores médios de potássio na solução do solo, ao longo do ciclo da cultura.

A hipótese de que o efeito do CO_2 sobre a produção tenha ocorrido, principalmente devido ao incremento da concentração de alguns nutrientes na solução do solo, é realçada quando se analisam algumas características, ligadas à fisiologia da cultura, e obtidas a partir de leituras efetuadas 20 minutos antes da aplicação de gás, durante o tempo de irrigação, e uma hora após cessada a aplicação de água carbonatada, nos dias 15 e 21 de outubro, conforme visualizado nas Figuras 13 e 14. Nelas, as setas indicam o momento em que se iniciou a aplicação do gás, bem como o término da mesma.

Observam-se que os valores de fotossíntese, de condutância estomática, de transpiração e de temperatura da folha acompanharam os valores de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), ou seja, com o aumento da radiação, houve incrementos nas características mencionadas, mesmo no dia 21 de outubro, quando a presença de nuvens induziu a uma maior oscilação dos valores de PAR. No entanto não foi possível detectar aumento no teor de CO_2 atmosférico no interior da estufa com a aplicação da água carbonatada, em nenhum dos dias de coleta dos dados fisiológicos.

Figura 13 - Radiação fotossinteticamente ativa (PAR) medida por quantômetro, fotossíntese e concentração de CO_2 no ar antes, durante e após a aplicação do gás na linha de irrigação.

Figura 14 - Condutância estomática, transpiração e temperatura da folha antes, durante e após a aplicação do gás na linha de irrigação.

Dessa forma, é possível que o efeito benéfico da aplicação do CO₂, na maioria das características fisiológicas da cultura não se tenha dado devido ao incremento da concentração de gás no ar, fato que também foi relatado por Novero et al. (1991) e mencionado por Nederhoff (1990), mas possivelmente devido a outros fatores, como os decorrentes do incremento na condutividade elétrica na solução do solo, cuja medida indica uma possível maior disponibilidade de nutrientes às plantas, no tratamento com gás, tais como cálcio e nitrato. Resultados semelhantes foram obtidos por D'Andria et al. (1993), que observaram o incremento de diversos nutrientes em frutos e em folhas, e a maior disponibilidade de micronutrientes em tratamentos submetidos à aplicação de água carbonatada. Também por Basile et al. (1993) destacaram uma maior mobilidade de cátions no solo. Novero et al. (1991) apontam que a combinação entre a redução do pH do solo e o aumento no crescimento de raízes, promovido pela aplicação de água carbonatada, pode favorecer a maior disponibilidade e maior absorção de nutrientes pelas plantas.

Vale ressaltar que se efetuaram as fertirrigações igualmente para todos os tratamentos; da mesma forma a adubação de pré-transplântio não influenciou na diferença entre as concentrações de nutrientes da solução do solo.

4.3 Manejo da irrigação

O manejo foi realizado aplicando-se uma lâmina total e uniforme de 22 mm, do transplântio ao pleno estabelecimento das mudas em todas as parcelas.

O controle das lâminas diferenciadas iniciou-se a partir do 28º DPT e inteirou 129 dias. As lâminas totais corresponderam a: $W_1 = 143$, $W_2 = 203$, $W_3 = 264$, $W_4 = 322$, $W_5 = 381$ e $W_6 = 438$ mm para a estufa sem a aplicação de CO₂ e $W_1 = 146$, $W_2 = 212$, $W_3 = 273$, $W_4 = 332$, $W_5 = 393$ e $W_6 = 458$ mm, para a estufa com a aplicação de CO₂. As diferenças entre as lâminas das duas estufas devem-se ao fato de o manejo da irrigação ter sido realizado de forma independente, para cada uma das duas estufas.

As lâminas evaporadas pelo tanque reduzido, nas estufas sem e com a aplicação de CO₂, foram semelhantes, tanto ao longo do ciclo, conforme apresentado na Figura 15,

ou em quantidades totais, ou seja, 143,59 e 143,03 mm, para a estufa sem e com a aplicação de CO₂, respectivamente.

Figura 15 - Lâmina evaporada no tanque evaporimétrico reduzido, ao longo do ciclo da cultura.

A pequena magnitude da evaporação observada deveu-se, possivelmente, às condições de sombreamento sobre ambos os tanques, durante o ciclo da cultura, impostas pelo crescimento das plantas e pelo espaçamento reduzido utilizado. Tal espaçamento, entretanto, é também adotado por tomaticultores em cultivos sob ambiente protegido, no Estado de São Paulo. O fato de o experimento ter sido realizado dentro de um ambiente protegido também explica os baixos valores detectados; com efeito, Alves & Klar (1996) constataram redução de 93 % da evaporação estimada, nesse ambiente. Os autores apontam a ausência de ventos como o principal fator da diferença entre a evaporação dentro e fora das estufas.

O aumento perceptível da lâmina evaporada, a partir do 100º DPT, pode ser justificado pela realização da prática de desfolha e pelo ligeiro afastamento das plantas próximas aos tanques, favorecendo a ventilação, mas não pelo efeito da temperatura do ar, pois esta permaneceu oscilando entre 20 e 30°C, durante todo o período de cultivo, conforme se pode observar na Figura 8.

Até aproximadamente o 51º DPT, ou seja, quando as plantas apresentavam uma altura média de 1,20 m, o manejo da irrigação foi realizado pelo método do balanço de

água, utilizando-se os tanques evaporimétricos. A partir dessa fase, continuou-se o controle da irrigação utilizando-se tensiômetros de cápsula porosa. A Figura 16 apresenta os valores de tensão média quinzenal, medida antes das irrigações do 49º DPT (quinzena 1) até o final (158º DPT).

De acordo com a Figura 16, verifica-se que as tensões se mantiveram como esperado, ou seja, a tensão maior para o tratamento em que se aplicou a menor lâmina (L1) e menor para o tratamento relativo à maior lâmina (L6).

Figura 16 - Comportamento do potencial matricial de água do solo a 20 cm de profundidade, ao longo do ciclo da cultura.

Na terceira quinzena, verificou-se um decréscimo da tensão correspondente à L1 da estufa sem a aplicação de gás, indicando solo mais úmido que L4. O resultado deve-se, possivelmente, ao fato de não ter ocorrido o consumo de parte da água aplicada no solo, próximo aos tensiômetros do tratamento L1, visto que, nesses locais, algumas

plantas haviam sido retiradas, com a finalidade de se efetuar um controle cultural de bacteriose. Entretanto, após trocar-se a localização dos tensiômetros, observou-se o retorno das tensões a valores acima dos referentes ao tratamento L4.

Em ambas as estufas, notou-se um aumento da tensão ao longo do tempo, o que pode ser indicativo do maior consumo de água pela cultura, em função do seu crescimento, tendo em vista que a evaporação do solo deve ter sido baixa, em virtude do uso da cobertura de polietileno preto.

