

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DO
CALOR LATENTE COM APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO.

ORLANDO TADEU LIMA DE SOUZA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia - Área de
Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP
Dezembro - 2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DO CALOR
LATENTE COM APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO.

Orlando Tadeu Lima de Souza

Orientador: Prof. Dr. José Angelo Cagnon

1310
tese
ex. 1

Biblioteca



13100019

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Agronomia - Área de Concentração em
Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP
Dezembro - 2004

UNIVERSIDADE FEDERAL
RURAL DA AMAZÔNIA
BIBLIOTECA

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÔNOMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CURSO DE GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY
DE CALOR LATENTE COM APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO

ORLANDO TADEU LIMA DE SOUZA

OR - PROF. DR. JOSÉ ÂNGELO CAGNON

Comissão Examinadora

PROF. DR. JOSÉ ÂNGELO CAGNON

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S729d Souza, Orlando Tadeu Lima de, 1955-
Desenvolvimento de um modelo Fuzzy para determinação do
calor latente com aplicação em sistemas de irrigação /
Orlando Tadeu Lima de Souza. -- Botucatu, [s.n.], 2004.
xi, 113 f. : il. color., gráfs., tabs.
Tese (Doutorado) -- Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas.
Orientador: José Ângelo Cagnon.
Inclui bibliografia.
1. Irrigação agrícola. 2. Estufa (Plantas). 3. Radiação
solar. 4. Evapotranspiração. 5. Solos - Fluxo de calor.
I. Cagnon, José Ângelo. II. Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade
de Ciências Agrônomicas. III. Título.

CDD 631.587

Palavras-chave: Lógica Fuzzy; Ambientes protegidos; Irrigação;
Evapotranspiração; Sistemas de controle.

Data da Realização: 17 de dezembro de 2004.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

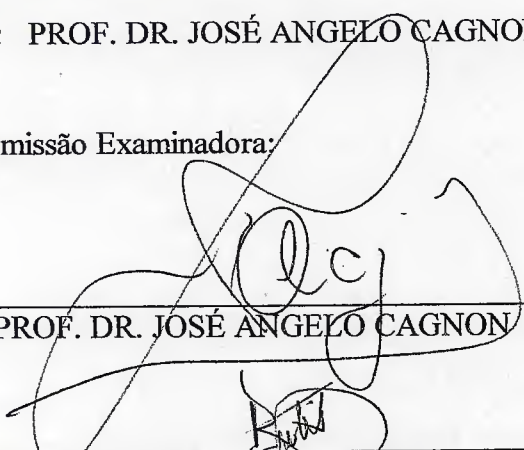
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DO CALOR LATENTE COM APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO".

ALUNO: ORLANDO TADEU LIMA DE SOUZA

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSÉ ANGELO CAGNON

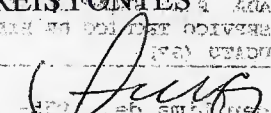
Aprovado pela Comissão Examinadora:



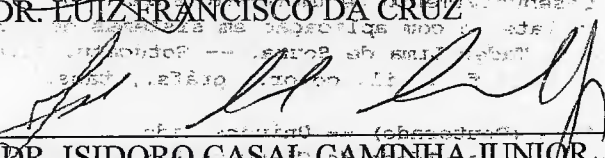
PROF. DR. JOSÉ ANGELO CAGNON



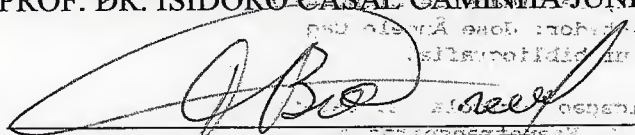
PROF. DR. IVO REIS FONTES



PROF. DR. LUIZ FRANCISCO DA CRUZ



PROF. DR. ISIDORO CASAL CAMINHA JUNIOR



PROF. DR. TARLEI ARRIEL BOTREL

Data da Realização: 17 de dezembro de 2004.

OFEREÇO,

A Deus por ter estado sempre comigo.

“...sem mim nada podeis fazer” (Jo 15,5)

DEDICO,

À minha mãe que nunca mediu esforços, apesar das grandes dificuldades que passamos, para que eu e meus irmãos tivéssemos acesso à educação.

À minha esposa Ana Maria pelo amor e incentivo em todos os momentos de nossas vidas, inclusive durante meu afastamento para realizar este projeto.

Aos meus filhos Ana Paula, Paulo André e Marcos Felipe, que são as dádivas que recebi do Senhor.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. José Angelo Cagnon do Departamento de Engenharia Elétrica – UNESP – Campus de Bauru, que acreditou em mim e em nossa empreitada.

Ao Professor Dr. Ivo Fontes pelas discussões e contribuições ao longo da realização do projeto.

Aos Professores Dr. Odivaldo Seraphim e Dr. Luiz Antonio Targa, pelas críticas e contribuições no fechamento deste trabalho.

Ao Dr. Antonio Ribeiro da Cunha e Dr. José Francisco Escobedo pelas sugestões, discussões e coleta dos dados utilizados neste trabalho.

Aos colegas Luis Manzine, Gilmar Alves, Melânia Valiati, Indalécio Dutra, Idelina Assunção e Hildeu Assunção, pelas discussões e incentivo ao longo de nossa convivência durante o curso.

À equipe da biblioteca, às secretárias da secretaria de pós-graduação e ao José Carlos (Magrão) da Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, pelo apoio constante no decorrer do curso realizado pelo autor.

À Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA e à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1	RESUMO	1
2	INTRODUÇÃO	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1	Radiação Solar.....	8
3.2	Temperatura e Umidade Relativa do Ar	16
3.3	Ambientes Protegidos	18
3.4	Irrigação	24
3.4.1	Sistemas de Irrigação	27
3.4.2	Vantagens e Desvantagens das Técnicas de Irrigação	37
3.5	Evapotranspiração	40
3.5.1	Métodos de Determinação da Evaporação e Evapotranspiração	41
3.5.1.1	Métodos de Medição Direta	42
3.5.1.2	Métodos Micrometeorológicos	45
3.6	Lógica Fuzzy.....	52
3.6.1	Fundamentos da Lógica Fuzzy.....	52
3.6.2	Conceitos Básicos da Lógica Fuzzy.....	56
3.6.3	Sistemas de Controle Fuzzy	61
3.7	Sistemas de Controle.....	62
3.7.1	Aspectos Gerais.....	62
3.7.2	Controlador PID	65
3.7.3	Controladores de Lógica Fuzzy.....	66
3.7.4	Sistema de Controle Combinados	67
4	MATERIAIS E MÉTODOS	71
4.1	Materiais.....	71
4.2	Métodos.....	78
4.2.1	Modelo Fuzzy para Obtenção do Fluxo de Calor Latente	78
4.2.2	Fuzzyficação.....	79

4.2.3	Determinação dos Conjuntos Fuzzy.....	83
4.2.4	Cálculo das Regras Fuzzy	86
4.2.5	Defuzzyficação.....	89
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
6	CONCLUSÕES	100
7	REFEÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação da radiação conforme o comprimento de onda	9
Figura 2 - Esquema da radiação solar transmitida à superfície da Terra.	10
Figura 3 Definição do ângulo de declinação (δ)	12
Figura 4 - Casa de vegetação modelo londrina	19
Figura 5 - Casa de vegetação modelo londrina	19
Figura 6 - Casa de vegetação modelo capela	19
Figura 7 -Casa de vegetação túnel forçado	19
Figura 8 -Casa de vegetação modelo teto em arc.....	20
Figura 9 - Casa de vegetação teto convectivo	20
Figura 10- Esquema de interação entre um sistema de cultivo e as radiações envolvidas no processo.....	46
Figura 11 - Gráfico representativo dos valores de pertinência do conjunto A.....	57
Figura 12 - Formas representativas da função pertinência para os conjuntos fuzzy.....	60
Figura 13 - Esquema básico de um Controlador Fuzzy	61
Figura 14 Diagrama de blocos de um Sistema de Controle	63
Figura 15 - Sistema de controle utilizando Lógica Fuzzy.....	67
Figura 16 - Sistema de Controle Combinado	68
Figura 17 - Tipos de programas supervisórios	69
Figura 18 - Planta baixa representativa da área experimental com a localização dos aparelhos e canteiro	72
Figura 19 - Sensor de temperatura e umidade do ar.....	74
Figura 20 - Sensor de radiação total líquida e saldo radiômetro	75
Figura 21 - Sensor de fluxo de calor no solo.....	76
Figura 22 -Modelo Fuzzy para a determinação do fluxo de calor latente.....	79
Figura 23 - Conjuntos fuzzy para o saldo da radiação	82
Figura 24 - Conjuntos fuzzy para o fluxo de calor no solo	82
Figura 25 - Conjuntos fuzzy para a temperatura do ar	83

Figura 26 - Planilha de simulação - Modelo Fuzzy	91
Figura 27 - Curvas de LE determinadas pelo Método de Bowen e pelo modelo fuzzy.....	94
Figura 28 Curvas de ET determinadas pelo Método de Bowen e pelo modelo fuzzy	94
Figura 29 - Curvas da razão entre o saldo da radiação com o fluxo de calor latente para os métodos de Bowen e fuzzy.....	97
Figura 30 - Relação entre os valores da vazão em l/h obtidos para o método de Bowen e o modelo fuzzy.....	99

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de técnicas de irrigação.....	39
Quadro 2 - Equipamentos de medidas utilizados no interior da estufa.....	73
Quadro 3 - Nomenclatura e símbolos para os conjuntos fuzzy.....	81
Quadro 4 - Correlação entre as variáveis R_n e G	87
Quadro 5 - Nomenclatura e símbolos para os conjuntos fuzzy da correlação R_n, G e T que indicam os resultados obtidos para o fluxo de calor latente.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Demonstrativo dos valores obtidos para o fluxo de calor latente(LE) determinados pelo método de Bowen e pelo modelo fuzzy	93
Tabela 2 - Demonstrativo dos valores obtidos para a evapotranspiração (ET); para a razão R_n/LE e a vazão determinados pelo método de Bowen e pelo modelo fuzzy	95

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Equação de Angstron	10
Equação 2 - Equação de Insolação	11
Equação 3 - Equação de Ângulo Horário.....	11
Equação 4 - Equação da Declinação Solar.....	11
Equação 5 - Radiação Solar Absorvida.....	13
Equação 6 – Balanço da Radiação de Ondas Longas.....	14
Equação 7 – Saldo da Radiação Solar	14
Equação 8 –Lamina Total de Água para Irrigação.....	26
Equação 9 –Lâmina total de água para irrigação suplementar.....	26
Equação 10 –Lâmina total de água para irrigação total	26
Equação 11 –Balanço de energia	46
Equação 12 –Razão de Bowen.....	47
Equação 13 –Fluxo de calor latente	47
Equação 14 –Fluxo de calor sensível	47
Equação 15 – Pressão de saturação do vapor d'água.....	47
Equação 16 –Grau de pertinência para um conjunto Booleano.....	56
Equação 17 –Representação de um conjunto fuzzy	59
Equação 18 – índice de Identificação para o saldo da radiação	84
Equação 19 – Grau de Pertinência para o saldo da radiação.....	84
Equação 20 –Complementar do grau de pertinência para o saldo da radiação	84
Equação 21 –Índice de identificação para temperatura.....	85
Equação 22 – Grau de pertinência para a temperatura.....	85
Equação 23 Complementar do grau de pertinência para a temperatura.....	85
Equação 24 –Índice de identificação para o fluxo de calor no solo	86
Equação 25 –Índice de identificação para o fluxo de calor no solo	86
Equação 26 – Complementar do grau de pertinência para o fluxo de calor no solo.....	86
Equação 27 –Propriedade associativa para três conjuntos fuzzy	87
Equação 28 –Calculo do fluxo de calor latente pelo modelo fuzzy	89

LISTA DE SÍMBOLOS

b	: Coeficiente angular
d_j	: Dia juliano
E_a	: Eficiência de aplicação da irrigação
E_a	: Pressão de saturação do vapor d'água (kPa)
E_t	: Evapotranspiração (mm H ₂ O)
G	: Fluxo de calor no solo (MJ/m ²)
h	: Ângulo horário (h)
H	: Fluxo de calor sensível (MJ/m ²)
I	: Índice de identificação para a temperatura ambiente
ITN	: Lâmina total de irrigação (mmH ₂ O)
J	: Índice de identificação para o fluxo de calor no solo
K	: Índice de identificação para o saldo da radiação
K_c	: Ganho proporcional do controlador PID
LE	: Fluxo de calor latente (MJ/m ²)
n	: Número de horas de brilho solar (h)
N	: Fotoperíodo (h)
P_e	: Precipitação Efetiva (mmH ₂ O)
Q_{cr}	: Contrarradiação (MJ/m ²)
Q_g	: Radiação solar global (MJ/m ²)
Q_o	: Radiação no topo da atmosfera (MJ/m ²)
Q_{oc}	: Radiação de ondas curtas (MJ/m ²)
Q_{ol}	: Radiação solar de ondas longas (MJ/m ²)
Q_r	: Radiação solar refletida (MJ/m ²)
Q_s	: Radiação terrestre (MJ/m ²)
Rn	: Saldo da radiação (MJ/m ²)
s	: Tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água
T	: Temperatura ambiente
T_d	: Ganho derivativo do controlador PID

- T_i : Ganho integral do controlador PID
- T_s : Temperatura média de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$)
- W_s : Água proveniente do lençol freático
- β : Razão de Bowen
- δ : Declinação solar ($^{\circ}$)
- Δs : Variação do teor de umidade no solo (mmH_2O)
- ΔT : Diferença das temperaturas dos termopares secos ($^{\circ}\text{C}$)
- ΔT_u : Diferença das temperaturas dos termopares úmidos ($^{\circ}\text{C}$)
- ΣET : Somatório da evapotranspiração (mmH_2O)
- γ : Coeficiente psicrométrico ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)
- λ : Comprimento de onda (μm)
- ϕ : Latitude
- $\mu(x)$: Grau de pertinência
- $\mu'(x)$: Complementar do grau de pertinência

1 RESUMO

A determinação da quantidade de água necessária é um dos principais parâmetros para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de um sistema de irrigação agrícola. Uma das consequências da eficácia do dimensionamento do sistema é o aumento da produtividade e, em decorrência, a lucratividade. A quantidade adequada de água é, pois, uma condição importantíssima para a otimização do crescimento vegetal acarretando a produção, com reduzidos custos econômicos.

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático, baseado na Teoria Fuzzy, para determinar o fluxo de calor latente, tendo como decorrência o cálculo da evapotranspiração que define a quantidade de água necessária para o cultivo de plantas em ambientes protegidos, visando sobretudo a racionalização do uso da água e da energia elétrica na atividade agrícola.

Este modelo pode ser utilizado na implementação de um sistema de controle de vazão em irrigações, proporcionando a determinação do tempo e do volume de água necessários ao suprimento hídrico da cultura. A quantidade de água requerida para a

suplementação hídrica do sistema é obtida a partir da determinação do fluxo de calor latente, cuja grandeza é o equivalente ao volume de água evapotranspirado pela cultura.

O modelo adota três variáveis de entrada, que são: o saldo da radiação solar, o fluxo de calor no solo e a temperatura do ar, cujos valores são medidos através de equipamentos instalados na área de plantio. Através desse modelo é possível determinar o fluxo de calor latente (LE), sendo esta a variável de saída do referido modelo.

Para a convalidação do modelo proposto foram utilizados os dados obtidos em experimento realizado com o cultivo de rúcula (*Eruca sativa* L.), em estufa coberta de polietileno, no Departamento de Ciências Ambientais, da Faculdade de Ciências Agronômicas e os resultados apresentados foram obtidos através de simulações realizadas no Laboratório Didático de Informática dessa mesma instituição.

Os valores do fluxo de calor latente, denominado LE, determinados através do modelo proposto foram comparados com os valores calculados pelo método da razão de Bowen, e apresentaram uma alta correlação quando comparados estatisticamente, chegando-se a 94%, para 99,9% de significância, com coeficiente de determinação de 90%. O erro médio verificado, entre os dados analisados através do método clássico e o modelo fuzzy, foi de 1%, cujo valor pode ser considerado praticamente desprezível.

A relevância deste trabalho é o desenvolvimento de uma nova metodologia para o cálculo do fluxo de calor latente, através de um modelo matemático utilizando lógica fuzzy, que se constitui em uma ferramenta muito útil para a determinação da altura da lâmina de água necessária em um sistema de irrigação.

O modelo desenvolvido pode ser utilizado na automação e gerenciamento em um sistema de irrigação, através da implementação de controlador fuzzy/PID. Como consequência, o sistema poderá promover a racionalização do consumo de água e da energia elétrica, contribuindo para a diminuição dos custos, possibilitando um desenvolvimento de forma sustentável da atividade agrícola, gerando maior lucratividade decorrente da otimização da produção.

DEVELOPMENT OF A FUZZY MODE TO DETERMINE THE LATENT HEAT WITH APPLICATION IN IRRIGATION SYSTEMS. Botucatu, 2004, 113 p.

Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP.

Author: ORLANDO TADEU DE LIMA DE SOUZA

Adviser: JOSÉ ANGELO CAGNON

SUMMARY

The determination of the necessary amount of water is one of the main parameters of an agriculture irrigation system. One of the efficient consequences of the measurements of the system is the increase of productivity, and therefore the profitable advantage of it. The satisfactory amount of water is therefore a very important condition for the growing accomplishment of the plant causing the production, with fewer costs.

The aim of this work is the development of a mathematical model, based on the Fuzzy Theory, to determine the stream of latent heat, having as a result the calculation of the transpiration dissipated that defines the necessary amount of water for the cultivations of plants in protected environments; intending above all the balance of water usage and electricity in the agriculture activity.

This model can be used in the implementation of a system that controls the outflowing of irrigations, determining the time and volume of water that is necessary for the furnishing of it. The required amount of water for the supplement of the system is gathered through the determination of the stream of latent heat, for its highness is the equivalent to the volume of water transpired by the plant.

The model adopts three variables to begin with, which are: the balance of solar radiation, stream of the soil heat and the air temperature, which are the amounts that are measured by the installed equipments in the planted area. Through this model is possible to determine the stream of latent heat (LE), having it as the variable of exit of the model.

To have this model validated there were used data, that were obtained in the experiment that was done by the cultivation of *Euruca Sativa* L., in an incubator

covered by polyethylene at the Department of Science, at Faculdade de Ciências Agrômicas and the results were obtained through simulations that were done in the Laboratory of this Institution.

The values of latent heat stream, named LE, determined through a model proposed were compared with the values that were calculated for the method of reason by Bowen and they present a high correlation when compared in a statistic way, getting a result of 94% to 99.9% of meaningfulness; with a coefficient of determination of 90%. The medium error verified between the analyzed data through the classic and fuzzy method was of 1%, which can be a despicable value.

The relevance of this work is the development of a new methodology for the calculation of latent heat stream, through a mathematical model using the fuzzy logic, that build up a very useful tool to determine the height of the water lamina necessary in a system of irrigation.

The model developed can be used in the automation and in the management in a system of irrigation, through the establishment of controlling fuzzy/PID. As a consequence, the system will be able to promote the rationalization of water and electricity consume, contributing for the lower of costs, becoming possible the sustainable development of the agriculture activity, generating a higher profit that was a result of the closing of the production.

Keywords: Fuzzy Logic, Irrigation, Protected Environment, Solar Radiation, Controlling Systems.

2 INTRODUÇÃO

A quantidade de água existente na natureza é limitada e atualmente sua disponibilidade vem diminuindo gradativamente devido à degradação do meio ambiente, ao crescimento populacional e à expansão acentuada da atividade agrícola. Apesar da importância da irrigação no aumento do suprimento de alimentos, ela pode provocar sérios problemas na contaminação e na disponibilidade de recursos hídricos. É, portanto, considerada uma das técnicas agrícolas que mais interferem em nível ambiental.

O crescimento da área irrigada brasileira vem acontecendo de forma lenta e gradual. A todo o momento novas aplicações de novas técnicas de irrigação são utilizadas pelos produtores de forma a ampliar ou de viabilizar sua produção. Nos projetos destas aplicações, via de regra, não existe a preocupação no sentido de se atender os critérios mínimos de proteção do meio ambiente e muito menos aqueles relacionados com os efeitos sobre os recursos hídricos. Desta forma, é necessário gerar e difundir informações sobre a aplicação destas técnicas e de outros procedimentos mais criteriosos que permitam o controle, conservação e manutenção destes recursos.

Em um ambiente protegido a evapotranspiração é o parâmetro fundamental para estimar a quantidade de irrigação necessária para uma determinada cultura. Dessa forma, o conhecimento da evapotranspiração, contribui para uma utilização adequada da água onde as fases críticas de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo são limitadas pelo fator hídrico.

Quanto mais preciso for o método empregado para determinar a quantidade de água necessária à irrigação da cultura, mais racional se torna o uso da água e da energia no processo de crescimento e produção vegetal. Os métodos adotados para estimar a evapotranspiração estão baseados em três princípios básicos: em medidas diretas, no balanço hídrico e em métodos micrometeorológicos, assim chamados por terem como base medidas físicas através de equipamentos.

Dentre os métodos micrometeorológicos utilizados para estimar a evapotranspiração, destaca-se o que determina o balanço de energia, através do método da razão de Bowen. Este método é considerado um processo racional de estimativa de evapotranspiração de uma superfície e através dele mede-se a energia disponível em um sistema natural e através do qual separam-se as frações da radiação usadas nos diferentes processos evapotranspirativos, obtendo-se assim bons resultados.

Modelos matemáticos implantados em programas computacionais têm apresentado significativos resultados em sistemas não-lineares e complexos nas mais diversas áreas, entre as quais, a teoria de controle, modelo de reconhecimento e análise de decisão. Esses programas são capazes de resolver questões que os modelos clássicos, via de regra, não são capazes de fazê-lo. São os chamados de sistemas inteligentes dentre os quais se destacam as Redes Neurais e a Lógica Fuzzy.

O termo inteligente é aplicado a determinados programas computacionais cuja metodologia de cálculo é baseada no raciocínio humano. A lógica fuzzy possibilita a interpretação de fenômenos não quantitativos e vagos utilizando uma lógica capaz de adequar o controle nebuloso ao raciocínio do senso comum.

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo matemático baseado na Teoria Fuzzy, para estimar o fluxo de calor latente. A importância desse modelo é a contribuição que o mesmo pode proporcionar para um monitoramento contínuo e global das condições a que está sujeita a cultura, uma vez que os métodos hoje

empregados, via de regra, não permitem um controle contínuo das condições hídricas a que está submetido o vegetal, às vezes restritas ao ponto onde está posicionado o sensor.

Os parâmetros envolvidos neste modelo são três variáveis de entrada: o saldo da radiação, o fluxo de calor no solo e a temperatura do ar. Estas variáveis são medidas através de sensores instalados no ambiente de cultivo. A variável de saída, que é o fluxo de calor latente é o parâmetro que indica a evapotranspiração da cultura, determinada através do equivalente da energia em volume de água.

