**EFEITO DO CO₂ APLICADO NA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO E NO
AMBIENTE SOBRE A CULTURA DA ALFACE (*Lactuca sativa* L.)**

Tamara Maria Gomes

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz",
Universidade de São Paulo, para a obtenção
do Título de Doutor em Agronomia,
Área de Concentração: Irrigação e
Drenagem.

PIRACICABA
Estado de São Paulo – Brasil
Outubro - 2001

**EFEITO DO CO₂ APLICADO NA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO E NO
AMBIENTE SOBRE A CULTURA DA ALFACE (*Lactuca sativa* L.)**

TAMARA MARIA GOMES

Engenheira Agrônoma

Orientador: Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade
de São Paulo, para a obtenção do Título de
Doutor em Agronomia, Área de
Concentração: Irrigação e Drenagem.

PIRACICABA
Estado de São Paulo – Brasil
Outubro - 2001

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Gomes, Tamara Maria

Efeito do CO₂ aplicado na água de irrigação e no ambiente sobre a cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) / Tamara Maria

Gomes. -- Piracicaba, 2001.

83 p. : il.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2001.

Bibliografia.

1. Água de irrigação 2. Alface 3. Dióxido de carbono 4. Dosagem 5. Irrigação por gotejamento 6. Relação solo-planta-atmosfera I. Título

CDD 635.52

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

A existência na Terra é comparável a uma viagem de aperfeiçoamento, na qual necessitas seguir adiante, ao lado dos companheiros da jornada evolutiva.

Muitos te desconhecem, no entanto, **Deus sabe quem és.**

Muitos te menosprezam, contudo, **Deus não te abandona.**

Muitos te hostilizam, **mas Deus te apoia.**

Muitos te reprovam, em circunstâncias difíceis, no entanto, **Deus te abençoa.**

Muitos te afastam da presença, todavia, **Deus permanece contigo.**

A vista de semelhante realidade, sempre que tropeços e provações te apareçam, não te acomodes, à beira da estrada, em algum recanto da inércia.

Confia em Deus e caminha.

Emmanuel (Chico Xavier)

Aos meus amados pais Braz e Therezinha por todo amor, confiança e sacrifício dedicado em toda minha existência nesta terra.

Aos meus irmãos Ricardo, Adriana e Mônica e meus sobrinhos Bruna, Caio e Liz pela alegria de formarmos uma família feliz.

Ofereço

Ao meu marido Alexandre por tanto amor dedicado e paciência despendida nesta longa jornada.

Dedico

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiii
RESUMO.....	xvi
SUMMARY.....	xviii
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	03
2.1 A cultura da alface.....	03
2.1.1 Irrigação da alface.....	05
2.1.2 Controle da irrigação para a alface.....	06
2.2 Irrigação por gotejamento.....	08
2.2.1 Uniformidade de distribuição de água.....	09
2.3 Gás carbônico.....	10
2.3.1 Efeitos do CO ₂	12
2.3.2 Resultados da aplicação de CO ₂ via água de irrigação em diferentes culturas	14
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1 Etapa 1 – Experimento 1 – curvas de respostas à taxa de assimilação de CO ₂	17
3.2 Etapa 2 – Experimentos conduzidos em campo com aplicação de CO ₂ via água de irrigação.....	19

	Página
3.2.1 Experimento 2 – cultivar Elisa com aplicação de diferentes doses de CO ₂	28
3.2.2 Experimento 3 – cultivar Verônica com aplicação de diferentes doses de CO ₂	30
3.2.3 Experimento 4 – cultivar Elisa em diferentes períodos de aplicação de CO ₂	33
3.3 Etapa 3 - Experimento 5 – cultivar Verônica com aplicação de diferentes doses de CO ₂ e por enriquecimento atmosférico.....	34
3.4 Análise econômica.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1 Etapa 1 – Experimento 1 - curvas de respostas à taxa de assimilação de CO ₂	40
4.2 Etapa 2 - Experimento 2 – cultivar Elisa com aplicação de diferentes doses de CO ₂	44
4.3 Experimento 3 – cultivar Verônica com aplicação de diferentes doses de CO ₂	52
4.4 Experimento 4 – cultivar Elisa em diferentes períodos de aplicação de CO ₂	58
4.5 Etapa 3 - Experimento 5 – cultivar Verônica com aplicação de diferentes doses de CO ₂ e por enriquecimento atmosférico.....	61
4.6 Análise econômica.....	68
5 CONCLUSÕES.....	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 IRGA modelo LI-6400.....	17
2 Esquema do princípio de funcionamento do IRGA.....	18
3 Canteiros.....	19
4 Túneis para cobertura dos canteiros.....	20
5 Conjunto de registros para controle da irrigação.....	21
6 Equipamentos utilizados para injeção de CO ₂ na água de irrigação.....	22
7 Extratores de solução do solo.....	26
8 Canteiros cobertos com sombrite.....	31
9 Sistema de injeção de CO ₂ via ar.....	35
10 Câmara de fluxo de CO ₂ do solo.....	37

11 Medidor de CO ₂ atmosférico.....	38
12 Medidor de pH do solo.....	38
13 Taxa de assimilação de CO ₂ em função da densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA), sob concentração de CO ₂ ambiente e temperatura de 22°C, para alface (cultivar Elisa), conduzida em casa de vegetação. As linhas verticais indicam o desvio padrão da média. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	40
14 Taxa de assimilação de CO ₂ em função da concentração de CO ₂ , para a densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA) de 1400 $\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e temperatura de 22°C, para alface (cultivar Elisa), conduzida em casa de vegetação. As linhas verticais indicam o desvio padrão da média. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	42
15 Taxa de assimilação de CO ₂ da alface (cultivar Elisa) ao longo do dia, nas concentrações de 600 e 800 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, medida em casa de vegetação com temperatura de 22°C. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	43
16 Produtividade da alface (cultivar Elisa) em função dos tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha^{-1} de CO ₂ aplicados via água irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.	45
17 Evapotranspiração da cultura da alface (cultivar Elisa) com base na evaporação do tanque classe A, no período 08/08/99 a 08/09/99. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	46

18	Relação entre assimilação de CO ₂ e a densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA) nos diferentes tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ , aplicados via água de irrigação, ao longo do dia. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	49
19	Variação da condutividade elétrica e das concentrações de NO ₃ , Ca, K, P, S e Mg na solução do solo, ao longo do ciclo da alface (cultivar Elisa), para os tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ , aplicados via água de irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	50
20	Produtividade da alface (cultivar Verônica) em função dos tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ aplicados via água irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.	53
21	Evapotranspiração da cultura da alface (cultivar Verônica) com base na evaporação do tanque classe A, no período 01/11/99 a 29/11/99. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	54
22	Taxa de crescimento relativo (TCR) e taxa de crescimento foliar relativo (TCFR) da cultura da alface (cultivar Verônica), para os tratamentos, 0, 52; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ , aplicados via água de irrigação, no período de 12 dias. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	57
23	Variação da condutividade elétrica e das concentrações de NO ₃ , K e Ca na solução do solo, ao longo do ciclo da alface (cultivar Verônica), para os tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ , aplicados via água de irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	58

24 Evapotranspiração da cultura da alface (cultivar Elisa) com base na evaporação do tanque classe A, no período 29/05/00 a 30/06/00. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000	60
25 Produtividade da alface (cultivar Verônica) em função dos tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ aplicados via água irrigação e 155 kg ha ⁻¹ aplicado via ar. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.....	63
26 Área foliar da alface (cultivar Verônica), para três diferentes folhas nos tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ aplicados via água irrigação e 155 kg ha ⁻¹ aplicado via ar, no período de 12 dias. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.....	64
27 Evapotranspiração da cultura da alface (cultivar Verônica) com base na evaporação do tanque classe A, no período 11/09/00 a 10/10/00. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.....	64
28 Concentração de CO ₂ atmosférico nos tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ aplicados via água irrigação e 155 kg ha ⁻¹ aplicado via ar no tempo. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.....	65
29 Fluxo relativo de CO ₂ no solo, antes, durante e depois da aplicação de CO ₂ , para os tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ aplicados via água irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.....	67
30 pH do solo e da água de irrigação em um período de cinco dias nos tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ aplicados via água irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.....	67

LISTA DE TABELAS

	Página
1 Valores de Kc para três fases de desenvolvimento da cultura da alface após o transplântio das mudas.....	07
2 Valores de precipitação pluviométrica (P) e médias mensais de radiação global (RG), número de horas de insolação, umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento (U), temperatura do ar (T) e evaporação do tanque classe A (ECA), registrados nos períodos de cultivo da alface. ESALQ/USP. Piracicaba, 1999.....	20
3 Experimento 2 - Análise química do solo dos quatro canteiros. ESALQ/USP.Piracicaba, 1999.....	28
4 Experimento 3 - Análise química do solo dos quatro canteiros. ESALQ/USP.Piracicaba, 1999.....	30
5 Experimento 4 - Análise química de uma amostra composta de solo dos quatro canteiros. ESALQ/USP.Piracicaba, 2000.....	33
6 Experimento 5 - Análise química de uma amostra composta de solo dos quatro canteiros. ESALQ/USP. Piracicaba, 2000.....	34

7 Comparação das médias dos tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ , aplicados via água de irrigação, segundo as variáveis, matéria seca (MS); índice de área foliar (IAF), matéria fresca (MF) e número de folhas (NF), para alface (cultivar Elisa), através do teste Duncan ao nível de 5 % de probabilidade. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	44
8 Teores de nutrientes na parte aérea da alface (cultivar Elisa), para os diferentes tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ , aplicados via água de irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	47
9 Comparação das médias dos tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ , aplicados via água de irrigação, segundo as variáveis, matéria seca (MS); índice de área foliar (IAF), matéria fresca (MF) e número de folhas (NF), para alface (cultivar Verônica), para a primeira e segunda coleta de plantas, através do teste Duncan ao nível de 5 % de probabilidade. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	52
10 Teores de nutrientes na parte aérea da alface (cultivar Verônica), para os diferentes tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ , aplicados via água de irrigação, referente a primeira e segunda coleta de plantas. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.....	55
11 Comparação das médias dos tratamentos de distintos períodos de aplicação de CO ₂ , total; $\frac{3}{4}$ e $\frac{1}{4}$ finais do ciclo da cultura, aplicados via água de irrigação, segundo as variáveis, matéria seca (MS); índice de área foliar (IAF), matéria fresca (MF) e número de folhas (NF), para alface (cultivar Elisa), através do teste Duncan ao nível de 5 % de probabilidade. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.....	59

12 Teores de nutrientes na parte aérea da alface (cultivar Elisa), para os tratamentos, de distintos períodos de aplicação de CO ₂ , total; $\frac{3}{4}$ $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ finais do ciclo da cultura, aplicados via água de irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.....	61
13 Comparação das médias dos tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha ⁻¹ de CO ₂ , aplicados via água de irrigação e 155 kg ha ⁻¹ aplicado via ar, segundo as variáveis, matéria seca (MS); índice de área foliar (IAF), matéria fresca (MF) e número de folhas (NF), para alface (cultivar Verônica), através do teste Duncan ao nível de 5 % de probabilidade. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.....	62
14 Custo total para a produção da alface com aplicação de duas doses de CO ₂ via água de irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2001.....	69
15 Valores de relação benefício-custo para produção da alface em diferentes doses de CO ₂ . ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2001.....	69

EFEITO DO CO₂ APLICADO NA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO E NO AMBIENTE SOBRE A CULTURA DA ALFACE (*Lactuca sativa* L.)

Autora: TAMARA MARIA GOMES

Orientador: Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar a influência de diferentes doses e períodos de aplicação de CO₂, via água de irrigação por gotejamento, no desenvolvimento e no estado nutricional da alface, na produtividade, avaliando também os efeitos na solução e no fluxo de CO₂ do solo, no pH da água de irrigação e na concentração na atmosfera. Os experimentos foram realizados em diferentes períodos durante dois anos (1999 e 2000), no Horto do Departamento de Ciências Biológicas da ESALQ/USP, localizado em Piracicaba-SP à latitude de 22° 42' 30" S e longitude de 47° 30' 00". A primeira etapa constituiu de testes preliminares para determinação da concentração de CO₂ que refleti-se em resposta à fotossíntese da cultura da alface. A segunda e a terceira etapa foram representadas por quatro experimentos com a finalidade de testar as doses de CO₂, determinadas na primeira etapa, e observar os efeitos provocados pela sua aplicação via água de irrigação na alface, na atmosfera, no solo e na água de irrigação. Nestas etapas os experimentos foram conduzidos sob túneis plásticos, e em delineamento experimental inteiramente casualizado. Os tratamentos foram compostos por diferentes doses de CO₂ - 0, 52, 155 e 310 kg ha⁻¹ e distintos

períodos de aplicação - TT, T3/4, T1/2, T1/4 referentes, respectivamente, ao total e aos $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ finais do ciclo da cultura. Em um dos experimentos foi aplicado CO_2 no ambiente, na dose de 155 kg ha^{-1} . As irrigações foram realizadas diariamente com base na evaporação do tanque classe A, corrigidas pelo coeficiente da cultura e do tanque. O monitoramento do CO_2 atmosférico foi realizado nos tratamentos que receberam CO_2 via água e via ar. A concentração de $600 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ aumentou a fotossíntese da cultura da alface. A aplicação de CO_2 via água de irrigação modificou o desenvolvimento das plantas de alface. As doses de 52 e 155 kg ha^{-1} de CO_2 aplicadas via água promoveram aumentos na produtividade para as duas cultivares (Elisa e Verônica), atingindo valores de até 26%, quando comparado à testemunha, de forma diferente à aplicação da dose de 310 kg ha^{-1} que não proporcionou resposta positiva no desenvolvimento das plantas. As análises do solo mostraram alterações pela aplicação do CO_2 através da água, sendo que o íon potássio foi modificado na solução do solo e na parte aérea da planta, o fluxo de CO_2 no solo cresceu com o aumento da dose de CO_2 aplicada e o pH do solo mostrou uma tendência ao abaixamento, juntamente com o pH da água da irrigação. A aplicação de CO_2 via água não alterou a concentração do CO_2 ambiente. Com a aplicação via ar, o aumento do CO_2 foi simultâneo à aplicação, retornando ao normal, após finalizada a operação. O período mais adequado para aplicação do CO_2 , durante o ciclo da cultura, foi verificado no $\frac{1}{4}$ final do ciclo de cultivo. A análise econômica mostrou a viabilidade da aplicação de CO_2 via água de irrigação para a cultura da alface, nas condições em que os experimentos foram conduzidos.

**EFFECT OF CO₂ APPLIED TO THE LETTUCE CROP (*Lactuca sativa* L.)
THROUGH IRRIGATION WATER AND THE ENVIRONMENT**

Author: TAMARA MARIA GOMES

Adviser: Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

SUMMARY

The aim of this work was to evaluate the influence of different CO₂ application rates and periods via drip irrigation water on the development and nutritional state of lettuce plants, its productivity, further to the effects on the solution and CO₂ flow in the soil, irrigation water pH and on the concentration in the atmosphere. The experiments were carried out in different periods for two years (1999 and 2000), at the Garden of the Biological Sciences Department of ESALQ/USP, in Piracicaba-SP, at 22° 42' 30" S latitude and 47° 30' 00" longitude. The first stage included preliminary tests to determine the CO₂ concentration whose response would reflect the photosynthesis of the lettuce crop. The second and third stages were represented by four experiments to test the CO₂ rates, determined at the first stage, and to observe the effects provoked by its application via irrigation water on the lettuce crop, on the atmosphere, on the soil and on the irrigation water. At these stages the experiments were conducted under plastic tunnels in a completely randomized block design. The treatments included

CO₂ rates - 0, 52, 155 and 310 kg ha⁻¹ and distinct application periods - TT, T3/4, T1/2, T1/4 referring to the total and final $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ and $\frac{1}{4}$ of the crop cycle, respectively. CO₂ was also applied to the environment in one of the experiments at a 155 kg ha⁻¹ rate for comparative analysis with the CO₂ applied via irrigation water. The irrigation was daily performed based on a class A evaporation tank, amended by the crop and tank coefficient (K_c and K_p, respectively). The CO₂ monitoring was performed in the treatments receiving CO₂ via irrigation water and via air. The 600 µmol CO₂ mol⁻¹ provided increased photosynthesis in lettuce. The CO₂ application via irrigation water modified the development of the lettuce plants. The 52 and 155 kg ha⁻¹ CO₂ rates applied via water promoted an increased productivity for both cultivars studied, reaching values of up to 26% in comparison with the control plant, differently from the 310 kg ha⁻¹ application rate, which failed to provide a positive response in the development of the plants. The soil-related analyses showed changes after the CO₂ was applied through irrigation water, and the potassium ion was modified in the soil solution and in the aerial part of the plant, the CO₂ flow in the soil increased with the higher applied CO₂ rate, and the soil pH tended to decrease, together with the irrigation water pH. The application of CO₂ via water did not change the concentration of the environmental CO₂. With the CO₂ application via air the atmospheric CO₂ increased simultaneously with the application, returning to the normal concentration when the operation was completed. The most adequate period for CO₂ application during the development cycle of the crop was verified at the last quarter of the cultivation cycle. The economical analysis indicated the viability of CO₂ application via irrigation water for the lettuce crop under the conditions in which these experiments were conducted.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, dado a grande competitividade no mercado mundial dos produtos hortícolas decorrente, principalmente, do excesso de produção, verifica-se uma tendência de diferenciação das mercadorias, classificadas dentro de padrões. Antigamente liderava a produção e o comércio de mercadorias agrupadas, sem diferenças baseadas em critérios qualitativos, mas hoje o consumidor exige qualidades prontamente identificáveis. Para atender o novo mercado faz-se necessário a introdução de novas tecnologias e formas de manejo nos sistemas de produção das hortaliças (Luego & Junqueira, 1999).