As tensões constatadas (menores que 30 kPa) estão de acordo com Marouelli et al. (1996), os quais sugerem que, para sistemas de irrigação por gotejamento as tensões sejam mantidas mais baixas que para outros sistemas, semelhantes às utilizadas por Smastrla & Locascio (1996).

4.4 Altura das plantas e diâmetro das hastes

As medições das características relacionadas ao crescimento das plantas, tais como, altura das plantas e diâmetro das hastes, são apresentadas na Figura 17.

Apesar de não ter sido efetuada a análise estatística para essas variáveis, observa-se que há uma similaridade entre as alturas e os diâmetros, para os diferentes tratamentos de lâminas de irrigação (L1 a L6), tanto para a estufa 1 (sem a aplicação de gás), como para a estufa 2 (com a aplicação).

Por outro lado, verificou-se, visualmente, uma redução da massa vegetativa da parte aérea das plantas na estufa onde foi aplicada a água carbonatada, a partir do 61ºDPT, como efeito da incidência generalizada da requeima (*Phytophthora infestans*), havendo posteriormente recuperação do dossel. O fato pode ter contribuído para aumentar a uniformidade das alturas de plantas e dos diâmetros das hastes entre os tratamentos com a aplicação de CO₂.

Figura 17 - Altura das plantas e diâmetro das hastes em diferentes épocas de medição.

A incidência de doenças, como a requeima e a bacteriose (*Pseudomonas corrugata*), que ocorreram durante o experimento, estão associadas a condições favoráveis de temperatura e de umidade relativa do ar, conforme se visualiza na Figura 8, o que aumenta a susceptibilidade da planta, e também à presença do patógeno no ambiente. Ressalta-se que os dados apresentados na Figura 8 foram obtidos de leituras realizadas próximas às 12 horas de cada dia. Assim, temperaturas menores e algumas possivelmente correspondentes à temperatura no ponto de orvalho, ocorreram, favorecendo a presença de umidade nas folhas das plantas infectadas; segundo Lopes & Santos (1994), umidade elevada e temperaturas frias durante a noite favorecem o aparecimento de requeima e bacterioses, entre elas a necrose-da-medula (*Pseudomonas corrugata*), muito comum em cultivo de tomate estaqueado sob cobertura plástica.

4.5 Produtividade

Verificando-se o peso de frutos colhidos ao longo do ciclo do tomateiro, observou-se que as plantas submetidas à aplicação de água carbonatada tiveram a média de produtividade incrementada em 7,6 %, que correspondeu à significativa diferença entre 74,1 t.ha⁻¹, obtidas no tratamento sem, e 80,2 t.ha⁻¹ no tratamento com a aplicação do gás. Resultado semelhante foi encontrado por D'Andria et al. (1990): eles obtiveram um incremento de 7 t.ha⁻¹, comparando os tratamentos com a aplicação de CO₂ e “mulching” aos sem uso do gás e sem a cobertura de solo. Novero et al. (1991) também obtiveram incrementos em 9 % em produtividade com a irrigação com água carbonatada.

Inicialmente, em visto de dados em literatura, era esperada uma diferença de produtividade entre as lâminas aplicadas. Porém, como se observa na Tabela 5, os tratamentos permaneceram estatisticamente iguais.

Tabela 5 - Médias de produtividade (t.ha⁻¹) relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO₂

Lâminas	L1	L2	L3	L4	L5	L6	Média
Sem	65,8 aA	69,6 aA	79,4 aA	71,4 aA	87,7 aA	70,7 bA	74,1 b
Com	69,3 aA	79,2 aA	77,2 aA	96,2 aA	80,4 aA	78,8 aA	80,2 a
Média	67,6 A	74,4 A	78,3 A	83,9 A	84,1 A	74,8 A	

As médias seguidas com letra minúscula correspondem à comparação entre estufas, enquanto, com letra maiúscula, correspondem à comparação entre lâminas de uma mesma estufa.

Pilatti & Paletto (1996) obtiveram redução significativa na percentagem de frutos rachados e justificam o fato pela possibilidade de reduzir a variação da umidade do solo utilizando “mulching”. Assim, a adoção da cobertura plástica no solo, juntamente com a alta frequência da irrigação, podem ter influído na atenuação dos efeitos decorrentes da aplicação de lâminas em déficit.

A maior produtividade, para os tratamentos L5 na estufa sem, e para os L4 na estufa com a aplicação de gás, reflete um controle eficiente da irrigação, o que significa terem sido estimadas e aplicadas as quantidades corretas de água no tratamento-controle (L4) e, conseqüentemente, nos demais tratamentos.

Apesar da ocorrência generalizada de requeima, na estufa com a aplicação de gás, essa doença praticamente não afetou os frutos, de forma que toda a produção foi

considerada comercial. O fato também se devem a não-ocorrência de frutos deformados, ou com lesões prejudiciais à comercialização, o que é possível sob ambiente protegido. Segundo Oliveira (1995), dentre as diversas vantagens apresentadas pelo cultivo protegido, cita-se a obtenção de produtos de alta qualidade.

Analisando-se o resultado de cada colheita de forma separada verificou-se estatisticamente que os tratamentos que receberam a água carbonatada diferiram dos demais somente a partir da nona colheita. Da 11ª colheita em diante, os tratamentos com e sem a aplicação do gás passaram a produzir de forma semelhante, até o final do ciclo. Tal fato pode ser constatado na Figura 18.

Figura 18 - Produtividade acumulada ao longo do período de maturação e de colheita dos frutos.

A época de diferenciação dos tratamentos coincidiu com o período de máxima produção em ambas as estufas. O decréscimo de produtividade para ambas as estufas pode ser detectado a partir da 13ª colheita, convergindo para os resultados apresentados graficamente por Gianquito et al. (1990), os quais obtiveram decréscimos de produtividade, aproximadamente a partir de 25 dias do início das colheitas.

Os resultados de produtividade das estufas não diferiram estatisticamente quanto à antecipação das primeiras colheitas, discordando daqueles encontrados por Bialczyk et al. (1996) que verificaram que o enriquecimento da água de irrigação com bicarbonato permitiu iniciar as colheitas com 10 dias de antecedência. Os autores justificam-se afirmando que a absorção radicular de carbono inorgânico dissolvido foi responsável

pelo incremento do peso e da maturação precoce dos frutos. Entretanto Calvert (1972) constatou que essa característica varia conforme o cultivar de tomate.

4.6 Número de frutos

Verificou-se um incremento não significativo de 1,8 % em número de frutos na estufa sem (113 frutos.m⁻²) em comparação à com a aplicação do gás (111 frutos.m⁻²). Calvert & Slack (1975) também não encontraram diferenças significativas, porém detectaram uma tendência em incremento no número de frutos, aumentado-se a concentração do CO₂ no ar de 600 para 1400 µmolCO₂.mol⁻¹.