O modelo proposto contribui com alguns benefícios para o cultivo de culturas em ambientes protegidos, tais como:

- Proporciona o uso racional da água pelo sistema de irrigação;
- Possibilita a determinação do tempo de irrigação necessário e suficiente para completar a quantidade de água no solo;
- Permite o controle da vazão de água, através do sistema de irrigação adotado, para o cultivo de produção de determinado vegetal;
- Permite o uso racional da energia, como decorrência da otimização do uso da água na irrigação, se o sistema adotado para a irrigação de determinada cultura exigir o uso de uma fonte de energia para o fornecimento de água.

Para a validação do modelo desenvolvido foram realizadas simulações, com dados obtidos através de um experimento com o cultivo da rúcula (*Eruca sativa* L.), em ambiente protegido. Esses dados possibilitaram determinar o fluxo de calor latente pelo método clássico de Bowen cujos resultados foram comparados aos encontrados no modelo proposto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Radiação Solar

A distribuição da radiação eletromagnética emitida pelo sol, em função do comprimento de onda incidente no topo da atmosfera é chamada de espectro solar. A Figura 1 apresenta uma divisão aproximada do espectro eletromagnético solar em várias bandas de cores e regiões de energia, que é classificado de acordo com o seu comprimento de onda (Iqbal, 1980). Medições indicam que 99% da energia solar está contida entre 0,25 a 4,0 μm , ficando 1% para comprimentos maiores que 4,00 μm . Assim, a radiação solar é conhecida como radiação de ondas curtas. A uma distância média Terra-Sol de $149,5 \times 10^6 \text{ km}$ o fluxo de ondas curtas incidente numa superfície perpendicular aos raios solares é chamado de constante solar e vale aproximadamente 1367 W/m^2 .

Vários fatores afetam a radiação solar que chega a uma superfície, dentre eles, os fatores astronômicos como a declinação solar (δ) que relaciona o plano de revolução da Terra em torno do Sol, chamado de Plano da Elíptica, com o eixo de rotação da Terra; a distância Terra-Sol uma vez que a quantidade de radiação solar que chega à Terra é inversamente proporcional ao quadrado de sua distância ao Sol; o ângulo horário que relaciona

o movimento do sol com a superfície horizontal da Terra. Com isso a radiação solar se modifica, aumentando à medida que o sol atinge o azimute.

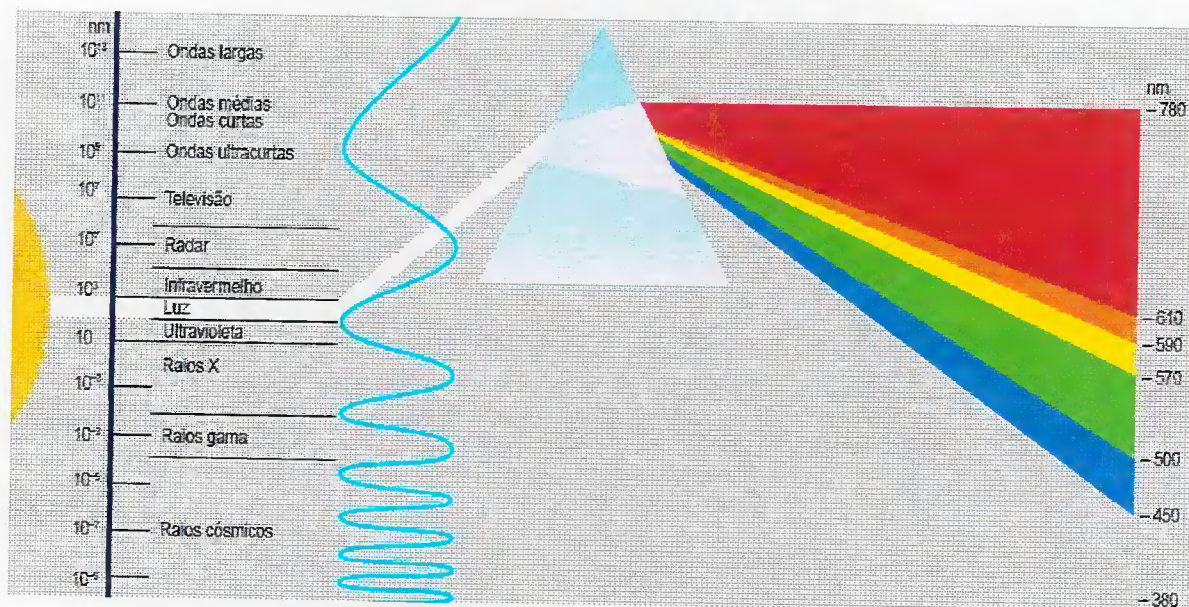


Figura 1 - Classificação da radiação conforme o comprimento de onda

Dos fatores geográficos a latitude é a que influi efetivamente sobre a variação da radiação solar. Já a altitude e a longitude não influenciam quando se avalia a radiação numa dada região restrita.

A radiação solar, ao atravessar a atmosfera, sofre os fenômenos seletivos da reflexão, difusão e absorção. Uma parte da radiação solar atinge a superfície terrestre diretamente, sendo chamada de radiação solar direta. Outra parte atinge a superfície terrestre após sofrer o processo de difusão, sendo por isso denominada de radiação solar difusa ou do céu. A Figura 2 demonstra esses dois fluxos de radiação que chegam à superfície concomitantemente e representam o total da radiação solar que atinge a superfície, que é denominado de radiação solar global (TUBELIS; NASCIMENTO, 1995).

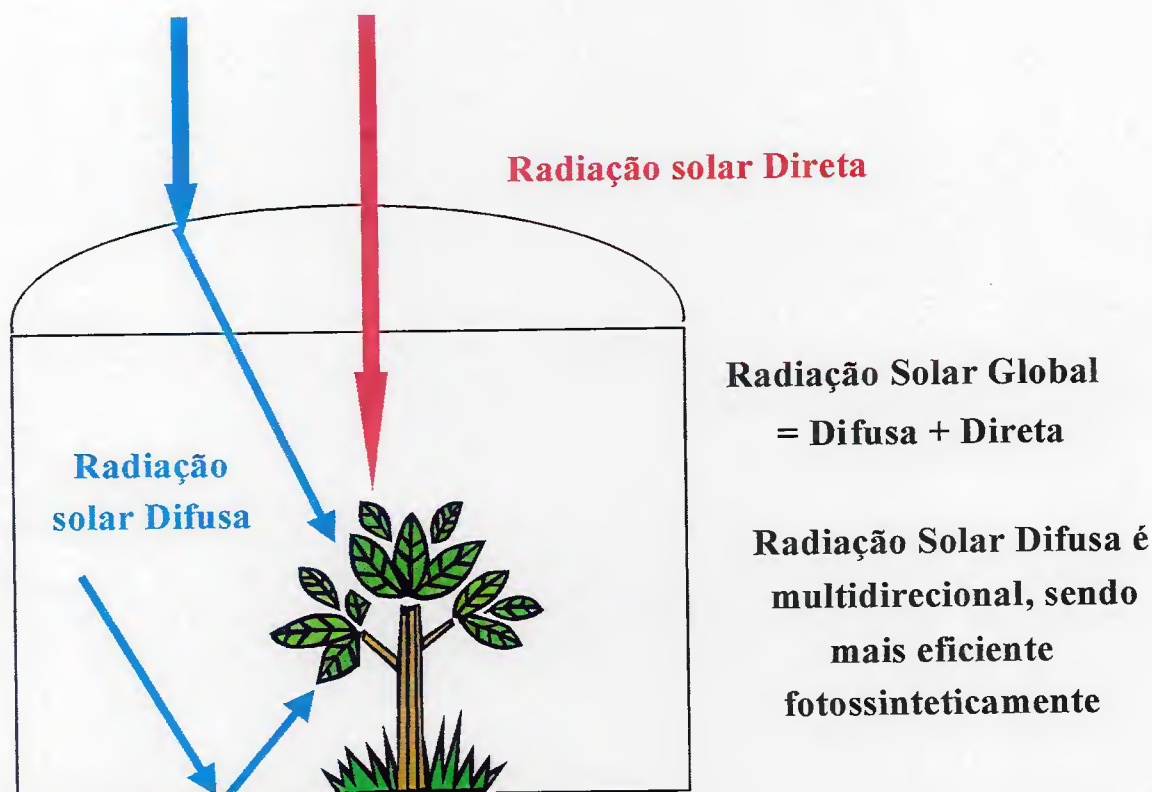


Figura 2 - Esquema da radiação solar transmitida à superfície da Terra.

A medida da radiação global que chega à superfície é feita através de piranômetro e actinógrafo. Os dados medidos pelo piranômetro são os mais confiáveis por apresentar melhor precisão que o actinógrafo, porém, Cebalos et al. (1992), afirmam que esse aparelho evidencia desempenho excelente quando calibrado com um piranômetro.

A radiação global (Q_g) que chega ao solo numa superfície horizontal, num ambiente de campo onde a atmosfera se apresenta com 100% de transmissividade, pode ser estimada através da equação de Angstron (Equação 1):

$$Q_g = Q_0 \left[a + b \left(\frac{n}{N} \right) \right] \quad (1)$$

Q_0 é a radiação no topo da atmosfera e o termo n/N é chamado de razão de insolação em que n é o número de horas de brilho solar e N é a insolação máxima possível, podendo ser calculada pela Equação 2:

$$N = \frac{2h}{15} \quad (2)$$

Sendo h o ângulo horário, dado em grau, definido como o valor que falta para completar 360° entre a linha do azimute (posição do Sol no zênite) e o meridiano do local do experimento. Este termo é definido pela Equação 3:

$$h = \arccos(-\operatorname{tg}\phi \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad (3)$$

em que:

ϕ é a latitude do local

δ a declinação solar definida para cada dia do ano sendo usado o valor do dia juliano (dj).

A Figura 3 estabelece a configuração para a declinação solar para as diversas posições da Terra em relação ao Sol. Através desta configuração é possível estabelecer a expressão para a determinação de δ , conforme Equação 4:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{2\pi}{365} (80 - dj) \right] \quad (4)$$

O coeficiente linear (a) e angular (b), da equação de Angstron, são obtidos a partir de ajustes estatísticos com valores específicos para cada região, pois dependem da latitude e são ainda dependentes da densidade e do tipo de nuvem variando, portanto dia após dia.

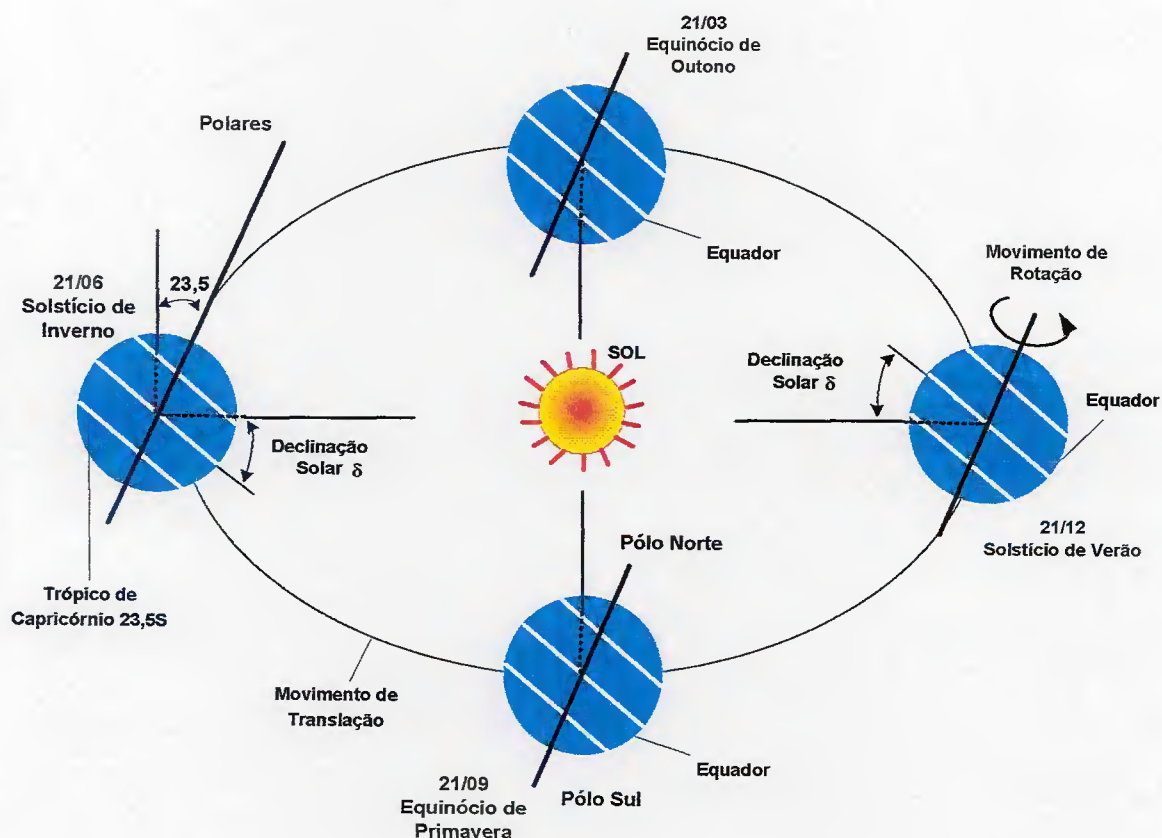


Figura 3 Definição do ângulo de declinação (δ)

Davis (1965), citado por Santos et al. (1983), estudando regressões mensais, constatou uma menor variabilidade para a do que para b , justificando essa variação em função da nebulosidade e do grau de turbidez atmosférica e para Ometto (1968) a menor variabilidade de a é pouco influenciada pelo fenômeno de nuvens o que não ocorre para b .

Mesmo sendo criticado por alguns autores, segundo Santos et al. (1983), por dar peso igual à radiação para todas as horas do dia, esta equação tem sido eficiente para estimar a radiação solar para várias localidades, para dados diários, tais como Fritz (1979), que estimou os coeficientes a e b para os Estados Unidos; Cervellini e Salati (1966), que estimaram os coeficientes a e b para o Estado de São Paulo; Lopes et al. (1971) para o Rio Grande do Sul e Mota et al. (1971) para Santa Catarina, entre outros, citados por Santos et al. (1983).

Ometto (1968) e Tarifa (1972), trabalharam com dados diários e apresentaram equações de regressão lineares para diferentes períodos concluindo que tais equações possam ser agrupadas numa única equação válida para todo o ano, devido a diferença entre os parâmetros ser não significativa.

Cury-Lunardi e Catâneo (1993), estimaram a radiação solar global através de equações de regressão entre a razão de radiação solar (Q_g/Q_o) e razão de insolação tendo encontrado para a região de Botucatu-SP várias relações entre a radiação global e o número de horas de insolação para a equação de Angstron e concluíram que dentre os agrupamentos os melhores resultados foram os bimestrais e os semestrais.

Uma parte da radiação solar global é absorvida pela superfície, constituindo-se na radiação solar absorvida e o restante dela é refletido, dando origem à radiação solar refletida. A radiação solar absorvida é a contabilização entre o recebimento e a devolução da radiação solar, também denominada de radiação de ondas curtas conforme Equação 5:

$$Q_{oc} = Q_g - Q_r \quad (5)$$

onde :

Q_{oc} é a radiação solar absorvida

Q_g é a radiação solar global

Q_r é a radiação solar refletida.

Por outro lado, a superfície terrestre emite radiação na forma de ondas eletromagnéticas não visíveis, denominada de radiação terrestre (Q_s). Mais de 99% da energia emitida se situa na faixa de 4 a 100 micrometros, denominada de ondas longas ou de grande comprimento de onda, com uma intensidade máxima em torno de 10 microns. Noventa por cento da energia emitida é absorvida pelo vapor d'água, gás carbônico, ozônio e nuvens na atmosfera. A radiação emitida na faixa de 8,5 a 11,0 microns, totalizando 10% da energia, atravessa a atmosfera sem ser absorvida, perdendo-se para o espaço sideral.

Com a mesma direção, sentido oposto e na mesma faixa de comprimento de onda da radiação terrestre, ocorre um fluxo de radiação, de origem atmosférica, denominado de contrarradiação Q_{cr} , que é totalmente absorvida pela superfície terrestre.

A contabilização entre a contrarradiação e a radiação terrestre é conhecida como emissão ou irradiação efetiva terrestre, e representa o balanço de radiação de ondas longas Q_{ol} dado pela Equação 6:

$$Q_{ol} = Q_{cr} - Q_s \quad (6)$$

onde:

Q_{ol} é o balanço de ondas longas

Q_{cr} é a contrarradiação

Q_s é a radiação terrestre

A soma dos balanços de radiação de ondas curtas e de ondas longas é denominada de balanço de radiação ou saldo de radiação, e representa o total da radiação que é absorvido pela superfície terrestre e que será usado na geração dos fenômenos meteorológicos.

O saldo da radiação Rn é determinado pela Equação 7 :

$$Rn = Q_{oc} + Q_{ol} \quad (7)$$

A superfície do solo, com ou sem vegetação, é o principal receptor da radiação solar e da radiação atmosférica, sendo também um emissor de radiação. Seu balanço de radiação, variável no decorrer do dia e do ano, promove variações diárias e anuais na temperatura do solo e do ar.

Sob condição de balanço positivo de radiação, a energia excedente é repartida em três fluxos: O fluxo de calor para o aquecimento do ar; o fluxo de calor para o interior do solo e o fluxo de calor latente usado na evaporação.

Sob condição de balanço negativo de radiação, geralmente ocorre fluxo de calor latente de evaporação, sendo o déficit de energia suprido por um fluxo de calor do ar e um fluxo de calor do interior do solo.

Os fluxos de calor, para o aquecimento do ar, são responsáveis pelo aquecimento e resfriamento do ar, enquanto que os fluxos de calor para o interior do solo são responsáveis pelo aquecimento e resfriamento do solo.

As medidas de saldo de radiação em superfícies de solo limpo ou vegetado têm aplicabilidade direta em práticas agrícolas, principalmente no planejamento racional da irrigação, no uso adequado do solo e no zoneamento agrícola regional, condicionados pela caracterização correta do balanço de energia e da determinação da evapotranspiração, através dos modelos micrometeorológicos. A utilização do saldo da radiação no cálculo da evapotranspiração é a concepção básica nos métodos combinados de Penman, e da razão de Bowen.

O saldo da radiação é um dos principais elementos alterados pelo uso da cobertura de polietileno em ambiente protegido, influenciando decisivamente no crescimento e desenvolvimento das culturas, e afetando conseqüentemente sua produtividade. Sua medida é feita através de saldos radiômetros, instrumentos imprescindíveis para a medição da radiação disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície do solo devendo, se montado sobre o dossel denso e completamente fechado, para que a radiação líquida absorvida pelo dossel seja equivalente à medida pelo equipamento, sendo que a troca entre o dossel e o solo é desprezível (GATES, 1965) citado por Cunha (2001).

Basicamente, todos os saldo radiômetros têm como componente principal uma termopilha. Esse sensor tem a forma de placas pretas e planas embutidas em outro material com uma série de junções de termopares localizados em cada lado. A diferença de temperatura entre as placas é proporcional ao saldo de radiação para o qual elas estão expostas. Por meio de uma constante de calibração, o sinal elétrico da termopilha é convertido em fluxo de radiação (SOUZA, 1996).

Os primeiros trabalhos utilizando esses instrumentos foram nos estudos de convergência de fluxo (FUNK, 1959), cobertura de nuvens e balanço de energia em mamíferos (FUNK, 1964).

Os saldos radiômetros mais difundidos mundialmente e algumas de suas características e problemas constam das publicações de Robison (1966); Sellers (1972); Coulson (1975); Fritschen (1979) e Halldin (1992) citados em Souza (1996). Esses instrumentos tornaram-se padrão em investigações micrometeorológicas, estudos de evaporação e em práticas agrícolas, como irrigação Souza (1996).

3.2 Temperatura e Umidade Relativa do Ar

O conhecimento da temperatura e da umidade relativa do ar, no dossel vegetativo em estudos climatológicos das culturas, que se desenvolvem em determinado ambiente é de fundamental importância, pois a variação desses elementos meteorológicos é um fator preponderante, não só no crescimento e desenvolvimento das plantas, mas também na ocorrência de pragas e doenças.

A faixa ótima de desenvolvimento das diversas espécies está abaixo da faixa de 80% de umidade, pois a partir deste valor é que a maioria das doenças surgem nos seres vivos, principalmente naqueles desenvolvidos em cativeiro, o que nos leva a concluir que o manejo adequado desses elementos meteorológicos é de vital importância para a prevenção de doenças e ao desenvolvimento das espécies.

Diversos autores como Tivelli (1999) e Seeman (1979) afirmam que, no cultivo em ambiente protegido não controlado, as altas temperaturas causam, geralmente, danos mais significativos do que as baixas temperaturas e, ainda que, a temperatura do ar na condição de ambiente protegido difere da condição de campo e depende da densidade de fluxo da radiação solar incidente no seu interior como também no seu manejo.

A radiação solar é o fator que influi preponderantemente nas altas temperaturas do ar no interior de abrigos, durante as horas de brilho solar, mas há outros fatores que influenciam esta variável climática como, o tamanho do ambiente protegido, o volume do ar a ser aquecido, as propriedades físicas da cobertura e as condições meteorológicas do local.

A transmissão do calor por condução, convecção e irradiação promove a variação vertical da temperatura no interior do ambiente protegido, sendo que, a convecção é o fator que maior influência tem sobre esse comportamento da temperatura pois, o ar quente tem

menor densidade e tende a se deslocar no sentido do solo para a cobertura do abrigo, com isso, verificamos temperaturas mais baixas na superfície do solo e valores maiores nas partes mais altas da construção.

Alguns autores como Mills et al. (1990), citados por Silva (2001), na África do Sul, Farias et al. (1993), em Capão do Leão, RS, e Martins (1992) em Pelotas, RS, concluíram que a temperatura média do ar não apresentou diferenças significativas, quando se compara o ambiente protegido com as condições de campo. Entretanto, outros autores como Al-Riahi et al. (1988) cultivando pepino em Bagdá e Faria Junior et al. (1993) estudando cultivares de alface em Ilha Solteira, SP, citados por Silva (2001), observaram um pequeno aumento de temperatura no ambiente protegido, quando comparado às condições de campo.

Segundo os autores Seeman (1979); Prados (1986) e Cunha (2001), os valores da umidade relativa do ar no interior dos ambientes protegidos são muito variáveis e estão relacionados aos valores de temperatura do ar, pois para um mesmo conteúdo do vapor d'água no ar, a umidade relativa é inversamente proporcional à temperatura.

Durante o período diurno, com o aumento da temperatura do ar, a umidade relativa diminui no interior do ambiente sob cobertura plástica, tornando-se inferior à verificada externamente, enquanto no período noturno, a umidade relativa aumenta chegando próxima a 100%, em decorrência da queda de temperatura e à retenção do vapor d'água pela cobertura plástica (TANAKA; GENTA, 1982).

Martins (1992) realizando estudos sobre ambientes protegidos com cobertura de polietileno de 100 μ m de espessura, em Pelotas, RS, concluiu que os valores de umidade relativa do ar, durante o período diurno, não apresentaram diferenças entre as condições de ambiente protegido e de campo, enquanto no período noturno, foram verificados valores superiores na condição de ambiente protegido.

Farias et al. (1993) investigando a variação de alguns elementos climáticos no interior de ambiente protegido com cobertura plástica, na região Sul do Brasil, encontraram valores de umidade relativa máxima mais elevados no interior do ambiente protegido, durante o período noturno, quando comparados com as condições do ambiente externo.