A alface é a mais popular das hortaliças folhosas e é cultivada em quase todas as regiões do globo terrestre, entretanto é bastante sensível às condições adversas de temperatura, umidade e chuva, sendo necessários estudos que possam propiciar aumentos significativos na produtividade e diminuição de riscos, tornando-a um produto mais competitivo e diferenciado (Tarsitano et al., 1999). O desenvolvimento de novas técnicas de irrigação conjuntamente com aplicação de fertilizantes e o advento do cultivo protegido, possibilitam o crescimento em área plantada, o aumento da produtividade e a utilização de maiores períodos do ano na produção de hortaliças.

A concentração do carbono na biosfera tem crescido nos últimos 150 anos em função da atividade humana, através da queima de combustíveis fósseis. A concentração inicial de CO_2 era de $250 \mu\text{mol mol}^{-1}$, mas hoje já encontra-se próximo a $365 \mu\text{mol mol}^{-1}$, com tendência em aumentar ainda mais (Keeling et al., 1995).

A aplicação de CO_2 na água ou no ar, baseia-se no fato de que alguns processos fisiológicos ou bioquímicos das plantas são beneficiados por este gás, causando respostas positivas com relação a produtividade em várias espécies

vegetais utilizadas na agricultura (Machado et al., 1999). O enriquecimento atmosférico com CO₂ é uma prática bastante antiga, realizada por agricultores europeus há mais de cem anos. Com o tempo a prática foi sendo aprimorada e surgiram equipamentos e técnicas adequadas para a aplicação em diversas condições de clima e plantio.

Recentemente no Brasil introduziu-se a aplicação de CO₂ via água de irrigação, aproveitando os sistemas de irrigação já existentes, com o objetivo de promover aumentos na produtividade das culturas. Apesar de haver pesquisas em que a aplicação de CO₂ através da água não tenha acarretado aumento na produção (Stoffella et al., 1995), há várias outras, conduzidas tanto em condições de casa de vegetação como em campo, aberto que relatam incrementos significativos na produção de fitomassa total, na fotossíntese e na resistência ao estresse hídrico (Bialczyk & Lechowski, 1992).

Existem muitas hipóteses a serem estudadas, procurando esclarecer os efeitos provocados sobre as plantas, influência na produtividade, doses a serem utilizadas e períodos de aplicação mais adequados, para os diferentes tipos de cultivo, procurando alcançar uma relação benefício custo ótima.

Este trabalho teve por objetivo principal avaliar a produtividade de duas cultivares de alface, Elisa e Verônica, submetidas a diferentes doses de CO₂ aplicadas via água de irrigação e em diferentes períodos durante o ciclo de cultivo. Foram também realizadas observações sobre os efeitos provocados pela aplicação do CO₂ na atmosfera, no solo e na água de irrigação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A cultura da alface

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma hortaliça folhosa, herbácea com caule diminuto e não ramificado. As variedades existentes pertencem a diferentes grupos varietais: com folhas lisas, com folhas crocantes e grossas fechando-se em cabeças e com folhas crespas sem formação de cabeça. As raízes são do tipo pivotante com delicadas ramificações, explorando os primeiros 25 cm do solo. É uma hortaliça de inverno, capaz de resistir até a geadas leves, a baixa temperatura noturna é mais importante que a diurna para uma boa produção (Blanco et al., 1997). Por ser uma hortaliça de clima ameno, apresenta problemas de pendoamento precoce, limitantes ao cultivo comercial, quando plantada em regiões com temperaturas médias superiores a 20°C, condições típicas do verão brasileiro (Aguilar, 2001).

A época de plantio mais recomendada no estado de São Paulo é de março a setembro, sendo que nas regiões serranas planta-se o ano todo. Quanto ao espaçamento sugere-se 20 x 20cm, 25 x 25cm ou 30 x 30cm, sendo o plantio feito em patamares ou em canteiros (Fahl et al., 1998). O período de cultivo varia de 40 a 70 dias dependendo do sistema (semeadura direta ou transplante de mudas), época de plantio (verão ou inverno), cultivar utilizado e sistema de condução, no campo ou protegido. A produtividade dessa hortaliça situa-se entre 15 e 30 toneladas por hectare (Gelmini & Trani, 1996).

A calagem da cultura da alface deve elevar a saturação por bases para 80% quando a análise de solo indicar valores inferiores a esse (Blanco et al., 1997).

As hortaliças se diferenciam nas exigências de macronutrientes e no padrão de absorção durante o crescimento. Em geral, a absorção de N, P e K segue a mesma tendência que a taxa de acúmulo de biomassa da cultura.

Hortaliças não frutíferas como aipo e a alface apresentam lenta absorção de nutrientes durante a primeira metade do ciclo de cultivo, sendo que o índice de absorção de nutrientes se acelera próximo a colheita (Papadopoulos, 1999). Em pesquisa realizada por Garcia et al. (1982) para os cultivares de alface Brasil 48 e Clause's Aurélia observou-se que a marcha de absorção de nutrientes pela cultura, em linhas gerais, acompanhou a produção de matéria seca, sendo lenta no início e sofrendo aceleração após os 30 dias. Uma planta da cultivar Brasil 48 acumulou por ocasião da colheita 469 mg N, 100 mg P, 1017 mg K, 161 mg Ca, 47 mg Mg e 21 mg S.

No momento do preparo do solo deve-se adicionar 60-70t/ha de esterco de curral bem curtido, ou um quarto dessa quantidade de esterco de galinha, pelo menos dez dias antes da semeadura ou do transplante de mudas. Em cobertura deve-se realizar duas aplicações de 30 kg/ha de nitrogênio aos 30 e 45 dias após a germinação. No caso de transplante de mudas, aplicar três coberturas de 20 kg/ha de nitrogênio aos 10, 20 e 30 dias após o transplante das mudas (Raij et al., 1996).

Experimentalmente já foi constatado que o nitrogênio é o nutriente que promove maior incremento na produtividade e no peso médio da alface. O fósforo também promove um aumento significativo na produção, embora menor que o nitrogênio. Todas as adubações pós-plantio devem anteceder a fase de máximo desenvolvimento da planta, que, em certas cultivares, coincide com a formação da cabeça. Nessa ocasião deverá haver maior disponibilidade de nutrientes solúveis, especialmente nitrogênio (Filgueira, 2000).

Com relação aos micronutrientes para a cultura da alface, o boro ocupa lugar de destaque e quando deficiente, causa queimadura das folhas devido ao látex que sai dos canalículos rompidos (Malavolta, 1980).

Atualmente o cultivo de hortaliças no Brasil ocupa uma área de 720 mil hectares, que produzem um total de 11 milhões de toneladas (Makishima, 1999). Embora o Brasil seja um país tropical, com presença de regiões com microclimas, o

aumento da tecnologia de cultivo vem melhorando a produtividade, hoje no estado de São Paulo existem 1,5 mil ha de lavouras protegidas (Goto, 1999). Segundo Makishima (1999) a preferência de cultivo nas regiões do sul e sudeste deve-se principalmente ao clima ameno, boa distribuição de chuvas, topografia e solos semelhantes aos dos países de origem das espécies vegetais. Segundo Mello et al. (1989), os solos orgânicos designados de Histossol possuem 30 a 40% de matéria orgânica, densidade muito baixa, capacidade de troca catiônica (CTC) muito elevada, fixação de fósforo bastante reduzida, complexação de micronutrientes e saturação de bases (V%) em torno de 10. Devido a V% baixa e a CTC alta, estes solos necessitam de 15 a 20% toneladas de calcário por ha, aplicados parceladamente e, se bem manejados, são solos muito férteis. Com o avanço da cultura para outras regiões a adaptação a solo mineral se fez necessária. Os solos minerais possuem densidade elevada, CTC baixa, fixação de fósforo e pequena complexação de micronutrientes. A CTC elevada dos solos orgânicos propicia a estes solos maiores capacidade de retenção de umidade, maior adsorção iônica e menor lixiviação de nutrientes. Baseando-se nessas constatações, é possível que a alface melhorada sob condições brasileiras, isto é, selecionada em solo mineral, deve ter maior capacidade de absorção de nutrientes, principalmente nitrogênio, potássio e fósforo pois os dois primeiros são facilmente lixiviados e o terceiro é facilmente fixado em nossos solos minerais.

2.1.1 Irrigação da alface

O cultivo de hortaliças é fortemente influenciado pela disponibilidade de água. O déficit hídrico acarreta queda de produtividade e qualidade, entretanto o excesso aliado a temperatura podem favorecer a incidência de patógenos (Pires et al., 2000). A alface é muito exigente em água, por isso necessita de freqüentes aplicações. Sale (1966) concluiu que o maior requerimento de água ocorreu nas três semanas anteriores à colheita, quando observou a maior resposta de crescimento da cultura à irrigação.

Em pesquisa desenvolvida por Andrade Junior & Klar (1996), a alface sofreu influência de diferentes lâminas de água de irrigação, principalmente na fase final do seu desenvolvimento, nas duas semanas anteriores à colheita, quando 80% a 90% da massa fresca total foram produzidas, e as maiores porcentagens foram obtidas pelas maiores lâminas de água.

Hamada & Testezlaf (1996) verificaram um aumento de 35% em área foliar da alface para os tratamentos que receberam aplicações diárias de água nos níveis de 120% e 100% da evaporação do tanque "Classe A", quando comparado com os níveis 80% e 60%.

Os sistemas de irrigação através da fertirrigação oferecem uma economia no fornecimento de nitrogênio para suprir as necessidades nutricionais da cultura, limitando a lixiviação de nitrato e o consumo excessivo de nitrogênio pela planta. Trabalho realizado por Slangen et al. (1988) mostrou a uniformidade de distribuição de água e nutrientes em diferentes cultivares de alface, durante a primavera e verão de 1983, 1984 e 1985. Os tratamentos utilizados foram: não aplicação de nitrogênio; aplicação de nitrato de amônio via sistema de irrigação e nitrato de amônio aplicado manualmente antes do plantio. Depois da colheita foi determinado a matéria seca da planta e analisado o conteúdo de nitrato nas amostras de solo. O rendimento das cultivares de alface estudadas com aplicação do fertilizante na água de irrigação apresentou-se igual ou melhor quando comparado com o rendimento das cultivares que receberam o fertilizante manualmente antes do plantio, a uniformidade das cultivares de alface testadas foram melhores para os tratamentos que receberam o nutriente por fertirrigação. A baixa concentração de nutrientes encontrados no solo mostraram a eficiência da fertirrigação, principalmente no que diz respeito a minimização das perdas por lixiviação.

2.1.2 Controle da irrigação para a alface

A umidade do solo pode ser resposta por leituras diárias da evaporação do Tanque Classe A, nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura.

O coeficiente da cultura (K_c) é um fator indicativo do consumo de água ideal para cada cultura. Os valores de k_c apresentam um valor menor no início do ciclo da alface e a partir dos 19 dias do transplântio das mudas aumentam com o desenvolvimento da planta (Bastos et al., 1996).

Tabela 1. Valores de coeficiente da cultura (K_c) para três fases de desenvolvimento da cultura da alface após o transplântio das mudas.

Fases	K_c
II	0,48
III	0,80
IV	0,88

Fase II – do transplântio aos 16 dias seguintes;

Fase III – do final da Segunda fase aos 37 seguintes;

Fase IV – do final da terceira fase até a colheita.

FONTE: Bastos (1994).

Os valores de K_c acima apresentados foram obtidos através da relação entre a evapotranspiração máxima (ETM) e a evapotranspiração de referência (Eto). Para a estimativa da Eto, foi utilizado o método de Penman-Monteith e a ETM foi obtida com o uso de cinco evapotranspirômetros de nível freático constante (Bastos, 1994). A evapotranspiração da cultura da alface é obtida pela seguinte equação:

$$ET = ECA \times K_c \times K_p \quad (1)$$

em que,

ET = evapotranspiração da cultura da alface;

ECA = evaporação do Tanque Classe A;

K_c = coeficiente da cultura;

K_p = coeficiente de correção do Tanque Classe A.

2.2 Irrigação por gotejamento

O sistema de irrigação mais utilizado para hortaliças no Brasil é a aspersão, entretanto para a produção de sementes de hortaliças, hortaliças de frutos e hortaliças que necessitam de pulverizações freqüentes, a melhor opção são os sistemas que não molham as plantas como o gotejamento e sulcos (Silva & Marouelli, 1998).

Bernardo (1989) relata que a irrigação por gotejamento compreende os sistemas de irrigação nos quais a água é aplicada ao solo, diretamente sobre a região radicular em pequenas intensidade (um a dez litros por hora) porém com alta freqüência de modo que mantenha a umidade do solo na zona radicular próximo a “Capacidade de Campo”. Assim sendo, a aplicação de água é feita através de tubos perfurados com orifícios de diâmetros reduzidos ou por meio de pequenas peças denominadas gotejadores, conectadas em tubulações flexíveis de polietileno, trabalhando a pressão variando entre 0,5 a 2,5 atm., sendo que a pressão de serviço da maioria dos tipos de gotejadores está em torno de uma atmosfera. Ainda o gotejamento tem a vantagem de permitir a integração de um conjunto de técnicas agrícolas nos cultivos de determinadas plantas, como o controle de umidade do solo, adubação, salinidade, doença e variedades selecionadas, de modo que se obtenham efeitos significativos na produtividade por água consumida, bem como na época da colheita e na qualidade do produto.

De acordo com Abréu et al. (1987), podemos resumir a irrigação por gotejamento da seguinte forma: não ocorre molhamento total do solo, a aplicação da água é restrita a uma pequena superfície; utiliza pequena vazão a baixa pressão; aplica água próximo das plantas através de um número variável de emissores; ao reduzir o volume de solo molhado e portanto sua capacidade de armazenamento de água, se opera com uma freqüência necessária apenas para manter alto o conteúdo de umidade no solo.

Segundo Frizzone et al. (1994), nos sistemas pressurizados, a irrigação por gotejamento e por microaspersão oferecem maior flexibilidade na fertirrigação, seguidos pela aspersão.

Embora o sistema de irrigação por gotejamento, tenha se mostrado uma prática bastante eficiente, ainda apresenta alguns problemas mencionadas por Bernardo

(1989): entupimento - sendo o diâmetro dos orifícios muito, pequenos a exigência de água limpa é uma característica inerente. A fim de minimizar a ocorrência de entupimento, a filtragem da água faz parte do próprio sistema, para evitar a obstrução dos gotejadores, com partículas minerais ou orgânicas. Porém persiste o problema de entupimento devido à precipitação de sais e/ou sedimentação dentro dos gotejadores, das partículas de argila, silte e areia em suspensão, na água de irrigação, que não são retidas nos filtros comuns; distribuição no sistema radicular - devido a formação e manutenção de um volume constante de solo umedecido (bulbo molhado) as raízes dos vegetais tendem a concentrar-se nesta região, diminuindo a estabilidade das árvores em regiões sujeitas a ventos com maior intensidade.

Demattê et al., (1981) observou que o sistema de irrigação por gotejamento proporcionou melhores resultados de produção em um experimento com hortaliças quando comparado com um sistema de aspersão, entretanto, o custo total unitário de produção gerado pelo gotejamento poderá ser elevado em relação à aspersão, devido ao custo inicial do equipamento e sua imobilidade, e pela utilização de grande números de linhas de distribuição em espaçamentos reduzidos. Como é possível cultivar mais de um ciclo por ano, o custo fixo unitário de produção poderá, deste modo, diminuir.

2.2.1 Uniformidade de distribuição de água

A uniformidade de emissão de água em um sistema de irrigação por gotejamento pode variar com: coeficiente de fabricação, fluxo de água e variação de pressão (Hanson, 1994).

Keller & Karmeli (1975) descrevem que no dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento, o critério mais comumente aceito é o de permitir uma variação máxima de 10% na vazão dos gotejadores que funcionam simultaneamente.

Christiansen, citado por Kalil (1992), determinou uma equação para cálculo do coeficiente de uniformidade de distribuição de água em um sistema de

irrigação. Bernardo (1989) concluiu que o limite mínimo do coeficiente de uniformidade de Christiansen aceitável para o sistema de irrigação por gotejamento é de 80%.

De acordo com trabalho apresentado por Deniculi et al. (1992) os métodos mais precisos para determinação do coeficiente de uniformidade foram em ordem crescente: Christiansen, Pattern-Efficiency, Novo coeficiente e Merriam, Keller e Afaro.

A variação de concentração da solução na água de irrigação afeta diretamente a uniformidade de aplicação do produto nas linhas de plantio. A duração do processo de injeção de fertilizantes deve ser longa o suficiente para se obter uma aplicação uniforme (Carrijo et al., 1999).

É preferível obter uma mistura lenta do fertilizante com a água para que a razão de aplicação proporcione uma cobertura uniforme. Quando injeta-se o produto rapidamente pode-se ocasionar uma série de problemas, incluindo a injeção do fertilizante somente em uma parte da linha com o perigo de acarretar uma produção desigual (Holman, 1978). Para Woodward citado por Zanini (1987), a maioria dos produtos devem ser injetados entre 30 e 40 minutos, devendo-se evitar interrupções e reinício de aplicação, o que prejudicaria a uniformidade de distribuição da substância aplicada às plantas.

2.3 Gás carbônico

As pesquisas desenvolvidas nas últimas três décadas verificaram que a elevação artificial da concentração de CO_2 no microclima dos vegetais, elimina parcial ou totalmente o processo de fotorrespiração, evitando perda de CO_2 pela planta e incrementando assim o saldo de absorção líquida. Esse incremento na absorção de CO_2 , em suma, aumenta a eficiência fotossintética das plantas e se reflete em maior produtividade e qualidade. Além desse mecanismo, há evidências de que outros fatores atuam sinergicamente sobre as plantas, aumentando a eficiência do processo de fertilização carbônica (Durão & Galvão, 1995).