O número total de frutos compreendeu a soma dos frutos de todos os tamanhos, cujos dados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Médias do número total de frutos (frutos.m⁻²) relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO₂

Lâminas	L1	L2	L3	L4	L5	L6	Média
Sem	106 aA	113 aA	125 aA	107 aA	123 aA	104 aA	113 a
Com	104 aA	115 aA	108 aA	120 aA	107 aA	111 aA	111 a
Média	105 A	114 A	116 A	113 A	115 A	107 A	

As médias seguidas com letra minúscula correspondem à comparação entre estufas, enquanto, com letra maiúscula, correspondem à comparação entre lâminas de uma mesma estufa.

Apesar de não terem sido observadas diferenças estatísticas em relação aos efeitos das lâminas de água aplicadas, os dados seguem uma tendência similar à da produtividade, apresentando efeitos de redução do número de frutos em condições de déficit hídrico e de excesso de umidade no solo para ambas as estufas. O fato indica que o número de frutos foi o componente da produção que mais influenciou na produtividade de frutos, em relação às lâminas irrigação, concordando com Novero et al.(1991). Esses autores atribuíram a tal componente da produção o incremento em produtividade, obtido em cultivo sob condições de solo coberto. Por outro lado, segundo eles, o tamanho de frutos teve maior influência em condições de solo descoberto.

Com a finalidade de se verificar o potencial da cultura em termos do número e do tamanho dos frutos, não se realizaram desbastes ou raleio nas inflorescências e nas frutificações. Isso conduziu à maior produção de frutos pequenos (< 50 mm de diâmetro),

em detrimento dos médios (50 a 60 mm), conforme pode ser observado na Tabela 7. Esses resultados discordam dos encontrados por Hartz et al. (1991): segundo eles, a aplicação de CO₂, via aérea, em tomateiro incrementou o tamanho dos frutos médios.

Tabela 7 - Médias de número de frutos (frutos.m⁻²), conforme o tamanho selecionado relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO₂

Lâminas	L1	L2	L3	L4	L5	L6	Média
Sem a aplicação de gás							
Pequenos	141 a	131 a	121 a	130 a	104 a	131 a	126 a
Médios	30 b	25 b	31 b	30 b	33 b	35 b	26 b
Com a aplicação de gás							
Pequenos	109 a	153 a	117 a	127 a	129 a	132 a	128 a
Médios	20 b	31 b	35 b	30 b	43 b	45 b	34 b

As médias seguidas com letra minúscula correspondem à comparação entre tamanho de frutos dentro de cada estufa, separadamente.

O número dos frutos grandes (> 60mm) foi desprezível: pois obtiveram-se apenas 12 frutos com esse tamanho, ao longo de todas as colheitas realizadas, não sendo possível representação para o mesmo.

4.7 Peso médio dos frutos

Houve um incremento significativo de 5,8 % no peso médio dos frutos das plantas cultivadas sob a irrigação carbonatada (87 g), em relação ao tratamento oposto (82 g). O efeito, entretanto, deveu-se principalmente ao incremento em peso de frutos pequenos (11,5 %). No que diz respeito ao peso dos frutos de tamanho médio, o incremento (0,9 %) não foi significativo. Devido a terem sido raros os frutos de tamanho grande, julgou-se necessária a análise estatística somente dos demais tamanhos.

De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 8 e 9, o peso médio dos frutos não sofreu efeito das lâminas de irrigação. A Tabela 10 apresenta o efeito dos tratamentos sobre a percentagem de matéria seca dos frutos.

Tabela 8 - Médias do peso de frutos de tamanho pequeno (g) relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO₂

Lâminas	L1	L2	L3	L4	L5	L6	Média
Sem	52 aA	53 aA	51 aA	56 bA	57 aA	57 aA	54 b
Com	59 aA	59 aA	59 aA	71 aA	63 aA	57 aA	61 a
Média	55 A	56 A	55 A	63 A	60 A	57 A	

As médias seguidas com letra minúscula correspondem à comparação entre estufas, enquanto, com letra maiúscula, correspondem à comparação entre lâminas de uma mesma estufa.

Tabela 9 - Médias do peso dos frutos de tamanho médio (g), relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO₂

Lâminas	L1	L2	L3	L4	L5	L6	Média
Sem	108 aA	107 bA	112 aA	111 aA	114 aA	112 aA	111 a
Com	113 aA	116 aA	113 aA	109 aA	112 aA	112 aA	112 a
Média	111 A	111 A	112 A	110 A	113 A	112 A	

As médias seguidas com letra minúscula correspondem à comparação entre estufas, enquanto, com letra maiúscula, correspondem à comparação entre lâminas de uma mesma estufa.

Tabela 10 - Médias da matéria seca de frutos (%) de tomate, relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com o enriquecimento de CO₂

Lâminas	L1	L2	L3	L4	L5	L6	Média
9ª Colheita							
Sem	5,86 aA	5,58 aA	5,61 aA	5,41 aA	5,36 aA	5,05 aA	5,48 b
Com	5,88 aA	5,56 aA	5,58 aA	5,62 aA	5,59 aA	5,69 aA	5,65 a
Média	5,86 A	5,58 A	5,59 A	5,51 A	5,46 A	5,39 A	
10ª Colheita							
Sem	3,48 aA	3,24 aA	3,05 aA	2,95 aA	3,17 aA	3,61 aA	3,25 a
Com	3,58 aA	3,12 aA	3,40 aA	3,29 aA	3,17 aA	3,28 aA	3,31 a
Média	3,53 A	3,18 A	3,23 A	3,13 A	3,16 A	3,46 A	
12ª Colheita							
Sem	4,25 aA	3,09 aA	3,79 aA	3,53 bA	3,37 aA	3,94 aA	3,66 b
Com	4,25 aA	4,04 aA	4,43 aA	4,92 aA	4,13 aA	5,08 aA	4,48 a
Média	4,25 A	3,58 A	4,14 A	4,23 A	3,80 A	4,51 A	

As médias seguidas com letra minúscula correspondem à comparação entre estufas, enquanto, com letra maiúscula, correspondem à comparação entre lâminas para uma mesma estufa.

Verifica-se que não houve diferenças significativas, em relação às lâminas de irrigação, em nenhuma das três colheitas nas quais o parâmetro foi utilizado. Por outro lado, os resultados indicam maior percentagem de matéria seca (incremento de 7,8 %, em média) nos tratamentos com a aplicação do gás. Reinert et al. (1997), avaliando o efeito

da aplicação do CO₂ sobre o crescimento e a frutificação de tomateiro, também obtiveram incrementos significativos em matéria seca a cada colheita. Entretanto Slack et al. (1988) afirmam que a matéria seca em frutos não foi afetada pela aplicação do CO₂. Porém deve-se considerar que estes autores utilizaram o gás via aérea.