Para os autores Prados (1986); Cunha (2001) e Galvani (2001), os valores médios da umidade relativa do ar na condição de ambiente protegido são similares aos encontrados na condição de campo.

Analisando os resultados desses trabalhos, notamos que os valores médios da temperatura e da umidade relativa do ar são iguais ou aproximadamente superiores ao interior do ambiente protegido, com cobertura plástica, quando comparados com as condições de campo.

3.3 Ambientes Protegidos

As plantas dependem, para o seu crescimento e desenvolvimento, dentre outros aspectos, das condições climáticas e essas condições o homem tem mostrado capacidade de modificar. Mesmo em escala bem reduzida, tem conseguido ajustar a atividade agrícola ao microclima onde desenvolve sua cultura.

A prática comum de definir as chamadas *analogias climáticas*, primeiramente em termos de médias mensais de temperatura e precipitação, tem provado ser inadequada para a introdução de plantas ou planejamento do uso da terra. A radiação solar, a evapotranspiração, a amplitude diária da temperatura, o balanço hídrico e outros parâmetros meteorológicos precisam ser completamente analisados, antes de se estabelecer um plano, para se obter o máximo retorno econômico para um dado regime climático.

Quanto mais desenvolvida é a cultura, mais calor ela necessita para o seu conforto, ou seja, para diferentes etapas de desenvolvimento são exigidas diferentes necessidades energéticas para o vegetal; daí que um ambiente protegido proporciona melhor controle das condições ambientais onde a cultura está inserida, promovendo assim uma melhor produtividade do que quando essas se desenvolvem em ambiente de campo. Por essa razão os ambientes protegidos têm sido cada vez mais utilizados na produção agrícola.

Um ambiente protegido é definido como sendo uma estrutura coberta e abrigada artificialmente, com materiais transparentes, para a proteção das plantas contra as ações dos agentes meteorológicos exteriores, (CERMEÑO, 1990).

De acordo com a sua arquitetura, os ambientes protegidos são de dois tipos: estufa e casa de vegetação, podendo ainda diferenciarem-se na forma. As Figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9 ilustram alguns dos tipos mais utilizados.



Figura 4 - Casa de vegetação modelo capela
Fonte: Agrinther (2003a)

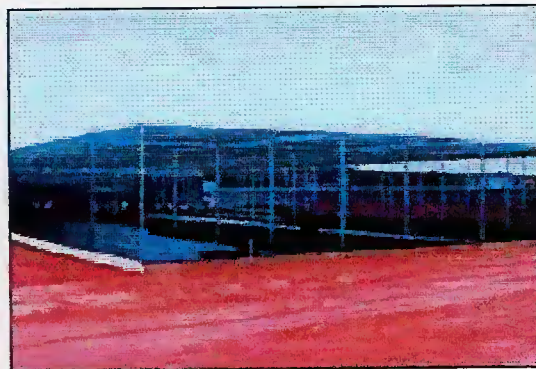


Figura 5 - Casa de vegetação modelo londrina
Fonte: Van de Hoven (2003a)



Figura 6 - Casa de vegetação modelo arco
Fonte: Van der Hoven (2003b)



Figura 7 - Casa de vegetação túnel forçado
Fonte: Tropical (2003a)

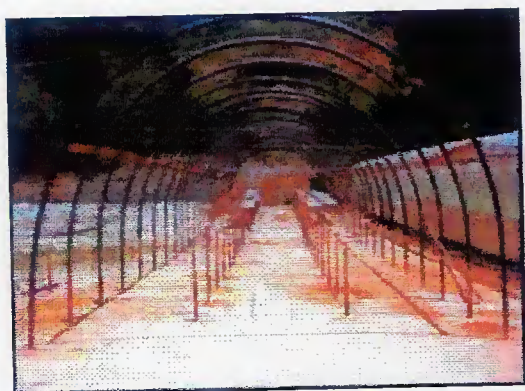


Figura 8 - Casa de vegetação modelo túnel alto

Fonte: Agrinther (2003b)



Figura 9 - Casa de vegetação teto convectivo

Fonte: Tropical (2003b)

Neville e Carrijo (1999), classificam as estruturas quanto à climatização, conforme a modificação microclimática desejada, em três tipos: climatizadas, semi-climatizadas e não-climatizadas.

a) estufas climatizadas: são aquelas onde é exercido o controle total e preciso sobre as variáveis micrometeorológicas de temperatura, umidade, luz (quantidade e qualidade), fotoperíodo e taxa de CO_2 ;

b) estufas semi-climatizadas: são caracterizadas por controlar as variáveis micrometeorológicas em faixas, não dispondo de aparelhagem adequada para o controle preciso das variáveis, como por exemplo, o controle parcial de temperatura e umidade relativa;

c) estufas não-climatizadas: são caracterizadas pela ausência total de aparelhagem acessória de controle de variáveis micrometeorológicas.

Em ambientes fechados, quando a radiação incide sobre a cobertura, dependendo da natureza da superfície, teremos uma emissividade diferente e, como decorrência, o espécime estará sujeito a cargas radioativas diferentes, para diferentes materiais de cobertura.

O fluxo de radiação solar global numa superfície horizontal inclui a radiação recebida diretamente, formada pelo ângulo sólido do disco solar, e a radiação que foi

espalhada ou refletida difusamente ao atravessar a atmosfera. Devida à absorção e reflexão do material de cobertura plástica, a densidade de fluxo da radiação solar global no interior do ambiente protegido é menor que a observada externamente (BUGALHO SEMESDO, 1978; SEEMAN, 1979; PRADOS, 1986; KURATA, 1990 e CERMEÑO, 1990).

Devido às suas características óticas, a cobertura plástica atua como dispersante da radiação solar, podendo aumentar a fração difusa da radiação solar no interior do ambiente protegido; efeito bastante desejável, uma vez que a radiação solar difusa é mais efetiva nos processos de fotossíntese, pois é multidirecional e penetra melhor através do dossel da cultura, e pode compensar, em parte, a opacidade do filme plástico à radiação solar (PRADOS, 1986 e FARIAS et al. 1993).

Segundo Montero et al. (1985), a absorção da radiação solar é dependente da composição química do material de cobertura. A reflexão depende das condições da superfície de cobertura (deposição de poeira, período de utilização, etc.) e do ângulo de incidência da radiação solar sobre a cobertura, que varia durante os diferentes períodos climáticos do dia, da declinação solar, da inclinação da cobertura, da forma e da orientação geográfica da estrutura. Quanto mais perpendicular for a superfície de cobertura à incidência da radiação solar, menor será sua reflexão (TANAKA; GENTA, 1982).

Robledo de Pedro e Vicente (1988), estudando diferentes filmes plásticos aplicados à agricultura, concluíram que os filmes plásticos comportam-se diferentemente quanto à absorção, reflexão e transmissão das radiações solares de onda curta e longa, de acordo com sua coloração, opacidade ou transparência.

A transmissividade do material de cobertura do ambiente protegido à radiação solar depende da sua composição, espessura, tempo de exposição às condições ambientais, das condições atmosféricas no momento da determinação, da condensação nas paredes internas do ambiente protegido, deposição de poeira, ângulo de incidência dos raios solares, orientação e arquitetura da estufa (ALPI; TOGNONI, 1984; ROBLEDO DE PEDRO; VICENTE, 1988 e CAMACHO et al. 1995).

Segundo Bugalho Semesdo (1978), cerca de 10% a 20% da radiação solar global incidente é absorvida e refletida pelos materiais de cobertura utilizados no ambiente protegido. A transmissividade da cobertura à radiação solar pode ser superior a 75% (ALPI; TOGNONI, 1984) apresentando uma transmissividade média que pode variar de 70 a

90% (ROBLEDO DE PEDRO; VICENTE, 1988; FARIAS et al. 1993; BURIOL et al. 1993 e BURIOL et al. 1995).

No Brasil os estudos sobre os efeitos da radiação solar em ambientes protegidos se concentram, via de regra, nos estados do Sul e em São Paulo, como é o caso dos estudos de Grodzki et al. (1991) que, comparando os valores encontrados no interior de um ambiente protegido com os valores encontrados na condição de campo, em Curitiba, PR, concluíram que a radiação solar incidente é interceptada em 40% e que essa redução não afeta o desenvolvimento das plantas.

Martins (1992) estudando o microclima proporcionado pelo ambiente protegido tipo capela, em Pelotas, RS, coberta com filme de polietileno de 100 μ m de espessura, observaram uma transparência à radiação solar de 81,5%.

Farias et al. (1993) observaram em um ambiente protegido tipo capela, cujo teto apresentava inclinação de 15°, no município de Capão do Leão, RS, que 83% da radiação solar verificada externamente, ao redor das 12 horas, penetrou no ambiente protegido, no período de 10 a 21 de novembro de 1989, tendo constatado também uma variação na transmissividade entre 65% a 90%, em dia de céu limpo, e 45% da radiação global, em média, correspondeu à radiação solar difusa, no ambiente externo esse valor foi de 24%, evidenciando o efeito difuso da cobertura.

Camacho et al. (1995) trabalhando com ambiente protegido tipo túnel alto, com cobertura de polietileno (0,1 mm), orientada no sentido norte-sul, no município de Capão do Leão, RS, no período de 01/11/1992 a 30/11/1993, observaram uma transmissividade média à radiação solar global de 78% com valores variando entre 65% a 89%, apresentando maior valor na primavera. A maior transmissividade encontrada durante um dia ocorreu por volta do meio dia, sendo verificada uma maior fração da radiação solar difusa no interior do ambiente protegido.

Para as condições de Botucatu, SP, Frisina (1998) constatou uma transmissividade de 79,59% trabalhando com um ambiente protegido tipo túnel, com cobertura de polietileno de baixa densidade (PEBD) de 100 μ m, cultivado com alface. Também em Botucatu, SP, Assis (1998), avaliando ambientes protegidos cobertos com PEBD de 100 μ m, em duas orientações N-S e L-O, obteve variação entre 55% a 77% e de 66% a

78%, respectivamente. Em dias com céu limpo a parcialmente nublados, a fração difusa da radiação solar apresentou-se maior no interior do ambiente protegido, o mesmo não acontecendo em dias de céu nublado. A radiação solar difusa no interior do ambiente protegido não sofreu alteração devido a diferentes orientações.

Ainda em Botucatu, SP, Galvani (2001) avaliando a transmissividade do polietileno de 120 μ m em cultivo de pepino, no outono-inverno e primavera-verão, obteve uma média de 70,77% a 74,92% para cada período, respectivamente e Cunha (2001) trabalhando nas mesmas condições, com cultura de pimentão, obteve uma transmissividade média para todo o ciclo da cultura de 68,81%.

Escobedo et al. (1994), calcularam a transmissividade da radiação solar, medida em ambiente protegido coberto com polietileno e encontraram valor igual a 63%, comprovado por Souza (1996) sob diversas coberturas do céu.

Mastekbayeva e Kumar (2000), avaliando a transmissividade do polietileno de 200 μ m de espessura, no interior de um ambiente protegido submetido a deposição de fumaça, com partículas variando entre 53 a 75 μ m e diferentes camadas de acumulação, concluíram que a transmissividade do polietileno em estudo não alterou em função de acréscimos nos níveis de irradiância (200 W.m⁻² a 800 W.m⁻²) e, sim em função do número de dias de exposição do material e do acúmulo de fuligem sob a cobertura.

O efeito do controle da radiação solar, fonte de energia mais importante no cultivo agrícola, em ambientes protegidos, tem sido de suma importância para o cultivo de hortaliças.

A principal finalidade do ambiente protegido é a proteção contra as adversidades climáticas, obtendo-se precocidades nas colheitas, aumento na produtividade e frutos de melhor qualidade, com a opção de explorar as culturas durante todo o ano (SALVETTI, 1983; PEDRO; VICENTE, 1988; CERMEÑO, 1990).

Corroborando com esses autores, Schneider et al. (1993), afirmam que a principal vantagem dessa técnica consiste na possibilidade de produção, principalmente de hortaliças nos períodos de entressafras, permitindo maior regularização da oferta e melhor qualidade aos produtos.

Culturas como feijão-vagem, alface, abobrinha, berinjela, pimentão, tomate e morango, tiveram a partir dos anos 80 um grande desenvolvimento com a plasticultura nacional (PLASTICULTURA, 1993).

Através da utilização desse ambiente é possível conseguir colheitas as quais excedem sensivelmente às que se obtém em condições de campo, sendo a produção obtida, de duas a três vezes maior que em condições de campo (OLIVEIRA et al. 1992; OLIVEIRA, 1995).

Segundo Sousa (2002) a utilização de ambientes protegidos tem se mostrado vantajosa, melhorando a produtividade e a qualidade dos produtos, permitindo uma produção fora de épocas convencionais e garantindo um melhor preço.

O ambiente da casa de vegetação com cobertura de polietileno acarreta alteração em diversos elementos meteorológicos, sendo seus efeitos ainda pouco conhecidos. Sabe-se, no entanto, que o balanço de radiação é um dos principais elementos alterados pelo uso da cobertura de polietileno, influenciando decididamente no crescimento e desenvolvimento das culturas, afetando por conseguinte sua produtividade.

Muitos estudos têm mostrado que, principalmente devido a uma maior difusividade da radiação, as condições radiativas do ambiente da casa de vegetação com cobertura de polietileno, favorece um maior desenvolvimento e produção da cultura neste ambiente que em seu exterior e um menor consumo de água; entre os quais destacamos o estudo realizado por Cunha et al. (2002) sobre a estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivos protegidos e de campo, para a cultura do pimentão, que concluíram ser o cultivo protegido mais eficiente na produção dos frutos, em relação ao cultivo no campo, com a vantagem de apresentar maior economia no consumo de água.

A FAO estima que a evaporação é reduzida em 30% nos cultivos protegidos, que o uso da água por unidade de produção pode ser diminuído em até 50%, e que se tem maior produtividade em ambientes protegidos (STANGHELLINI, 1993).

3.4 Irrigação

A irrigação é uma técnica que visa o fornecimento artificial de água ao solo, em quantidades necessárias, com o objetivo de proporcionar o desenvolvimento

adequado das plantas nele cultivadas, a fim de suprir a falta, a insuficiência ou a má distribuição das precipitações pluviométricas.

A necessidade da irrigação ocorre quando há limitações de água disponível no solo para um desenvolvimento do ciclo completo da planta.

Como um dos resultados do grande avanço da tecnologia agrícola, principalmente na área de fertilidade, os principais fatores limitantes na produtividade agrícola são a falta ou o excesso de água no solo durante a fase do ciclo de crescimento da cultura. A irrigação combinada com a drenagem é a solução prática para este problema sempre que exista água em disponibilidade. O sucesso da irrigação envolve mais do que instalar um equipamento e ligá-lo à fonte de água. Para a maximização da produtividade é necessário aplicar a quantidade exata de água, no momento exato.

Experiências têm demonstrado que, a irrigação, além de permitir a suplementação hídrica necessária às culturas, pode-se obter maior produção e possibilitar uma melhora considerável na qualidade do produto agrícola.

A determinação da quantidade de água necessária para a irrigação é um dos principais parâmetros para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de qualquer sistema de irrigação, bem como para a avaliação de recursos hídricos. Quando a quantidade de irrigação necessária for superestimada, têm-se como consequência sistema de irrigação superdimensionados, encarecendo o custo da irrigação por unidade de área, levando a aplicação de água em excesso e provocando muitas vezes elevação do lençol freático, salinização do solo e lixiviação dos nutrientes. Por outro lado, quando a quantidade de irrigação necessária for subestimada tem-se, como consequência, produções não muito elevadas, ou como é mais freqüente, incapacidade do sistema para irrigar toda a área do projeto, ou seja, redução da área a ser irrigada (BERNARDO, 1995).

Considera-se água necessária, a quantidade de água requerida pela cultura, em determinado período de tempo, de modo a não limitar seu crescimento e sua produção, devido às condições climáticas do local, ou seja, é a quantidade de água necessária para atender a evapotranspiração e à lixiviação dos sais do solo.

Segundo Bernardo (1995), a irrigação total necessária (ITN) pode, então, ser definida como a quantidade de água a ser suprida pela irrigação, de modo a

complementar as precipitações efetivas, no atendimento à quantidade d'água necessária à cultura.

A ITN para um determinado período pode ser estimada pela equação do balanço d'água simplificada pela Equação 8:

$$ITN = \frac{\Sigma ET - P_e - W_s - \Delta s}{E_a} \quad (8)$$

Onde:

ITN = lâmina total de irrigação necessária, no período;

ΣET = somatório da evapotranspiração, no período;

P_e = precipitação efetiva, no período;

W_s = água proveniente do lençol freático, no período;

Δs = variação do teor de umidade do solo, no período;

E_a = eficiência de aplicação da irrigação, em decimal.

Como normalmente W_s e Δs são valores muito pequenos, quando comparados com ET e P_e , esta equação pode ser escrita de forma mais simplificada, ou seja:

Para condições de irrigação suplementar conforme Equação 9

$$ITN = \frac{\Sigma ET - P_e}{E_a} \quad (9)$$

Para as condições de irrigação total conforme a Equação 10

$$ITN = \frac{\Sigma ET}{E_a} \quad (10)$$

Conhecidas com precisão as variáveis das equações 8, 9 e 10, é possível otimizar a suplementação hídrica necessária à cultura, tornando irrelevante uma das grandes críticas que se faz à prática da irrigação, que é o uso excessivo e descontrolado da

água, muitas vezes aliado a outro fator importante, a poluição causada em aquíferos e mananciais em virtude do desmatamento ciliar e em decorrência da falta de proteção das nascentes, do manejo inadequado do solo, do uso indiscriminado de agrotóxicos e de fertilizantes provocando um distanciamento do que se concebe como agricultura sustentável.

Entre os grandes desafios da agricultura irrigada brasileira destaca-se também o consumo de energia. Este fator não se baseia apenas na acentuada elevação do custo da energia imposta nos últimos anos, mas principalmente pelo crescimento das extensões de áreas irrigadas.

Segundo Knutson (1977), a maior parte da energia utilizada em irrigação está relacionada à condução da água às áreas irrigadas. Sendo que 43% deste consumo são aplicados na retirada da água dos aquíferos subterrâneos ou dos rios, 41% no seu transporte e nas instalações de infra-estrutura de superfície tais como os reservatórios. Os 16% restantes são utilizados na pressurização dos sistemas empregados na aplicação de água nas áreas irrigadas.

A escolha do sistema de irrigação mais conveniente e adequado é um fator importante para se conseguir o máximo de benefício de seu uso. Muitos fatores influenciam nesta escolha, mas estes devem estar baseados na viabilidade técnica, econômica e social de cada região.

3.4.1 Sistemas de Irrigação

De acordo com o modo de aplicação da água os sistemas de irrigação são classificados em 4 categorias: Sistemas de Irrigação de Superfície ou Infiltração, Sistemas de Irrigação por Aspersão, Sistemas de Irrigação Localizada (Gotejamento ou Micro-aspersão) e Sistemas de Sub-irrigação.

a) Sistemas de Irrigação de Superfície ou Infiltração são constituídos de pequenos diques que geralmente são utilizados para irrigar pequenas áreas de cultura, ou seja, as áreas a serem irrigadas se encontram próximas dos reservatórios de água. Neste sistema, são utilizados canais e sulcos de irrigação em que a água flui por gravidade para fornecer água às culturas que são realizadas em canteiros elevados.

A água é liberada na parte superior da margem do dique e flui através de um canal mestre ou canalização principal alimentando canais secundários. Na medida que a água avança pelos canais, esta sofre derivações alimentando os sulcos existentes no solo entre os canteiros, parte dela se infiltrando no solo. Assim que a água fornecida à rede de canais atinge as extremidades de mais baixa altitude ocorre o transbordamento, se o seu fornecimento não for interrompido. Quando a água fornecida for suficiente para a cultura, a sua entrada é interrompida manualmente ou por um sistema de controle automático. Como referência, considera-se que a irrigação está completa quando a quantidade de água fornecida é equivalente àquela que está sendo esgotada nas extremidades inferiores dos canais.

É difícil prever a taxa de fluxo de água ótima e o período de aplicação para suprir as necessidades de água à planta, porque a taxa de infiltração e a taxa de avanço da água, através da superfície do solo, variam de uma irrigação para a outra. O tempo de infiltração é geralmente mais longo na parte superior do fluxo de água do que nas extremidades inferiores dos canais. Assim sendo, se a extremidade inferior estiver completamente irrigada, mais água deve ser infiltrada na parte superior do que o solo pode reter. A água que se infiltrar além da zona radicular (percolação profunda) geralmente retorna ao lençol freático.

A água deve ser aplicada em cada canal ou grupo de canais em período suficiente para assegurar uma irrigação adequada. Taxas de fluxo de água e número de vezes de aplicação, para uma irrigação uniforme, podem ser calculados em sistemas bem planejados. A maioria dos operadores destes sistemas, utiliza experiências anteriores para dosar o número de vezes de aplicação de água e a taxa de fluxo, já que o solo e as condições da planta variam durante todo o período de cultivo. Mas o excesso de água que extravasa é mais difícil de prognosticar porque ele não pode ser observado. Dessa forma, taxas ótimas de fluxo de água e o estabelecimento do número de aplicações podem não ser conhecido ou nem sempre são utilizados. O excesso de água na superfície pode ser capturado e reconduzido para o mesmo campo através de um sistema de reutilização da sobra de água. Por outro lado, a água recuperada pode servir de fonte para a irrigação de outras áreas de mais baixa altitude ou para emprego em outras atividades.

Nesta categoria de sistemas de irrigação existem diversos tipos de construção entre os quais destacamos: Sistema de inundação por diques, sistema de sulcos em desnível, sistemas de corrugações e bacias em nível.

O sistema de inundação por diques (border systems) é apropriado para todos os tipos de culturas que não sejam prejudicadas por inundação durante curtos períodos de tempo. São usados em quase todos os tipos de solo irrigável, mas são mais apropriados para solos cujas taxas de infiltração sejam medianas, isto é, nem extremamente baixas, nem extremamente altas. As faixas irrigadas variam em largura de 9 a 30 metros e são separadas por diques baixos. A declividade do solo deve ser menor que 3%.

O sistema de sulcos em desnível (graded furrows) é constituído de sulcos que são formados entre as ruas plantadas, antes da primeira irrigação. A direção das ruas é geralmente paralela à declividade máxima do campo, mas pode ser diferente se uma declividade menor melhorar o fluxo hidráulico no sulco. Este método difere da irrigação por diques (border irrigation) porque somente parte da superfície do solo é coberta pela água durante a irrigação.

Os sistemas de corrugações (corrugations) são canais menores com menor espaço entre si, usados para irrigar culturas que apresentam pequeno espaço entre as plantas, em terrenos moderadamente íngremes. A corrugação geralmente possui menor capacidade do que os sulcos e algumas vezes é utilizada dentro dos sulcos em degraus para melhorar a distribuição da água.