As respostas dos estômatos à intensidade luminosa tem sido consideradas conjuntamente com as respostas à concentração de CO₂. Sabe-se atualmente que a luz afeta diretamente a abertura estomática, acreditando-se na existência de dois fotorreceptores, um sensível a comprimentos de onda correspondentes a vermelho e vermelho distante, outro, a violeta e ultravioleta. Sabe-se, também, ser possível promover abertura no escuro pela remoção de CO₂ da atmosfera interna da planta, indicando que o efeito da luz poderia estar associado ao balanço de carbono, este dependendo de energia, a qual em última análise tem por fonte a radiação solar. Quanto à concentração externa de CO₂, seu aumento acima daquela do ambiente pode decrescer a condutância estomática e vice-versa, permitindo um controle estomático se essa concentração diminui, porque se as plantas de uma comunidade fotossintetizam rapidamente, os estômatos podem abrir (Angelocci, 1998).

Idso & Idso (1994) em revisão de literatura para resposta de várias espécies de plantas ao enriquecimento atmosférico de CO₂ para os últimos dez anos, relataram que cerca de 50% da espécies estudadas mostraram-se relativamente mais receptivas ao enriquecimento atmosférico de CO₂ com baixa intensidade luminosa, ao passo que 40% apresentaram-se menos receptivas. A porcentagem de aumento em termos absoluto na produção de diferentes espécies por enriquecimento de CO₂ são bastante satisfatórios em plantas que sofreram algum tipo de estresse, como baixa intensidade luminosa, temperatura extrema, salinidade, déficit hídrico e influência de gases poluentes.

A eficiência no uso da água para culturas irrigadas sob enriquecimento atmosférico de CO₂, tem apresentado resultados satisfatórios. Hunsaker et al. (1996) avaliaram a cultura do trigo irrigada por gotejamento sob duas condições de umidade no solo, fornecimento adequado de água (- 33 kPa) e sob condições de stress hídrico (- 1500 kPa) para duas condições de CO₂ atmosférico, uma com ambiente (370 μ mol mol⁻¹) e outra enriquecido (550 μ mol mol⁻¹). Os resultados apresentaram eficiência significativa no uso da água para o tratamento com enriquecimento atmosférico, foram 24% maior para a testemunha na tensão de - 33 kPa e 18% maior para a condição de stress hídrico.

Ito (1989) estudou a produção da alface sobre condições controladas artificialmente e testou quatro níveis de CO₂ atmosférico (normal sem adição, 600 ppm, 800 ppm e 1000 ppm), e obteve como resultado, melhor razão de crescimento e qualidade das cabeças para o nível de 600 ppm. Observou também que o incremento adicional em concentração de CO₂ resultou em pequena redução de matéria fresca, embora tenha apresentado alta razão de peso seco e alto conteúdo de clorofila, ocorrido provavelmente devido a baixa temperatura e insuficiência de luz, que geralmente produzem plantas com tecido mais duro.

2.3.1 Efeitos do CO₂

A aplicação de CO₂ via água de irrigação tem provocado diversos efeitos nas culturas. Misra (1951) sugere que alterações em nutrientes do solo, causadas por aplicação de água carbonatada, pode ser fonte de ganho em crescimento nas plantas.

A saturação de CO₂ na água de irrigação na cultura do algodão, proporcionou aumentos nos teores de Zn e Mn no limbo foliar, resultando em maior fotossíntese nos tratamentos com CO₂, quando comparado à testemunha (Mauney & Hendrix, 1988).

Incrementos na elongação do sistema radicular tem sido freqüentemente observados com resultado da elevação na concentração de CO₂ no solo (Glinski & Stepniewski, 1985). Arteca et al. (1979) observaram aumentos no conteúdo de ácidos orgânicos (málico e ácido cítrico) assim como incremento nos teores de Ca e Mg, quando submeteram raízes de batata (*Solanum tuberosum* L.) em solução com alta concentração de CO₂.

O aumento da biomassa do sistema radicular pode induzir maior expiração de dióxido de carbono e exedução de substâncias, estimulando as atividades microbiológicas no solo (Luo et al., 1994).

Testando concentrações diferentes de íons HCO₃⁻ (0,025% e 0,1% CO₂ em água) na cultura do tomate, Bialczyk et al. (1994) observaram que na concentração maior (0,1% de CO₂ em água) os valores absolutos de crescimento diminuíram em

comparação a concentração mediana (0,025 % de CO₂ em água). O estudo mostrou que HCO₃⁻ em médias concentrações estimula a produção de biomassa no estágio inicial de crescimento das plantas.

Bialczyk & Lechowski (1995) analisaram a concentração da seiva de xilema em mudas de tomates, submetidas a incorporação de bicarbonato (HCO₃⁻) e verificaram que potássio foi o cátion encontrado em maior proporção na seiva do xilema, constituindo 52% da concentração total de todos os cátions inorgânicos determinados. Também observaram incremento no conteúdo de aminoácidos ao redor de 28% quando comparado à testemunha.

Machado et al. (1999) discutem algumas hipóteses na tentativa de justificar as causas dos efeitos benéficos sob a produtividade das culturas, por ocasião da aplicação de CO₂ via água de irrigação: difusão do CO₂ do solo para a atmosfera; absorção de CO₂ pelo sistema radicular das plantas (em torno de 1 a 4%); absorção de certos nutrientes, podendo causar o aumento na concentração de íons bicarbonato com abaixamento relativamente temporário do pH da solução do solo, aumentando a disponibilidade de alguns nutrientes; CO₂ podendo agir como hormônio, efeitos do etileno sendo bloqueados pelo CO₂, causando restabelecimento imediato do crescimento da raiz.

Storlie & Heckman (1996a) discutem que entre os vários efeitos da aplicação de CO₂ pela água de irrigação, o aumento na produtividade é mais freqüente onde o pH do solo e da água de irrigação são elevados, utiliza-se cobertura com "mulch", o sistema de irrigação é localizado e a irrigação ocorre freqüentemente, com longa duração.

Mathooko (1996) em trabalho de revisão sobre a regulação da biossíntese do etileno por CO₂, formulou várias hipóteses nas quais, a maioria sugerem a neutralização da ação do etileno pelo CO₂.

Vários autores (Skok et al., 1962; Stolwijk & Thimann, 1957) citados por Storlie & Heckman (1996a) descrevem que menos de 5% do CO₂ fixado pelas plantas é absorvido pelo sistema radicular, e que incrementos na produtividade como resultado da

absorção de CO_2 pelo sistema radicular devido a aplicação de CO_2 via água de irrigação, deve ser bastante improvável.

2.3.2 Resultados da aplicação de CO_2 via água de irrigação em diferentes culturas

Rezende et al. (1999) estudaram o efeito do CO_2 aplicado via água de irrigação por gotejamento na cultura do pimentão, cultivado em ambiente protegido, em duas casas de vegetação. Em uma casa de vegetação, a concentração de CO_2 foi elevada para $800 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ e na outra manteve-se nas condições normais da atmosfera, em torno de $365 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$. Os resultados revelaram um aumento significativo de 45 % no rendimento acumulado (kg ha^{-1}) e um incremento de 13% no peso médio dos frutos no tratamento com aplicação de CO_2 , no entanto não se observou diferença significativa entre o número de frutos para os tratamentos com e sem aplicação de CO_2 .

Pinto et al. (2000) avaliaram os efeitos da aplicação de CO_2 via água de irrigação por gotejamento na produtividade e qualidade de frutos de meloeiro "Valenciano Amarelo" em ambiente protegido. A aplicação de CO_2 iniciou-se logo após o transplântio, estendendo-se até a colheita. O tempo de cada aplicação foi de 30 minutos e a dose aplicada foi de 50 kg ha^{-1} . O tratamento com aplicação de CO_2 proporcionou maior produtividade de frutos total ($28,68 \text{ t ha}^{-1}$) e comercial ($23,68 \text{ t ha}^{-1}$) em comparação com o tratamento sem aplicação, $22,53 \text{ t ha}^{-1}$ e $19,67 \text{ t ha}^{-1}$ para produção total e comercial respectivamente.

Furlan et al. (2001) analisaram os efeitos promovidos pela aplicação de CO_2 via água de irrigação na produtividade e qualidade da alface, cultivada em ambiente protegido e observaram um aumento de 27% na produtividade em relação ao tratamento sem aplicação de CO_2 .

Bialczyk et al. (1996) cultivaram plantas de tomate submetidas ao enriquecimento de 0,025% de CO_2 em água (HCO_3^-) e verificaram incremento no peso fresco dos frutos de 32,6% em média quando comparado com à testemunha.

O experimento conduzido por Sritharan & Lenz (1990) indicou que o enriquecimento de CO₂ na água de irrigação com um nível de 25% no fornecimento de água reduziu consideravelmente a concentração de nitrato em plantas de brócolos (*Brassica oleracea* var. *italica*), devido à baixa transpiração.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida em duas etapas no Horto Experimental do Departamento de Ciências Biológicas, pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) em Piracicaba –SP, cujas coordenadas geográficas são: latitude 22° 42' 30" S, longitude 47° 30' 00" W e altitude média de 576 m.

O clima segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa (clima mesotérmico de inverno seco), temperatura média do mês mais frio menor 18 °C e a do mês mais quente ultrapassa 22 °C. As médias anuais de temperatura, precipitação pluviométrica e umidade relativa são: 21,1 °C, 1247 mm e 74 %, respectivamente. A estação seca ocorre entre abril e setembro e a época mais chuvosa entre janeiro e fevereiro.

A primeira etapa constituiu em testes preliminares para determinação da dose de CO₂ fisiológica para a cultura da alface em condições controladas, utilizando um medidor portátil de fotossíntese LI-6400 da Li-Cor, permitindo a elaboração de curvas de assimilação de CO₂ em função da densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA) e da concentração de CO₂.

A segunda e a terceira etapa foram formadas por quatro experimentos (quatro ciclos de cultivo) com a finalidade de testar as doses de CO₂ determinadas na primeira etapa e observar os efeitos provocados pela aplicação de CO₂ via água de irrigação na cultura da alface, na atmosfera, no solo e na água de irrigação, em várias épocas. Nesta etapa os experimentos foram conduzidos sob túneis baixos de filme de polietileno de baixa densidade, utilizando duas cultivares de alface, Elisa e Verônica. A cultivar Elisa, do tipo lisa, caracteriza-se por formar cabeça e possuir pendoamento mais lento (Silva, 1997).

A cultivar Verônica, do tipo crespa, não forma cabeça e apresenta relevante desempenho quanto à resistência ao calor, podendo ser cultivada o ano todo (Azevedo et al., 1997).

3.1 Etapa 1 - Experimento 1 – curvas de respostas à taxa de assimilação de CO₂

Plantas de alface cultivar Elisa, cultivadas em condições de casa de vegetação, foram utilizadas para determinar as curvas de assimilação de CO₂ em função da concentração de CO₂ e da densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos DFFFA. Trinta dias após a semeadura, as plantas foram transplantadas para vasos de 2,5 litros de capacidade.

Transplantou-se uma muda por vaso em 19/04/99, com colheita realizada em 20/05/99. Para mantê-las em condições ideais, foram aplicados, diariamente, nutrientes através da água de irrigação, conforme solução nutritiva recomendada por Mccree (1986).

Quando as folhas atingiram área superior a 6 cm², iniciaram-se as leituras de assimilação de CO₂ com o IRGA (Analysis Gas by Infrared) modelo LI-6400 da Li – Cor Inc., NE/USA, precisão na análise de CO₂ $\pm 5 \mu\text{mol mol}^{-1}$ para 0 a 1500 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ e $\pm 10 \mu\text{mol mol}^{-1}$ para 1500 a 3000 $\mu\text{mol mol}^{-1}$ (Figura 1), sob condições controladas de luz, temperatura e gás carbônico no Laboratório de Fisiologia de Plantas Cultivadas sobre Stresse pertencente à ESALQ/USP.

Figura 1 – IRGA modelo LI-6400.

O princípio de funcionamento do IRGA baseia-se em uma fonte que emite ondas com comprimento no infravermelho através de uma célula de análise, onde simultaneamente, é transportado o gás proveniente da amostra estudada, e paralelamente existe uma outra célula chamada de referência transportando moléculas de CO_2 com concentração conhecida. As moléculas de CO_2 absorvem ondas de infravermelho e um detector, em posição oposta à fonte de emissão, compara a quantidade de radiação que passa por cada célula, registrando a diferença (Figura 2) (Peet & Krizek, 1997).

Figura 2 – Esquema do princípio de funcionameno do IRGA.

As curvas de assimilação de CO_2 foram obtidas em cinco plantas sorteadas entre os dez vasos cultivados. As folhas selecionadas mantiveram a mesma posição de uma planta para outra, procurando uniformizar o estágio de desenvolvimento das mesmas.

As doses de CO_2 e os níveis de DFFFA aplicados nas folhas de alface para obtenção das curvas de assimilação de CO_2 foram 0, 200, 400, 600, 800, 1000 e 1200 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ e 50, 100, 200, 400, 800, 1000, 1400 $\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente, mantidas à temperatura de 22 °C. As curvas de assimilação de CO_2 em função da concentração de CO_2 foram obtidas para DFFFA de 1400 $\mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e as curvas de assimilação de CO_2 em função de DFFFA foram obtidas sob a concentração de CO_2 de 365 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$. Após a determinação dessas curvas,

realizou-se a experimentação das doses de 600 e 800 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, em casa de vegetação, com a radiação do ambiente. As leituras foram realizadas na mesma planta em dias diferentes para cada dose, com plena intensidade luminosa. As leituras foram realizadas durante o período 9:00 às 17:00h.

3.2 Etapa 2 – Experimentos conduzidos em campo com aplicação de CO_2 via água de irrigação

Foram formados quatro canteiros com proteção lateral de madeira, com dimensões de 1,20m x 3,00m e profundidade de 0,30m (Figura 3). Os experimentos 2 e 3 receberam terra e esterco de curral na dose 60 t ha^{-1} , os demais não receberam adubação orgânica. A cada ciclo de cultivo a terra foi removida dos canteiros e misturada uniformemente através de uma betoneira para posterior redistribuição, procurando evitar variabilidade de fertilidade.

Figura 3 – Canteiros

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, sendo que cada canteiro recebeu um tratamento. Os canteiros foram constituídos por quatro linhas de plantas, espaçadas por 0,30m entre si. As duas linhas externas da lateral e da cabeceira foram consideradas bordadura, sendo cada parcela constituída por dezesseis plantas úteis.

Os canteiros foram cobertos com túneis de armação de ferro, revestido de filme de polietileno de baixa densidade, com a finalidade de aprisionar o CO₂ aplicado via água de irrigação e evitar a incidência direta de chuvas sobre a cultura (Figura 4). Os túneis foram colocados antes da irrigação e permaneciam sobre os canteiros por uma hora e meia à duas horas após a irrigação, procurando evitar grande elevação na temperatura sob o túnel.

Figura 4 – Túneis para cobertura dos canteiros.

Os dados climáticos referentes aos períodos de cultivo (Tabela 2) foram obtidos na estação meteorológica do departamento de Ciências Exatas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

Tabela 2. Valores de precipitação pluviométrica (P) e médias mensais de radiação global (RG), número de horas de insolação, umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento (U), temperatura do ar (T) e evaporação do tanque classe A (ECA), registrados nos períodos de cultivo da alface. ESALQ/USP. Piracicaba, 1999.

Período	RG cal cm ⁻² d ⁻¹	Insolação h dia ⁻¹	P mm	UR %	U km h ⁻¹	T °C	ECA mm
Ago/1999	375	8,40	0,00	64	8,00	19,10	3,85
Set/1999	423	7,80	85,90	70	9,70	21,40	4,95
Nov/1999	480	7,00	52,10	72	9,20	22,60	5,73
Jun/2000	257	6,00	68,60	83	6,00	17,50	2,55
Set/2000	396	6,20	91,20	73	9,10	21,20	4,55
Out/2000	480	7,20	114,20	69	7,90	25,00	5,73

A irrigação foi por gotejamento, utilizando-se de fita gotejadora Rain-Tape TPC, fabricado pela Rain-Bird. Os gotejadores foram autocompensantes, do tipo labirinto, fluxo turbulento e espaçamento entre emissores de 0,20m e vazão de $1,09\text{L h}^{-1}$, cujo CUC (Coeficiente de Uniformidade de Christiansen) avaliado foi de 93,4%. As linhas laterais com comprimento de três metros foram dispostas próximas às fileiras das plantas, seguindo o mesmo espaçamento das linhas de plantio, ou seja, espaçadas de 0,30m.

O sistema de irrigação foi composto por um conjunto de registros para controle dos tratamentos, contendo reguladores de pressão de 100 kPa e válvulas de retenção vertical para evitar retorno do CO_2 aplicado (Figura 5). Próximo aos canteiros foi instalado um filtro de tela de 120 Mesh, visando prevenir entupimentos nos gotejadores.

Figura 5 – Conjunto de registros para controle da irrigação

As irrigações foram feitas diariamente, em torno das 10:00 h, com base na evaporação do Tanque Classe A, corrigida pelos coeficientes de cultivo (fase II – 0,48; fase III – 0,80 e fase IV – 0,88) e do tanque ($K_p = 0,75$).

O tempo de irrigação correspondente a evapotranspiração da cultura foi determinado pela eq. (2).

$$TI = \frac{ET \times A}{Q} \quad (2)$$

em que:

TI = tempo de irrigação (h);

ET = evapotranspiração da cultura (mm);

A = área do canteiro (m²);

Q = vazão derivada ao canteiro (L h⁻¹).