4.8 Eficiência no uso da água

Não se detectou qualquer diferença entre os tratamentos relativos ao uso de gás, ou seja, em ambas as estufas a eficiência no uso da água (EUA) foi, em média, 30 kg.m⁻³. Esse resultado difere do apresentado por Hunsaker et al. (1996), que obtiveram 18 % de incremento na EUA, aplicando CO₂ via aérea na cultura de trigo, em comparação ao tratamento sem o gás, ambos sob condições de irrigação.

Analisando-se a Tabela 11, pode-se verificar que o tratamento que recebeu apenas 40 % da lâmina requerida pela cultura (143 e 146 mm para a estufa sem a aplicação de CO₂ e estufa com a aplicação do gás, respectivamente) apresentou maior eficiência no uso da água, seguido do tratamento L2. A pior eficiência referiu-se ao tratamento L6.

Tabela 11 - Médias da eficiência no uso da água (kg.m⁻³) relativas às diferentes lâminas de água de irrigação sem e com enriquecimento de CO₂

Lâminas	L1	L2	L3	L4	L5	L6	Média
Sem	46 aA	34 aB	30 aBC	22 aC	23 aCD	16 aD	29 a
Com	47 aA	37 aB	28 aBC	29 aC	20 aCD	17 aD	30 a
Média	46,7 A	35,9 B	29,2 BC	25,6 C	21,7 CD	16,7 D	

As médias seguidas com letra minúscula correspondem à comparação entre estufas, enquanto, com letra maiúscula, correspondem à comparação entre lâminas de uma mesma estufa.

4.9 Função de produção

A partir dos dados de produtividade e das lâminas totais de água aplicada durante o ciclo, foi possível ajustar regressões polinomiais de segunda ordem, para ambos os tratamentos de gás, conforme apresentado na Figura 19.

Diversos autores têm encontrado funções quadráticas, como as obtidas neste trabalho, para culturas como tomate cultivado em campo (Alves, 1980) e como feijão (Frizzone, 1986), milho (Silva et al., 1992), milho doce (Oliveira et al., 1993), cenoura

(Carvalho et al., 1995), laranja (Bertonha, 1997) e cana-de-açúcar (Souza et al., 1997). Segundo Helweg (1991), essas funções são suficientes para uma situação específica. Assim, considerando que a resposta de produtividade de qualquer cultura à aplicação de água depende de muitos fatores, tais como frequência de irrigação, qualidade da água, método de aplicação da água, períodos críticos da cultura, heterogeneidade dos solos e condições climáticas, deve-se verificar a adequação dessas funções para os diferentes locais em que se deseje cultivar.

Ys = Produtividade da cultura sem a aplicação de CO₂ para as lâminas de 143 a 438 mm, kg.ha⁻¹ e
 Yc = Produtividade da cultura com a aplicação de CO₂ para as lâminas de 146 a 458 mm; kg.ha⁻¹.

Figura 19 - Funções de produção com e sem água carbonatada tendo a água como variável.

Helweg (1991) afirma que funções de produção lineares também são utilizadas, porém a análise econômica é limitada, pois não existe um ponto de máximo, o que impossibilita a obtenção da quantidade ótima de água; o mesmo não ocorre com as quadráticas.

Verificou-se, a partir das funções quadráticas, que as produtividades máximas foram 78,82 e 86,36 t.ha⁻¹, em função da aplicação de 335,2 e 333,6 mm, para os tratamentos sem e com a aplicação de CO₂, respectivamente. A partir de tais valores, um acréscimo na lâmina de irrigação acarreta um decréscimo de produtividade, resultante dos efeitos do excesso de água nas plantas. Da mesma forma, quantidades totais de água

aplicada, durante o ciclo, menores que os valores apresentados induzem a uma menor produtividade, ocasionada pelo efeito do déficit hídrico. Entretanto as produtividades máximas estimadas neste trabalho são maiores do que a obtida por Alves (1980), ou seja, $54,3 \text{ t.ha}^{-1}$, possivelmente devido ao fato de esse autor ter conduzido o trabalho em campo. O resultado confirma a grande vantagem de se utilizar em estufas cobertas com plástico no cultivo de tomate, as quais também permitem melhorias na qualidade do produto final (Oliveira, 1995).

4.10 Maximização da receita líquida

A máxima receita líquida é proporcionada pela produtividade que resultou da aplicação da lâmina economicamente ótima. Foram calculados os produtos físicos marginais da água, sem e com a aplicação de CO_2 , sendo os mesmos apresentados nas equações 13 e 14 e representados graficamente na Figura 20:

$$\frac{dY_s}{dW} = \frac{P_w}{P_y} = 26,196 - 0,07815 \cdot W \quad (13)$$

em que

$$dY_s/dW = \text{Derivada primeira da produtividade, em relação à água sem gás, } \text{kg.m}^{-3}.$$

$$\frac{dY_c}{dW} = \frac{P_w}{P_y} = 34,084 - 0,10216 \cdot W \quad (14)$$

em que

$$dY_c/dW = \text{Derivada primeira da produtividade, em relação à água com gás, } \text{kg.m}^{-3}.$$

Figura 20 - Relação entre a fração preço da água e preço do produto com as lâminas economicamente ótimas

Observando-se a Figura 20, verifica-se que para uma faixa de variação do produto físico marginal de 0 a 1, as lâminas economicamente ótimas variaram de 335,2 a 322,4 mm, respectivamente, para a irrigação, sem a aplicação do gás, e de 333,6 a 323,8 mm para a irrigação, com a aplicação do gás. O pequeno efeito da variação do produto físico marginal sobre as lâminas ótimas foi consequência do fato de os tratamentos relativos às lâminas de água terem apresentado um efeito reduzido sobre a produtividade, conforme comentado no item “Produtividade” de “Resultados e Discussão”.

4.11 Viabilidade econômica da aplicação de água carbonatada

Com o intuito de verificar se a adoção dessa nova tecnologia foi viável nas condições em que o experimento foi conduzido, considerou-se o preço pago ao produtor rural, durante o período das colheitas (setembro e outubro); e efetuou-se um cálculo comparando-se a receita marginal com o incremento de custo da aplicação do CO_2 . Para tanto, utilizaram-se as produtividades máximas estimadas das funções de produção obtidas dos tratamentos sem ($78,82 \text{ t.ha}^{-1}$) e com o enriquecimento do gás ($86,36 \text{ t.ha}^{-1}$), o preço da água nulo, o preço médio de 5 anos por quilo de tomate de R\$ 0,62 (US\$ 0,35), segundo FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO (2000), o custo estimado de R\$ 1,50

(US\$ 0,84) por quilo do gás, incluindo despesas com aluguel de cilindro, com o frete e o com o próprio insumo, e a área experimental de 100 m².