Bacias em nível (level basin) são similares aos sistemas de inundação por diques (border systems), porém não apresentam declividade em nenhuma direção. Elas são represadas em todos os lados de modo a fazer com que toda a água captada se infiltre no solo. São mais apropriadas para terras que sejam quase totalmente niveladas, de modo que o custo de nivelção não seja excessivo. O fluxo de água deve ser suficientemente amplo para cobrir a área em uma proporção de tempo relativamente pequena, em relação ao tempo necessário para a infiltração da quantidade desejada. Esse sistema não deve ser utilizado para plantas com alta sensibilidade à água, a menos que sulcos sejam utilizados dentro das bacias. Este sistema geralmente não é utilizado em áreas úmidas, em que se faz necessária uma rápida drenagem da superfície do excesso de água da chuva, exceto nos locais de cultivo de arroz, que tolera água represada para o seu cultivo.

Os sistemas de irrigação de superfície são mais indicados para solos de textura fina a média, com declividade relativamente pequena e uniforme.

Todos os tipos de culturas podem ser irrigados através de um dos vários métodos de irrigação de superfície. Estes métodos podem ser considerados mais adequados nos casos em que os sais dissolvidos na água tendem a causar danos quando espalhados sobre as folhas das plantas, ou quando problemas de doenças possam ocorrer em virtude do molhamento das plantas através de aspersores.

Embora os sistemas de irrigação de superfície venham sendo utilizados durante séculos, novas técnicas e aperfeiçoamento do seu manejo estão sendo continuamente desenvolvidos. A adoção de equipamentos de nivelção controlados por laser, nos anos 70, simplificou e enormemente e melhorou a formatação e o alisamento do solo. Em 1979, uma técnica rotulada como "irrigação intermitente" (surge irrigation) patenteada pela Fundação da Universidade Estadual de Utah, foi desenvolvida para aumentar a taxa de avanço de água nos sulcos. Esse tipo de irrigação implica na liberação intermitente de água nos sulcos. Essa prática, em alguns solos, resulta em uma infiltração mais uniforme em tempo adequado ao longo do comprimento dos sulcos e pode reduzir a profundidade da percolação. Equipamentos comerciais de controle de água estão disponíveis para executar com êxito o fluxo intermitente.

Outro aperfeiçoamento recente destinado tanto para automatizar os sistemas de irrigação de superfície, como para melhorar seu desempenho, é o sistema por cabos (cablegation) que apresenta uma tomada de água (plug) que se movimenta vagarosamente dentro de um conduto de água de superfície situado na extremidade superior de um campo sulcado. O sistema é automatizado pelo uso de um mecanismo de controle da velocidade do plug móvel. A água é liberada em seqüência, em taxas variadas para os sulcos, a partir de orifícios nos condutos.

b) Os Sistemas de Irrigação por Aspersão: são aqueles em que a irrigação assemelha-se a uma chuva e molha toda a planta; são classificados de acordo com a maneira como são operadas as suas linhas principais e laterais. Existem sistemas em que algumas linhas laterais permanecem fixas durante todo o ano, sistemas em que algumas são movimentadas depois de cada período de irrigação e sistemas que se movimentam continuamente durante toda a operação de irrigação.

Os três tipos principais de sistemas de irrigação por aspersão são: Sistemas fixos, sistemas semi-fixos e sistemas móveis.

Nestes sistemas, a pressão necessária para distribuir a água e operar os aspersores geralmente é fornecida por bombas hidráulicas. Em alguns locais a pressão pode ser proporcionada por gravidade se a elevação da fonte de água for suficientemente alta em relação à área a ser irrigada.

Sistemas fixos e semi-fixos bem projetados podem aplicar água com aceitável uniformidade quando a velocidade do vento é baixa e a taxa de aplicação não excede a taxa de infiltração do solo, evitando-se assim o excesso de água não absorvida pelo mesmo. Sistemas móveis geralmente aplicam água mais uniformemente do que os sistemas semi-fixos e fixos. A velocidade de deslocamento dos sistemas móveis (que controla a quantidade de água aplicada em cada área de irrigação) pode ser regulada.

Os sistemas de aspersores fixos não precisam ser movimentados após a sua instalação. As linhas laterais e o número deles devem ser suficientes para cobrir todo o campo a ser irrigado. Para realizar a irrigação, somente é necessário que os aspersores sejam abertos ou fechados através da aplicação de água sob pressão na entrada do sistema. As linhas laterais podem ser enterradas na superfície do campo. A maioria dos sistemas de aspersores fixos possui pequenos aspersores espaçados de 9 a 24 metros uns dos outros, porém alguns sistemas usam grandes "canhões" ou aspersores do tipo hidráulico espaçados de cerca de 30 a 50 metros.

Um sistema de aspersores fixos é denominado deslocável (móvel) se as linhas laterais puderem ser movidas para dentro e para fora do campo durante o período, a fim de possibilitar as operações de cultivo, plantio e colheita.

Os sistemas semi-fixos são similares aos sistemas fixos, porém, o número de linhas laterais e aspersores disponíveis é suficiente para irrigar uma parte do terreno de cada vez. As linhas laterais e os aspersores a elas ligados devem ser movimentados de uma parte do terreno para outra a fim de irrigar o campo inteiro.

Quanto ao método de deslocamento empregado estes sistemas são classificados em: Sistemas de linhas laterais manualmente deslocáveis; sistemas de linhas laterais rebocáveis e sistemas de linhas laterais de rolagem lateral.

Sistemas de linhas laterais manualmente deslocáveis são sistemas em que as linhas laterais geralmente consistem em extensões de tubos de alumínio, aço galvanizado ou PVC, que podem ser acopladas e separadas com facilidade de modo manual e podem ser alimentadas com água oriunda de canalizações, também deslocáveis, ou através de linhas mestras de água que são enterradas no solo. Os sistemas de deslocamento manual exigem maior dispêndio de mão-de-obra.

Sistemas de linhas laterais rebocáveis (End-tow Lateral Systems) são sistemas conceitualmente similares aos de linhas laterais manualmente deslocáveis, exceto pelo fato de terem secções de tubulação rigidamente acopladas. As linhas laterais são geralmente rebocadas de um lugar para outro com o auxílio de um trator.

Sistemas de linhas laterais de rolagem lateral (Side-roll Laterals) são um terceiro tipo de sistema semi-fixo periodicamente deslocável em que as tubulações laterais são rigidamente acopladas e cada secção abaixo delas é sustentada por uma grande roda. O conduto transversal (linha lateral) forma o eixo das rodas e quando giradas a tubulação inteira pode ser deslocada para uma área mais próxima. A unidade pode ser movimentada mecanicamente através de um motor montado no centro da tubulação ou por uma fonte exterior instalada na extremidade de cada linha de tubos.

Os sistemas de aspersores móveis irrigam o solo enquanto estão em movimento. Quanto ao tipo de movimento estes sistemas podem ser classificados em: Sistemas de pivô central, Sistemas de aspersor móvel e Sistemas transversais móveis auto-propelidos.

O sistema de pivô central é o tipo de sistema móvel mais comum. A linha transversal (linha lateral) de tubos é fixada em uma extremidade e gira a fim de irrigar uma grande área circular. A extremidade fixa, o ponto do pivô, é ligada ao suprimento de água (adutora). A linha transversal consiste em uma série de torres variando em comprimento entre 27 a 75 metros. Cada torre (ou vão) é mantida a cerca de 3 metros acima do solo por uma unidade motriz, em uma armação em forma do tipo "A" montada sobre rodas propelidas por motores elétricos ou hidráulicos.

Dispositivos mecânicos em cada torre mantêm a linha lateral no alinhamento. A velocidade rotacional do sistema é regulada pela velocidade da unidade motriz da extremidade, a qual pode ser controlada pelo operador. Linhas laterais de pivôs centrais

mais comuns são as de 455 metros de comprimento e irrigam uma área circular de cerca de 65 hectares.

O sistema de aspersor móvel (Travelling Sprinkler ou Traveller) consiste em um aspersor de grande capacidade, montado sobre um chassi autopropelido que se desloca em linha reta enquanto é suprido de água através de uma mangueira flexível, geralmente operam a altas pressões e utilizam muita energia. Alguns aspersores móveis se deslocam paralelamente a canais abertos dos quais a água é retirada e pressurizada por uma bomba montada no chassi.

Sistemas transversais móveis auto-propelidos ou de deslocamento lateral (Self-Propelled Lateral Move Systems) combinam a estrutura e a orientação transversal de pivô central com um sistema de alimentação de água similar àquele do aspersor móvel. Eles operam a pressões mais baixas do que as dos aspersores móveis. Os sistemas de deslocamento lateral se movem continuamente em uma direção perpendicular à lateral. Para a efetiva operação necessitam de um campo retangular livre de obstáculos.

Uma modificação dos sistemas de deslocamento lateral e de pivô foi desenvolvida por Lyle et al. (1981), citado por Fontes (2003). Seu sistema, de baixa energia e precisão na aplicação (LEPA), usa emissores de água de baixa pressão que descarregam pouco acima da superfície do solo. Quando usado em conjunto com práticas de cultivo modificadas, inclusive diques pouco espaçados em sulcos, os sistemas LEPA usam tanto água da irrigação como a água da chuva com efetividade.

Os sistemas de irrigação por aspersão são adequados para a maioria das plantações e são adaptáveis à maioria dos solos irrigáveis. Esta flexibilidade é possível porque os bocais dos aspersores estão disponíveis em uma ampla variedade de capacidades de descarga. Um sistema bem projetado aplica a água a uma taxa menor que a da infiltração no solo. O projeto envolve a seleção do tamanho apropriado do bocal, da pressão de operação e espaçamento dos aspersores, a fim de aplicar a água com uniformidade à taxa projetada. Os efeitos do vento podem diminuir grandemente a uniformidade da irrigação e devem ser considerados no projeto.

Os sistemas de deslocamentos periódicos são usados onde a irrigação não é necessária mais do que a cada 5 a 7 dias. Os sistemas fixos ou de deslocamento contínuo são mais adequados para as condições em que as irrigações frequentes e pouco intensas são

necessárias, tais como para plantas de raízes rasas ou para solos com baixa capacidade de retenção de água. Os sistemas fixos também podem ser projetados e operados para prover proteção contra geada e baixa temperatura, retardamento na florada e resfriamento da planta. A flexibilidade no controle das taxas de aplicação fazem dos sistemas por aspersores adequados para a maior parte das condições topográficas.

Considerando que os aspersores descarregam a água no espaço acima do dossel das plantas, ocorre alguma evaporação e sob condições de vento, uma parte pequena da água se desvia da área alvo da aplicação. A quantidade de água evaporada e de água desviada é difícil de ser avaliada com exatidão. A maior parte das quantificações efetuadas acusa evaporação e desvio situados entre 5 a 20% da água descarregada.

Ocorre igualmente a evaporação do dossel da planta e da superfície do solo molhado pela aspersão. Usualmente, a evaporação das superfícies molhadas causa um decréscimo correspondente na transpiração que ocorreria sem ela. Irrigações freqüentes e pouco intensas tendem a resultar em mais evaporação do que em irrigações menos freqüentes, porém mais intensas.

O sistema por aspersão necessita de água mais limpa do que a maioria dos sistemas de superfície. Sedimentos e fragmentos devem ser retirados da água, pois, podem danificar o sistema de aspersão e podem obstruir os bocais dos aspersores.

A evaporação da folhagem molhada pode causar danos à planta se a água da irrigação contiver alta concentração de sais dissolvidos. Muitos vegetais são sensíveis à relativamente baixa concentração de sódio e cloreto e algumas frutas podem ser danificadas pelo depósito de sal sobre o fruto. Nos locais em que estes problemas potenciais existem, somente aspersores colocados na parte inferior das árvores são convenientes. O aumento da umidade e o decréscimo da temperatura do ar dentro do dossel, causado pelos sistemas de aspersão, podem aumentar a incidência de doenças em algumas culturas.

c) Sistemas de Irrigação Localizada: (gotejamento ou micro aspersão) são aqueles que aplicam água com frequência e a baixas taxas sobre ou sob a superfície do solo em locais próximos à planta sem atingi-la diretamente. A água é aplicada na forma de gotas ou por mini aspersores através de emissores colocados a pequenos espaçamentos e ligados aos condutos de fornecimento de água, ou ainda através de nebulizadores. Este termo é aplicado a vários

sistemas de baixa pressão, tais como: Sistemas de gotejamento, sistemas de sub-superfície e sistemas de micro aspersão ou nebulização.

O sistema de irrigação por gotejamento (drip) é o sistema de micro irrigação mais comum. Ele é mais adequado para plantações mais espaçadas (árvores ou parreiras) ou culturas de alto valor. Os emissores desse sistema têm as funções de dissiparem a pressão de água no sistema de distribuição por meio de orifícios, vórtex ou linhas de fluxo longo e descarregarem um fluxo de água limitado e quase constante, mesmo que estes estejam situados em posição de alta (ou baixa) pressão. Nesta categoria, se enquadram os emissores auto-compensáveis.

O volume de solo irrigado por cada emissor é influenciado pelo movimento horizontal e vertical da água através do solo. O projeto do sistema deve levar em consideração o volume do solo que pode ser molhado, a taxa de aplicação e o volume necessário para repor a água utilizada pela planta, o padrão radicular da planta, a infiltração e a capacidade de retenção do solo.

Os sistemas de sub-superfície são aqueles em que a tubulação e os emissores são colocados abaixo da superfície do solo. A irrigação de sub-superfície difere da sub-irrigação. Nesta modalidade a zona radicular da planta é irrigada através do controle do nível do lençol freático.

Freqüentemente, os sistemas de irrigação por gotejamento exigem projeto, administração e manutenção mais acurados do que os outros métodos de irrigação.

Os sistemas de micro aspersão ou nebulização empregam micro aspersores para aplicar a água como se fossem pequenos borrifos ou névoa. São usados, principalmente, para pomares e plantações de citros. O sistema de liberação de água é semelhante àquele usado nos sistemas de gotejamento, ou seja, não se molha toda a superfície do solo.

Os sistemas de micro aspersão são adaptáveis para a maioria das culturas. Mas, devido ao seu custo inicial relativamente alto, eles são usados principalmente onde a água é escassa ou cara; os solos são arenosos, rochosos ou difíceis de serem nivelados e as culturas são de alto custo e necessitam de um alto grau de controle da água no solo onde são produzidas.

Todos os sistemas apresentam algumas desvantagens, mas os métodos de irrigação localizada (micro irrigação) apresentam algumas desvantagens peculiares e potenciais, ou seja: o entupimento do emissor é o mais sério e isto afeta a taxa e a uniformidade da aplicação da água, aumenta os custos de manutenção e resulta em redução do rendimento da colheita se não for detectado e corrigido. Algumas medidas preventivas incluem filtragem da água e seu tratamento químico, limpeza periódica das canalizações e inspeção de campo.

Outros problemas potenciais dizem respeito ao acúmulo de sal perto das plantas, limitação na distribuição de água do solo e no desenvolvimento das raízes das plantas e altos custos.

d) Sistemas de Sub-Irrigação: são técnicas de irrigação que consistem em drenar a água em sub-superfície, realizando a complementação hídrica diretamente na zona radicular do vegetal.

Em regiões úmidas, a possibilidade de realizar drenagem é essencial a fim de permitir o cultivo produtivo nos solos. A drenagem é necessária para possibilitar as condições de movimentação para o preparo e plantio de canteiros na primavera e para garantir ambiente adequado para o crescimento da planta durante o período de cultivo. Drenagem excessiva pode retirar a água de que a planta necessitará mais tarde na época oportuna e pode aumentar a perda de nutrientes do solo por lixiviação. Nos locais em que a superfície e a sub-superfície permitem, os sistemas podem ser projetados e manejados para desempenhar ambas as funções de drenagem e de irrigação.

Os componentes do sistema de manejo do nível do lençol freático incluem uma combinação de poços de observação abertos e drenos de manilha na sub-superfície. Estes sistemas de manejo do nível do lençol de água regulam o escoamento da drenagem para evitar drenagem excessiva (over-drainage). Água também pode ser acrescentada para aumentar o nível do lençol freático a fim de fornecer água para a zona radicular. Durante os períodos de chuvas pesadas o nível da saída da drenagem pode ser ajustado para rápida drenagem a fim de diminuir o risco de dano às plantas. Sistemas que combinam sub irrigação e drenagem podem ser economicamente exequíveis para certos solos, nos quais sistemas individuais de irrigação podem não ser econômicos.

Os sistemas de manejo do nível de lençol freático são mais adequados para campos que apresentam declividades menores do que 2%. Uma barreira natural, impermeável, deve existir abaixo da superfície e a profundidade de menos de 3 metros. Estas condições geralmente ocorrem em áreas úmidas e sub-úmidas, em que períodos de água excessiva e de déficit de água do solo podem ocorrer dentro de um mesmo período de cultivo.

A quantidade de água necessária para um projeto bem elaborado com o de manejo do lençol de água é aproximadamente a mesma que é exigida pelos sistemas de irrigação por aspersão, embora o primeiro geralmente requeira menor consumo de energia, uma vez que a água não é aplicada sob pressão.

Idealmente, um sistema de irrigação é projetado para aplicar uma determinada quantidade de água de modo que em cada parte da área irrigada a água atinja a mesma profundidade.

Infelizmente, nenhum sistema de irrigação é capaz de aplicar a água com perfeita uniformidade. O maior esforço despendido no projeto de um sistema de irrigação é otimizar a uniformidade da aplicação da água. Nos projetos de irrigação de superfície para solos uniformes, os limites das taxas de fluxo de água e o comprimento dos sulcos são determinados a fim de evitar que a não uniformidade não seja excessiva. Os limites hidráulicos (pressão e perda de carga) na rede de tubulação para os aspersores ou para a irrigação localizada são determinados da mesma forma.

Existem pequenas diferenças no consumo de água em relação à maior parte das culturas quando irrigadas através de qualquer sistema de irrigação bem projetado e manejado. Mas pode haver grande diferença tanto na quantidade de percolação profunda quanto no excesso de água que ocorre na superfície.

3.4.2 Vantagens e Desvantagens das Técnicas de Irrigação

Cada sistema de irrigação apresenta vantagens e desvantagens. Entretanto, qualquer um dos principais métodos de irrigação pode ser adaptado para uso em qualquer plantio irrigado. As restrições principais para os métodos de irrigação de superfície são declividade, uniformidade do solo e limitações topográficas. Em terrenos nivelados, qualquer sistema pode ser usado. Conforme o aumento da declividade do solo e este se tornar

menos uniforme, somente aspersão e irrigação localizada se tornam práticos. A distribuição da água é mais bem controlada em redes de distribuição (adutoras e linhas laterais) do que em canais ou pela superfície do solo (irrigação por sulcos ou por inundação). A uniformidade potencial de aplicação da água e a quantidade e qualidade do suprimento de água disponível também influenciam a escolha do método de irrigação.

O Quadro 1, baseado no artigo de Leme (2002) e nas considerações sobre as diversas técnicas de irrigação já discutidas, sintetiza as vantagens e desvantagens das principais técnicas de irrigação.

Sendo conhecidas as vantagens e as desvantagens dos diversos métodos de suplementação hídrica para um sistema agrícola, deve-se avaliar os fatores locais para se definir qual a técnica mais adequada na irrigação de uma determinada cultura. Os fatores devem ser avaliados separadamente, para em seguida efetuar-se uma análise conjunta. Esses fatores são os relacionados à cultura (sistema radicular, os coeficientes da cultura em relação à evapotranspiração de referência, etc.), ao solo (características hídricas, como infiltração, curva característica de água, massa específica, etc.), ao local ou campo a ser usado (topografia do terreno, meios de comunicação, energia elétrica), ao clima (chuvas, evapotranspiração, ventos, temperatura e umidade relativa do ar, etc.) (KLAR, 2000).

A consideração final envolvida na seleção de um sistema de irrigação diz respeito ao capital e custos operacionais, cultura a ser irrigada e rentabilidade e qualidade esperadas da colheita. A variação do capital instalado para os vários tipos de sistemas de irrigação é analisada por vários autores. Os aumentos das receitas devem ser suficientes para pagar o investimento nos sistemas e os custos operacionais anuais. Os custos com a mão-de-obra e a energia são os dois componentes mais pesados na composição dos custos operacionais (FONTES, 2003).

Quadro 1- Vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de técnicas de irrigação

Tipos de Irrigação	Vantagens	Desvantagens
Convencional tipo aspersão	Menos custos de implantação; Pode ser implantado em pomar adulto; Permite a aplicação de insumos (defensivos e adubos) pela água. Eficiência em torno de 70% a 80%.	Maior gasto com mão de obra; Há uma maior interferência das tubulações com as operações agrícolas pertinentes (por ex: dificultam o trânsito dos implementos agrícolas na área irrigada; Irriga toda a superfície do terreno, permitindo o desenvolvimento de ervas indesejáveis entre as linhas de plantio.
Autopropelido tipo aspersão	É muito prática; Apresenta maior economia de mão-de-obra; Permite a aplicação de defensivos e adubos; Eficiência em torno de 70% a 80%.	Em culturas plantadas em curva de nível e em declive ocorre tombamento; Exige a utilização de um trator para ser deslocado dentro do pomar; A mangueira flexível (geralmente de 200 m de comprimento) que faz parte do equipamento, se desgasta com facilidade e seu preço é bastante alto.
Gotejamento tipo localizado	Proporciona condições de maior produtividade em relação aos sistemas de aspersão porque facilita a absorção da água do solo; Gera economia de mão-de-obra por ser um sistema permanente; Evita o crescimento de ervas indesejáveis nas entrelinhas; Permite a aplicação de adubos; Não promove a lavagem de defensivos aplicados na parte aérea; Eficiência em torno de 90% com menor dispêndio hídrico.	Maior custo de implantação; Exige um sistema de filtragem de água eficiente para reduzir os riscos de entupimento das tubulações e emissores; Risco de acidentes ou sabotagem das tubulações, pois estas permanecem constantemente no pomar; Apresenta uma menor eficiência de bulbo molhado em solos arenosos.
Microaspersão tipo localizado	Asperge uma superfície maior do terreno, permitindo uma irrigação melhor em terrenos arenosos; Facilita a absorção de água do solo; Maior economia de mão-de-obra; Evita o crescimento de ervas indesejáveis nas entrelinhas; Não promove a lavagem de defensivos aplicados na parte aérea; Eficiência em torno de 90% com maior economia de água.	É menos eficiente que o sistema por gotejamento pois molha uma área menor, gastando, portanto, mais água; Alguns tipos de sistemas por micro-aspersão atingem o caule das plantas, aumentando o risco de doenças no tronco; Alto custo de implantação.

3.5 Evapotranspiração

De acordo com Huschke (1970), a perda de água de uma superfície vegetada, para a atmosfera, através da transpiração das plantas e da evaporação do solo é conhecida como evapotranspiração. É o processo conjugado da transpiração vegetal e da evaporação que a vegetação apresenta. A transpiração vegetal ocorre através dos estômatos e da cutícula das plantas, utilizando a água que o seu sistema radicular absorveu ao longo do perfil do solo explorado; a evaporação corresponde à perda de água depositada na superfície vegetal e da água contida no solo.

De outra forma podemos definir a evapotranspiração como o consumo de água pela planta que é transpirada principalmente através das folhas, que, juntamente com a precipitação efetiva, são os dois parâmetros para estimar a quantidade de irrigação necessária. Na maioria das áreas irrigadas a magnitude da precipitação efetiva é pouco significativa, como é o caso de ambientes protegidos.