O sistema de aplicação de CO₂ foi composto de um cilindro de CO₂, equipado com uma válvula reguladora de pressão, manômetro, fluxômetro com escala de 0,2 a 2,0 L min⁻¹ para quantificar o fluxo de dióxido de carbono a ser liberado e um injetor para introduzir o CO₂ na água de irrigação (Figura 6). Após calibrado o nível de carbono na água de irrigação, procurou-se manter a vazão constante para não alterar a calibração. Para isto foi criado um sistema de escape, constituído em fitas gotejantes na quantidade suficiente para fornecer a vazão para um tratamento. Ao interromper a aplicação de água carbonatada ao tratamento, esta foi desviada ao sistema de escape, mantendo a vazão constante. A operação de utilização do sistema de escape foi realizada por manuseio de três registros, um para fechar a água carbonatada para o tratamento, outro para abrir a água carbonatada para o sistema de escape e outra para alimentar o tratamento com água comum.

1. Cilindro de CO₂;
2. Fluxômetro e manômetro para controle de gás;
3. Injetor de CO₂

Figura 6 – Equipamentos utilizados para injeção de CO₂ na água de irrigação.

As aplicações de CO₂ via água de irrigação foram realizadas diariamente, a cada sete dias da injeção do CO₂ foi realizada calibração do fluxômetro através de um recipiente contendo água, um cronômetro e uma proveta graduada. Na calibração o gás foi liberado por uma mangueira e introduzido numa proveta graduada, imersa com a boca para baixo num recipiente cheio de água. A liberação do gás dentro da proveta deslocou um certo volume de água em um determinado tempo, o qual foi cronometrado. Com os valores obtidos na calibração, determinou-se uma equação de ajuste da leitura do fluxômetro ao fluxo medido, a qual foi utilizada para a definição da vazão de CO₂ a ser empregada no fluxômetro por ocasião da aplicação do gás via água de irrigação.

O tempo de aplicação de CO₂ via água de irrigação (T_{CO2}) foi dependente do volume de água aplicada pela irrigação, ou seja, o volume de CO₂ foi constante, mas a taxa de aplicação variou com a lâmina aplicada (eq. 3, 4 e 5), mantendo os limites inferior a saturação do gás CO₂ na água que é de 1,2 g L⁻¹, segundo Storlie & Heckman (1996). A determinação das doses de CO₂ para aplicação via água de irrigação, foram obtidas a partir de incrementos de CO₂ na atmosfera (100, 300 e 600 ppm) e transformados para kg ha⁻¹ (eq. 6 e 7).

$$V_{CO_2} = \text{Maior Incremento } CO_2 \times V_C \times 3 \quad (3)$$

em que:

V_{CO_2} = volume de CO₂ aplicado para maior incremento em três canteiros (cm³);

Maior Incremento de CO₂ = maior incremento de CO₂ a ser aplicado (ppm);

V_C = volume da cobertura do canteiro (m³).

Para que a análise dimensional da equação 3 fique correta tem-se que 1 ppm = 1 cm³ de CO₂ em 1000.000 de cm³ de ar, ou ainda, 1 cm³ de CO₂ em 1 m³ de ar.

$$Q_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{TI \times 1000} \quad (4)$$

em que:

Q_{CO_2} = vazão de CO_2 aplicada para os três canteiros ($L\ h^{-1}$).

Nos tratamentos com incrementos de CO_2 inferiores ao máximo valor, o controle foi feito com variação no tempo de aplicação, permanecendo a taxa de injeção constante. A determinação do tempo de aplicação foi obtido com a utilização da eq. (5), apresentada a seguir.

$$T_{CO_2} = \frac{\text{Incremento de } CO_2 \times TI}{\text{Maior Incremento de } CO_2} \quad (5)$$

em que:

Incremento de CO_2 = incremento de CO_2 desejado (ppm);

T_{CO_2} = tempo de aplicação de CO_2 para o incremento desejado (h).

Para cada tempo determinaram-se os novos volumes de CO_2 para o incremento desejado, de acordo com a eq. (6).

$$V_{I_{CO_2}} = \left(\frac{Q_{CO_2}}{3} \right) \times T_{CO_2} \quad (6)$$

em que:

$V_{I_{CO_2}}$ = volume de CO_2 para o incremento desejado (L).

Considerando cada incremento de CO₂ aplicado e sua acumulação ao longo do ciclo da cultura, pode se obter a dose de CO₂ em kg ha⁻¹. (eq. 7).

$$D = \frac{VI_{CO_2} \times \rho_{CO_2} \times S \times N}{A \times 1000} \quad (7)$$

em que:

D = dose de CO₂ por ciclo de cultivo (kg ha⁻¹);

ρ_{CO_2} = massa específica do CO₂ na CNTP (1,964 kg m⁻³);

S = área de um ha em m² (10000 m²);

A = área do tratamento (m²);

N = número de dias com aplicação de CO₂ (dias).

O valor 1000 foi utilizado para transformação do volume em litros para metros cúbicos.

Para o estudo da concentração de nutrientes na solução do solo, foram instalados baterias de tensiômetros e extratores de solução.

A coleta da solução do solo foi realizada após a aplicação de CO₂ via água de irrigação, através de quatro extratores de solução do solo localizados em cada canteiro. Os extratores foram instalados a uma distância de 0,10 m da planta da alface, com cápsulas a 0,20 m de profundidade em relação à superfície do solo (Figura 7). A coleta da solução nos extratores foi realizada com o auxílio de uma seringa de 60 cm³, acoplada a um tubo flexível de 6 mm de diâmetro. Para facilitar a extração, no dia anterior, realizou-se aplicação de vácuo com tensão em torno de 70 kPa, utilizando a própria seringa da coleta. O intervalo das coletas variou nos experimentos entre quatro e sete dias. As amostras de solução coletadas nos extratores foram acondicionadas em recipientes e conservadas em geladeira à 4 °C, para posterior análise química.

1. Detalhe da disposição dos extratores de solução do solo;
2. Vista geral.

Figura 7 – Extratores de solução do solo

Os tensiômetros foram instalados entre às linhas de plantio, com distância e profundidade equivalentes aos extratores de solução do solo, visando verificar indiretamente a umidade do solo no momento da extração da solução do solo. O conhecimento da umidade do solo no momento da extração é importante, pois possibilita estimar a condutividade elétrica e a concentração de íons em uma umidade padrão (Silva et al., 2000). As leituras nos tensiômetros foram realizadas no momento da aplicação do vácuo nos extratores de solução do solo, utilizando um leitor digital de punção (Tensímetro).

As plantas foram semeadas em bandeja de poliestireno expandido com 200 células, em substrato comercial "Plantmax HA", caracterizado por umidade de 50-60 %; capacidade de retenção de água de 150% (mínimo); condutividade elétrica entre 1,0-2,0 mS cm⁻¹ e pH de 5,5-6,2. O transplântio foi realizado quando as plantas emitiram a quinta folha, aproximadamente 30 dias após a semeadura.

O controle de ervas daninhas foi realizado através de capina manual, sempre procurando deixar as plantas de alface livres de plantas invasoras. O controle de pragas foi realizado somente quando as plantas apresentavam sintomas característicos de ataques. Durante o terceiro experimento foi necessário realizar uma pulverização com inseticida de princípio ativo deltamethrin (decis 25 CE) na dosagem de 1mL L⁻¹ de água para controle do trips.

A colheita das plantas de alface foram realizadas quando as mesmas apresentavam-se prontas para o consumo.

Após a colheita foram determinadas: matéria seca (MS), matéria fresca (MF), número de folha (NF) e índice de área foliar (IAF). A determinação da matéria seca, proveniente da colocação do material vegetal em estufa de ventilação forçada à 65 °C até massa constante, e da matéria fresca foi obtida por pesagem em balança digital. O número de folhas foi verificado contando-se as folhas que apresentaram comprimento mínimo de 5 cm, desprezando-se as folhas que estavam secas rentes ao solo. O parâmetro IAF foi determinado pela razão entre área foliar e a área de ocupação da planta, obtida pelo espaçamento, sendo que a área foliar foi determinada pelo medidor de área modelo LI- 3100 da Li – Cor Inc., NE/USA, com resolução de 1 mm² e precisão de ± 1%.

A produtividade considerada nas avaliações foi determinada convertendo-se os valores a uma unidade padrão para fins de comparação em cada um dos experimentos. A unidade padrão foi a média das umidades obtidas em todos os tratamentos.

Foram determinadas a eficiência do uso de água e de CO₂. A eficiência do uso de água pela cultura foi obtida pela relação entre a produtividade com base em matéria seca de cada tratamento e o consumo de água durante o ciclo de cultivo, como mostra a eq. (8) (Doorenbos & Kassan, 1994).

$$EUA = \frac{P}{C} \quad (8)$$

em que:

EUA = eficiência do uso da água (kg m⁻³);

P = produtividade da alface com base em matéria seca (kg ha⁻¹);

C = consumo de água durante o ciclo da cultura (m³ ha⁻¹).

Na análise estatística das variáveis avaliadas, procedeu-se a análise de variância pelo Teste F e médias comparadas pelo teste de Duncan.

3.2.1 Experimento 2 – cultivar Elisa com aplicação de diferentes doses de CO₂

A cultivar de alface utilizada foi Elisa. A adubação seguiu a recomendação de Raij et al. (1999) para a cultura da alface, com base na análise de solo (Tabela 3). Foram retiradas amostras compostas para caracterização química nas camadas de 0 – 0,20 m, independentes para cada canteiro.

Tabela 3. Experimento 2 - Análise química do solo dos quatro canteiros. ESALQ/USP.Piracicaba, 1999.

Canteiro	P	M.O.	K	Ca	Mg	H+Al	pH (2:1) (CaCl ₂)	S	T	V%
	mg/dm ³	g/dm ³	mmol _e /dm ³							
1	303	47	5,4	65	30	14	6,5	100,2	114,5	88
2	360	51	5,4	73	28	15	6,5	106,4	121,2	88
3	180	34	4,5	69	26	15	6,5	99,2	114,0	87
4	195	37	5,3	66	23	13	6,7	94,3	106,7	88

* fósforo (P), matéria orgânica (M.O), macronutrientes (K, Ca, Mg), saturação por alumínio (H + A), pH, soma de base (S), capacidade de troca de cátions (T), saturação por bases (V).

O resultado da análise de solo mostrou boa uniformidade entre os canteiros para a saturação por bases (V%).

A adubação de plantio constitui-se de: 10g planta⁻¹ de P₂O₅; 1,55g planta⁻¹ de KCl e 0,05g planta⁻¹ de ácido bórico. A adubação de cobertura foi parcelada em três aplicações durante o ciclo da cultura (7, 14 e 21 dias após o transplante das mudas), utilizando-se 1,29g planta⁻¹ aplicação⁻¹ de nitrato de cálcio. Os canteiros tiveram a superfície coberta com substrato comercial "Plantmax HA", com a

finalidade de reter por mais tempo a umidade do solo.

Os tratamentos foram sorteados e distribuídos entre os quatros canteiros, recebendo à seguinte configuração:

Canteiro 1 – T310, dose de 310 kg de CO₂ ha⁻¹ ciclo⁻¹;

Canteiro 2 – TT, sem aplicação de CO₂;

Canteiro 3 – T155, dose de 155 kg de CO₂ ha⁻¹ ciclo⁻¹;

Canteiro 4 – T52, dose de 52 kg de CO₂ ha⁻¹ ciclo⁻¹.

O início da aplicação de CO₂ via água de irrigação ocorreu no dia 16/08/99, sete dias após o transplântio das mudas nos canteiros. O término da aplicação deu-se no dia anterior à colheita das plantas (08/09/1999).

Nas plantas pertencentes a área útil do delineamento experimental foram sorteadas, por ocasião da colheita, dez plantas de cada tratamento para determinação da matéria seca, matéria fresca, número de folhas e área foliar para o cálculo do índice de área foliar.

A taxa de assimilação de CO₂ em função do DFFFA ao longo de um dia, no período das 9:00 h as 17:00 h, foi medida utilizando-se do IRGA, sorteando uma planta de cada tratamento e desta planta sorteou-se uma folha mediana. As medidas foram realizadas após dez dias do transplântio das mudas, com duas medidas em cada tratamento ao longo do ciclo. Para que as diferentes radiações incidentes nos dias de leitura não influenciasse nos resultados, os valores de assimilação de CO₂ obtidos foram divididos pela respectiva radiação de cada dia, calculando-se assim um rendimento (%).

Após a colheita retirou-se uma folha mediana de cada planta para análise química de macro e micronutrientes.

As coletas de solução de solo foram realizadas a cada sete dias e as amostras foram submetidas à análise de NO₃, P, K, Ca, Mg e condutividade elétrica (CE), através de um condutivímetro modelo HI 8820, marca ATC Bench Conductivity, com precisão de ± 1 %.

3.2.2 Experimento 3 – cultivar Verônica com aplicação de diferentes doses de CO₂

A cultivar utilizada foi Verônica adaptada a temperaturas mais elevadas, ou seja, mais adequada ao novo período de cultivo. O transplântio foi realizado no dia 01/11/99 e a colheita no dia 29/11/99.

A terra dos canteiros foi removida e redistribuída novamente para melhor homogeneização. O substrato não foi utilizado, por perceber no primeiro experimento, que a umidade do solo manteve-se naturalmente elevada, não havendo necessidade do mesmo. Foram realizadas novas análises de solo sendo retiradas amostras, independentes para cada canteiro (Tabela 4).

Tabela 4. Experimento 3 - Análise química do solo dos quatro canteiros. ESALQ/USP. Piracicaba, 1999.

Canteiro	P	M.O.	K	Ca	Mg	H+Al	pH (2:1) (CaCl ₂)	S	T	V%
	mg/dm ³	g/dm ³	mmol _c /dm ³							
1	234	35	6,8	111	56	13	6,7	173,8	187,1	93
2	265	41	6,3	70	35	13	6,7	111,1	124,4	89
3	217	33	6,0	61	25	13	6,7	91,8	105,1	87
4	265	33	7,4	68	29	13	6,8	103,9	117,2	89

* fósforo (P), matéria orgânica (M.O), macronutrientes (K, Ca, Mg), saturação por alumínio (H + A), pH, soma de base (S), capacidade de troca de cátions (T), saturação por bases (V).

A adubação de plantio e cobertura tiveram as mesmas doses e fertilizantes utilizados no experimento dois, em função da proximidade dos resultados da análise.

Os canteiros foram cobertos com sombrite 50% nos períodos de maior insolação na primeira semana após o transplântio das mudas, evitando a incidência direta da radiação solar, a qual poderia provocar danos às plantas (Figura 8). Os túneis

foram utilizados somente nos momentos de precipitações, não mais durante a aplicação do CO₂ via água de irrigação.

Figura 8 - Canteiros cobertos com sombrite.

Os tratamentos foram distribuídos diferentemente do experimento dois, com intuito de descartar influência do local.

Canteiro 1 – T155, dose de 155 kg de CO₂ ha⁻¹ ciclo⁻¹;

Canteiro 2 – T52, dose de 52 kg de CO₂ ha⁻¹ ciclo⁻¹;

Canteiro 3 – T310, dose de 310 kg de CO₂ ha⁻¹ ciclo⁻¹;

Canteiro 4 – TT, sem aplicação de CO₂.

O início da aplicação de CO₂ via água de irrigação ocorreu no dia 08/11/99, sete dias após o transplântio das mudas nos canteiros. O término da aplicação deu-se no dia 27/11/99 (dois dias antes da colheita).

Realizaram-se duas amostragens de plantas durante o ciclo da cultura, aos 18 dias e outra por ocasião da colheita (29/11/99), visando a determinação das taxas de crescimento relativo (TCR) e de crescimento foliar relativo (TCFR).

Em cada amostragem foram selecionadas 4 plantas das duas linhas centrais de cada tratamento, nas quais foram avaliadas as variáveis matéria seca, matéria fresca, número de folhas e índice de área foliar. Com os valores de matéria seca e de área foliar referentes as duas coletas de plantas foram determinadas a taxa de crescimento relativo (TCR) e a de crescimento foliar relativo (TCFR) da cultura, por meio das equações propostas por Lucchesi (1984) e descritas a seguir (equações 9 e 10).

$$TCR = \frac{(\ln P_2 - \ln P_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (9)$$

em que:

TCR = taxa de crescimento relativo ($\text{g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$);

P_2 = peso da matéria seca da parte aérea colhido na segunda amostragem (g);

P_1 = peso da matéria seca da parte aérea colhido na primeira amostragem (g);

t_2 e t_1 = dias da segunda e primeira amostragens, respectivamente (número de dias decorridos entre as duas amostragens) (dias).

$$TCFR = \frac{(\ln A_2 - \ln A_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (10)$$

em que:

TCFR = taxa de crescimento foliar relativo ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-2}$);

A_2 = área foliar do vegetal colhido na segunda amostragem (cm^2);

A_1 = área foliar do vegetal colhido na primeira amostragem (cm^2);

t_2 e t_1 = dias da segunda e primeira amostragens, respectivamente (número de dias decorridos entre as duas amostragens) (dias).

Após as coletas das plantas retirou-se uma folha mediana de cada planta para análise química de macro e micronutrientes.

As coletas de solução de solo foram realizadas a cada sete dias e as amostras acondicionadas em geladeira para posterior análise de NO_3^- , K^+ e Ca^{+2} e CE.

3.2.3 Experimento 4 – cultivar Elisa, diferentes períodos de aplicação de CO_2

A cultivar utilizada foi Elisa, sendo o plantio realizado no dia 29/05/00 e a colheita quando as plantas apresentavam-se prontas para o consumo, no dia 30/06/00.

Anteriormente ao plantio das mudas o solo foi removido dos canteiros e misturado uniformemente para posterior redistribuição. Foi coletada uma amostra composta para análise química, cujo resultado é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Experimento 4 - Análise química de uma amostra composta de solo dos quatro canteiros. ESALQ/USP.Piracicaba, 2000.

P	M.O.	K	Ca	Mg	H+Al	pH	S	T	V%
mg/dm ³	g/dm ³	mmol _e /dm ³				(CaCl ₂)			
199	35	3,6	81	33	15	6,3	117,7	132,5	89

* fósforo (P), matéria orgânica (M.O), macronutrientes (K, Ca, Mg), saturação por alumínio (H + A), pH, soma de base (S), capacidade de troca de cátions (T), saturação por bases (V).