Nas condições expostas, as receitas brutas foram R\$ 488,67 (US\$ 274,54) e R\$ 535,43 (US\$ 300,80), sem e com a aplicação de CO₂, respectivamente. Assim, o incremento de receita, com a utilização do insumo foi de R\$ 46,76 (US\$ 26,27) e correspondeu à receita marginal.

O incremento de custo foi considerado similar a um custo marginal. Assim, considerando que, durante o experimento, foi utilizado apenas um cilindro com 25 kg de gás, o “custo marginal” foi de R\$ 37,50 (US\$ 21,07). Os demais custos mantiveram-se iguais, tanto sem como com o uso de água carbonatada.

Dessa forma, pelos resultados obtidos verifica-se que a adoção dessa tecnologia foi viável, pois a receita estimada excedeu o incremento de custo. Nota-se, entretanto, que o resultado advém da simulação de uma situação ótima. Assim, a viabilidade teria de ser reavaliada, caso a produtividade, o preço do tomate e o custo do gás sejam alterados.

Considerando-se o custo do gás equivalente a R\$ 37,50, verifica-se que a aplicação de CO₂, via água de irrigação, não seria viável somente se o quilo de tomate durante o período de colheita fosse inferior a R\$ 0,50, pois nesse valor que o custo do gás se iguala à receita marginal.

4.12 Qualidade de frutos

Das análises realizadas, observaram-se semelhanças entre os tratamentos quanto ao teor de sólidos solúveis, resultados que concordam com os obtidos por Islam et al. (1996), quanto à acidez, ao pH, ao murchamento e à perda de peso dos frutos colhidos, conforme pode ser visualizado na Tabela 12.

Apesar de Daker (1988) e Peet (1992) apontarem problemas como rachadura e podridão apical, em frutos de plantas submetidas a déficit hídrico, não foram detectados tais distúrbios fisiológicos, provavelmente devido à aplicação foliar preventiva e semanal de cloreto de cálcio e à alta frequência de irrigação, ou seja, 1,3 e 1,5 dia para estufa sem e com a aplicação de CO₂, respectivamente.

Tabela 12 - Médias do teor de sólidos solúveis (Brix), acidez titulável (g ácido.g polpa⁻¹), pH, murchamento e perda de peso de frutos (g.dia⁻¹), relativas às diferentes lâminas de água de irrigação, sem e com o enriquecimento de CO₂

	Lâminas	L1	L2	L3	L4	L5	L6	Média
Teor de sólidos	Sem	4,26	4,50	4,50	4,45	4,50	4,75	4,49
Solúveis	Com	4,88	5,25	4,75	5,00	4,63	4,75	4,88
Média		4,57	4,88	4,63	4,73	4,57	4,75	
Acidez	Sem	0,3083	0,2614	0,2882	0,3016	0,3083	0,2815	0,2916
	Com	0,3351	0,2681	0,2815	0,2882	0,2815	0,2882	0,2904
Média		0,3217	0,2648	0,2849	0,2949	0,2949	0,2849	
pH	Sem	4,13	4,20	4,22	4,22	4,18	4,23	4,20
	Com	4,22	4,25	4,25	4,18	4,23	4,21	4,22
Média		4,18	4,23	4,24	4,20	4,21	4,22	
Murchamento	Sem	1,9065	2,1847	1,9197	2,1302	1,8257	1,9750	1,9903
	Com	2,3504	2,0929	2,1216	2,1126	2,1931	2,1960	2,1778
Média		2,1285	2,1388	2,0207	2,1214	2,0094	2,0855	
Perda de peso	Sem	1,30	1,88	1,91	1,25	1,38	1,40	1,52
	Com	1,32	1,50	1,41	1,15	1,54	1,85	1,46
Média		1,31	1,69	1,66	1,20	1,46	1,63	

Comparando-se os resultados da análise de macro e micronutrientes nos frutos das amostras de estufas com e sem a aplicação de gás, conforme expostos na Tabela 13, verificaram-se semelhanças quanto aos teores de fósforo, de cálcio e de boro.

Tabela 13 - Médias dos teores de macro e micronutrientes em frutos, relativas à água sem e com a aplicação de CO₂

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
Sem	21,1	3,9	81,3	1,5	1,5	2,3	15	23	68	23	42
Com	19,6	3,8	56,2	1,5	1,8	2,0	14	34	76	19	31

Embora não tenha sido realizada a análise estatística desses parâmetros, os valores médios obtidos indicam a possibilidade de a água carbonatada ter reduzido os teores de zinco nos frutos, resultado que concorda com Kimbal et al. (1986). Contudo Machado et al. (1999) comentam que não há um padrão de respostas quanto à absorção, à distribuição e ao acúmulo de nutrientes na planta, devido a diferenças entre culturas,

entre tipos de solo, entre cultivo sob condições de hidroponia ou não e entre tipos de substratos. Dessa forma, não é recomendado generalizar os efeitos do gás, quanto à qualidade nutricional dos frutos.

Quanto à análise bromatológica, os frutos de plantas tratadas com água carbonatada, indicaram possíveis aumentos de fibra bruta e de proteína e reduções do conteúdo de extrato etéreo, conforme observado na Tabela 14.

Tabela 14 - Médias de fibra bruta (%), de proteína (%) e de extrato etéreo (%) em frutos, relativas à água sem e com a aplicação de CO₂

Aplicação de CO ₂	Fibra bruta	Proteína (%)	Extrato etéreo
Sem	0,4	12,5	1,8
Com	0,5	13,5	1,4

Os resultados assemelham-se aos encontrados por Wheeler et al. (1997), tais autores, porém, não constataram diferenças estatísticas em nenhum dos fatores avaliados.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos do presente trabalho permitiram as seguintes conclusões:

- Os tratamentos com uso de dióxido de carbono, via água de irrigação, diferiram estatisticamente pelo teste de Wilcoxon, a 5 % de significância, daqueles em que não houve aplicação de gás, sendo superiores em produtividade (7,6 %), em peso de frutos de tamanho pequeno (11,5 %) e em matéria seca de frutos (7,8 %). Não se constatarem diferenças, todavia, na precocidade de produção, no aumento no número de frutos, no peso de frutos de tamanho médio e na eficiência no uso da água;
- A aplicação de CO₂ via água de irrigação apresentou-se economicamente viável;
- As lâminas de irrigação não causaram diferenças significativas, a 5 % de significância pelos teste de Kruskal-Wallis, para número, peso médio e produtividade de frutos. O mesmo ocorreu para os valores de matéria seca de frutos;
- Ajustando-se os dados a funções quadráticas, as máximas produtividades alcançadas foram 77,83 e 87,57 t.ha⁻¹, para as lâminas totais de água de 335,2 e 333,6 mm, correspondentes aos tratamentos sem e com a aplicação do CO₂, respectivamente;
- Para uma faixa de variação do produto físico marginal de 0 a 1, as lâminas economicamente ótimas variaram de 335,2 a 322,4 mm, em ausência de CO₂, e de 333,6 a 323,8 mm, com a utilização do gás;
- Os tratamentos cujas lâminas de irrigação corresponderam à menor quantidade total de água aplicada, 143 e 146 mm, foram estatisticamente superiores aos demais, em eficiência no uso da água (46 e 47 kg.m⁻³), proporcionando menores gastos deste recurso por unidade de peso produzido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, P. Effects of watering on the yield, quality and composition of tomatoes grown in bags of peat. **Journal of Horticultural Science**, v.65, n.6, p.667-74, 1990.
- ALVES, D.R.B.; KLAR, A.E. Comparação de métodos para estimar evapotranspiração de referência em túnel de plástico. **IRRIGA**, v.1, n.2, p.26-34, 1996.
- ALVES, E.M. Efeito de diferentes lâminas d'água sobre a produção de três cultivares de tomateiro (*Lycopersicum esculentum*, Mill), com utilização da irrigação por gotejamento. Viçosa, 1980. 60p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.
- ALVINO, A.; D'ANDRIA, R.; ZERBI, G. Yield and quality of processing tomato varieties, as raw and canned product, with relation to irrigation level. **Acta Horticulturae**, n.194, p.117-24, 1986.
- ALVINO, A.; D'ANDRIA, R.; CERIO, L.; MORI, M.; SORRENTINO, G. Phsiological response of Gladiolus to carbonated water application under two water regimes. **Advances in Horticultural Science**, v.12, n.3, p.145-52, 1998.
- ANDREI, E. **Compêndio de defensivos agrícolas** : guia prático de produtos fitossanitários para uso agrícola. 5.ed. São Paulo. 1996, 506p.
- AOAC ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official mehods of analysis**. 12ed. Washington, DC, 1975. 948p.

- ARIENZO, M.; BASILE, G.; D'ANDRIA, R.; MAGLIULO, A. Fertilization via carbonated water and mineral concentrations in a tomato crop. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.24, n.17/18, p.2281-291, 1993.
- BASILE, G.; ARIENZO, M.; ZENA, A. Soil nutrient mobility in response to irrigation with carbon dioxide enriched water. **Soil Science and Plant Analysis**, v.24, n.11, p.1183-195, 1993.
- BERNARDO, S. Irrigação e produtividade. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., Poços de Caldas, 1998. **Manejo de irrigação**. Lavras: UFLA; SBEA, 1998. p.117-32.
- BERTONHA, A. Funções de resposta da laranja pêra a irrigação complementar e nitrogênio. Piracicaba, 1997. 113p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- BEZERRA, F. M. L. Coeficientes de cultura e efeitos de déficits hídricos nos diferentes estádios fenológicos sobre a produção da batata (*Solanum tuberosum*, L.). Piracicaba, 1995. 131p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- BIALCZYK, J.; LECHOWSKI, Z.; LIBIK, A. Fruiting of tomato cultivated on average enriched with bicarbonate. **Journal of Plant Nutrition**, v.19, n.2, p.305-21, 1996.
- BISWAS, P.K.; HILEMAN, D.R.; GHOSH, P.P.; BHATTACHARYA, N.C.; McCRIMMON, J.N. Growth and yield responses of field-grown sweetpotato to elevated carbon dioxide. **Crop Science**, v.36, n.5, p.1234-239, 1996.
- CALVERT, A. Effects of day and night temperatures and carbon dioxide enrichment on yield of glasshouse tomatoes. **Journal of Horticultural Science**, v.47, p.231-47, 1972.

- CALVERT, A.; SLACK, G. Effects of carbon dioxide enrichment on growth, development and yield of glasshouse tomatoes. I. Responses to controlled concentrations. **Journal of Horticultural Science**, v.50, p.61-71, 1975.
- CAMP, C.R.; ROBBINS, M.L.; KARLEN, D.L.; SOJKA, R.E. Irrigation management for double-cropped fresh-market tomatoes on a high-water-table soil. **Transactions of the ASAE**, v.34, n.6, p.2445-452, 1991.
- CAMPOS, H. de. **Estatística experimental**. 3.ed. Piracicaba : ESALQ, Departamento de Matemática e Estatística, 1979. 343p.
- CARVALHO, J.A.; BERNARDO, S.; CASALI, V.W.; CECON, P.R. Efeito da lâmina de irrigação sobre o crescimento da cenoura (*Daucus carrota* L.) cv. Brasília. **Revista Ceres**, v.42, n.243, p.528-42, 1995.
- CASTELLANI, P.D.; CRUZ, M.C.P. da; FERREIRA, M.E. **Nutrição e adubação de hortaliças**. Piracicaba : POTAFOS, 1993. 487p.
- CENTRITO, M. Comparative growth in elevated CO₂ environments. **Acta Horticulturae**, n.449, p.481-88, 1997.
- COELHO, E.F.; SOUZA, V.A.B. de; CONCEIÇÃO, M.A.F.; DUARTE, J.O. Comportamento da cultura do tomateiro sob quatro regimes de irrigação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.29, n.12, p.1959-968, 1994.
- DAKER, A. **Irrigação e drenagem: a água na agricultura**. 7.ed. Rio de Janeiro : Livraria Freitas Bastos, 1988. v.3, 543p.
- D'ANDRIA, R.; NOVERO, R.; SMITH, D.H.; SHANAHAN, J.F.; MOORE, F.D. Drip irrigation of tomato using carbonated water and mulch in Colorado. **Acta Horticulturae**, n.278, p.179-85, 1990.

D'ANDRIA, R.; MAGLIULO, V.; MAGGIO, A.; BASILE, G.; ARIENZO, M.; LOPEZ-GALVEZ, J. Soil and plant nutrient modifications in response to irrigation with CO₂ enriched water on tomato. **Acta Horticulturae**, n.335, p.557-62, 1993.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. de H.R. Gheyi, A.A. de Sousa, F.A.V. Damasceno e J.F. de Medeiros. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requirement**. Rome : FAO, 1977. 144p. (FAO. Irrigation and Drainage, 24).

DUARTE, E.F. Necessidades hídricas e de irrigação em culturas de arroz e de tomate, na Baixada Fluminense. Rio de Janeiro, 1976. 100p. Tese (Livre Docência) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DURÃO, P.L.; GALVÃO, A.C. Gás carbônico em irrigação: tecnologia de ponta para aumentar a produtividade e qualidade dos produtos agrícolas. **Ciência Hoje**, v.19, n.110, p.12-5, 1995.

ENOCH, H.Z. Crop responses to arial carbon dioxide. **Acta Horticulturae**, n.268, p.17-32, 1990.

FERREIRA, M.E.; CASTELLANE, P.D.; CRUZ, M.C.P. da. **Nutrição e Adubação de Hortalças**. Piracicaba : POTAFÓS, 1993. 480p.

FERREYRA, E.R. Efecto de diferentes alturas de agua sobre el cultivo del tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.). 1.Relacion evapotranspiracion-rendimiento. **Agricultura Técnica**, v.47, n.3, p.254-59, 1987.