Segundo Tubelis e Nascimento (1995), a evaporação é um processo físico enquanto que a transpiração é um processo biológico. Neste último caso entram em jogo processos fisiológicos que controlam a perda de água pelos vegetais, e que atuam concomitantemente com as condições atmosféricas.

A evaporação é o processo pelo qual a água de uma superfície líquida, úmida ou molhada, passa para a atmosfera na forma de vapor, a uma temperatura inferior a de ebulição.

A evaporação é uma perda indesejável, do ponto de vista agrônomo, pois é uma quantidade de água que sai do solo sem participar das atividades biológicas da cultura e seu controle deve ser feito na superfície do solo onde ela ocorre. Ela deve ser mantida em níveis mínimos sempre que possível. As perdas por evaporação são importantes nos períodos em que o solo se encontra sem vegetação, quando a vegetação é pequena (início de culturas anuais) ou quando existe área grande de solo nu entre as plantas (como é o caso das culturas perenes, como citrus, pêssego, café). Quando a cultura se desenvolve bem e cobre o solo com sua vegetação, a evaporação perde importância.

De acordo com Huschke (1970), a perda de água de uma superfície vegetada, para a atmosfera, através da transpiração das plantas e da evaporação do solo é

conhecida como evapotranspiração. É o processo conjugado da transpiração vegetal e da evaporação que a vegetação apresenta. A transpiração vegetal ocorre através dos estômatos e da cutícula das plantas, utilizando a água que o seu sistema radicular absorveu ao longo do perfil do solo explorado; a evaporação corresponde à perda de água depositada na superfície vegetal e da água contida no solo.

Segundo Rosenberg et al. (1983), o crescimento e a produtividade das plantas são diretamente relacionados com a água, porém, da quantidade de água que passa através das plantas, apenas 1% fica envolvida nos processos metabólicos. A maior parte dessa água utilizada pelas plantas é vaporizada para o ar atmosférico.

O consumo de água é a quantidade de água transpirada pelas plantas, mais a evaporada do solo e a água retida nos tecidos vegetais. A água retida pela atividade metabólica dos vegetais é praticamente desprezível do total da água consumida pela planta, sendo que na prática podemos considerar consumo de água e evapotranspiração como sinônimos (BERLATO; MOLION, 1981).

Os autores Thornthwaite (1948) e Doorembos e Pruitt (1977) definem Evapotranspiração Potencial (ETP) como a máxima perda de água na forma de vapor para a atmosfera que ocorre com uma vegetação em crescimento, que cobre totalmente uma superfície horizontal de solo e é completamente exposta às condições atmosféricas, sem ocorrer restrição de água no solo.

A definição da evapotranspiração potencial implica em que a planta não ofereça nenhuma restrição às perdas de água por transpiração, portanto, é função exclusiva das condições atmosféricas no ambiente cultivado. Em vista disso, ela é tomada como elemento meteorológico de referência para estudos comparativos de perda de água pela vegetação em diferentes locais (BERLATO; MOLION, 1981).

3.5.1 Métodos de Determinação da Evaporação e Evapotranspiração

Entre os elementos meteorológicos que sofrem modificações importantes em ambiente protegido, está a evaporação, que conseqüentemente, altera também a evapotranspiração chegando a ser reduzida em 30% no ambiente protegido com cobertura plástica, em relação às condições de campo (MARTINS, 1992 e STANGHELLINI, 1993).

Berlato e Molion (1981), afirmam que medidas de evaporação e evapotranspiração normalmente não existem, como deveriam existir, para cada região e condição climática. Em vista disso, as estimativas baseadas em princípios físicos e fisiológicos, ou mesmo as equações empíricas que utilizam parâmetros climáticos comuns, constituem-se, muitas vezes, na única alternativa disponível.

Diversos estudos têm sido realizados para estimar a evapotranspiração através de métodos ou equações. Em geral os métodos são baseados em medição direta da evapotranspiração e em métodos micrometeorológicos (por utilizarem medidas físicas através de equipamentos).

3.5.1.1 Métodos de Medição Direta

A evapotranspiração é medida diretamente por evapotranspirômetros e lisímetros. Os primeiros são tanques enterrados e cheios de solo (e planta) com dispositivo para medir a água drenada ou percolada. Os segundos são igualmente tanques cheios de solo (e planta) mas montados em um sistema de balança ou sobre um sistema hidráulico. Os lisímetros são, evidentemente, instrumentos mais precisos e permitem medidas para períodos de tempo menores (BERLATO; MOLION, 1981).

A medição da evaporação é realizada através de duas classes de instrumentos denominados atmômetros e evaporímetros. O termo atmômetro é utilizado para designar qualquer instrumento que apresente uma superfície porosa ao nível da qual se processa a evaporação. Os evaporímetros são reservatórios ou tanques, de seção circular ou quadrada, onde a superfície da água se encontra, na maioria dos casos, livremente exposta ao processo de evaporação.

Os principais tipos de atmômetros utilizados são o atmômetro de Livingstone e o atmômetro de Bellani.

O atmômetro de Livingstone é constituído de uma esfera oca de porcelana porosa de 5 cm de diâmetro com paredes de 3 mm de espessura. Essa esfera se comunica com um reservatório de água por meio de um tubo de metal ou vidro. A pressão atmosférica, atuando sobre a superfície livre de água, faz com que o tubo e a esfera sejam

mantidos sempre cheios. As medidas da variação do volume de água do reservatório fornecem a água evaporada em qualquer tempo.

O atmômetro de Bellani é constituído de um disco de cerâmica porosa com 8,5 cm de diâmetro, unido a extremidade de um longo funil também de cerâmica mas revestido de vidro. A água é conduzida ao funil por uma bureta que funciona como reservatório e instrumento de medida da evaporação.

Os evaporímetros utilizados pelos serviços meteorológicos mundiais são de diversos tipos. As diferenças fundamentais são referentes ao tamanho (superfície evaporante), à forma (superfície circular ou quadrada) e ao modo de instalação (sobre a superfície do solo ou enterrados). Dentre os evaporímetros destacamos os mais difundidos: o evaporímetro de Piche e o tanque classe A.

O evaporímetro de Piche é um tubo de vidro, normalmente de 22,5 cm de comprimento, com uma extremidade fechada, com diâmetro interno de 11 mm e o externo de 14 mm. O tubo é graduado em cm^3 ou mm^3 e a altura da água evaporada é lida diretamente. Na extremidade aberta do tubo é ajustado um disco de papel poroso com 3,2 cm de diâmetro, dando uma superfície evaporante total de 13 cm^2 . As dimensões do tubo, a escala e diâmetro do disco de papel poroso variam dependendo do fabricante. Esse instrumento é instalado dentro do abrigo meteorológico padrão das estações meteorológicas, onde são realizadas leituras diárias de evaporação.

O evaporímetro mais utilizado e difundido nos experimentos realizados no Brasil é o tanque classe A. Ele é um recipiente circular de 121,0 cm de diâmetro e 25,4 cm de profundidade, construído, normalmente, de chapa de ferro galvanizado. É montado sobre um estrado de madeira de modo que o fundo do tanque fique em torno de 5 cm a 10 cm acima do solo. O tanque é cheio de água até uma distância de 5,0 cm da borda superior. Esse é um nível de referência em torno do qual deve ser mantida a água do tanque. Para efeito de padronização, é estabelecido que se deve colocar água no tanque sempre que atingir 2,5 cm.

O sistema de leitura comumente adotado nesse tipo de evaporímetro é o micrômetro (parafuso micrométrico), instalado em um “poço tranquilizador” constituído de um cilindro, em geral metálico, que evita a formação de ondulações na água do tanque pela ação do vento e, portanto, permite a determinação mais precisa do nível da água. A leitura do

nível da água é realizada uma vez por dia e a evaporação para o período de 24 horas é dada pela diferença de duas leituras consecutivas mais a precipitação no período, se houver.

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

Para a estimativa da evapotranspiração pelo método do tanque classe A, há a necessidade de determinar o coeficiente desse tanque (k_p), o qual apresenta variação em função da área tampão (bordadura) do tanque, velocidade do vento a 2 metros de altura e umidade relativa do ar próxima a essa superfície livre de água.

Atualmente, com a utilização do sistema automatizado na coleta de dados meteorológicos (dataloggers), torna-se importante o cálculo do coeficiente do tanque classe A através de equações desenvolvidas para esse fim, sem a necessidade de se utilizar da tabela sugerida por Doorenbos e Pruitt (1997), até então a mais utilizada para instrumentos convencionais. Para isso, hoje já existem algumas equações de estimativa para o cálculo desse coeficiente, levando em conta os fatores que alteram essa medida, o vento, a umidade relativa e a bordadura.

Uma das principais limitações dos atmômetros em geral é a manutenção da superfície evaporante porosa sempre limpa. As esferas de porcelana dos atmômetros, tipos Livingstone e Bellani, devem ser mantidas limpas e o disco de papel dos evaporímetros de Piche trocados freqüentemente pois do contrário a evaporação é severamente afetada. Como esses instrumentos são instalados à sombra (abrigo meteorológico) eles respondem apenas ao déficit de saturação do ar, não sendo afetados diretamente pela radiação solar que é o fator meteorológico dominante do processo da evaporação. Daí, a dúvida sobre a validade dessas observações como índice de evaporação.

Como vantagens os atmômetros são instrumentos de baixo custo e o uso de pequena quantidade de água facilita o serviço de operação e manutenção, permitindo a montagem de redes densas de observação da evaporação.

3.5.1.2 Métodos Micrometeorológicos

Os métodos micrometeorológicos são baseados no princípio da conservação da energia ou no balanço da energia, que tem a finalidade de estimar a transferência de água para a atmosfera em forma de vapor.

Dentre os métodos micrometeorológicos mais utilizados destacam-se o Método Combinado ou como é mais conhecido Método de Penman e o método da razão de Bowen. Há algum tempo a utilização do saldo da radiação no cálculo da evapotranspiração já é de uso corrente em diversos experimentos agrícolas, podendo serem citados os seguintes trabalhos que serviram de base para esses estudos: nos métodos combinados (PENMAN, 1948; MONTEITH, 1965; FUCHS; TANNER, 1970; PRIESTLEY; TYLOR, 1972) e da razão de Bowen (TANNER, 1960; FRITSCHEN 1965; VAN BAVEL, 1966).

O método de Penman, combina o balanço de energia com a aproximação aerodinâmica, foi desenvolvido por Penman e publicado pela primeira vez em 1948 (PENMAN, 1956). Esse método, desde aquela época, tem sido modificado pelo próprio autor e por diversos outros pesquisadores. Devidas às diversas modificações ocorridas nesse método, hoje ele é conhecido como o método de Penman-Monteith (Padrão FAO-1998).

Para a estimativa da evaporação pela fórmula de Penman há necessidade de dados de radiação, temperatura, umidade e vento. Temperatura e umidade são dados observados comumente nas estações meteorológicas. Velocidade do vento a 2m de altura é um parâmetro que não é medido na maioria das estações meteorológicas comuns, sendo esta uma das dificuldades na aplicação da fórmula de Penman (BERLATO; MOLION, 1981). Uma das principais vantagens do método foi a eliminação da necessidade de medidas de superfície, não disponíveis em estações meteorológicas comuns e, também, difíceis de serem obtidas com a exatidão requerida.

O método da razão de Bowen está baseado no balanço da energia, é o método micrometeorológico, que junto com o método de Penman-Monteith é bastante utilizado para estimar a evapotranspiração de uma cultura. A Figura 10 apresenta de modo esquemático o processo de interação entre um sistema de cultivo vegetal e as radiações envolvidas.

Por meio da razão de Bowen (1926) o balanço de energia pode ser definido de acordo com a equação 11:

$$Rn = H + LE + G \quad (11)$$

onde:

Rn é o saldo de radiação sobre a superfície (W/m^2);

H é o fluxo de calor sensível (W/m^2);

LE o fluxo de calor latente (W/m^2);

G o fluxo de calor no solo (W/m^2).

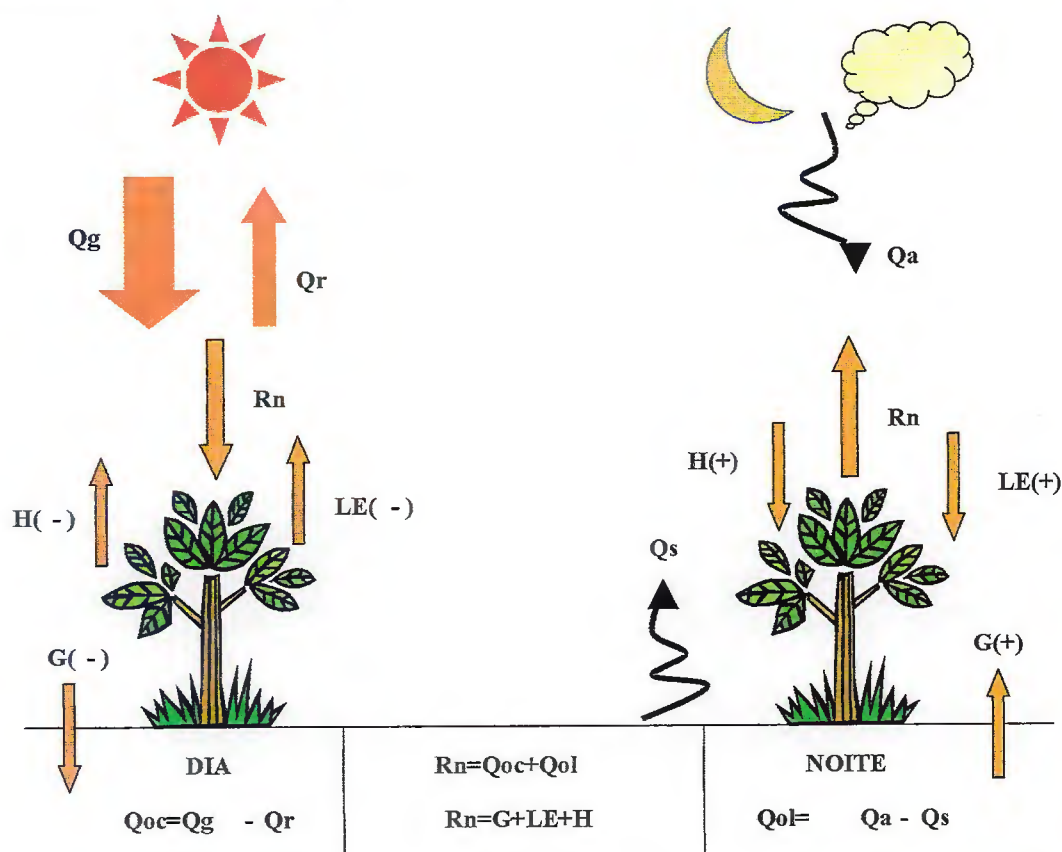


Figura 10- Esquema de interação entre sistema de cultivo e as radiações envolvidas

No cálculo do balanço de energia, os fluxos que chegam ao sistema (vegetal cultivado) são considerados positivos e os que saem, negativos, sendo o dossel da cultura e a superfície do solo, os limites superior e inferior do sistema, respectivamente.

Através da razão de Bowen (Equação 12) estima-se os valores de LE (Equação 13) e H (Equação 14), utilizando medidas de gradientes psicrométricos em dois níveis na cultura:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{1}{\left(\frac{s + \gamma}{\gamma}\right) \left(\frac{\Delta T_u}{\Delta T}\right) - 1} \quad (12)$$

$$LE = \frac{(R_n - G)}{(1 + \beta)} \quad (13)$$

$$H = R_n - (LE + G) \quad (14)$$

Em que β é a razão de Bowen; s a tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água em função da temperatura do ar (kPa/°C), conforme Equação (15):

$$s = \frac{4098}{(T_s + 237,3)^2} e_s(T_s) \quad (15)$$

onde:

T_s é a temperatura média do bulbo seco entre dois níveis (°C);

e_s é a pressão de saturação de vapor d'água à temperatura de bulbo seco (kPa);

γ é o coeficiente psicrométrico (0,0725 kPa/°C);

ΔT_u é a diferença das temperaturas dos termopares úmidos entre os dois níveis (°C);

ΔT a diferença das temperaturas dos termopares secos entre os dois níveis medidos.

O balanço da radiação de uma superfície é a contabilização entre o recebimento e a devolução de radiação por essa superfície. De acordo com Cunha e Bergamaschi (1994), o balanço da radiação, método da razão de Bowen, é aplicado para a

determinação da evapotranspiração de culturas, através da quantificação do fluxo de calor latente de evaporação, em intervalos de tempo iguais ou inferiores a um dia.

Segundo Villa Nova (1973), o método do balanço da energia é considerado um processo racional de estimativa de evapotranspiração de uma superfície, o qual mede a energia disponível em um sistema natural e separa as frações usadas nos diferentes processos, obtendo-se, assim, bons resultados.

Cunha et al. (2002), afirmam que Bowen foi o pioneiro nos estudos do balanço da energia sobre uma superfície natural, determinando a razão entre os fluxos de calor latente e sensível emitidos por uma superfície de água, durante o processo de evaporação, em função dos gradientes da pressão do vapor e da temperatura observados sobre a superfície, denominada razão de Bowen.

As pesquisas com balanço de energia comprovam que a maior fonte de energia para a evapotranspiração é o saldo da radiação. O clima de uma determinada região e a condição de umidade do solo condicionam bastante a distribuição do saldo de radiação para os fluxos de massa e calor entre a superfície e a camada superficial turbulenta. Quando o suprimento hídrico é adequado R_n cede maior porção para LE. Esta tendência tem sido verificada em diversos trabalhos como os de Villa Nova (1973) no cultivo de arroz; Pedro Júnior (1977); André e Viswanadhan (1986) e Fontana et al. (1991) no cultivo de soja; Bergamaschi et al. (1988) em feijoeiro; Cunha et al. (1989) em milho; Medeiros (1990) em milheto forrageiro; Cunha e Bergamaschi (1994) em alfafa e Cunha (2001) no cultivo do pimentão.

Quando o balanço de radiação da superfície do solo começa a ser positivo, o ar em contato com o solo começa a ser aquecido por condução. Esse ar aquecido, expande-se, eleva-se e é substituído por outra quantidade de ar de maior densidade. Este é o início de um processo de convecção livre, que se pronuncia com o aumento do balanço positivo de radiação. Por este processo o ar vai sendo sucessivamente aquecido, sendo o de junto do solo aquele que aquece mais rápida e intensamente. Em consequência dessas células de circulação, o ar como um todo tem sua temperatura aumentada continuamente.

A temperatura máxima do ar em contato com o solo ocorre simultaneamente com a temperatura máxima da superfície do solo; à medida que se afasta do solo, a temperatura máxima se atrasa continuamente. Após a temperatura máxima, a

temperatura do ar diminui como consequência da diminuição da temperatura do solo, com o balanço de radiação positiva e decrescente.

Quando o balanço de radiação torna-se negativo, estabelece-se um fluxo de calor por condução do ar para a superfície. Este fluxo passa a resfriar o ar, iniciando pelas camadas adjacentes. Pelo aumento da densidade e pelo resfriamento, as diversas camadas tendem a se acamar. O processo se intensifica continuamente no decorrer da noite até a nova inversão do balanço de radiação, quando a temperatura do ar adjacente ao solo é mínima. A temperatura mínima atrasa-se para as camadas mais afastadas da superfície do solo.

A transferência de calor de um corpo para o meio ambiente é feita através do calor latente, por isso, a grande quantidade de energia consumida na evapotranspiração é função da energia radiante e da energia térmica do ar que aquece a cultura, sendo ambas as fontes oriundas da radiação solar.

A evaporação da água requer 590 calorias em média para cada grama de água. É esse dado que possibilita o cálculo do equivalente em energia calorífica, que é o fluxo de calor latente, para promover a evaporação da água através de um vegetal. Durante o dia essa energia provém do saldo positivo de radiação, mas mesmo durante a noite ela pode ser conseguida a partir dos fluxos de calor no solo e do ar atmosférico (TUBELIS; NASCIMENTO, 1995).

O clima próximo à superfície terrestre, onde animais e plantas têm o seu habitat, é condicionado pelo balanço energético que ocorrem entre a superfície e a camada atmosférica adjacente. A superfície, estando nua ou vegetada, sofrerá grande variação diurna na temperatura e uma grande quantidade de energia será trocada através dos processos de evaporação e transpiração (BERLATO; MOLION, 1981).

A temperatura da água determina a razão com que as moléculas deixam (escapam) a superfície líquida e passam para o ar. A variação da temperatura da superfície da água em períodos curtos pode exercer profundo efeito na quantidade de água evaporada. Essas temperaturas, do ar e da água, estão grandemente associadas à radiação solar e, portanto, também se correlacionam positivamente com a evaporação, daí a importância de se verificar o balanço da energia no ambiente da planta, uma vez que, com a determinação do balanço da energia é possível determinar-se a evapotranspiração de uma cultura, que é o dado

mais importante para se definir o quanto de água precisa o vegetal no momento da irrigação (BERLATO; MOLION, 1981).

Problemas como a irrigação podem ser melhores resolvidos quando são equacionados levando em conta os elementos climáticos. O fluxo de calor latente permite estimar o comportamento da cultura, quanto a evapotranspiração, para auxiliar na otimização da irrigação, que determina a quantidade de água necessária à planta durante o ciclo do cultivo, em ambiente protegido, tendo em vista que o fluxo de calor sensível, que está correlacionado com a advecção, é praticamente desprezível em ambientes protegidos (BERLATO; MOLION, 1981).

A medição de R_n , além de caracterizar mais corretamente o balanço de energia de superfícies, é o parâmetro mais importante utilizado em modelos meteorológicos que determinam a evapotranspiração. Em diversas aplicações biológicas e de engenharia, há mais necessidade do conhecimento do saldo de radiação que simplesmente da radiação solar. O fato dos componentes de radiação solar serem mais freqüentes medidos que o saldo de radiação (o saldo de radiação normalmente é medido em pesquisas científicas de curto período) induziu a procura de relações entre esses componentes, que permitem suprir a falta das medições do saldo de radiação. Em meteorologia agrícola determinar o balanço de radiação em áreas localizadas tem importância fundamental nos estudos energéticos regionais, resultando em respostas físicas e biológicas (ANDRE; VISWANADHAN, 1983).

Diversos trabalhos têm mostrado que diferentes parâmetros causam diferentes medidas no saldo da radiação: Decker (1959) citado por Rosenberg et al. (1983) atribui esta diferença à temperatura e refletividade da cultura; Glover (1972) atribui esta diferença às condições hídricas do solo, enquanto que Stanhill et al. (1966), citados por Souza (1996), atribui à latitude a diferença do saldo da radiação nos diferentes vegetais, ou seja, diferentes tipos de cultura, disponibilidade de água e localização do experimento, apresentam diferentes respostas ao saldo da radiação, daí que se torna necessário o monitoramento do saldo da radiação disponível à cultura para uma melhor otimização da irrigação.

Inúmeros trabalhos têm demonstrado que a maior porcentagem do saldo da radiação é utilizada pelo fluxo de calor latente, que é o responsável pela evaporação da água e, como decorrência, da evapotranspiração da cultura, chegando a valores próximos a 90%; os demais parâmetros ficam com a menor partição do saldo da radiação atingindo cerca

de 15% para o fluxo de calor sensível, que é responsável pela temperatura do ar no ambiente de cultivo e até 10% para o fluxo de calor no solo.