A adubação de plantio e cobertura teve as mesmas doses de fertilizantes utilizados nos experimentos 2 e 3.

Neste experimento foram testados diferentes períodos de aplicação de CO_2 via água de irrigação, dentro do ciclo de cultivo, para a dose de 155 kg ha^{-1} .

Os tratamentos foram distribuídos da seguinte forma:

Canteiro 1 – T1/2, aplicação de CO_2 na ½ final do ciclo, início 14/06/00;

Canteiro 2 – T1/4, aplicação de CO_2 no ¼ final do ciclo, início 22/06/00;

Canteiro 3 – T3/4, aplicação de CO_2 no ¾ final do ciclo, início 06/06/00;

Canteiro 4 – TT, aplicação de CO₂ durante todo o ciclo, início 29/05/00.

Após a colheita foram selecionadas seis plantas de cada canteiro para análise das mesmas variáveis avaliadas nos experimentos 2 e 3. De cada planta foi retirada uma folha mediana, para análise dos macro e micro nutrientes.

3.3 Etapa 3 - Experimento 5 – cultivar Verônica com aplicação de diferentes doses de CO₂ e por enriquecimento atmosférico

O experimento cinco comparou a aplicação de CO₂ via água de irrigação com a aplicação por enriquecimento atmosférico, para as variáveis matéria seca (MS); matéria fresca (MF); número de folhas (NF) e índice de área foliar da cultura da alface (IAF). Também avaliou-se o efeito das doses de CO₂ aplicadas via água de irrigação: na água de irrigação, no pH do solo e no fluxo de CO₂ do solo.

A cultivar utilizada foi Verônica, cujo o plantio foi realizado no dia 11/09/00 e a colheita se deu quando as plantas apresentavam-se prontas para o consumo, no dia 11/10/00.

Anteriormente ao plantio das mudas o solo foi removido dos canteiros e misturado uniformemente para posterior redistribuição. Foi coletada uma amostra composta para análise química, cujo resultado é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Experimento 5 - Análise química de uma amostra composta de solo dos quatro canteiros. ESALQ/USP. Piracicaba, 2000.

P	M.O.	K	Ca	Mg	H+Al	pH (2:1) (CaCl ₂)	S	T	V%
mg/dm ³	g/dm ³	mmol/dm ³							
204	35	2,8	99	28	13	6,4	130,0	143,3	91

* fósforo (P), matéria orgânica (M.O), macronutrientes (K, Ca, Mg), saturação por alumínio (H + A), pH, soma de base (S), capacidade de troca de cátions (T), saturação por bases (V).

A adubação de plantio e cobertura recebeu as mesmas doses e fertilizantes utilizados nos experimentos 2, 3 e 4.

A aplicação de CO₂ foi realizada via água de irrigação e no ambiente (enriquecimento atmosférico) (Figura 9-1), foram utilizados dois cilindros de gás carbônico e consequentemente dois sistemas de injeção. A aplicação de CO₂ via água utilizou o mesmo sistema utilizado nos demais experimentos.

Para a aplicação via ar foi necessário acoplar mangueiras de polietileno perfuradas com saídas para microtubos (Figura 9-2), pelas quais o gás foi liberado a uma altura de aproximadamente 0,50 m da superfície do solo. Como a quantidade do gás a ser aplicada foi muito pequena, e o equipamento disponível não apresentava sensibilidade suficiente para a dose correta, foi necessário projetar um sistema de escape (Figura 9-3) que triplicava a concentração a ser aplicada, possibilitando a dosagem correta no momento da injeção. O sistema de escape constituiu-se da mesma mangueira de polietileno com saída para microtubos descrita acima e teve três vezes mais o número de microtubos, o mesmo foi posicionado distante do canteiro para se evitar contaminação da área do experimento.

1. Cilindro de gás carbônico + fluxômetro;
2. Microtubo distribuidor de gás carbônico;
3. Escape de gás carbônico.

Figura 9 – Sistema de injeção de CO₂ via ar

Os tratamentos foram distribuídos da seguinte forma:

Canteiro 1 – TT (sem aplicação de CO₂);

Canteiro 2 – T155ar (dose de 155 kg de CO₂ ha⁻¹ ciclo⁻¹ via ar);

Canteiro 3 – T310ag (dose de 310 kg de CO₂ ha⁻¹ ciclo⁻¹ aplicada via água);

Canteiro 4 – T155ag (dose de 155 kg de CO₂ ha⁻¹ ciclo⁻¹ aplicada via água).

As doses de CO₂ aplicadas via água e no ambiente foram as mesmas, procurando garantir uma comparação entre as duas formas de aplicação. A variação nas doses de CO₂ aplicadas via água de irrigação, visaram observar os efeitos provocados pelo CO₂ nas variáveis estudadas para a alface.

O início da aplicação de CO₂ foi de sete dias após o transplante das mudas (18/09/00) e foi finalizado por ocasião da colheita, como nos experimentos anteriores. O tempo de aplicação de CO₂ via água foi baseado no tempo de irrigação, como anteriormente mencionado. A aplicação de CO₂ via ar foi realizada diariamente em torno das 9:00 h, simultaneamente à irrigação, e com duração constante de 12 minutos.

Para os tratamentos que receberam CO₂ via água, foram realizadas leituras do fluxo de CO₂ no solo durante o ciclo da cultura. O aparelho utilizado foi uma câmara de fluxo de CO₂ modelo LI-6400-09 da Li-Cor Inc., NE/USA, acoplado ao IRGA, que registrou a emissão de CO₂ do solo para a câmara (Figura 10). A câmara foi introduzida no solo próximo à planta uma hora antes da irrigação, iniciando a leitura com dez repetições; sendo o mesmo procedimento repetido durante e após a irrigação. Nos dias anteriores às leituras, foram inseridos ao solo anéis de PVC para introdução da câmara de solo por ocasião das leituras, evitando-se alterações na estrutura física do solo. O fluxo foi calculado utilizando o melhor ajuste de regressão linear, para as várias medidas (repetições) de fluxo registradas pelo IRGA. Análise quantitativa do movimento de CO₂ nas camadas do solo é essencial para se verificar a circulação de carbono e a emissão de CO₂ para a atmosfera.

Na elaboração do gráfico do fluxo de CO_2 do solo foi considerado um fluxo relativo, determinado pela razão entre a média do fluxo medido durante e após a irrigação e a média do período anterior a irrigação.

1. Câmara de fluxo de CO_2 do solo acoplado ao LI-6400;
2. Detalhe da câmara de solo.

Figura 10 – Câmara de fluxo de CO_2 do solo

Foi realizado o monitoramento do CO_2 atmosférico durante a aplicação do gás carbônico para todos os tratamentos, utilizando um analisador de gás CO_2 modelo Li-800 da Li-Cor Inc., NE/USA, com precisão de 2% acoplado a um voltímetro (Figura 11), o qual teve a função de transformar o sinal proveniente do Li-800. As leituras foram realizadas simultaneamente para todas as doses, através de um sistema de mangueiras distribuídas entre os canteiros. Em um período de vinte minutos anterior a aplicação do gás iniciavam-se as medidas de gás, em intervalos de dez minutos. Durante a leitura cada tratamento foi repetido por três vezes; iniciava-se a medida esperando quarenta segundos para a tomada da primeira leitura, tempo necessário para a resposta do aparelho à entrada do gás; após dez segundos a segunda leitura e após mais dez segundos a última leitura, assim sucessivamente para todos os tratamentos. No período de aplicação do gás, das 9:00 as 9:12 h, as leituras foram obtidas consecutivamente, sem intervalo entre as mesmas, após o término da aplicação, as leituras continuaram por mais uma hora à intervalos de dez minutos cada.

Figura 11 – Medidor de CO₂ atmosférico

O pH do solo foi medido por um aparelho de leitura direta (Figura 12), Soil Tester modelo DM-5, marca Demetra Tokyo, Japan, introduzido no solo para os tratamentos que receberam CO₂ via água de irrigação e para a testemunha. As leituras foram realizadas ao término da irrigação, após a estabilização do equipamento, aproximadamente de 3 a 5 minutos, por cinco dias consecutivos.

Figura 12- Medidor de pH do solo

Também foram realizadas medidas de pH da água de irrigação, após a aplicação do gás. Foram colocados recipientes, aleatoriamente nos canteiros, sob o gotejador para coleta de amostra da água. Imediatamente após o término da irrigação as amostras foram levadas ao Laboratório do Horto da Botânica da ESALQ para análise do pH.

Durante o ciclo da cultura, após 15 dias do transplântio das mudas, iniciaram-se as medidas de comprimento e largura das folhas, corrigidos pelo fator de forma (Norman & Campbell, 1991), para estimativa da área foliar, método não destrutivo. Foram sorteadas quatro plantas das duas linhas centrais de cada canteiro, as quais foram identificadas com etiquetas. Selecionou-se uma folha mediana de cada planta, marcando com uma caneta de ponta porosa as extremidades da parte mais larga no sentido horizontal. Diariamente, com auxílio de uma régua media-se a largura (tomando como referência a marca da caneta) e comprimento da folha. Com o término do crescimento, geralmente em torno de quatro dias, trocava-se de folha.

Após a colheita foram selecionadas seis plantas de cada canteiro para análise das mesmas variáveis avaliados nos experimentos 2, 3 e 4.

3.4 Análise econômica

A viabilidade econômica da aplicação de CO₂ via água de irrigação na cultura da alface para as condições de cultivo apresentadas, foi determinada pela comparação entre a relação benefício – custo dos tratamentos que apresentaram melhor produtividade com e sem a aplicação de CO₂. A análise foi realizada nos experimentos 2, 3 e 5. Para isso, foi utilizado o custo de produção para a cultura da alface em um ciclo de cultivo e o preço do produto comercializado durante diferentes épocas no ano, apresentados por FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO (2001).

Os custos dos equipamentos utilizados para aplicação do CO₂ via água de irrigação foram obtidos no mercado, os quais foram corrigidos pelo fator de recuperação do capital e pelo fator de formação de capital de uma série uniforme de pagamentos conforme as equações apresentadas por Bernardo (1989) e Frizzone & Silveira (2000), respectivamente. O preço do gás também foi determinado no mercado local e acrescido no custo da produção da alface, juntamente com o custo dos equipamentos de injeção, compondo o custo total da produção da alface com aplicação de CO₂ via água de irrigação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Etapa 1 - Experimento 1 – curvas de respostas à taxa de assimilação de CO₂

A Figura 13 apresenta valores de assimilação de CO₂ em função da radiação fotossinteticamente ativa.

Figura 13 - Taxa de assimilação de CO₂ em função da densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA), sob concentração de CO₂ ambiente e temperatura de 22°C, para alface (cultivar Elisa), conduzida em casa de vegetação. As linhas verticais indicam o desvio padrão da média. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

A equação 11, fornece a variação da taxa de assimilação de CO₂ para os valores estimados seguindo modelo polinomial:

$$A = 21,72 - 0,003 \text{ DFFFA} - \frac{7051,22}{\text{DFFFA}} + \frac{75745,64}{\text{DFFFA}^{1,5}} - \frac{234739,34}{\text{DFFFA}^2} \quad R^2 = 0,99 \quad (11)$$

em que:

A = assimilação de CO₂ (μmol CO₂ m⁻² s⁻¹);

DFFFA = densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (μmol fótons m⁻² s⁻¹).

A Figura 13 mostra que a curva atingiu a forma de uma assíntota indicando o ponto de saturação lumínica entre os valores de 800 a 1000 μmol m⁻² s⁻¹, os valores estão pouco superiores aos observados por Hall & Rao (1994), 600 a 800 μmol m⁻² s⁻¹ para plantas do tipo C₃. Para os valores de DFFFA inferiores a 800 μmol m⁻² s⁻¹, os ganhos na taxa de assimilação de CO₂, são maiores do que os ganhos observados em valores acima deste valor, resultado também verificado por Rezende (2001) em curvas de assimilação de CO₂ para plantas de pimentão.

A partir da equação ajustada para a assimilação de CO₂ em função de DFFFA estimou-se o ponto de compensação luminosa, 45,40 μmol fótons m⁻² s⁻¹, valor de DFFFA que considera a assimilação de CO₂ igual a zero, superior ao valor de 33,10 μmol fótons m⁻² s⁻¹ encontrado por Pinto (1997) em plantas de melão.

A Figura 14 apresenta os valores de assimilação de CO₂ em função de diferentes concentrações de CO₂, para DFFFA de 1400 μmol fótons m⁻² s⁻¹.

Figura 14 - Taxa de assimilação de CO₂ em função da concentração de CO₂, para a densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA) de 1400 μmol fótons m⁻² s⁻¹ e temperatura de 22°C, para alface (cultivar Elisa), conduzida em casa de vegetação. As linhas verticais indicam o desvio padrão da média. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

Foi ajustada uma equação (12) do tipo polinomial, pela análise de regressão, mostrando a variação na assimilação de CO₂ em função do aumento da concentração de CO₂.

$$A = -0,0013 + 0,02\text{CO}_2 + 0,0003\text{CO}_2^2 - 1,78 \cdot 10^{-5}\text{CO}_2^{2,5} + 2,52 \cdot 10^{-7}\text{CO}_2^3 \quad R^2 = 0,99 \quad (12)$$

em que:

CO₂ = concentração de CO₂ (μmol de CO₂ mol⁻¹).

Observa-se na Figura 14, que o aumento na assimilação de CO₂ surge com o aumento na concentração de CO₂, até o valor de 600 μmol de CO₂ mol⁻¹, estabilizando-se a seguir e decrescendo a partir de 800 μmol de CO₂ mol⁻¹. Segundo Keys (1986) e Ogren et al. (1986) o estímulo na assimilação de CO₂ é principalmente

atribuído a ativação da 1,5-RUBP carboxilase/oxigenase (Rubisco) pelo CO_2 . Evidências indicam que as espécies C_3 apresentam incrementos próximos a 60% na fotossíntese, em resposta a ambientes com concentrações de CO_2 correspondente ao dobro da atual (Drake et al., 1997). Um melhor entendimento deste fenômeno se faz necessário em função da espécie utilizada e do estágio de desenvolvimento da planta (Carpon, 1989). A concentração de CO_2 a ser aplicada é um fator de fundamental importância, pois doses inadequadas podem prejudicar o desenvolvimento das plantas, acarretando danos a produtividade comercial (Peet et al., 1986).

As leituras apresentadas na Figura 15 foram realizadas na mesma planta em dias diferentes, mas com intensidade de radiação fotossinteticamente ativa semelhante. Os valores de assimilação de CO_2 para a concentração de $600 \mu\text{mol}$ de $\text{CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ foram de 16 a $20 \mu\text{mol}$ de $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ superiores aos obtidos para $800 \mu\text{mol}$ de $\text{CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, que foram de 10 a $12 \mu\text{mol}$ de $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, principalmente nos horários de maior atividade fotossintética.

Figura 15 - Taxa de assimilação de CO_2 da alface (cultivar Elisa) ao longo do dia, nas concentrações de 600 e $800 \mu\text{mol}$ de $\text{CO}_2 \text{ mol}^{-1}$, medida em casa de vegetação com temperatura de 22°C . ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

As curvas de respostas da taxa de assimilação de CO₂ apresentadas anteriormente, demonstram que os melhores valores da concentração de CO₂ para a cultura da alface que proporcionaram melhores resultados como resposta das plantas sem desperdício de gás, situa-se em torno de 600 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$.

4.2 Etapa 2 - Experimento 2 – cultivar Elisa com aplicação de diferentes doses de CO₂

A aplicação de CO₂ via água de irrigação modificou o desenvolvimento da cultura, proporcionando diferenças nas variáveis analisadas (Tabela 7).

Tabela 7. Comparação das médias dos tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂, aplicados via água de irrigação, segundo as variáveis, matéria seca (MS); índice de área foliar (IAF), matéria fresca (MF) e número de folhas (NF), para alface (cultivar Elisa), através do teste Duncan ao nível de 5 % de probabilidade. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

Tratamentos	Variáveis			
	MS (g)	IAF	MF (g)	NF
TT	8,96 B	4,73 B	207,65 B	25,4 B
T52	10,65 A	4,64 B	201,29 B	29,0 A
T155	10,71 A	5,42 A	246,25 A	28,5 A
T310	9,13 B	4,86 B	216,28 B	26,30 B
F	6,18**	3,36*	3,68*	5,68**
CV (%)	12,17	12,36	15,05	8,39

(*) significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

(**) significativo ao nível de 1 % de probabilidade.

Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, ao nível de 5 % de probabilidade.

Para todas as variáveis avaliadas, matéria seca (MS), índice de área foliar (IAF), matéria fresca (MF) e número de folhas (NF), observou-se a influência dos tratamentos aplicados. Os tratamentos T52 e T155 foram superiores em todos os variáveis, com destaque ao T155, que apresentou diferença significativa ao nível de 5% pelo Teste F, quando comparado a TT e T310. A maior dose 310 kg ha⁻¹, apresentou valores inferiores nas variáveis avaliadas entre os tratamentos estudados (T52 e T155), confirmando o relato feito por Bialczyk et al.(1994) de que determinadas concentrações de CO₂ podem reduzir o crescimento das plantas.

Figura 16 - Produtividade da alface (cultivar Elisa) em função dos tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂ aplicados via água irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

A Figura 16 apresenta a produtividade da cultura da alface em função dos tratamentos de CO₂. A dose de 155 kg ha⁻¹ apresentou o melhor resultado, proporcionando um aumento de 19,53 % na produtividade da cultura da alface quando comparado à testemunha (TT). Kretchman & Howlett (1970) mencionam 10 a 20 % de aumento na produtividade da alface sob enriquecimento de CO₂ atmosférico. Furlan et al. (2001), que analisando os efeitos promovidos pela aplicação de CO₂ via água de irrigação na cultura da alface, também registraram um aumento de 27 % na

produtividade. Guri et al. (1999) aplicou CO_2 via água de irrigação na cultura do pimentão e verificou aumento na área foliar das plantas, associado ao aumento de fotoassimilados, resultando em maiores números de frutos e acréscimo de 10 % na produtividade.