FILGUEIRA, F.A.R. **Manual de olericultura**. São Paulo : Agronômica Ceres, 1972. 451p.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Agrianual 99** : anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 1999. p.489-97 : Tomate.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Agrianual 99** : anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2000. p.515-26 : Tomate.

FRIZZONE, J. A. Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâminas de irrigação. Piracicaba, 1986. 133p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

FRIZZONE, J.A. Função de produção. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., Poços de Caldas, 1998. **Manejo de irrigação**. Lavras: UFLA; SBEA, 1998. p.86-116.

GAMMON, R.H.; SUNDQUIST, E.T.; FRASER, P.J. History of carbon dioxide in the atmosphere. In: TRABALKA, J.R., **Atmospheric carbon dioxide and the global carbon cycle**. Springfield : NTIS, 1985. p.25-62.

GARY, C.; BERTIN, N.; FROSSARD, J.S.; BOT, J.le; LeBOT, J. High mineral contents explain the low construction cost of leaves, stems and fruits of tomato plants. **Journal of Experimental Botany**, v.49, n.318, p.49-57, 1998.

GIANQUITO, G.; CECCON, P.; GIOVANARDI, R. Evapotranspiration, growth and yield of fresh market tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) at two irrigation levels. **Acta Horticulturae**, n.278, p.579-86, 1990.

HAM, J.M.; OWENSBY, C.E.; COYNE, P.I.; BREMER, D.J. Fluxes of CO₂ and water vapor from a prairie ecosystem exposed to ambient and elevated atmospheric CO₂. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.77, p.73-93, 1995.

HARTMANN, H.D., ZENGERLE, K.H. Water supply of tomatoes. **Acta Horticulturae**, n.191, p.99-105, 1986.

HEADY, E.O.; PESEK, J. A fertilizer production surface with specification of economic optima for grown on calcareous ida silt loam. **Journal of Farm Economics**. v.36, p.466-82, 1954.

- HELWEG, O.J. Functions of crop yield from applied water. **Agronomy Journal**, v.83, p.769-73, 1991.
- HUNSAKER, D.J.; KIMBALL, B.A.; PINTER Jr., P.J.; LaMORTE, R.L.; WALL, G.W. Carbon dioxide enrichment and irrigation effects on wheat evapotranspiration and water use efficiency. **Transactions of the ASAE**, v.39, n.4, p.1345-355, 1996.
- HUNSAKER, D.J.; HENDREY, G.R.; KIMBALL, B.A.; LEWIN, K.F.; MAUNEY, J.R.; NAGY, J. Cotton evapotranspiration under field conditions with CO₂ enrichment and variable soil moisture regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.70, n.1/4, p.247-458, 1994.
- ISLAM, M.S.; MATSUI, T.; YOSHIDA, Y. Effect of carbon enrichment on physico-chemical and enzymatic changes in tomato fruits at various stages of maturity. **Scientia Horticulturae**, v.65, n.2/3, p.137-49, 1996.
- JIAO, J.; TSUJITA, M.J.; GRODZINSKI, B. Predicting growth of Samantha roses at different light, temperature and CO₂ levels based on net carbon exchange. **Acta Horticulturae**, n.230, p.435-442, 1988.
- JITLA, D.S.; ROGERS, G.S.; SENEWEERA, S.P.; BASRA, A.S.; OLDFIELD, R.J.; CONROY, J.P. Accelerated early growth of rice at elevated CO₂. Is it related to developmental changes in the shoot apex ? **Plant Physiology**, v.115, n.1, p.15-22, 1997.
- KIMBALL, B.A.; MAUNEY, J.R.; RADIN, J.W.; NAKAYAMA, F.S.; IDSO, S.B. HENDRIX, D.L.; AKEY, D.H.; ALLEN, S.G. **Progress research report 039**. Phoenix : United States Water Conservation Laboratory, 1986. 125p.
- KIRDA, C.; ÇEVİK, B.; TÜLÜCÜ, K. A simple method to estimate the irrigation water requirement of greenhouse grown tomato. **Acta Horticulturae**, n.366, p.373-80, 1994.

KRETCHMAN, D.W.; HOWLETT, F.S. CO₂ enrichment for vegetable production. **Transactions of the ASAE**, v.13, n.2, p.252-56, 1970.

—LETARD, M. Utilisation du CO₂ en serre. Comportement des plantes et consommation en CO₂. **Infos-Paris**, n.126, p.32-7, 1996. <http://erl.sibi.usp.br/cgi-bin/webspirs.cmd>, (10 Aug. 1999).

LOCASCIO, S.J.; SMAJSTRLA, A.G. Water application scheduling by pan evaporation for drip-irrigated tomato. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.1, n.121, p.63-8, 1996.

LOCASCIO, S.J., OLSON, S.M., RHOADS, F.M. Water quantity and time of N and K application for trickle-irrigated tomatoes. **Journal American Society Horticultural Science**, v.2, n.114, p.265-68, 1989.

LOPES, C.A.; SANTOS, J.R.M. dos. **Doenças do tomateiro**. Brasília : EMBRAPA, SPI, 1994. 67p.

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.345-53.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional da plantas** : princípios e aplicações. 2ed. Piracicaba : POTAFOS, 1997. 319p.

MANZAN, R.J. Irrigação do tomateiro. **Informe Agropecuário**, v.6, n.66, p.20-1, 1980.

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

MATYSIAK, B.; NOWAK, J. Acclimatization of ex vitro homalomena 'Emerald Gem' as affected by nutrient solution concentration and CO₂ enrichment. **Acta Horticulturae**, n.399, p.157-60, 1995.

- MEDEIROS, J. F. de. Manejo da água de irrigação salina em estufa cultivada com pimentão. Piracicaba, 1998. 152p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- MEDEIROS, J.F. de; PEREIRA, F.A.C.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A. Comparação entre evaporação em tanque classe "A" padrão e em minitanque, instalados em estufa e estação meteorológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., Piracicaba. 1997. **Anais**. Piracicaba : ESALQ, 1997. p.228-30.
- MICHELAKIS, N.G., CHARTZOULAKIS, K.S. Water consumptive use of greenhouse tomatoes as related to various levels of soil water potential under drip irrigation. **Acta Horticulturae**, n.228, p.127-36, 1988.
- MINAMI, K.; HAAG, H.P. **O tomateiro**. 2.ed. Campinas : Fundação Cargill, 1989. 397p.
- MOORE, F.D. Potential for irrigation with carbon dioxide. **Acta Horticulturae**, n.278, p. 168-75, 1991.
- MJWARA, J.M.; BOTHA, C.E.J. Water efficiency in *Phaseolus vulgaris* exposed to elevated CO₂. **Acta Horticulturae**, n.449, p.439-47, 1997.
- NEDERHOFF, E.M. Technical aspects, management and control of CO₂ enrichment in greenhouses. **Acta Horticulturae**, n.268, p.127-38, 1990.
- NOVERO, R.; SMITH, D.H.; MOORE, F.D.; SHANAHAN, J.F.; D'ANDRIA, R. Field-grown tomato response to carbonated water application. **Agronomy Journal**, v.5, n.83, p.911-16, 1991.
- OLIVEIRA, C.R. de; BARRETO, E.A.; FIGUEIREDO, G.J.B. de; NEVES, J.P.S.; ANDRADE, L.A. de; MAKIMOTO, P.; DIAS, W.T. **Cultivo em ambiente protegido**. Campinas : CATI, 1997. 31p. (CATI. Boletim Técnico, 232).