Dependendo das condições climáticas, em determinado período do dia, o fluxo de calor no solo pode chegar a atingir valores negativos, decorrente da inversão de algumas variáveis climáticas no interior do abrigo.

A partir de medições e com base no cálculo da razão de Bowen, Cunha et al. (1994) determinaram os fluxos de calor latente, do calor sensível e no solo de Eldorado do Sul no Rio Grande do Sul na cultura de alfafa, ficando as frações do saldo da radiação, respectivamente, 86%, 9% e 5%.

Cunha et al. (2002), realizaram um experimento em cultivo protegido de pimentão, na região de Botucatu, estado de São Paulo, chegaram a 2,05% do fluxo de calor no solo, 87,74% do fluxo de calor latente e de 9,66% para o fluxo de calor sensível, em relação à radiação líquida, em experimento realizado no cultivo protegido de pimentão.

3.5.2 Considerações sobre os Métodos de Estimativa da Evapotranspiração

Segundo Monteith (1965), o método de Penman combina o balanço de energia com parâmetro aerodinâmico, estimando a evapotranspiração potencial em escala diária, sendo o mais recomendado para estudos de pesquisa; enquanto que o tanque classe A é amplamente utilizado devido sua simplicidade de manuseio e custo relativamente baixo, sendo o método mais utilizado, em ambiente protegido, para a estimativa da ETP recomendado pela Organização Meteorológica Mundial.

Valiati et al. (2003), determinaram a estimativa da evapotranspiração potencial em ambiente protegido utilizando método do tanque classe A e de Penman-Monteith, e concluíram que o método do tanque classe A superestima, em média, 4,12% a ETP em ambiente protegido, em relação ao método de Penman-Monteith tendo recomendado o uso do tanque classe A para a estimativa da ETP em ambiente protegido.

Diversos trabalhos de pesquisa com hortaliças têm monitorado a evapotranspiração utilizando-se o tanque evaporimétrico classe A, que é considerado instrumento padrão em países ocidentais, sendo também adotado no Brasil (VAREJÃO-SILVA, 2001).

Os instrumentos meteorológicos utilizados para medidas de evaporação, normalmente não medem a evaporação natural, quantificam apenas casos particulares de transferência de água para a atmosfera, como é o caso dos evaporímetros tanque classe A e de Piche, necessitando de correções para a utilização de suas medidas. Com isso, são necessárias correções específicas em relação aos elementos meteorológicos que causam influências nessa evaporação, para a utilização do evaporímetro de Piche em superfícies naturais, assim como são feitas correções para o tanque classe A.

Segundo Stanhill (1961), citado por Souza (1996), tentativas em se correlacionar as medições do evaporímetro de Piche com a evaporação potencial tem sido insatisfatórias.

Nascimento e Tubelis (1981), através de correlação entre a evaporação de Piche e o poder evaporante do ar, encontraram equações lineares de regressão com precisões variadas em função da época do ano.

Souza et al. (2003) estudando a evapotranspiração em função da razão da Bowen e do tanque classe A em ambiente protegido, concluíram, através de resultados comparativos entre os dois métodos de determinação da evapotranspiração da cultura (ETC), que o método do tanque classe A subestimou a ETC com relação ao obtido pelo método do balanço de energia e que os valores obtidos para a evapotranspiração da cultura, estimados pelo método do tanque classe A, mostrou-se menos preciso que os valores obtidos pelo método o balanço de energia.

3.6 Lógica Fuzzy

3.6.1 Fundamentos da Lógica Fuzzy

Muitos fenômenos são compreendidos através de simulações que representam determinado comportamento de um dado sistema, podendo ser analisado por simulações clássicas ou através de simulações que utilizem os sistemas inteligentes (programas de computador que respondem a dados de entrada, dando respostas baseadas na lógica do raciocínio humano).

Os métodos de simulação por sistemas inteligentes, surgidos na década de sessenta do século passado, são métodos de sistemas computacionais que se baseiam na

linguagem e no raciocínio humanos, hoje amplamente utilizados que são: as Redes Neurais e a Lógica Fuzzy.

O objetivo das Redes Neurais é o de imitar a mente humana, a fim de processar informações através de algoritmos que capacitem um aprendizado de um determinado comportamento.

As redes neurais têm a capacidade de aprender como controlar um sistema, através de exemplos numéricos entre dados de entrada e saída do mesmo, enquanto que a técnica fuzzy pode aprender através de exemplos semânticos (SIMÕES, 1999).

A Lógica Fuzzy tem sido utilizada como uma ferramenta de sistemas de controle de processos industriais, aplicações domésticas e de diversão eletrônica, sistemas de diagnósticos e outros sistemas especialistas.

As principais áreas de aplicação da Lógica Fuzzy são: Sistemas de Controle Fuzzy, Tomada de Decisão, Reconhecimento de Padrões e Processamento de Imagens e Aplicações em Sistemas Operacionais.

Segundo Zadeh (1997), citado por Ribacioka (1999), a “Computação Soft”, derivada da computação tradicional chamada de “Computação Hard”, apresenta uma diferença em relação a esta última por ter uma tolerância em relação à imprecisão, incerteza ou verdade parcial, tendo como modelo a mente humana.

A “Computação Soft” é baseada na Lógica Fuzzy, Teoria das Redes Neurais, Raciocínio Probabilístico, Algoritmos Genéricos, Teoria do Caos e Teoria do Aprendizado onde cada uma das teorias se complementa, no intuito de apresentar uma solução mais abrangente, para uma faixa maior de aplicações.

Um exemplo são os sistemas Neurofuzzy onde a Lógica Fuzzy, em combinação com as Redes Neurais, fornece uma capacidade de aprendizado para fazer com que os controladores fuzzy se adaptem a uma variada gama de condições. O benefício da Teoria Fuzzy é o de capacitar a tomada de decisões, onde a Teoria de Redes Neurais permitem um aprendizado, a partir de um conjunto de dados, enquanto a Teoria Fuzzy proporciona uma forma de se obter resultados sobre este aprendizado, como descrito em Altrock (1995).

A Lógica Fuzzy é baseada nos conceitos de conjuntos fuzzy (nebulosos). Nesta lógica, o valor exato equivale a um número suficientemente próximo a ele, sendo interpretado como um processo de composição de relações nebulosas.

O conceito de conjuntos fuzzy foi introduzido, em 1965, por Lotfi A. Zadeh da Universidade da Califórnia, Berkeley. Ele teve muita importância na história, colaborando para o desenvolvimento de sistema de controle moderno. Na década de 60, Zadeh, tinha observado que os recursos tecnológicos disponíveis na época, eram incapazes de automatizar atividades relacionadas a problemas de natureza industrial, biológica ou química, que compreendessem situações ambíguas e que eram incapazes de serem implementadas em programas computacionais, fundamentadas na Lógica Booleana. Em 1973, ele elaborou suas idéias formulando o conceito de “variáveis lingüísticas” fazendo ligações de variáveis definidas com os conjuntos fuzzy.

A diferença entre a Lógica Fuzzy e a binária está no fato de que a Lógica Fuzzy pode possuir mais de dois resultados distintos, também chamados de valores verdade, o que não ocorre com a teoria clássica. Esses resultados não são expressos de forma bem definida e sim, lingüisticamente como: “*correto, muito correto, incorreto, muito incorreto*”. Tais valores estão contidos dentro de um subconjunto fuzzy e expresso numericamente pelo intervalo fechado dos números reais $[0,1]$.

Outra diferença entre essas lógicas é que, quando nos referimos à análise de certos intervalos de verdade ou faixas de valores, a lógica binária utiliza testes de condições exatas como, “*igual, maior que, menor ou igual que,...*”, enquanto que na Lógica Fuzzy são utilizados termos nebulosos, ou seja, sem definição exata, como, “*alto, baixo, médio...*”. Uma outra diferença é que, na lógica binária, o modificador mais utilizado é a negação, sendo que na nebulosa existe uma imensa variedade deles como: “*mais, menos, maior, menor, muito, pouco...*”.

Na Lógica Clássica, números e intervalos são utilizados para definir a probabilidade de um determinado acontecimento ocorrer. Na lógica nebulosa, esses termos probabilísticos são identificados como “*possível, provável, improvável*”, como decorrência, a transformação de termos exatos da Lógica Clássica em nebulosos faz com que sua sensibilidade na identificação dos parâmetros aumente.

Quando nos deparamos com um problema numa determinada área, normalmente, deve-se, de início, pesquisar e estudar os processos que ocorrem nesse domínio e, em seguida, transformá-lo em um modelo matemático que o simule. Quando estudamos sistemas complexos, tais procedimentos tornam-se uma tarefa muito difícil, já que há a

necessidade de se conhecer detalhadamente todo o processo que se deseja controlar e que o mesmo esteja bem definido.

Uma área de aplicação da Teoria Fuzzy é chamada raciocínio aproximado, conforme Zadeh (1975), onde um tipo de raciocínio não é totalmente certo nem totalmente errado. Este tipo de raciocínio se aproxima da forma do raciocínio humano. Neste caso as variáveis lingüísticas são representadas por conjuntos fuzzy, interpretando uma variável lingüística como uma variável cujos valores são palavras ou sentenças em uma linguagem natural. Conjuntos fuzzy proporcionam, aos métodos de desenvolvimento de sistemas computacionais, uma forma de programação mais próxima da linguagem e do raciocínio humano.

A Lógica Clássica, ainda é utilizada em larga escala resolvendo muitos dos problemas encontrados em variadas áreas. Entretanto, há situações de problemas reais em que é impossível modelar matematicamente determinados processos. É o caso de sistemas que apresentam uma gama muito grande de informações e que as características desses dados são conhecidos apenas lingüisticamente; decorrendo para que a utilização da lógica binária, tenha respostas imprecisas e inexatas, invalidando sua utilização.

A utilização da lógica nebulosa, a qual trabalha com informações e termos lingüísticos, pode solucionar este tipo de problema. A modelagem e controle fuzzy são técnicas que conseguem trabalhar rigorosamente essas informações analisando não apenas a exatidão dos resultados, mas também o grau de incerteza. Por estas razões, esta técnica pôde solucionar vários problemas até hoje desconhecidos, mostrando o seu valor e potencialidade na sua utilização em sistemas computacionais de controle. A modelagem e controle fuzzy, pode lidar eficientemente com essas classes de problemas devido ao fato de conseguir trabalhar com as entradas e saídas de um sistema e reestruturá-lo pela utilização de vários parâmetros, sendo possível, desta forma, resolver problemas tão complexos que na modelagem matemática é impraticável, além de proporcionar resultados mais precisos com melhor desempenho.

3.6.2 Conceitos Básicos da Lógica Fuzzy

Pela Teoria Clássica dos Conjuntos, um elemento pertence ou não a um conjunto. Esta análise matemática é feita da seguinte forma: Considere um universo U , um elemento particular $x \in U$ e um conjunto $A \subseteq U$. O grau de pertinência $\mu_A(x)$ com relação ao conjunto A é dado pela Equação 16:

$$\begin{cases} \mu_A(x) = 1 & \text{se } x \in A \\ \mu_A(x) = 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (16)$$

A função $\mu_A(x): U \rightarrow \{0,1\}$, que representa a equação 16 é chamada de função característica na teoria básica dos conjuntos. Esta idéia pode ser generalizada, por exemplo, aproximando os resultados para um valor exato, limitado por uma determinada margem de erro. Neste caso, o sistema emitirá o valor 1, não somente quando os valores de entradas pertencerem ao conjunto A considerado, mas também para uma faixa de valores consideravelmente próximos a esse conjunto (Figura 11 a). Por outro lado, pode-se, também, fixar o valor de entrada para que a saída seja 1 e então todos os outros valores serão 0 (Figura 11 b).

Entretanto, estes dois casos generalizados descritos, não podem ser estendidos a todos os problemas encontrados na realidade. A proposição feita por Zadeh, em 1965, sugere que o conjunto A não seja delimitado “visivelmente” por uma faixa de valores bem definida, mas que a pertinência de cada elemento seja em função do quanto esse elemento esteja próximo ao conjunto A (Figura 11c)

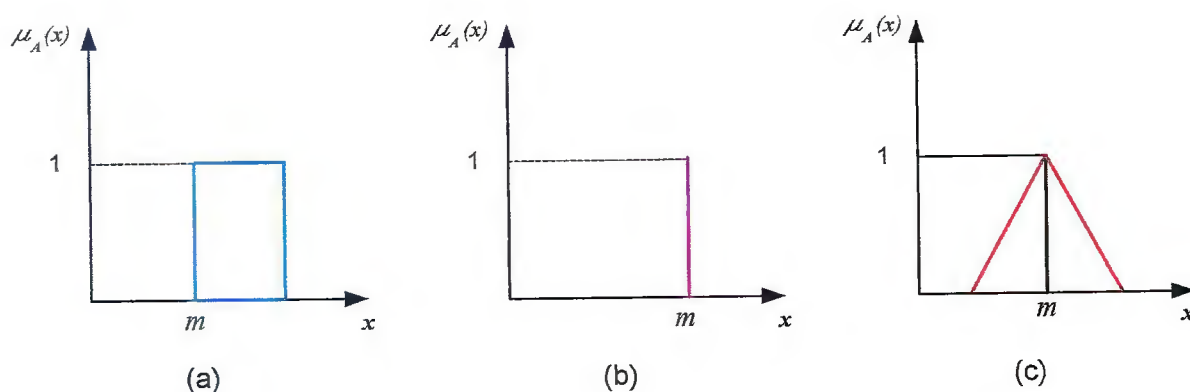


Figura 11 - Gráfico representativo dos valores de pertinência do conjunto A

Segundo Simões (1999), a Lógica Fuzzy é uma técnica que incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle. Um controlador fuzzy típico pode ser projetado para comportar-se conforme o raciocínio dedutivo, isto é, o processo que as pessoas utilizam para inferir conclusões baseadas em informações que elas já conhecem.

Enquanto controladores clássicos são baseados em modelo matemáticos rígidos para controle de processos, controladores fuzzy são baseados no conhecimento da operação humana. Este conhecimento é formulado em termos de regras de controle fuzzy, cada um expresso por uma proposição condicional, tal como:

SE *temperatura* do ar é *alta*

E *umidade* do ar é *baixa*

ENTÃO *ventilação* no ambiente é *média*

onde *temperatura* e *umidade* são variáveis observadas no processo controlado, enquanto *ventilação* é uma variável que representa a ação a ser controlada. Os termos lingüísticos *alta*, *baixa* e *média* são apropriadamente representados na Lógica Fuzzy.

A ação a ser controlada nada mais é que uma tomada de decisão. Tomar uma decisão é uma das atividades humanas fundamentais e o objetivo da mesma é o estudo de como elas podem levar a um maior sucesso.

Lee (1990), afirma que, sistemas de controle é a área que mais tem recebido aplicações da Teoria Fuzzy, especialmente em aplicações industriais. Ele também afirma que o uso de controladores fuzzy segue a forma humana de operar um sistema. Generalizando, um controlador fuzzy pode ser visto como um método de tomada de decisão, baseado no raciocínio aproximado, fazendo com que o sistema se pareça mais com a forma humana de operar o sistema controlado.

Os Sistemas Fuzzy também podem ser desenvolvidos para auxiliar numa determinada decisão. A aplicação da Teoria Fuzzy, sobre a teoria da tomada de decisão é feita através da utilização de conceitos vagos e pouco específicos, semelhante às formulações humanas de preferências e objetivas.

Segundo Klir (1997), citado por Ribacioka (1999), a aplicação da Lógica Fuzzy, em reconhecimento de padrões, está associada ao processamento de imagens; afirma também que o objetivo básico é comparar as categorias identificadas nos dados com categorias definidas em tabelas ou base de dados.

Shimura (1975), citado por Ribacioka (1999), considera que o reconhecimento de padrões é essencialmente fuzzy, porque não há uma fronteira definida entre as categorias de fontes de caracteres. Afirma que o reconhecimento de padrões é mais um evento probabilístico do que determinístico, pois a impressão de caracteres pode ser afetada por várias situações, como a má qualidade de impressão ou sujeira no papel.

Com a finalidade de equacionar e resolver as diversas questões através da Lógica Fuzzy, Zadeh (1965) propôs então a seguinte definição matemática:

Um subconjunto fuzzy A de um conjunto clássico X é dado por uma função $\alpha: X \rightarrow [0,1]$, onde $\alpha(x)$ é o grau de pertinência do elemento x com os graus 1 e 0 representando, respectivamente, a pertinência máxima e a não pertinência do elemento ao conjunto fuzzy A . A função grau de pertinência também é chamada de grau de pertinência do conjunto fuzzy A .

Baseando-se na caracterização de um conjunto clássico A através de sua função característica 1_A é que se definiu um subconjunto fuzzy por meio de uma função, “generalizando” o conceito de subconjunto clássico. Isto é, enquanto a função indicadora (ou característica) 1_A , que caracteriza o subconjunto A , assume apenas valores no conjunto $\{0,1\}$, a

função grau de pertinência $\mu(x)$ do subconjunto fuzzy A pode assumir qualquer valor no intervalo dos números reais $[0,1]$.

O problema de se construir as funções grau de pertinência no contexto de várias aplicações não é um problema da Teoria Fuzzy em si. É um problema relacionado a um novo campo chamado de “Engenharia do Conhecimento”, onde se concentra a aquisição dos fatos relacionados ao conhecimento da situação. O processo de aquisição do conhecimento envolve um ou mais especialistas na área de aplicação e um engenheiro de conhecimento. O engenheiro deve transformar em uma forma operacional o conhecimento fornecido pelos especialistas.

A representação das funções que definem os membros de um conjunto fuzzy facilita a visualização deste conjunto e pode ser feita na forma tabular ou de lista, graficamente e na forma analítica.

Para conjuntos finitos, as funções podem ser sempre representadas por tabelas. A tabela representando um conjunto fuzzy lista todos os elementos do conjunto com seus respectivos graus de pertinência.

A forma geral para representar o conjunto fuzzy A quando x é finito e é dada pela seguinte Equação 17:

$$A = \frac{\sum A(x)}{x} \quad (17)$$

As operações algébricas com números fuzzy são as mesmas da Teoria Clássica. Assim como no caso clássico, aqui também se pretende fazer “contas”. A diferença é que, nas operações com números fuzzy, pretende-se, por exemplo, “somar” quantidades imprecisas. Para isso, “criam-se” os objetos que generalizam os números reais. Tais objetos serão chamados de números fuzzy.

O conceito de números fuzzy vem do fato de muitos fenômenos não poderem ser caracterizados por números precisos, como consequência, tem-se a seguinte definição: “Um conjunto fuzzy A é chamado de número fuzzy quando o conjunto universo onde A está definido é o conjunto dos números reais e A é normal. Isto é, A é um número fuzzy se $A:R \rightarrow [0,1]$ e $A(x)=1$ para algum x , dado como certo”.

Uma outra forma de se representar um conjunto fuzzy é feita graficamente. A representação gráfica é a mais usada na literatura fuzzy por ter uma interpretação mais intuitiva. No caso de se fazer a representação em duas dimensões, o eixo vertical representa a função grau de pertinência no intervalo $[0,1]$, e o eixo horizontal contém a informação a ser modelada.

Em geral para expressar a função grau de pertinência de um número fuzzy as formas mais usadas são a triangular (figura 12 a) e a trapezoidal (figura 12 b).

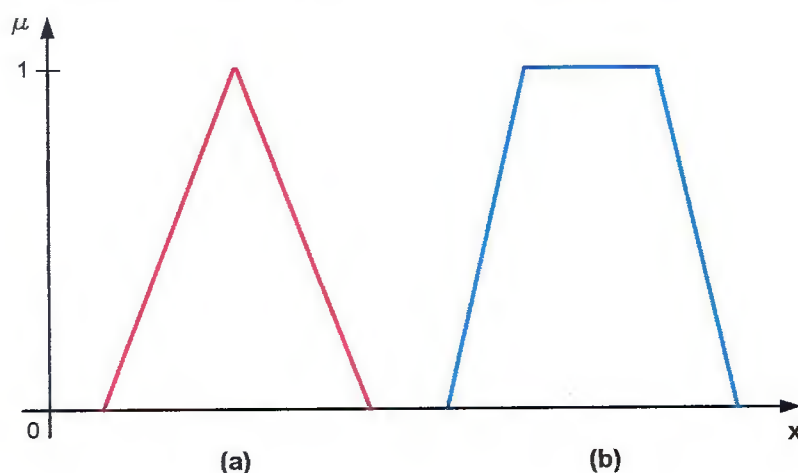


Figura 12 - Formas representativas da função pertinência para os conjuntos fuzzy

As principais características da modelagem fuzzy são:

- A sua utilização em sistemas complexos com razoável base de conhecimento;
- A facilidade de ser manuseada na elaboração do modelo de um processo;
- A memorização do conhecimento é mais simples;
- Por utilizar termos lingüísticos, a sua compreensão, durante e depois de elaborada é mais fácil;
- Trabalha tanto com processamento simbólico quanto processamento com significado lingüístico.

3.6.3 Sistemas de Controle Fuzzy

O funcionamento de um controlador fuzzy de maneira simples e básica está esquematizado na Figura 13.

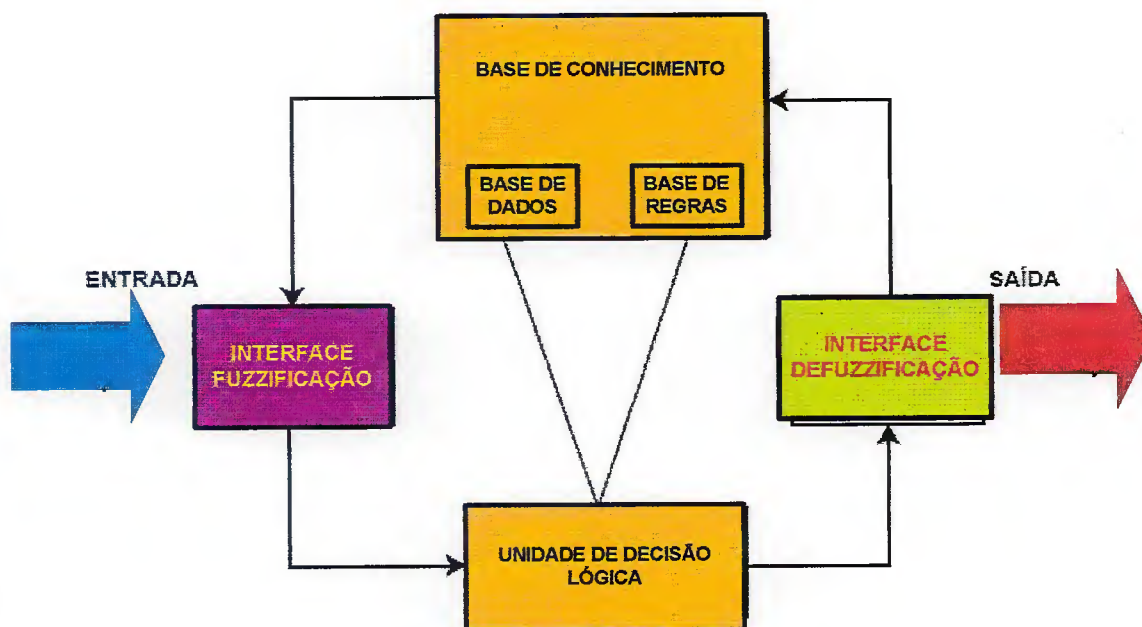


Figura 13 - Esquema básico de um Controlador Fuzzy

As descrições das partes principais ilustradas na Figura 13 estão apresentadas, a seguir:

- *Interface de Fuzzyficação*: os valores de entradas são apresentados e escalonados tornando-se universo de discurso normalizado. Em seguida, são fuzzyficados, transformando em números do conjunto fuzzy, de modo que possam tornar-se instâncias de variáveis lingüísticas.
- *Base de Conhecimento*: um conjunto de regras caracterizada por estratégia de controle e metas.
- *Base de Dados*: armazena definições das funções de pertinência; sobre discretizações e normalizações dos universos de discurso, bem como a partições fuzzy de entrada e saída.