Com relação a aplicação de água por irrigação durante o ciclo da cultura a lâmina total aplicada foi de 66,43 mm, referente a evaporação do tanque classe A, corrigida pelos coeficientes da cultura e do tanque. A Figura 17 apresenta o comportamento da evapotranspiração da cultura (ET) diariamente durante o período de cultivo.

Figura 17 – Evapotranspiração da cultura da alface (cultivar Elisa) com base na evaporação do tanque classe A, no período 08/08/99 a 08/09/99. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

Os valores obtidos para eficiência do uso da água (kg m^{-3}) com base na produtividade foram: 1,50; 1,78; 1,79 e 1,53 para os tratamentos TT, T52, T155 e T310, respectivamente. Os tratamentos que receberam CO_2 tiveram aumentos na eficiência quando comparados com a testemunha na ordem de 18,67 %, 19,33 % e 2 % para os tratamentos T52, T155 e T310, respectivamente. O aumento foi superior nas doses de 52 e 155 kg ha^{-1} de CO_2 favorecendo o uso da água pelas plantas de alface e acompanhando o comportamento obtido para produtividade. Hunsaker et al. (1996) analisaram a

eficiência do uso da água para a cultura do trigo em ambientes com enriquecimento atmosférico por CO₂ e sem enriquecimento (condições naturais do ambiente), e verificaram um aumento de 13 a 18 % na eficiência do uso da água para as plantas que receberam CO₂ adicional em condições bem irrigadas.

Tabela 8. Teores de nutrientes na parte aérea da alface (cultivar Elisa), para os diferentes tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂, aplicados via água de irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

TRATAMENTOS	N	P	K	Ca	Mg	S
	(g kg ⁻¹)					
TT	37,80	7,5	45,90	12,55	5,54	5,59
T52	33,46	6,08	52,02	11,20	4,42	3,00
T155	36,40	7,24	74,97	9,65	4,73	2,99
T310	35,00	6,82	71,91	11,20	5,55	2,72
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
	(mg kg ⁻¹)					
TT	20,60	7,90	1154	74,50	44,70	
T52	63,40	7,70	1077	76,20	40,40	
T155	31,90	8,00	1060	73,60	46,60	
T310	32,80	9,80	1276	87,20	41,70	

A concentração de potássio foi 63,3 % superior para a dose de 155 kg ha⁻¹ de CO₂ quando comparada à testemunha (Tabela 8). Pinto (1997) verificou um aumento de 94,2 % na concentração de potássio, com aplicação de CO₂ via água de irrigação na cultura do melão em condições de ambiente protegido, valor este próximo ao encontrado por Tyler & Lorenz (1964). Bialczyk & Lechowski (1995) analisaram a seiva do xilema de plantas de tomate sob aplicação de água carbonatada e encontraram o potássio em maior concentração, constituindo 69% do total de cátions determinados. Novero et al. (1991) observaram por ocasião da aplicação de água com CO₂, um aumento aparente nos nutrientes encontrados nas folhas de tomate, principalmente o zinco, e atribuíram esse efeito ao decréscimo do pH do solo, favorecendo a maior disponibilização de nutrientes para a planta. Guri et al. (1999) também atribuiu as

alterações nutricionais nas plantas de pimentão, sob aplicação de CO_2 via água, à redução momentânea do pH do solo.

Os demais teores de nutrientes foram semelhantes entre os tratamentos estudados, com exceção da concentração do enxofre que decresceu nos tratamentos que receberam CO_2 .

Determinou-se durante o desenvolvimento da cultura, valores de assimilação de CO_2 em função das horas do dia, utilizando-se do IRGA, para os tratamentos estudados (Figura 18). Este estudo teve como finalidade observar o comportamento da taxa de assimilação de CO_2 da alface, quando submetida a aplicação de CO_2 via água de irrigação. A Figura 18 mostra o mesmo comportamento para todos os tratamentos estudados, não obtendo respostas na assimilação de CO_2 presente na atmosfera em função de acréscimos de gás carbono aplicados via água de irrigação, o que também foi verificado por Cararo (2000) em plantas de tomate. Storlie & Heckman (1996a) verificaram um aumento de CO_2 na atmosfera durante a operação da irrigação, rapidamente dispersível, não justificando os incrementos obtidos na produção das plantas de pimentão. Aumentos obtidos na produtividade de tomate pela aplicação de CO_2 via água de irrigação em experimento conduzido por Novero et al. (1991) foi associado a combinação da limitação de escape de CO_2 atmosférico pela utilização de cobertura "mulch" e modificações físico-químicas do solo, melhorando a absorção de nutrientes. Andria (1990) também verificou enriquecimento atmosférico de CO_2 , na cultura do tomate, aplicado via água de irrigação, para os tratamentos que receberam a cobertura de "mulch", a 15 cm de altura do solo e apenas no dia da irrigação.

As amostras de solução da solo, obtidas por extratores de cápsulas porosas, nas diferentes umidades do solo medida através dos tensiômetros e corrigidas para a umidade de saturação do solo, foram analisadas para condutividade elétrica e para os íons NO_3 , P, K, Ca, Mg e S (Figura 19).

Figura 18 - Relação entre assimilação de CO₂ e a densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos (DFFFA) nos diferentes tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂, aplicados via água de irrigação, ao longo do dia. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

Figura 19 - Variação da condutividade elétrica e das concentrações de NO₃, Ca, K, P, S e Mg na solução do solo, ao longo do ciclo da alface (cultivar Elisa), para os tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂, aplicados via água de irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

Os gráficos da Figura 19 demonstram decréscimo nos valores de condutividade elétrica e nas concentrações dos íons estudados, ao longo do ciclo de cultivo para todos os tratamentos, devido a absorção dos nutrientes pela planta, com consequente redução na solução do solo.

Os valores de condutividade elétrica medidos na solução do solo mantiveram-se, para todos os tratamentos, abaixo do valor de $1,3 \text{ dS m}^{-1}$ recomendado por Ayers & Westcot (1991) como máxima salinidade tolerada pela cultura da alface. O aumento em uma unidade de salinidade pode resultar em decréscimos de 9,85 %; 13,0 % e 17,5% na produtividade da alface, segundo Ayers & Westcot (1991), Blanco et al. (1999) e Silva et al. (2000), respectivamente.

Os valores dos íons, NO_3 , P, K, Ca, Mg e S, na solução do solo de forma geral apresentam-se inversamente aos teores dos nutrientes encontrados na parte aérea das plantas (Tabela 8), com destaque para o íon potássio que sofreu variação nas concentrações entre os tratamentos, acompanhando de forma inversa os resultados da parte aérea, ou seja, o T155 que apresentou o maior valor de potássio na parte aérea da planta, teve o menor valor na solução do solo. Os demais íons na solução do solo tiveram seus valores relativamente constante no final das coletas entre os tratamentos, da mesma forma que na parte aérea. Ibrahim (1992) descreve que o conteúdo de nutrientes estudados do solo não foram afetados pela injeção de CO_2 através da água de irrigação, entretanto as concentrações de P, Zn, Mn e Fe foram significativamente aumentados nas plantas.

As amostras de solução de solo apresentaram resultados coerentes e de importância, pois refletiram o caminhamento dos nutrientes do solo para a planta e confirmaram a maior absorção do íon potássio no T155. Bialczyk et al. (1994) em estudo com água carbonatada verificou aumento na mobilidade de certos nutrientes e a absorção pela planta; o enriquecimento afetou os processos de distribuição, acumulação e absorção de N, K e Ca.

4.3 Experimento 3 – cultivar Verônica, aplicação de diferentes doses de CO₂

Foram realizadas duas coletas de plantas durante o ciclo da cultura, aos 18 dias após o transplântio das mudas e outra por ocasião da colheita (Tabela 9).

Tabela 9. Comparação das médias dos tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂, aplicados via água de irrigação, segundo as variáveis, matéria seca (MS); índice de área foliar (IAF), matéria fresca (MF) e número de folhas (NF), para alface (cultivar Verônica), para a primeira e segunda coleta de plantas, através do teste Duncan ao nível de 5 % de probabilidade. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

Tratamentos	Variáveis							
	MF		NF		IAF		MS	
	(g)						(g)	
	1ª coleta	2ª coleta	1ª coleta	2ª coleta	1ª coleta	2ª coleta	1ª coleta	2ª coleta
TT	36,18 a	158,80 b	6,75 b	15,25 b	0,83 a	3,04 b	2,44 a	11,77 ab
T52	43,53 a	201,45 a	8,00 a	18,25 a	0,92 a	3,89 a	2,57 a	13,35 a
T155	41,40 a	205,25 a	7,50 ab	18,25 a	0,89 a	3,87 a	2,44 a	13,07 a
T310	27,08 b	124,43 b	6,50 b	17,25 a	0,66 b	2,58 b	1,89 b	9,35 b
F	7,42**	8,64**	3,37 ^{ns}	5,05*	6,46**	10,03**	3,96*	6,14 **
CV (%)	14,53	15,12	10,43	7,29	10,88	12,17	12,93	12,80

(ns) não significativo

(*) significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

(**) significativo ao nível de 1 % de probabilidade.

Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, ao nível de 5 % de probabilidade.

As variáveis analisadas na primeira coleta de plantas (Tabela 9), não apresentaram diferença significativa na comparação das médias dos tratamentos T52, T155 e TT, com exceção da dose T310 que apresentou valores inferiores aos demais, confirmando o resultado encontrado no experimento 2 para cultivar Elisa.

As plantas de alface analisadas por ocasião da colheita, apresentaram diferença significativa na comparação das médias dos tratamentos para T52 e T155,

quando contrastado com TT e T310. A variável matéria seca (MS) em T52 e T155 foi superior mas não diferiu estatisticamente de TT. A dose de 52 kg ha⁻¹ apresentou o melhor resultado, proporcionando um aumento de 13,42 % na produtividade da cultura da alface quando comparado à testemunha (TT) (Figura 20). Nakayama & Bucks (1980) aplicando CO₂ por gotejamento subsuperficial encontrou aumentos na ordem de 10 a 20 % no rendimento de melão, batata e trigo. Entretanto Storlie & Heckman (1996a) não encontraram resposta positiva na produtividade, absorção de nutrientes e precocidade de plantas de pimentão. Para Andria (1990) a produtividade dos frutos de tomate foi aumentada para aplicação de CO₂, via água de irrigação com cobertura de "mulch", para a condução sem "mulch", não foi verificado aumentos.

Figura 20 - Produtividade da alface (cultivar Verônica) em função dos tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂ aplicados via água irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

A lâmina total de água aplicada por irrigação durante o ciclo de cultivo em campo foi de 79,46 mm. A Figura 21 apresenta o comportamento da evapotranspiração da cultura (ET) diariamente durante o período de cultivo. A lâmina de água total aplicada foi superior a fornecida no experimento 2 para a cultivar Elisa, devido à maior demanda evaporativa ocorrida no período de 01/11/99 à 29/11/99.

Figura 21 - Evapotranspiração da cultura da alface (cultivar Verônica) com base na evaporação do tanque classe A, no período 01/11/99 a 29/11/99. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

Os valores obtidos para eficiência do uso da água (kg m^{-3}) com base na produtividade foram: 1,65; 1,87; 1,83 e 1,31 para os tratamentos TT, T52, T155 e T310, respectivamente. A eficiência foi 13,33% e 10,91 % maior nos tratamentos T52 e T155, respectivamente, relativamente ao tratamento sem aplicação de CO_2 (TT), resultado bem próximo ao encontrado no experimento 2. Entretanto T310 mostrou uma baixa utilização da água, comprovando a ineficiência da dose de $310 \text{ kg de CO}_2 \text{ ha}^{-1}$. Ibrahim (1992) também verificou aumento na eficiência do uso da água pelas plantas, com aumentos nos níveis de CO_2 , aplicados via da água de irrigação, e atribuiu ao aumento temporário da pressão de CO_2 nas folhas, sob túneis plásticos, com decréscimos na perda de água através da transpiração, devido ao fechamento estomático.

A Tabela 10 apresenta os teores de macro e micro nutrientes encontrados na parte aérea das plantas de alface, nas duas coletas realizadas, aos 18 dias e aos 28 dias após o transplântio das mudas. As plantas da primeira coleta receberam dez aplicações de CO_2 via água de irrigação, enquanto as plantas da segunda coleta receberam 20 aplicações.

Tabela 10. Teores de nutrientes na parte aérea da alface (cultivar Verônica), para os diferentes tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂, aplicados via água de irrigação, referente a primeira e segunda coleta de plantas. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

PRIMEIRA COLETA DE PLANTAS						
TRATAMENTOS	N	P	K (g kg ⁻¹)	Ca	Mg	S
TT	41,02	3,27	67,32	13,70	4,37	2,21
T52	45,64	5,51	65,79	10,22	3,61	1,98
T155	42,56	4,72	73,44	12,89	4,96	2,52
T310	41,86	4,60	65,79	10,96	4,07	1,92
	B	Cu	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn	Zn	
TT	20,50	11,50	203,70	60,00	38,40	
T52	56,80	9,60	244,80	36,90	42,10	
T155	57,50	10,00	378,30	57,60	33,00	
T310	51,80	7,40	152,40	42,50	33,90	
SEGUNDA COLETA DE PLANTAS						
TRATAMENTOS	N	P	K (g kg ⁻¹)	Ca	Mg	S
TT	26,04	5,82	47,43	4,56	1,88	1,57
T52	29,40	4,82	50,49	5,22	1,96	2,23
T155	30,24	4,80	45,90	4,59	1,87	1,95
T310	23,10	4,43	52,02	5,75	2,06	2,10
	B	Cu	Fe (mg kg ⁻¹)	Mn	Zn	
TT	30,90	9,20	135,80	29,60	40,00	
T52	26,60	9,40	100,20	33,70	35,50	
T155	36,50	7,70	100,00	26,00	37,70	
T310	18,60	6,80	103,40	27,80	29,30	

Na primeira coleta de plantas (Tabela 10) os teores de nutrientes entre tratamentos mantiveram-se relativamente constantes, sem uma tendência acentuada, possivelmente em função das poucas aplicações de CO₂. Comparando os valores entre coletas, observa-se considerável decréscimo nos teores dos nutrientes da primeira para a segunda coleta, provavelmente em virtude de lixiviação provocada pela irrigação ou devido a concentração dos nutrientes em plantas jovens em comparação com plantas adultas, onde a porcentagem de água é maior. A segunda coleta de plantas mostra valores maiores para os macro nutrientes em T52 quando comparado à testemunha, com exceção do fósforo.

A Figura 22 apresenta os ganhos em peso e em área foliar para a cultura da alface nos últimos 10 dias de cultivo. Os valores acompanham a tendência das doses, com exceção de T310 que foi inferior a T52 e T155. Quando se compara as TCR e TCFR dos tratamentos T155 e T52 e também T310 com TT, verifica-se que os primeiros valores são maiores, porém, observando a Tabela 9, percebe-se uma inversão em termos de produção de matéria seca e índice de área foliar. A explicação pode estar contida na época de injeção do CO₂, pois a aplicação logo na segunda semana de cultivo, das doses de 155 e 310 kg ha⁻¹, pode ter prejudicado o desenvolvimento das plantas, que recuperaram-se no final, justificando os ganhos em matéria seca e área foliar, e conseqüente inversão dos valores das taxas. Os resultados confirmam as sugestões feitas por Pinto (1997) e Machado et al. (1999) para desenvolvimento de pesquisas que visem a época e o período adequado da aplicação de CO₂ via água de irrigação para cada cultura.

Figura 22 - Taxa de crescimento relativo (TCR) e taxa de crescimento foliar relativo (TCFR) da cultura da alface (cultivar Verônica), para os tratamentos, 0, 52; 155 e 310 kg ha^{-1} de CO_2 , aplicados via água de irrigação, no período de 12 dias. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

As amostras de solução do solo, neste experimento, foram analisadas para condutividade elétrica e para os íons NO_3 , K e Ca (Figura 23).

Os valores de condutividade elétrica mantiveram-se bem abaixo dos teores salinos toleráveis pela alface, como descrito no experimento 2. De uma maneira geral os gráficos de CE, NO_3 , K e Ca para T52 e T155 conservaram os valores medidos, do início ao fim com pequenas oscilações; sendo que esse comportamento sugere uma liberação dos nutrientes pela aplicação de CO_2 via água de irrigação conforme (Novero et al., 1991; Arteca et al., 1979; Mauney & Hendrix, 1988; Bialczyk & Lechowski, 1995), pois contrário ao decréscimo que deveria ocorrer devido a lixiviação e absorção pela planta ao longo do cultivo, os teores dos nutrientes permaneceram constante. Entretanto TT e T310 tiveram suas concentrações decrescidas no decorrer das avaliações, com destaque para a dose 310 kg ha^{-1} , indicando que os nutrientes não foram liberados com o tempo, no decorrer do ciclo de cultivo, podendo justificar os menores valores obtidos para produtividade nos respectivos tratamentos. A discussão dos resultados para solução do solo não correlacionam com os resultados obtidos para nutrientes na planta (Tabela 9), diferente dos apresentados no experimento 2.

Figura 23 - Variação da condutividade elétrica e das concentrações de NO_3 , K e Ca na solução do solo, ao longo do ciclo da alface (cultivar Verônica), para os tratamentos, 0; 52; 155 e 310 kg ha^{-1} de CO_2 , aplicados via água de irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 1999.

4.4 Experimento 4 – cultivar Elisa em diferentes períodos de aplicação de CO_2

O período de aplicação de CO_2 via água de irrigação, dentro do ciclo de cultivo da alface, é importante para que não haja injeção do gás sem aproveitamento pelas plantas. A Tabela 11 apresenta os valores obtidos por análise das variáveis da alface (MS, IAF, MF e NF) em quatro períodos de aplicação do CO_2 (TT, T3/4, T1/2 e T1/4) durante o ciclo de cultivo, para a dose de 155 kg ha^{-1} .