- OLIVEIRA, M.R.V. O emprego de casas de vegetação no Brasil: vantagens e desvantagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, n.8, p.1049-060, 1995.
- OLIVEIRA, S.L.; SEDIYAMA, G.C.; BERNARDO, S.; SANS, L.M.; REZENDE, M. Análise econômica do uso de água e nitrogênio em milho doce. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22., Ilhéus, 1993. **Anais**. Ilhéus : SBEA, CEPLAC, 1993. p.2249-264.
- PASCUAL, B.; MAROTO, A.; BARÍSI, A.; LÓPEZ-GALARZA, S. Influence of irrigation on yield and cracking of two processing tomato cultivars. **Acta Horticulturae**, n. 487, p.117-20, 1999.
- PEET, M.M. Fruit cracking in tomato. **HortTechnology**, v.2, n.2, p.216-23, 1992.
- PERI, G.; HART, W.E.; NORUM, D.I. Optimal irrigation depths a method of analysis. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.105, p.341-55, 1979.
- PEZZOPANE, J.E.M.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; ORTOLANI, A.A. Modificações microclimáticas provocadas por estufa com cobertura plástica. **Bragantia**, v.54, n.2, p.419-25, 1995.
- PILATTI, R.A.; PALETTO, C.H. Effect of mulching and shading on splitting of tomato fruits grown in the greenhouse. **Horticultura Argentina**, v.15, n.38, p.12-6, 1996.
- PINTO, J.M. Aplicação de dióxido de carbono via água de irrigação em meloeiro. Piracicaba, 1997. 82p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia**. Madrid : Mundi-Prensa, 1986. 461p.
- PULUPOL, L.U.; BEHBOUDIAN, M.H.; FISHER, K.J. Growth, yield, and postharvest attributes of glasshouse tomatoes produced under deficit irrigation. **HortScience**, v.31, n.6, p.926-29, 1996.

- REBELO, A.L. A questão do aumento da concentração de CO₂ na atmosfera. **Ciência e Cultura**, v.38, n.5, p.872-75, 1986.
- REINERT, R.A.; EASON, G.; BARTON, J. Growth and fruiting of tomato as influenced by elevated carbon dioxide and ozone. **New Phytologist**, v.137, n.3, p.411-20, 1997.
- RICHARDS, L.A. Advances in soil physics. In : INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 7., Madison, 1960. **Transactions**, Madison : International Society of Soil Science, 1960. p.67-9.
- SANTOS, V.B. Efeito da irrigação por gotejamento no crescimento e produção do tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado em casa de vegetação e em condições de campo. Piracicaba, 1986. 76p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- SENTELHAS, P.C.; SANTOS, A.O. Cultivo protegido: aspectos microclimáticos. **Revista Brasileira de Hortaliças e Ornamentais**, v.1, n.2, p.108-15, 1995.
- SGANZERLA, E. Nova agricultura : a fascinante arte de cultivar com os plásticos. 5.ed. In: SGANZERLA, E. **Cultivo do tomate na estufa**. Guaíba : Agropecuária, 1995. p.155-72.
- SILVA, D.D.; LOUREIRO, B.T.; BERNARDO, S.; GALVÃO, J.D. Efeito de lâminas e doses de nitrogênio na cultura do milho, irrigado por aspersão em linha. **Revista Ceres**, v.39, n.222, p.91-104, 1992.
- SILVA, E.F.F.; MIRANDA, J.H.; COELHO, R.D.; DUARTE, S.N.; FERREIRA, Y.R.P. Determinação da salinidade do solo utilizando extratores de cápsulas porosas e soluções diluídas (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28., Pelotas, 1999. **Anais**. Pelotas : SBEA, UFPEL, 1999.

- 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., Poços de Caldas, 1998. **Manejo de irrigação**. Lavras : UFLA; SBEA, 1998. p.311-51.
- SLACK, G.; FENLON, J.S.; HAND, D.W. The effects of summer CO₂ enrichment and ventilation temperatures on the yield, quality and value of glasshouse tomatoes. **Journal of Horticultural Science**, v.63, n.1, p.119-29, 1988.
- SMAJSTRLA, A.G.; LOCASCIO, S.J. Tensiometer-controlled, drip-irrigation scheduling of tomato. **Transactions of the ASAE**, v.12, n.1, p.315-19, 1996.
- SOUZA, E.F.; MARTINS, D.P.; BERNARDO, S.; CARVALHO, J.A. Função de produção da cana-de-açúcar em relação à lâmina de água em Campos de Goyatacazes – RJ (compact disc). In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., Campina Grande, 1997. **Anais**.
- STORLIE, C.A.; HECKMAN, J.R. Bell pepper yield responses to carbonated irrigation water. **Journal of Plant Nutrition**, v.19, n.10/11, p.1477-484, 1996.
- TRANI, P.E.; GROPPPO, G.A.; SILVA, M.C.P. e; MINAMI, K.; BURKE, T.J. Diagnóstico sobre a produção de hortaliças no Estado de São Paulo. **Horticultura Brasileira**, v.15, n.1, p.19-24, 1997.
- VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-98, 1980.
- WANG, T.; ARTECA, R.N. Effects of low O₂ root stress on ethylene biosynthesis in tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill cv Heinz 1350). **Plant Physiology**, v.98, p.97-100, 1992.

WHEELER, R.M.; MACKOWIAK, C.L.; STUTTE, G.W.; YORIO, N.C.; BERRY, W.L. Effect of elevated carbon dioxide on nutritional quality of tomato. **Life Sciences : Life Support Systems Studies**. v.20, n.10, p.1975-978, 1997. <http://webofscience.fapesp.br/images/tblogoff.gif>, (15 Fev. 2000).

LETARD, M. Utilisation du CO₂ en serre. Comportement des plantes et consommation en CO₂. **Infos-Paris**, n.126, p.32-7, 1996. <http://erl.sibi.usp.br/cgi-bin/webspirs.cmd>, (10 Aug. 1999).

WITTEWER, S.H. Aspects of CO₂ enrichment for crop production. **Transactions of the ASAE**, v.13, n.2, p.249-51, 1970.