- *Procedimento de Inferência*: utiliza os dados fuzzy de entradas, e juntamente com as regras, processa-se inferindo numa resposta de controle fuzzy. Para isso, aplica-se operador de implicação fuzzy e regras de inferência da Lógica Fuzzy.
- *Interface de Defuzzyficação*: transforma as ações de controle fuzzy inferidas em ações não-fuzzy. Em seguida, escalona-se para poder compatibilizar os valores normalizados vindos do passo anterior com valores dos universos de discursos reais das variáveis.

3.7 Sistemas de Controle

3.7.1 Aspectos Gerais

Controlar um sistema denota o ato de fiscalizar, supervisionar e manter o seu equilíbrio. A necessidade sempre crescente de controlar processos deu origem às técnicas de controle. A técnica de controle emprega um conjunto de elementos por meio dos quais se constroem sistemas ativos capazes de atuar com eficiência ótima sobre o processo produtivo utilizando as informações recebidas do meio sobre o qual atuam. Com base nas informações, o sistema calcula a ação corretiva mais apropriada para a execução da ação. Esta é uma característica de sistemas em malha fechada, conhecidos como sistemas com realimentação, ou seja, aquele que mantém uma relação expressa entre um valor da saída e um valor de entrada de referência do processo. Essa relação entrada/saída serve para corrigir eventuais valores de saída que estejam fora dos valores desejados. Para tanto, são utilizados controladores que, por meio da execução algorítmica de um programa ou circuito eletrônico, comparam o valor atual com o valor desejado (set-point), efetuando o cálculo para ajuste e correção (FONTES, 2003).

A ação de controle pressupõe a presença de três componentes básicos, cuja principal característica é a realimentação das informações requeridas para o controle do processo através de um controlador, conforme ilustra a Figura 14.

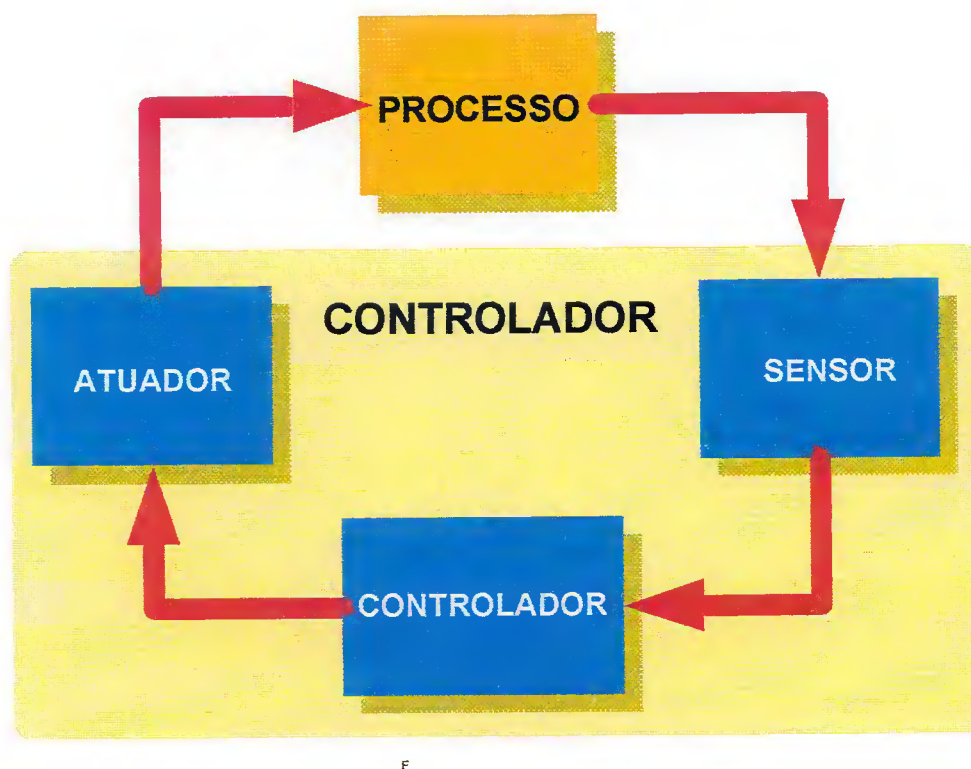


Figura 14 - Diagrama de blocos de um Sistema de Controle

As descrições dos componentes básicos de um controlador ilustrados na figura 14 serão apresentadas a seguir:

a) sensor: é definido como sendo um dispositivo sensível a um fenômeno físico, tal como: temperatura, umidade, luz, pressão, etc. Por meio desta sensibilidade, os sensores enviam um sinal para os dispositivos de medição e controle. Caso exista a necessidade de medir uma grandeza a partir de um fenômeno físico que envolva uma grandeza física que não seja de natureza elétrica, tem-se, conceitualmente, a necessidade de se utilizar um transdutor, que se caracteriza por um dispositivo capaz de responder ao fenômeno físico, ou estímulo, de forma a converter a sua magnitude em um sinal elétrico proporcional à amplitude desse estímulo. Os transdutores também são conhecidos como conversores de sinais.

b) atuador: os atuadores são dispositivos a serem acionados para executarem uma determinada força de deslocamento, ou outra ação física qualquer, definida pelo sistema controlador. Estes dispositivos são os elementos através dos quais o controlador atua sobre o processo. Podem ser magnéticos, hidráulicos, pneumáticos, elétricos ou de acionamento misto. A título de exemplo, temos: válvulas e cilindros pneumáticos, válvulas proporcionais, motores, aquecedores, entre outros.

c) controlador: é o elemento responsável pela aquisição dos sinais enviados pelos sensores, seu processamento e o envio de comandos para os atuadores. Eles podem ser microprocessados ou não.

Existe uma variedade de controladores programáveis disponíveis no mercado. É possível utilizar controladores tradicionais, com poucas opções de configurações ou controladores lógicos programáveis (CLP's). Entretanto, algumas aplicações necessitam funcionalidades mais avançadas ou uma maior flexibilidade. Para alguns destes sistemas, a opção de controladores programáveis conhecidos como "*Programmable Automation Controllers – PAC's*" (Controlador de Automação Programável) pode ser a melhor solução. PAC combina a configuração e a robustez de um CLP com a flexibilidade e funcionalidade de um PC.

A melhor opção de controlador programável depende das necessidades do sistema onde o mesmo deve atuar. É possível associar vários esquemas de controle para a otimização do processo. Pelo fato de possuir uma entrada e uma saída e fornecer uma resposta linear, o controle PID é o mais utilizado. Entretanto, na prática, muitos sistemas têm múltiplas entradas ou possuem uma não linearidade, que um simples módulo de entrada e saída, em que o controle PID não resolveria o problema.

Os PAC's podem implementar esquemas de controles flexíveis, como PID com ganhos agendados, ou Lógica Fuzzy, o qual usa múltiplas entradas ou possui respostas para sistemas não-lineares mais ainda executam rotinas de controle compreensíveis. É possível ainda, implementar algoritmos de controles sofisticados como a combinação de funções PID e Lógica Fuzzy.

A seguir apresentaremos uma breve explicação sobre PID, controle com Lógica Fuzzy e a combinação de esquemas de controle. Antes, porém, é necessário

primeiro entender algumas terminologias básicas que são comuns para todos os sistemas de controle.

- *Variável de Processo:* é o parâmetro do processo que deverá ser controlado;
- *Setpoint:* é o valor desejado para a variável do processo;
- *Saída do Controlador:* é o valor de saída para um atuador do sistema;
- *Planta:* é o processo dinâmico no qual a saída do controlador afeta a variável do processo.

3.7.2 Controlador PID

PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é o mais comum método de controle analógico usado atualmente e é ideal para sistemas lineares de segunda ordem como trocadores de calor. No controle PID, o algoritmo determina a saída desejada do atuador, calculando a resposta proporcional, integral e derivativa e somando estes três componentes.. Sendo assim, é muito importante entender o efeito de cada componente para sintonizar o controlador PID.

a) Efeito Proporcional: A componente proporcional depende somente do erro, o qual é a diferença entre o setpoint e a variável do processo. O ganho proporcional (K_c) determina a relação da resposta de saída em função do erro. Em geral, aumentando o ganho proporcional, aumenta a velocidade de resposta do sistema de controle e diminui o estado do erro. Entretanto, se o ganho proporcional é muito grande, a variável do processo irá oscilar. Se for aumentado o K_c a oscilação irá se tornar maior e o sistema se tornará instável.

b) Efeito Integral: A componente integral, como o próprio nome já diz, integra o erro sobre o tempo para interagir com o estado do erro. Sendo assim, a resposta da integral irá continuamente aumentar sobre o tempo a menos que o erro seja zero. Entretanto, a ação integral pode causar uma extrapolação dos valores, oscilação e problemas de instabilidade se o ganho integral (T_i) for muito pequeno. Valores menos que T_i terão um efeito integral mais forte na resposta do sistema.

c) Efeito Derivativo: A parte derivada do algoritmo PID antecipa comportamentos futuros do erro, pois a resposta da componente derivada é proporcional à taxa de mudança no erro. Sendo assim, geralmente, a ação derivada previne a extrapolação dos valores e elimina

oscilações. Por outro lado, na prática a maioria dos sistemas de controle usam um ganho derivativo (T_d) muito pequeno pois a resposta da derivada é muito sensível a ruídos no sinal da variável de processo. Se o sinal de retorno do sensor, que representa a variável de processo possui ruídos, a componente derivativa pode tornar o sistema de controle instável.

Embora existam métodos analíticos para sintonia de ganhos PID, a técnica mais comum usada é a “tentativa e erro”. Pelo fato desta tarefa consumir muito tempo, técnicas de auto-sintonia que automatizam este processo são muito bem-vindas.

Alguns controladores já disponíveis no mercado incluem um algoritmo de auto-sintonia para, automaticamente, melhorar o desempenho do controlador PID. O algoritmo necessita que o controlador PID esteja operando o sistema de uma forma estável, com os parâmetros dos ganhos de P, PI ou PID definidos. Então, o algoritmo automaticamente testa o sistema para determinar os novos parâmetros que melhoram o desempenho do controle.

3.7.3 Controladores de Lógica Fuzzy

A Lógica Fuzzy é ideal para ser usada em sistemas não lineares ou sistemas com múltiplas entradas. Como as entradas e saídas do controlador não são bem definidas, ou não determinísticas, na Lógica Fuzzy, o controlador pode aceitar muitas variáveis de processo e setpoints. Essas variáveis passam por um processo de “fuzzyficação”, o qual converte os valores do mundo real em termos lingüísticos. Isto é feito comparando a variável a um conjunto de valores fuzzy que foi dimensionado.

Na fase de inferência fuzzy, os termos lingüísticos são passados por uma série de regras de decisões para determinar uma saída lingüística única. Estas regras de decisão representam a operação básica do controlador fuzzy.

O estágio final é a “defuzzyficação”, o qual converte a saída lingüística única para um valor do mundo real. Ele compara a sua saída lingüística única com um conjunto de valores fuzzy que determina a saída através de um método de médias pré-determinadas. A Figura 15 ilustra de forma esquemática um controlador fuzzy.

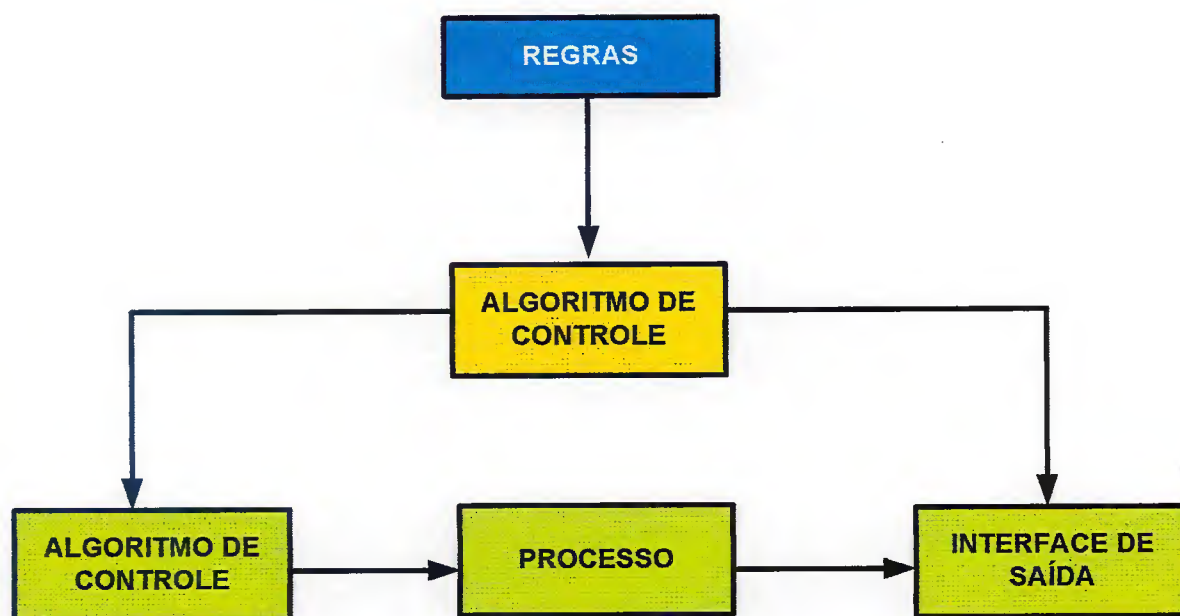


Figura 15 - Sistema de controle utilizando Lógica Fuzzy

3.7.4 Sistemas de Controles Combinados

Para sistemas que apresentam não-linearidade, é possível implementar combinações de esquemas de controle como PID com agendamento de ganho. O PID com agendamento de ganho permite variar os parâmetros de sintonia do PID para os seus loops baseados nas variáveis de processo. Por exemplo, é possível ter um dispositivo de vazão de água o qual possui características que dependam do microclima do sistema que são diferentes em altas e baixas taxas de vazão. Se for utilizado o PID tradicional para controlar a vazão pode-se não atingir a suplementação hídrica ideal. O PID com agendamento de ganho permitiria usar ganhos mais agressivos em taxas altas ou baixas de vazão para reagir a mudanças na vazão da água.

É possível também usar controladores de Lógica Fuzzy em conjunto com controladores tradicionais de P, PI e PID (Figura 16). Por exemplo, ainda no caso de um dispositivo de controle de vazão, este pode responder linearmente apenas em certas faixas. Para valores externos, as constantes do controlador PID são inválidas. Sendo assim, utilizam-se controladores de Lógica Fuzzy para controlar as constantes PID à medida que o dispositivo

se movimentar de uma taxa para outra. Ou, talvez o controlador PID está controlando um sistema linear pequeno muito bem, mas mudanças no ambiente como temperatura e umidade podem afetar o controle. O controlador de Lógica Fuzzy pode ajustar os setpoints e outras variáveis, no loop PID para compensar as diversas mudanças no ambiente mantendo o loop de controle PID tão efetivo quanto possível. Este tipo de estrutura de controle tem diversas utilizações. Um controlador de Lógica Fuzzy pode também rodar em paralelo com um controlador PID, onde a saída final, são algumas médias ponderadas das saídas dos dois controladores.

Todo sistema de automação segue um princípio comum, em que o gerenciador do processo é realimentado de informações resultantes da conclusão de cada tarefa, de forma a redimensionar ou reorientar a etapa seguinte, com o objetivo de alcançar o resultado final mais próximo possível daquele para o qual o dispositivo foi instruído a executar através de informações codificadas. Um exemplo de sistema que desempenha a função de controlador é o sistema de supervisão e controle, que possui a característica de uma plataforma multitarefa e de tempo real, podendo executar inúmeras tarefas diferentes simultaneamente e com um tempo de resposta extremamente curto, situado na faixa de milésimos de segundo.

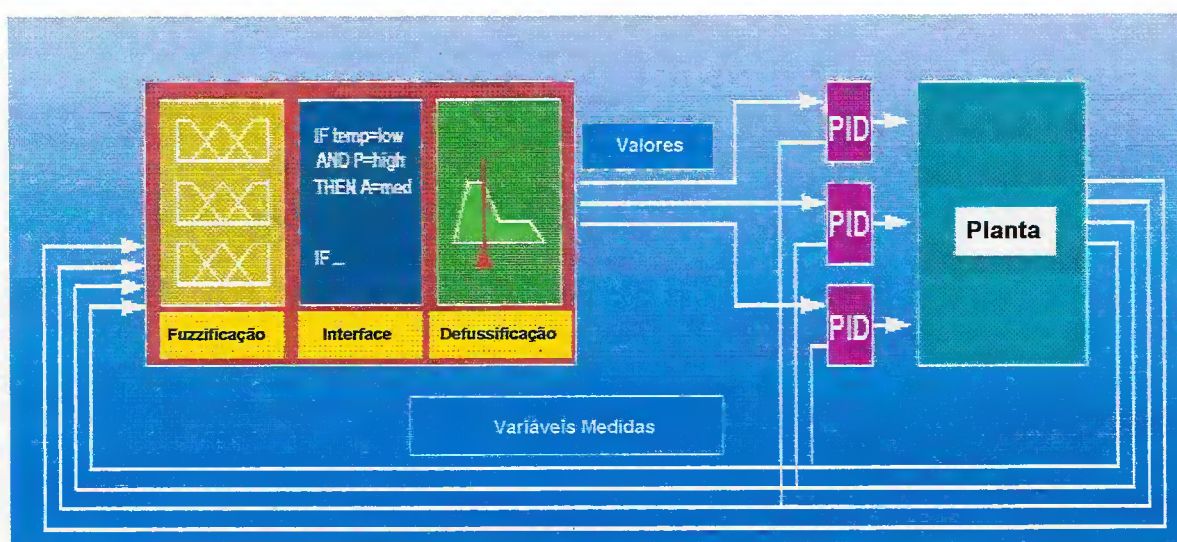


Figura 16 - Sistema de Controle Combinado

Para o gerenciamento destes controladores, podem ser utilizados os sistemas de supervisão. Os sistemas supervisórios são programas de computador desenvolvidos para realizar o controle, monitoramento e o gerenciamento de informações de sistemas industriais, proporcionando a visualização dos valores instantâneos das variáveis do processo através de interfaces gráficas.

Através destes programas o operador pode realizar coleta de informações relativas à operação de qualquer tipo de equipamento e a partir das mesmas monitorar e controlar com precisão a operação do sistema, proporcionando o gerenciamento de forma rápida e eficiente de todo o sistema de produção.

Embora seja possível controlar sistemas de maneira eficiente sem o emprego de sistemas supervisórios há o inconveniente de não se dispor de recursos de monitoramento, supervisão e aquisição de dados com extrema confiabilidade que são de grande importância para o gerenciamento de processos.

Para se realizar uma boa escolha de um programa supervisório levam-se em consideração diversos fatores, tais como, sistemas operacionais em que podem ser executados e a confiabilidade do suporte técnico oferecido pelo seu fabricante. Entende-se como suporte técnico eficiente a capacidade do fornecedor em prover constantes atualizações e proporcionar de forma rápida o fornecimento de módulos adaptadores de comunicação para novos equipamentos ou protocolos. A Figura 17 ilustra os diversos tipos de programas supervisórios hoje disponíveis no mercado.



Figura 17 - Tipos de programas supervisórios

Os sistemas SCADA, instalados em microcomputadores PC, melhoram a eficiência do processo uma vez que disponibiliza o estado do sistema, em tempo real, através de um conjunto de interfaces gráficas de usuário (GUI), permitindo a tomada de decisões apropriadas, quer automaticamente, quer por iniciativa do próprio operador.

A palavra SCADA é utilizada para caracterizar um sistema de controle de processo em tempo real com capacidade de aquisição de dados e supervisão. Esses sistemas utilizam tecnologias de computação e comunicação para automatizar o monitoramento e o controle dos processos, efetuando aquisição de dados em ambientes complexos apresentando-os ao operador, de modo amigável, através de Interfaces Homem-Máquina (HMI).

A interação do operador, com o sistema de controle no microcomputador se dá, através de uma tela principal, que pode conter vários elementos ou objetos. Uma tela pode ser caracterizada como sendo uma janela para monitoramento de um sistema, onde serão inseridos diversos objetos de tela que proporcionarão a interface entre o usuário e o processo a ser controlado. A configuração de uma tela é auxiliada através de uma caixa de diálogo. Os Objetos de Tela são componentes que podem ser inseridos na tela para visualizar e atuar sobre as variáveis que contêm dados provenientes dos periféricos externos. Os objetos podem ser do tipo: animação, display, gauge, slider e gráfico de tendência. Estes elementos facilitam a criação de aplicativos para a realização do controle de qualquer processo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Os dados utilizados, para a convalidação do modelo proposto, foram obtidos através de um ensaio conduzido em estufa, na área experimental do Departamento de Recursos Naturais da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu, São Paulo (latitude 22°51'S; longitude 48°26'W e altitude de 786 m), durante o período de 12/09 a 10/10/2002.

A estufa é do tipo arco não-climatizada, com dimensões de 7m de largura, 20m de comprimento com altura lateral de 2,2m e altura máxima de 4m, orientada no sentido NNW-SSE, cuja estrutura é de ferro galvanizado, coberta com polietileno transparente difusor de luz de 150µm de espessura e laterais em malha de polipropileno(sombrite) com 50% de transparência à radiação solar.

A cultura instalada no ambiente protegido foi a rúcula de folha larga (*Eruca sativa* L.), as mudas foram preparadas no viveiro do Departamento de Ciências Florestais e após 14 dias transplantadas para a estufa. Adotou-se um espaçamento de plantio de 0,07m entre covas, com 3 plantas/cova e 0,2m entre linhas. O sistema de irrigação da

cultura utilizado foi o de fitas gotejadoras apresentando uma vazão de 1/h. A área interna da estufa foi subdividida em 3 canteiros com dimensões de 1,1m de largura por 16,6m de comprimento, perfazendo um total aproximado de 8500 plantas.

A Figura 18 apresenta a planta baixa representativa da área experimental com as respectivas localizações dos canteiros e dos aparelhos nela instalados.