Os melhores resultados foram obtidos para aplicação concentrada no último quarto do ciclo de cultivo (T1/4). Para todas as variáveis estudadas, com exceção de NF, T1/4 diferiu estatisticamente, ao nível de 5% pelo teste de Duncan, dos tratamentos que receberam CO_2 durante todo o ciclo de cultivo (TT) e no $\frac{3}{4}$ final. A

aplicação na metade final do ciclo (T1/2) apresentou comportamento semelhante ao T1/4, não diferindo estatisticamente, com exceção do parâmetro IAF.

Os resultados evidenciam uma tendência das plantas de alface otimizarem o uso do CO₂ aplicado via água de irrigação no final do ciclo de cultivo, coincidindo com o período de maior absorção de água pela planta (Hamada & Testezlaf, 1996). Outra hipótese a ser levantada é que o CO₂ esteja agindo como um fito hormônio, neutralizando a ação do etileno (Mathooko, 1996), ou seja, retardando a maturação das raízes e estimulando o crescimento das mesmas; a consequência seria um aumento da massa do sistema radicular em oposição ao menor crescimento da parte aérea no início do ciclo de cultivo.

Tabela 11. Comparação das médias dos tratamentos de distintos períodos de aplicação de CO₂, total; $\frac{3}{4}$ $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ finais do ciclo da cultura, aplicados via água de irrigação, segundo as variáveis, matéria seca (MS); índice de área foliar (IAF), matéria fresca (MF) e número de folhas (NF), para alface (cultivar Elisa), através do teste Duncan ao nível de 5 % de probabilidade. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.

Tratamentos	Variáveis			
	MS (g)	IAF	MF (g)	NF
TT	6,61B	2,99B	113,43BC	19,33A
T3/4	6,10B	2,79B	103,37C	18,83A
T1/2	6,72AB	3,24B	129,02AB	20,33A
T1/4	7,29 ^A	3,56A	144,01A	20,83A
F	1,79 ^{ns}	3,77 ^{ns}	5,88 [*]	1,91 ^{ns}
CV (%)	13,37	13,40	14,70	8,16

(*) significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

(^{ns}) não significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Duncan ao nível de 5 % de probabilidade.

A lâmina total de água aplicada por irrigação durante o ciclo de cultivo foi de 48,04 mm, valor bem abaixo aos obtidos nos experimentos 3 e 4, em função da baixa demanda evaporativa pertinente à época do ano, na qual foi conduzido o experimento. A Figura 24 apresenta o comportamento da evapotranspiração da cultura (ET) diariamente durante o período de cultivo.

Figura 24 - Evapotranspiração da cultura da alface (cultivar Elisa) com base na evaporação do tanque classe A, no período 29/05/00 a 30/06/00. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.

A Tabela 12 apresenta os nutrientes encontrados nas folhas da alface, após a colheita, para os diferentes períodos de aplicação. Os macronutrientes N, P e K tiveram pequenos incrementos para os tratamentos T1/2 e T1/4, acompanhando o incremento obtido com matéria seca, entretanto o Ca apresentou comportamento inverso, ou seja foi maior para TT e T3/4. Os demais elementos não demonstraram nenhuma tendência.

Tabela 12. Teores de nutrientes na parte aérea da alface (cultivar Elisa), para os tratamentos, de distintos períodos de aplicação de CO₂, total; $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$ finais do ciclo da cultura, aplicados via água de irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.

TRATAMENTOS	N	P	K (g.kg ⁻¹)	Ca	Mg	S
TT	40,60	5,62	65,79	12,43	3,86	2,19
T3/4	42,98	5,80	59,67	9,55	2,82	2,43
T1/2	47,18	5,93	70,38	7,93	3,55	2,18
T1/4	47,04	6,83	68,85	8,10	3,09	2,03
	B	Cu	Fe (mg.kg ⁻¹)	Mn	Zn	
TT	26,30	9,10	152,60	43,30	28,40	
T3/4	42,50	9,40	137,10	46,60	30,20	
T1/2	43,00	10,50	142,70	36,60	33,70	
T1/4	29,60	9,60	159,00	33,10	33,10	

4.5 Etapa 3 - Experimento 5 – cultivar Verônica com aplicação de diferentes doses de CO₂ e por enriquecimento atmosférico

Na Tabela 13 observa-se que para o índice de área foliar (IAF), peso fresco (MF) e número de folhas (NF) não houve influência significativa dos tratamentos aplicados. Entretanto para a matéria seca (MS) a dose de 155 kg ha⁻¹ aplicada via água de irrigação, apresentou diferença significativa entre as médias ao nível de 5% pelo Teste Duncan, quando comparado à testemunha, repetindo o resultado encontrado no experimento 2, apresentado anteriormente.

Tabela 13. Comparação das médias dos tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂, aplicados via água de irrigação e 155 kg ha⁻¹ aplicado via ar, segundo as variáveis, matéria seca (MS); índice de área foliar (IAF), matéria fresca (MF) e número de folhas (NF), para alface (cultivar Verônica), através do teste Duncan ao nível de 5 % de probabilidade. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.

Tratamentos	Variáveis			
	MS (g)	IAF	MF (g)	NF
TT	10,24 B	3,46 A	223,82 A	15,83 A
T155ar	12,04 AB	3,91 A	241,44 A	17,17 A
T155ag	12,90 A	3,72 A	218,04 A	17,83 A
T310ag	11,71 AB	3,34 A	203,21 A	16,50 A
F	2,20 ^{ns}	1,43 ^{ns}	1,17 ^{ns}	0,93 ^{ns}
CV (%)	15,62	14,49	16,12	13,01

(^{ns}) não significativo ao nível de 5 % de probabilidade.

Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si, ao nível de 5 % de probabilidade.

A dose de 155 kg ha⁻¹ aplicada via água, proporcionou aumento de 26% em produtividade ao se comparar com o tratamento sem CO₂ (Figura 25). Observando os valores de produtividade, verifica-se um aumento para os tratamentos que receberam CO₂. Brito (1999) avaliando a cultura da batata sob enriquecimento atmosférico com CO₂ também obteve aumento na produção das plantas. Entretanto a maior dose (310 kg ha⁻¹) manifestou o mesmo efeito observado pelos outros experimentos, em que, os valores de produtividade apresentaram-se inferiores aos tratamentos com menores doses de CO₂.

O tratamento que recebeu CO₂ por enriquecimento atmosférico apresentou valor de produtividade inferior à mesma dose aplicada via água.

Figura 25 - Produtividade da alface (cultivar Verônica) em função dos tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂ aplicados via água irrigação e 155 kg ha⁻¹ aplicado via ar. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.

A Figura 26 apresenta a área foliar da alface após 18 dias de cultivo até a ocasião da colheita para todos os tratamentos estudados. Observa-se na primeira seqüência de pontos, dos dias 29/9 a 2/10 comportamento semelhante para TT, T155ar e T155ag e valores um pouco inferiores para T310ag. Nas seqüências de pontos seguintes, 4/10 a 7/10 e 8/10 a 11/10, verifica-se uma ascensão nos valores de T310ag e um decréscimo nos valores de TT, destacando a superioridade de T155ag. Os resultados observados indicam que a maior dose aplicada (310 kg ha⁻¹) prejudica o desenvolvimento da planta no início do ciclo de cultivo, possibilitando recuperação à seguir, entretanto insuficiente para promover respostas superiores a outras doses. No caso da cultura da alface esse efeito deve ser mais acentuado, devido o ciclo de cultivo ser curto, em torno de trinta a quarenta dias após o transplântio das mudas.

Figura 26 – Área foliar da alface (cultivar Verônica), para três diferentes folhas nos tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂ aplicados via água irrigação e 155 kg ha⁻¹ aplicado via ar, no período de 12 dias. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.

A lâmina total de água aplicada por irrigação durante o ciclo de cultivo foi de 74,69 mm, valor próximo ao obtido no experimento 3. A Figura 27 apresenta a evapotranspiração da cultura (ET) diária durante o período de cultivo.

Figura 27 - Evapotranspiração da cultura da alface (cultivar Verônica) com base na evaporação do tanque classe A, no período 11/09/00 a 10/10/00. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.

Os valores obtidos para eficiência do uso da água (kg m^{-3}) foram: 1,52; 1,79; 1,92 e 1,74 para os tratamentos TT, T155ar, T155ag e T310ag, respectivamente. A eficiência foi 17,76 %, 26,31 % e 14,47 % maior nos tratamentos T155ar, T155ag e T310ag, respectivamente, quando comparado ao tratamento sem aplicação de CO_2 (TT), com destaque para a dose 155 kg ha^{-1} via água de irrigação.

O monitoramento do CO_2 atmosférico durante a aplicação do gás carbônico para todos os tratamentos, está apresentado na Figura 28.

Figura 28 – Concentração de CO_2 atmosférico nos tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha^{-1} de CO_2 aplicados via água irrigação e 155 kg ha^{-1} aplicado via ar no tempo. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.

As leituras realizadas simultaneamente para os tratamentos estudados, antes, durante e depois da aplicação do gás, demonstram incremento atmosférico somente no período de aplicação do gás (9:00-9:12 h) para T155ar. A aplicação do gás carbônico via água (T155ag, T310ag) não promoveu enriquecimento atmosférico, explicando o comportamento das curvas de assimilação de CO_2 apresentadas no experimento 2 que não apresentaram alteração no comportamento entre os tratamentos estudados. Segundo Storlie & Heckman (1996a) a aplicação de CO_2 via água de

irrigação na cultura do pimentão incrementou a concentração do CO₂ do ar atmosférico na porção baixa das plantas, somente durante o evento da irrigação, retornando a concentração do ambiente logo que finalizada a aplicação de água com CO₂. O CO₂ aplicado no ar (T155ar) alterou a concentração do ambiente, entretanto o incremento ocorreu somente no momento da aplicação. Logo após, a concentração voltou a valores anteriores, evidenciando que para haver alteração significativa na assimilação de CO₂, deve ser necessária aplicação do gás por um período maior de tempo. Em revisão de literatura realizada por Idso & Idso (1994), praticamente todas as espécies expostas a elevados níveis de CO₂ por um longo período, apresentaram incremento na taxa de fixação de carbono e na biomassa de folhas, frutos, raízes e caules.

A Figura 29 apresenta os valores do fluxo de CO₂ no solo, medidos por uma câmara de CO₂. Os tratamentos com gás carbônico incrementaram o fluxo de CO₂ do solo em função do aumento da dose aplicada, 155 kg ha⁻¹ e 310 kg ha⁻¹ via água de irrigação, respectivamente. Vários trabalhos mostram enriquecimento do CO₂ do ar do solo pela ocorrência da aplicação de CO₂ via água de irrigação, a maioria atribui os incrementos em produtividade das plantas à utilização de coberturas como mulch, possibilitando o enriquecimento de CO₂ do solo para a atmosfera (Novero et al., 1991; Nakayama & Bucks, 1980; Hopen & Oebeker, citado por Storlie & Heckman, 1996b). Para Arteca et al. (1979) o aumento do fluxo de CO₂ do solo pode afetar o balanço de hormônios e enzimas das plantas por outros caminhos, influenciando a fotossíntese, respiração e outros processos da planta. Aumento do CO₂ do ar do solo pode alterar a produtividade das plantas através do efeito na nitrificação do solo (Alexander, 1965 citado por Storlie & Heckman, 1996b).

Figura 29 – Fluxo relativo de CO₂ no solo, antes, durante e depois da aplicação de CO₂, para os tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂ aplicados via água irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.

Figura 30 – pH do solo e da água de irrigação em um período de cinco dias nos tratamentos, 0; 155 e 310 kg ha⁻¹ de CO₂ aplicados via água irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2000.

Os valores de pH do solo e da água apresentados na Figura 30, mostram tendência de abaixamento em função do acréscimo da dose de CO₂ aplicada via água de irrigação. Exceção para o gráfico de pH do solo na dose de 155 kg ha⁻¹, que teve dois pontos (dias 6/10 e 8/10) inferiores à dose de 310 kg ha⁻¹. Essa oscilação dos valores de pH do solo para os tratamentos que receberam CO₂, segundo Donahue, et al., citado por

Ibrahim (1992) pode estar associada a ocorrência de carbonato de cálcio, proveniente da reação do ácido carbônico formado pela aplicação de CO_2 via água de irrigação com o cálcio presente no solo, produzindo bicarbonato de cálcio que pode acarretar aumento no pH do solo. Mauney & Hendrix (1988), Novero et al. (1991), Ibrahim (1992) e Basile et al. (1993) também verificaram decréscimos no pH do solo por ocasião da aplicação de CO_2 via água de irrigação. Andria (1990) constatou redução temporária do pH da água de irrigação de 6,4 para 4,5, nos tratamentos que receberam CO_2 via água de irrigação. Segundo Storlie & Heckman (1996b) o gás carbônico reduz o pH da água, podendo diminuir o pH do solo. Onde o pH do solo é reduzido para um nível ótimo, pode ocorrer incremento na disponibilização de nutrientes, sugerindo que respostas positivas no crescimento das plantas sob aplicação de água carbonatada, ocorrem onde o pH do solo e da água atingem valores ideais.

4.6 Análise econômica

Para avaliar a rentabilidade do cultivo de alface sob aplicação de CO_2 via água de irrigação, determinou-se a relação benefício-custo para duas cultivares (Elisa e Verônica) e duas doses de CO_2 (52 e 155 kg ha^{-1}), comercializadas à três diferentes preços durante o ano (US\$ 0,54 kg^{-1} ; US\$ 0,74 kg^{-1} e US\$ 1,25 kg^{-1} , correspondentes as médias da safra, anual e entre safra, respectivamente). Segundo Rodrigues et al. (1997) a alface alcança preços maiores nos meses de dezembro a março, com pico no mês de fevereiro. Os valores de produtividades envolvidos nos cálculos foram escolhidos mediante as doses que resultaram em maiores ganhos nos diferentes experimentos.

A Tabela 14 apresenta os custos necessários para a produção da alface com a aplicação de CO_2 via água de irrigação. O custo do quilograma do CO_2 foi US\$ 1,078, transformado para as doses aplicadas. A aplicação de CO_2 representou um aumento de 6,80 % e 11,46 % no custo total da produção da alface para as doses de 52 e 155 kg ha^{-1} , respectivamente.

Tabela 14. Custo total para a produção da alface com aplicação de duas doses de CO₂ via água de irrigação. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2001.

CUSTO	DOSES (kg ha ⁻¹)	
	52	155
Produção da alface sem CO ₂	2.404,59	2404,59
CO ₂	56,06	167,09
*Anual fixo	108,60	108,60
TOTAL	2.569,25	2.680,28

*Custo anual fixo dos equipamentos utilizados para a aplicação de CO₂ pela água de irrigação, calculado para uma vida útil de 10 anos e sob 12 % de taxa de anual de juros.

A Tabela 15 apresenta os valores da relação benefício-custo para a produção da alface com e sem CO₂. Todos os valores são maiores que um, indicando que a receita gerada pela produção da alface é maior que o capital aplicado. Comparando os valores com CO₂ e sem CO₂ verifica-se que para todas as situações a relação benefício-custo foi superior para a produção com a aplicação de CO₂ via água de irrigação, confirmando os ganhos em produtividade nos diferentes experimentos e afirmando a viabilidade desta aplicação para a cultura da alface. Ibrahim (1992) avaliou a relação benefício-custo para os níveis de 50, 100, 150 e 200 ppm de CO₂ acrescido na água de irrigação, para a cultura do pepino em túneis plásticos, e verificou que a maior relação B/C foi encontrada para a concentração de 150 ppm e a menor para 50 ppm, demonstrando a importância da dose de CO₂ aplicada via água de irrigação para promover benefícios econômicos e fisiológicos.

Tabela 15. Valores de relação benefício-custo para produção da alface em diferentes doses de CO₂. ESALQ/USP. Piracicaba-SP, 2001.

Experimento	Cultivar	Dose de CO ₂ (kg ha ⁻¹)	Preço		
			Safra (US\$)	Entre Safra (US\$)	Médio (US\$)
02	Elisa	155	5,28	12,22	7,24
02	Elisa	0	4,92	11,40	6,75
03	Verônica	52	4,47	10,34	6,12
03	Verônica	0	4,21	9,74	5,77
04	Verônica	155	5,44	12,59	7,45
04	Verônica	0	4,81	11,14	6,59

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e para as condições de clima e solo que foram desenvolvidos os experimentos, pode-se concluir que:

1. A concentração de $600 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ proporcionou maiores incrementos na fotossíntese da cultura da alface.
2. As doses de $52 \text{ e } 155 \text{ kg ha}^{-1}$ de CO_2 aplicadas através da água de irrigação, proporcionaram aumentos de até 26 % na produtividade da alface. Entretanto a dose de 310 kg ha^{-1} não se diferenciou da testemunha em todos os experimentos realizados.
3. A aplicação de água carbonatada proporcionou alterações nos nutrientes das plantas, verificado no experimento 02, onde o íon potássio foi aumentado em 63 % , na dose de 155 kg ha^{-1} de CO_2 , em relação à testemunha.
4. O fluxo de CO_2 no solo aumentou com o aumento da dose de CO_2 aplicada via água de irrigação.
5. Os valores de pH do solo e da água, foi reduzido com o acréscimo da dose de CO_2 aplicada via água de irrigação.
6. As plantas mostraram melhor desenvolvimento quando a aplicação de CO_2 via água, foi realizada no $\frac{1}{4}$ final do ciclo de cultivo.

7. Análises da relação benefício-custo para as doses 52 e 155 kg ha⁻¹ de CO₂ e cultivar Elisa e Verônica, demonstraram viabilidade econômica da aplicação de CO₂, via água de irrigação, em três situações de comercialização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRÉU, J.M H.; LÓPEZ, J.R.; REGALADO, A. P. et al. **El riego localizado**: curso internacional de riego localizado Tenerife (Espanã). Madrid: INIA, 1987. 317p.
- AGUIAR, R. G. Comportamento de famílias $F_{2:3}$ de alface (*Lactuca sativa* L.), originadas de cruzamento entre cultivares contrastantes quanto a características vegetativas e pendoamento precoce. Lavras, 2001. 43 p. Dissertação (M.S.) – Universidade Federal de Lavras.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; KLAR, A. E. Produtividade da alface em função do potencial matricial de água no solo e níveis de irrigação. **Horticultura Brasileira**, v. 14, n.1, p. 27-31, 1996.
- ANDRIA, D. R. Drip irrigation of tomato using carbonated water and mulch in colorado. **Acta Horticulturae**, n.278, p. 179-185, 1990.
- ANGELOCCI, L. R **Aspectos biofísicos do transporte de CO₂ entre as folhas e a atmosfera**. Piracicaba: ESALQ, Depto. Física e Meteorologia, 1998. 11p.
- ARTECA, R. N.; POOVAIAH, B. W.; SMITH, O. E. Changes in carbon fixation, tuberization and growth induced by CO₂ application to the root zone of potato plants. **Science**, n. 205, p. 1279-1280, 1979.

- AYRES, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Trad. de H. GHEYI et al. Campina Grande: UFPB, 1991. 218 p. (FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 29 revisado I).
- AZEVEDO, S.M.; MOMENTÉ, V. G.; SILVEIRA, M. A. et al. Avaliações de cultivares de alface (*Lactuca sativa* L.) para as condições quente e úmida do Estado de Tocantins. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 37., Manaus, 1997. **Resumos**. Manaus: Sociedade de Olericultura do Brasil, 1997. r. 20.
- BASILE, G.; ARIENZO, M.; ZENA, A. Soil nutrient mobility in response to irrigation with carbon dioxide enriched water commn. **Soil Science and Plant Analysis**, v. 24, n. 11/12, p. 1183-1195, 1993.
- BASTOS, E. A. Determinação dos coeficientes da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.). Botucatu, 1994. 101p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".
- BASTOS, E. A.; LUNARDI, D. M. C.; ANDRADE JUNIOR, A. S. et al. Determinação dos coeficientes da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.). **Irriga**, v.3, p. 2-5, 1996.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5. ed. Viçosa: Biblioteca Central da Federal de Viçosa, 1989. 596 p.
- BLANCO, F. F.; MEDEIROS, J. F.; FOLEGATTI, M. V. Produção da alface (*Lactuca sativa* L.) em ambiente protegido sob condições salinas. (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28. Pelotas, 1999. Pelotas: UFPEL, 1999.

- BLANCO, M. C. S. G.; GROPPPO, G. A.; TESSARIOLI NETO, J. Alface (*Lactuca sativa* L.). In: COORDENADORIA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL. **Manual técnico das culturas**. 2. ed. Campinas, 1997. t.1, p. 13-18 (Manual, 8).
- BIALCZYK, J., LECHOWSKI, Z. Absorption of HCO_3 by roots and its affect on carbon metabolism of tomato. **Journal of Plant Nutrition**, v. 15, n. 3, p. 293-312, 1992.
- BIALCZYK, J.; LECHOWSKI, Z. Chemical composition of xylem sap of tomato grown on bicarbonate containing medium. **Journal of Plant Nutrition**, v. 18, n.10, p.2005-2021, 1995.
- BIALCZYK, J.; LECHOWSKI, Z.; LIBIK, A. A growth of tomato seedlings under different HCO_3^- concentration in the medium. **Journal of Plant Nutrition**, v. 17, n.5, p.801-816, 1994.
- BIALCZYK, J.; LECHOWSKI, Z.; LIBIK, A. Fruting of tomato cultivated on medium enriched with bicarbonate. **Journal of Plant Nutrition**, v. 19, n.2, p.305-321, 1996.
- BRITO, M. N. O. Crescimento e respostas fisiológicas de duas espécies de batata (*solanum* sp.) sob ambientes enriquecidos com CO_2 . Viçosa, 1999. 55 p. Dissertação (M.S.) – Universidade Federal de Viçosa.
- CARPON, S. J. M. The effects of oxides of nitrogen and carbon dioxide enrichment on photosynthesis and growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) **New Phytologist**, v. 11, p. 473-481, 1989.
- CARARO, D. C. Efeito de diferentes lâminas de água na presença e ausência de CO_2 injetado na água de irrigação sobre a cultura do tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado em estufa. Piracicaba, 2000. 70 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

- CARRIJO, O. A.; SILVA, W. L. C.; MAROUELLI, W. A.; SILVA, H. R. Aplicação de CO₂ via água de irrigação em agricultura. In: FOLEGATTI, M. V. (Coord.) **Fertirrigação**: citrus, flores, hortaliças. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 345-353.
- DEMATTE, J. B. I.; SOBRINHO, F. C.; MEDONÇA, J. R. et. al. Influência de irrigação por gotejamento e aspersão sobre desenvolvimento e produção da cultura de alface (*Lactuca sativa* L.) CV. Brasil-48. **Científica**, v. 9, n. 2, p. 207-213, 1981.
- DENICULI, W; FEITOSA FILHO, J. C.; LOUREIRO, B. T. Desempenho do injetor de fertilizantes venturi na fertirrigação por microaspersão. **Revista Ceres**, v. 39, n. 226, p. 554-563, 1992.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. de H. R. Gheyi et al. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (FAO Estudos de Irrigação e Drenagem, 33).
- DRAKE, B. G.; GONZÁLEZ – MELER, M. A.; LONG, S. P. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO₂? **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 48, p. 607-637, 1997.
- DURÃO, P. L.; GALVÃO, A. C. Gás carbônico em irrigação. **Ciência Hoje**. v.19, n. 110, p. 12-15, 1995.
- FAHL, J.I.; CAMARGO, M. B. P. C.; PIZZINATO, M. A. et al. (Ed.) **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 6 ed. Campinas: IAC, 1998. p. 173-174: Alface. (IAC. Boletim, 200).
- FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura**: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: UFV, 2000. 402 p.

FNP CONSULTORIA E COMÉRCIO. **Agrianual**: anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2001. p. 150-152: Alface.

FRIZZONE, J. A.; SILVEIRA, S. F. R. Análise econômica de projetos hidroagrícolas. In: SILVA, D. D. da.; PRUSKI, F. F. **Gestão de recursos hídricos**: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos; Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2000. cap. 5, p 449-615.

FRIZZONE, J. A.; BOTREL, T. A.; DOURADO NETO, D. **Aplicação de fertilizantes via água de irrigação**. Piracicaba: ESALQ, Depto. Engenharia Rural, 1994. 35p. (Série Didática, 8).

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

GARCIA, L. L. C.; HAAG, H. P.; DIEHL NETO, W. Nutrição mineral de hortaliças: XXXVIII. Deficiências de macronutrientes em alface (*Lactuca sativa* L.), cv. Brasil 48 e Clause's Aurélia. **Anais da escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, v. 39, p. 349-372, 1982.

GELMINI, G. A.; TRANI, P. E. **Agrotóxicos para alface**: manual. Campinas: CATI, 1996. 22p.

GLINSKI, J.; STEPNIEWSKI, W. **Soil aeration and its role for plants**. Boca Raton: CRC Press, 1985. 30 p.

GOTO, R. Hortaliças no Brasil. **Panorama Rural**, n.10, p. 21-24, 1999.

- GURI, S.; MARFÀ, O.; SAVÉ, R. **Efecto de la irrigación carbónica en la producción de un cultivo de pimiento**. Barcelona: IRTA, Departamento de Tecnología Hortícola, 1999. 6p.
- HALL, D. O.; RAO, K. K. **Photosynthesis**. Cambrige: Cambridge University Press, 1994. 211 p. (Studies in Biology).
- HAMADA, E.; TESTEZLAF, F.R. Análise de crescimento da alface (*Lactuca sativa* L.) submetida a diferentes lâminas de água, aplicadas através da irrigação. **Ecosistema**, v.21, p.62-65, dez. 1996.
- HANSON, B. R. Adhering to the rules of drip tape selection. **Irrigation Journal**, v. 44, n. 5, p. 8-13, 1994.
- HOLMAN, H. Fertilizer and chemical injection irrigation systems. **Citrus & Vegetable Magazine**, v.41, n. 7, p.26-28, 46-48, 1978.
- HUNSAKER, D. J.; KIMBALL, B. A.; PINTER Jr, P. J. et al. Carbon dioxide enrichment and irrigation effects on wheat evapotranspiration and water use efficiency. **Transactions of the ASAE**, v. 39, n. 4, p. 1345-1355, 1996.
- IBRAHIM, A. Response of plant to irrigation with CO₂-enriched water. **Acta Horticulturae**, n. 323, p. 205-214, 1992.
- IDSO, K. E.; IDSO, S. B. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment in the face of environmental constraints: a review of the past 10 years research. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 69, p. 153-203, 1994.
- ITO, T. More intensive production of lettuce under artificially controled conditions. **Acta Horticulturae**, n. 260, p. 381-389, 1989.

- KALIL, A. J. B. Comparação entre a adubação nitrogenada via fertirrigação por gotejamento e aplicação convencional na produtividade da alface. Viçosa, 1992. 60p. Dissertação (M.S.) – Universidade Federal de Viçosa.
- KEELING, C. D.; WRORTF, T. P.; PFLIT, J. V. D. Internation extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. **Nature**, v. 375, n. 6533, p. 666-670, 1995.
- KEYS, A. J. Rubisco: its role in photorespiration. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, Series B, v. 313, p. 325-336, 1986.
- KRETCHMAN, D. W.; HOWLETT, F. S. CO₂ enrichment for vegetable production. **Transaction of the ASAE**, p. 252-256, 1970.
- LUCCHESI, A. A. Utilização prática da análise de crescimento vegetal. **Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, v. 51, p. 181-203, 1984.
- LUENGO, R. F. A.; JUNQUEIRA, A. **Distribuição de hortaliças no Brasil**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 1999. 7 p. (Circular Técnica, 16).
- LUO, Y.; FIELD, C. B.; MOONEY, H. A. Producing responses of photosynthesis and root fraction to elevated CO₂ interactions among carbon, nitrogen, and growth. **Plant Cell and Environment**, v. 17, p. 1195-1204, 1994.
- MACHADO, E. C.; TAKANE, R. J.; FERRO, R. Aplicação de CO₂ via água de irrigação em agricultura. In: FOLEGATTI, M. V. (Coord.) **Fertirrigação**: citrus, flores, hortaliças. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 345-353.
- MAKISHIMA, N. Hortaliças no Brasil. **Panorama Rural**, n.10, p. 33 - 35, 1999.

- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 284p.
- MATHOOKO, F. M. Regulation of ethylene biosynthesis in higher plants by carbon dioxide. **Postharvest Biology and Technology**, v. 7, p. 1-26, 1996.
- MAUNEY, J. R., HENDRIX, D. L. Responses of glasshouse grown cotton to irrigation with carbon dioxide-saturated water. **Crop Science**, v.28, p. 835-838, 1988.
- MCCREE, K.J. Measuring the whole-plant daily carbon balance. **Photosynthetica**, v. 20, p. 82-93, 1986.
- MELLO, F. A. F.; SOBRINHO, M. O. C. B.; ARZOLLAS, S. et al. **Fertilidade do solo**. 3.ed. São Paulo: Nobel, 1989. 400p.
- MISRA, R. K. Further studies on the carbon dioxide factos in the air and soil layers near the ground. **Indian Journal Meteorological and Geophysics**, v.2, p. 284-92, 1951.
- NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Using subsurface trickle system for carbon dioxide enrichment. In: NATIONAL AGRICULTURE PLASTICS CONGRESS, 15., Tucson, 1980. **Proceedings**. p. 13-18.
- NORMAN, J. M.; CAMPBELL, G. S. Canopy structure. In: PEARCY, R. W.; EHRLINGER, J.; MOONEY, H. A.; RUNDEL, P. W. **Plant physiological ecology: field methods and instrumentation**. London: Chapman and Hall, 1991. cap. 14, p. 301-325.
- NOVERO, R.; SMITH, D. H.; MOORE, F. D. et al. Field grown tomato response to carbonated water application. **Agronomy Journal**, v. 83, p. 911-916, 1991.

- OGREN, W. L., SALVUCCI, M. E., PORTIS, A. R., Jr. The regulation of rubisco activity. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London** Series B, v. 313, p. 337-346, 1986.
- PAPADOPOULOS, I. Aplicação de CO₂ via água de irrigação em agricultura. In: FOLEGATTI, M. V. (Coord.), **Fertirrigação**: citrus, flores, hortaliças. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 11-74.
- PEET, M. M.; KRIZEK, D. T. Carbon dioxide. In: LANGHANS, R. W.; TIBBITTS, T. W. **Plant growth chamber handbook**. Ames: Iowa State University, 1997. cap. 4, p. 65-79.
- PEET, M. M.; HUBER, S. C.; PATTERSON, D. T. Acclimation to high CO₂ in monoecious cucumbers. II. Carbon exchange rates, enzyme activities, and starch and nutrient concentrations. **Plant Physiology**, v. 80, p. 63-67, 1986.
- 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.
- PINTO, J. M.; BOTREL, T. A.; MACHADO, E. C. et al. Aplicação de CO₂ via água de irrigação em meloeiro. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE INGENIERIA RURAL, La Plata, 1998. **Avances en el manejo del suelo y agua en la ingeniería rural latinoamericana**. La Plata: Board, 1998. p. 239-244.
- PINTO, J. M.; BOTREL, T. A.; MACHADO, E. C. et al. Uso de CO₂ aplicado via água de irrigação em meloeiro. **Horticultura Brasileira**, v. 18, p. 595-596, jul. 2000. Suplemento.

- PIRES, R. C. M.; SAKAI, E.; ARRUDA, F. B. et al. Manejo da irrigação em hortaliças. **Horticultura Brasileira** v.18, p. 147-158, jul. 2000. Suplemento.
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. et al. (Ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. p. 168-168: Alface. (IAC. Boletim, 100).
- REZENDE, F. C. Resposta de plantas de pimentão (*Capsicum annuum* L.) à irrigação e ao enriquecimento da atmosfera com CO₂, em ambiente protegido. Piracicaba, 2001. 107p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- REZENDE, F. C.; ALVES, D. R. B.; FURLAN, R. A. et al. Produtividade do pimentão (*Capsicum annuum* L.) sob aplicação de dióxido de carbono e diferentes lâminas de irrigação. (compact disc). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 28, Pelotas, 1999. Pelotas: UFPEL, 1999.
- RODRIGUES, A. B.; MARTINS, M. I. E. G.; ARAÚJO, J. A. C. de. Avaliação econômica da produção de alface em estufa. **Informações Econômicas**, v. 27, n. 3, p. 27-35, mar. 1997.
- SALE, P. J. M. The response of summer lettuce to irrigation at different stages of growth. **Journal of Horticultural Science**, v. 41, p. 43-52, 1966.
- SILVA, E. C. Estudos genéticos relacionados à adaptação da alface (*Lactuca sativa* L.) sob altas temperaturas em cultivo protegido na região norte fluminense. Rio de Janeiro, 1997. 103p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense.

- SILVA, E. F. F.; ANTI, G. R.; CARMELLO, Q. A. C. et al. Extratores de cápsula porosa e o monitoramento da condutividade elétrica e do teor de potássio na solução de um solo. **Scientia Agricola**, v.57, n. 4, p. 785-789, out. 2000.
- SILVA, E. F. F.; DUARTE, S. N.; FERREIRA, Y. R. P. et al. Tolerância da cultura da alface a salinidade. **Horticultura Brasileira**, v. 18, p. 788-789, jul. 2000. Suplemento.
- SILVA, W. L. C.; MAROUELLI, W. A. Manejo da irrigação em hortaliças no campo e em ambientes protegidos. In: FARIA, M. A.; SILVA, E. L.; VILELA, L. A. A. et al. **Manejo de irrigação**. Poços de Caldas: SBEA, 1998. cap. 5. p. 311-348.
- SLANGEN, J. H. G. et al. The importance of fertigation for the improvement of N-fertilizer use efficiency in lettuce culture. **Acta Horticulturae**, n. 200, p. 135-146, 1988.
- SRITHARAN, R., LENZ, F. The effect of CO₂ concentration and water supply on photosynthesis, dry matter production and nitrate concentrations of kohlrabi (*Brassica oleracea* var. gongylodes L.). **Acta Horticulturae**, n. 268, p. 43-54, 1990.
- STOFFELLA, P. J.; LI, Y.; PELOSI, R. R. et al. Citrus rootstock and carbon dioxide enriched irrigation influence on seedling emergence, growth, and nutrient content. **Journal of Plant Nutrition**, v. 18, n. 7, p. 1439-1448, 1995.
- STORLIE, C. A.; HECKMAN, J. R. Bell pepper yield response to carbonated irrigation water. **Journal of Plant Nutrition**, v. 19, p. 1477-1484, 1996a.
- STORLIE, C. A.; HECKMAN, J. R. Soil, plant, and canopy responses to carbonated irrigation water. **Horticultural Technology**, v. 6, n. 2, p. 111-114, 1996b.

TARSITANO, M. A. A.; PETINARI, R. A.; DOURADO, M. C. Viabilidade econômica do cultivo de alface em estufa no município de Jales-SP. **Cultura Agronômica**, v. 8, n.1, p. 99-108, 1999.

TYLER, K. B.; LORENZ, O. A. A. Nutrient absorption and growth of four muskmelon varieties. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.84, n.1, p. 191-195, 1964.

ZANINI, J. R. Hidráulica de fertirrigação por gotejamento utilizando tanque de derivação de fluxo e bomba injetora. Piracicaba, 1987. 103p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.