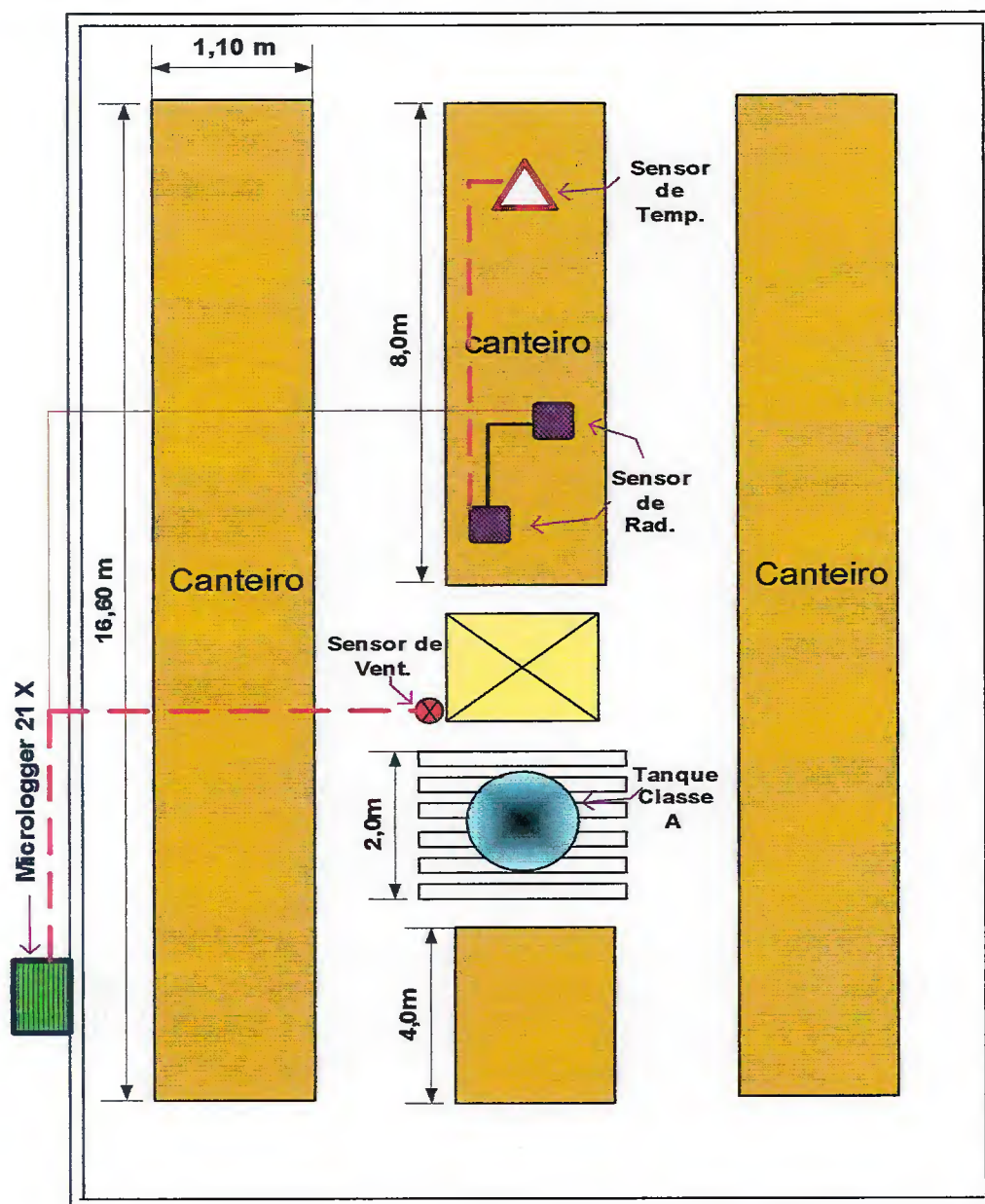


Figura 18 - Planta baixa representativa da área experimental com a localização dos aparelhos e canteiro

Durante a fase de condução experimental foram medidas além da velocidade do vento e da tensão de água no solo, as variáveis térmicas ambientais: temperatura do ar e do solo, a umidade relativa do ar, as variáveis radiométricas ambientais: Radiação global, radiação refletida, radiação fotosinteticamente ativa, radiação difusa, saldo da radiação e fluxo de calor no solo, cujas especificações dos aparelhos encontram-se no quadro 2.

Quadro 2 - Equipamentos de medidas utilizados no interior da estufa

Variável	Unid	Modelo	Fabricante	Posição			
Temperatura / umidade relativa do ar	°C / %	HMP45C	VAISALA	1,50 m			
Temperatura seca	°C	Termopar Cu-Co	-	1,00 m			
			-	0,50 m			
-			1,00 m				
-			0,50 m				
Temperatura úmida		107B	-	-0,10 m			
				-0,05 m			
Irradiância global	W.m ⁻²	CM3	KIPP & ZONEN	0,50 m			
					LI-180	LI-COR	
							NR
		HTF	REBS				
					CASSELA	-	
				Classe "A"			-
m.s ⁻¹	-	1,00 m					
			mm/dia		-	0,20 m	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-		-	-	
				-			-
-	-	-					
			-</				

Dos dados coletados no experimento foram utilizados neste trabalho, aqueles fornecidos pelos sensores de temperatura, do saldo da radiação e do fluxo de calor no solo, assim descritos:

a) Sensores de Temperatura e Umidade Relativa do Ar

Esta combinação de sensores de temperatura e umidade relativa do ar foi projetada para aplicações meteorológicas e seus respectivos elementos sensores estão localizados dentro de um único invólucro protegido por um filtro poroso o qual garante que ambos estejam amostrando as mesmas condições e protegidos contra poeira e água. Para evitar exposição direta dos elementos sensores à chuva e aos raios solares e também garantir que os mesmos recebam adequada ventilação para permitir o equilíbrio com a atmosfera a sua volta, o conjunto é protegido por uma espécie de chapéu que pode ser de plástico ou alumínio, com o se observa na Figura 19.



Figura 19 - Sensores de temperatura e umidade do ar

b) Sensores de Radiação Total Líquida ou Saldo Radiômetro

Este sensor (Figura 20) mede a Radiação Total Líquida que é a diferença entre a Radiação Incidente Hemisférica Total e a Radiação Refletida Hemisférica Total. A unidade de medida é W/m^2 .

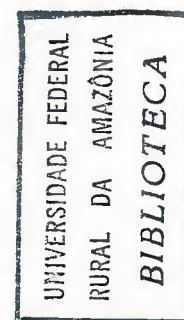


Figura 20 - Sensores de radiação total líquida e saldo radiômetro

O elemento sensor do Saldo Radiômetro é uma termopilha, que é formada de uma série de junções termoeletricas, construídas com a combinação de dois metais tais como o cobre e constantan. Esta termopilha é capaz de fornecer em sua saída um sinal típico de vários $\mu V/W/m^2$ (micro-Volt por Watt por metro quadrado) proporcional à diferença de temperatura entre uma superfície absorvedora negra - junção “quente”, e a referência - junção “fria”. A referência é uma superfície refletiva ou a porção interna da base do sensor. A superfície negra ou junção “quente” absorve uniformemente dentro do espectro solar e é encapsulada dentro de um domo de vidro ou poliestireno que protege a termopilha dos efeitos de resfriamento pelo vento e chuva. Para compor o Saldo Radiômetro, duas termopilhas idênticas são conectadas eletricamente e montadas no plano horizontal, uma voltada para o céu e outra para o solo.

c) Sensor de Fluxo de Calor no Solo

O transdutor de fluxo de calor (Figura 21) é projetado para medir o fluxo de calor no solo. O elemento sensor do transdutor de fluxo é uma termopilha encapsulada em epóxi de alta condutividade térmica. Outras características típicas do sensor de fluxo de calor no solo incluem: alto nível de sinal de saída, baixa resistência elétrica, não exige alimentação e possui calibração linear. A unidade de medida é W/m^2 .

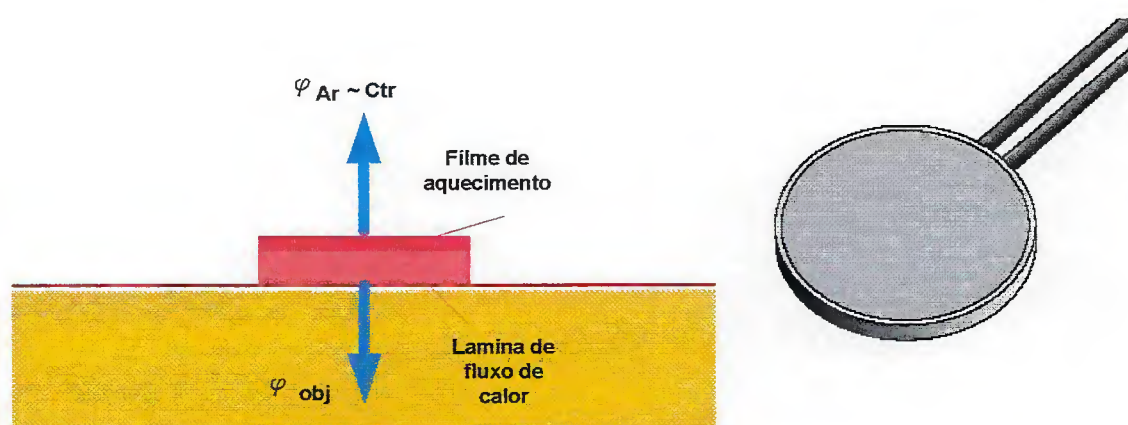


Figura 21 - Sensor de fluxo de calor no solo

A aquisição automática dos dados foi feita por meio de um Micrologger 21X, programados por meio de linguagem específica com varredura de sensores a cada cinco segundos e saída média dos dados a cada cinco minutos e transferidos para um módulo externo de expansão de memória RAM, modelo SM192 os dados foram armazenados em uma interface modelo SC532 e através dela transferidos para um microcomputador.

No cálculo do saldo da radiação, os fluxos que chegavam ao sistema (cultura da rúcula) foram considerados positivos, e os que saíam negativos; o dossel da cultura e a superfície do solo foram considerados o limite superior e inferior do sistema, respectivamente.

A diferença entre os fluxos totais da radiação incidente e refletida pela superfície da cultura, correspondeu à radiação líquida (R_n) que é a energia disponível no sistema analisado. O calor destinado ao aquecimento do ar atmosférico, que é o fluxo de calor sensível (H), não medido, foi avaliado através das medidas de temperatura do ar, sendo uma das variáveis utilizadas no modelo fuzzy adotado.

O fluxo de calor latente (LE) é o calor utilizado na mudança de estado físico da água, da forma líquida para a forma gasosa, sendo considerada a energia subtraída da superfície do solo.

O fluxo de calor no solo (G) depende da radiação solar global e da condutividade do solo, que é a fração do saldo da radiação (R_n) transmitida para o interior do solo, sendo medida a 0,02 m sob a superfície, próximo à linha de plantio da cultura e a R_n foi medida através de saldos radiômetros, instalados a 0,5 metros de altura, em relação ao solo, cujos modelos estão especificados no quadro 2.

Através da razão de Bowen foram estimados os fluxos de H e LE , por meio das medições de gradientes psicrométricos na cultura, entre os níveis de 1,00 m e 0,5 m para o conjunto de termopar de bulbo seco e bulbo úmido, de acordo com as equações 11, 12, 13, 14 e 15.

Os conjuntos psicrométricos de termopares foram introduzidos em microabrigos confeccionados em acrílico, com aeração natural e protegidos contra a radiação direta e parte da difusa. Os conjuntos de microabrigos de acrílico foram instalados a uma distância entre si em níveis de 1,00 m e 1,50m de altura em relação ao solo.

A evapotranspiração é calculada diariamente para que se determine a quantidade de água a ser irrigada ao sistema solo-vegetal, sendo assim, foram calculadas as médias dos dados a cada 24 horas, para confecção de curvas diárias dos valores instantâneos (W/m^2), cujos resultados em MJ/m^2 .dia estão apresentados na tabela 2.

As duas principais questões para se otimizar a irrigação é definir como e quanto se deve irrigar a cultura. O modelo adotado nesta pesquisa estabelece a quantidade evapotranspirada pela planta durante o dia, permitindo que um controlador fuzzy possa otimizar a irrigação ao vegetal no abrigo.

Todos os resultados apresentados neste trabalho foram determinados através de um microcomputador, com processador Pentium, tendo sido usado para o

processamento dos dados o software Excel, licenciado para o Laboratório Didático de Informática da Universidade Estadual Paulista campus de Botucatu.

4.2 Métodos

4.2.1 Modelo Fuzzy para Obtenção do Fluxo de Calor Latente

O modelo fuzzy adotado, tem três variáveis de entrada: O saldo da radiação (R_n), o fluxo de calor no solo (G) e a temperatura ambiente (T). Este modelo está baseado no balanço da energia para a determinação do saldo da radiação.

De acordo com a equação 11, o valor de R_n é função de G e LE é também função do fluxo de calor sensível (H). Como os fluxos de calor latente e sensível não são medidos por equipamentos, o método da razão de Bowen estima a relação entre essas variáveis, representada por β , de acordo com a equação 12, em que β é função da temperatura e da pressão de saturação do vapor d'água. A temperatura é medida através de termopares instalados em dois níveis no interior do ambiente protegido e a pressão de saturação de vapor d'água é decorrente de cálculos matemáticos cuja fórmula (equação 15) é definida também a partir da temperatura ambiente; assim sendo o modelo adota, como variável de entrada a temperatura medida a 1,50 m, com relação ao solo, valor que melhor expressa a temperatura ambiente, em substituição à razão β .

De acordo com os conceitos da Teoria Fuzzy, discutidos no capítulo anterior, o esquema do modelo matemático fuzzy para o cálculo do calor latente (LE) é apresentado a seguir, na Figura 22:

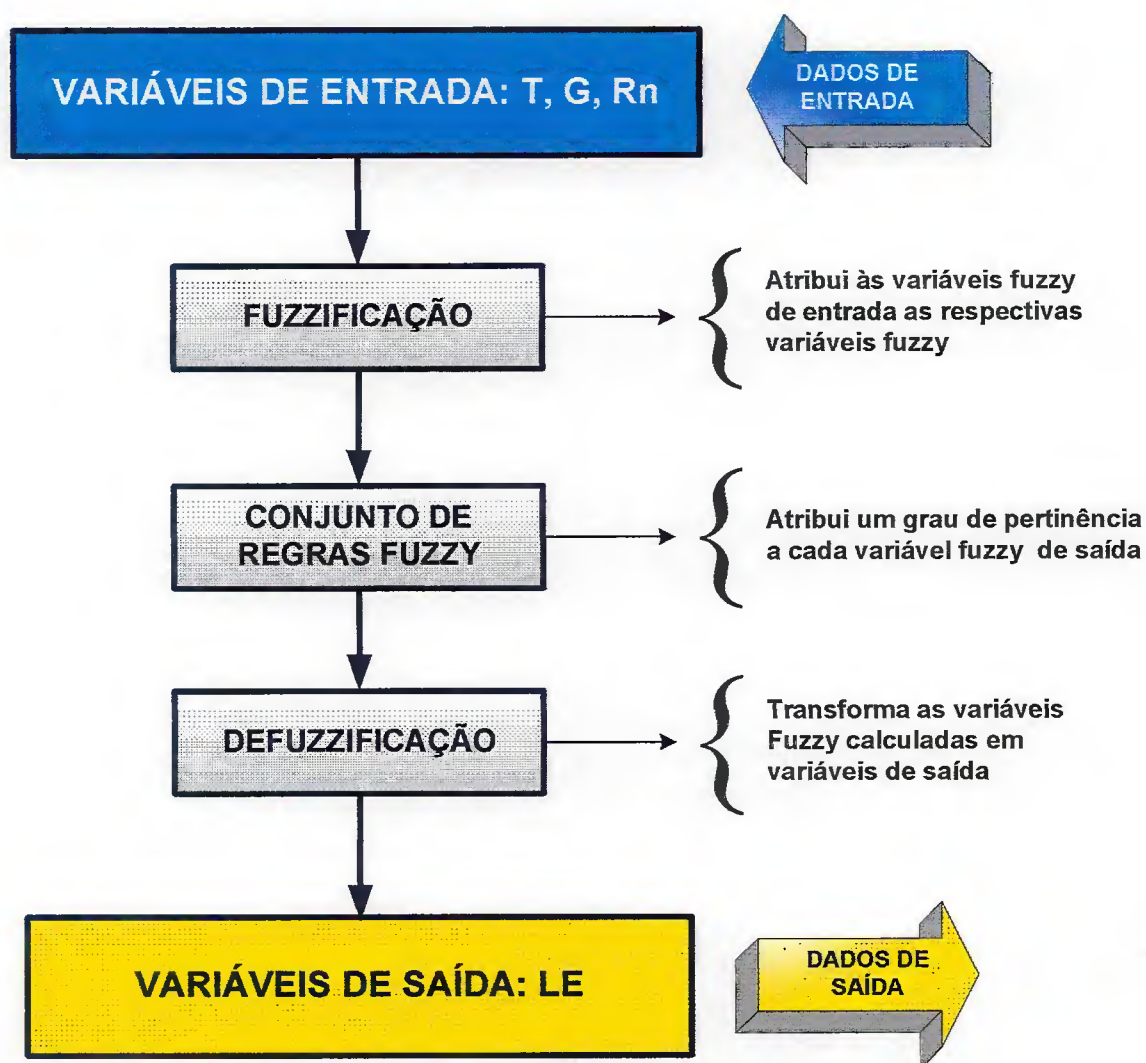


Figura 22 -Modelo Fuzzy para a determinação do fluxo de calor latente

4.2.2 Fuzzyficação

Os valores extremos estabelecidos para R_n , G , T e LE foram definidos com base nos dados obtidos na literatura para diversas culturas, sendo adotados os valores máximos, para proporcionar ao modelo uma ampla abrangência em ensaios para ambientes protegidos.

A radiação global que incide em Botucatu é de 42,63 MJ/m².dia, considerando-se que a transmissividade da cobertura plástica é de 80% teríamos tão somente 34 MJ/m².dia da radiação incidente. De acordo com dados encontrados para diversas culturas, o saldo da radiação máxima para esta região chega a 58%, que representa um valor de 20,0 MJ/m².dia, sendo este o valor máximo adotado para o saldo da radiação. Para o conjunto de valores fuzzy de R_n, o modelo adota então o intervalo entre zero e 20 MJ/m².dia.

A relação entre o saldo da radiação com o fluxo de calor latente, é um fator importante para se avaliar o peso dessa variável com relação as demais (fluxo de calor no solo e temperatura), na equação do balanço da energia. Esta relação é um dos pilares do modelo proposto. É ela que auxilia na definição dos limites do modelo, para a determinação do grau de pertinência.

O fluxo de calor latente é a maior partição dentre as variáveis de R_n, da equação 11, chegando a 90%, o que decorre um valor máximo de 18 MJ/m².dia, ou seja, os extremantes do conjunto fuzzy para LE ficam no intervalo de zero a 18 MJ/m².dia.

O fluxo de calor no solo pode atingir os valores máximos próximos a 15%, sendo que, dependendo das condições climáticas, este pode se apresentar com déficit ou saldo positivo no valor de R_n, portanto o diagrama dos conjuntos fuzzy para G, se apresentam com variações de negativa a positiva. Desta feita o fluxo de calor no solo tem variação entre -3 MJ/m².dia a 3 MJ/m².dia.

A temperatura, terceira variável utilizada no modelo fuzzy, varia em torno de 0°C a 40°C, sendo que os valores considerados ideais para o cultivo em ambientes protegidos não climatizados estão no intervalo compreendido entre 15°C a 30°C.

Definido o limite superior e inferior de R_n, G e T, os intervalos são estabelecidos a partir de um número de conjuntos fuzzy adotados. O refinamento dos intervalos torna o modelo mais preciso; entretanto uma quantidade excessiva de intervalos tem demonstrado que o modelo pode ficar um tanto "cansativo" (Cruz,2001).

Como o modelo correlaciona variáveis de iguais unidades ou dependentes entre si, foi estabelecido um intervalo de nove valores para todas as variáveis de entrada como à de saída os quais estão apresentados nas figuras 23, 24 e 25.

O quadro 3 especifica a nomenclatura para as grandezas de entradas e saídas utilizadas no modelo fuzzy, de acordo com os nove valores adotados, que tem os seus

limites estabelecidos desde um valor mínimo até um valor máximo e seus respectivos valores intermediários.

Quadro 3 - Nomenclatura e símbolos para os conjuntos fuzzy

CONJUNTOS FUZZY	SÍMBOLO
Mínimo	Mi
Muito Baixo	MB
Baixo	B
Pouco Baixo	PB
Médio	M
Pouco Alto	PA
Alto	A
Muito Alto	MA
Máximo	Mx

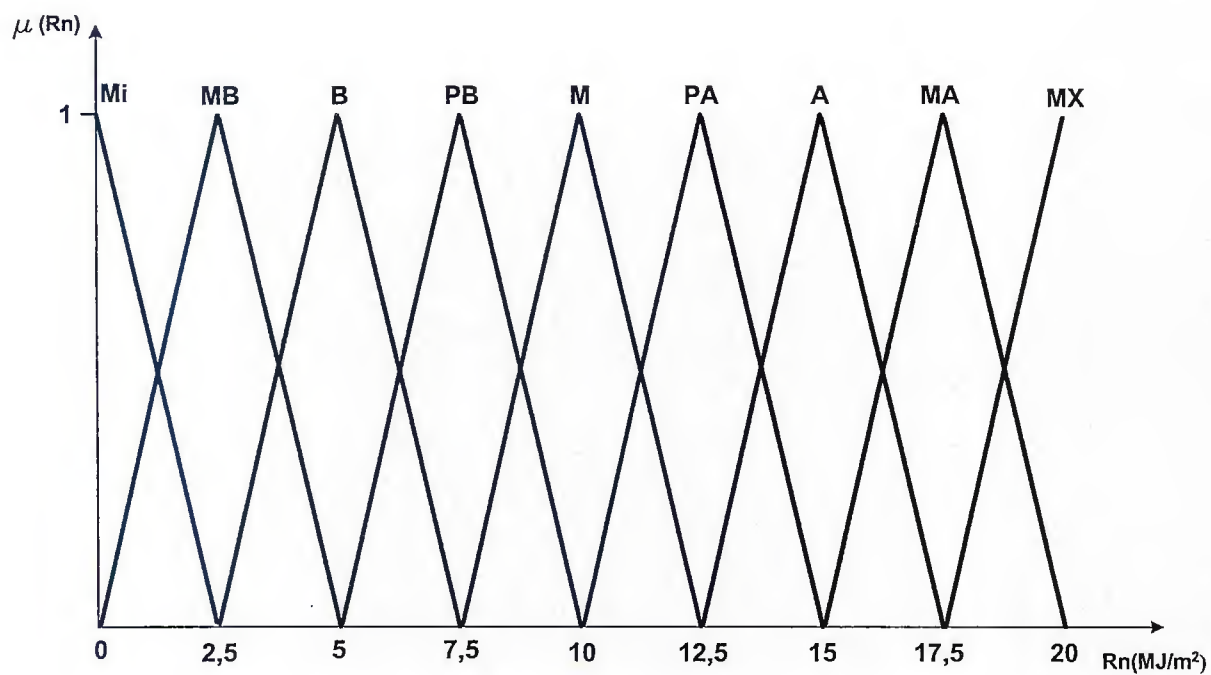


Figura 23 - Conjuntos fuzzy para o saldo da radiação

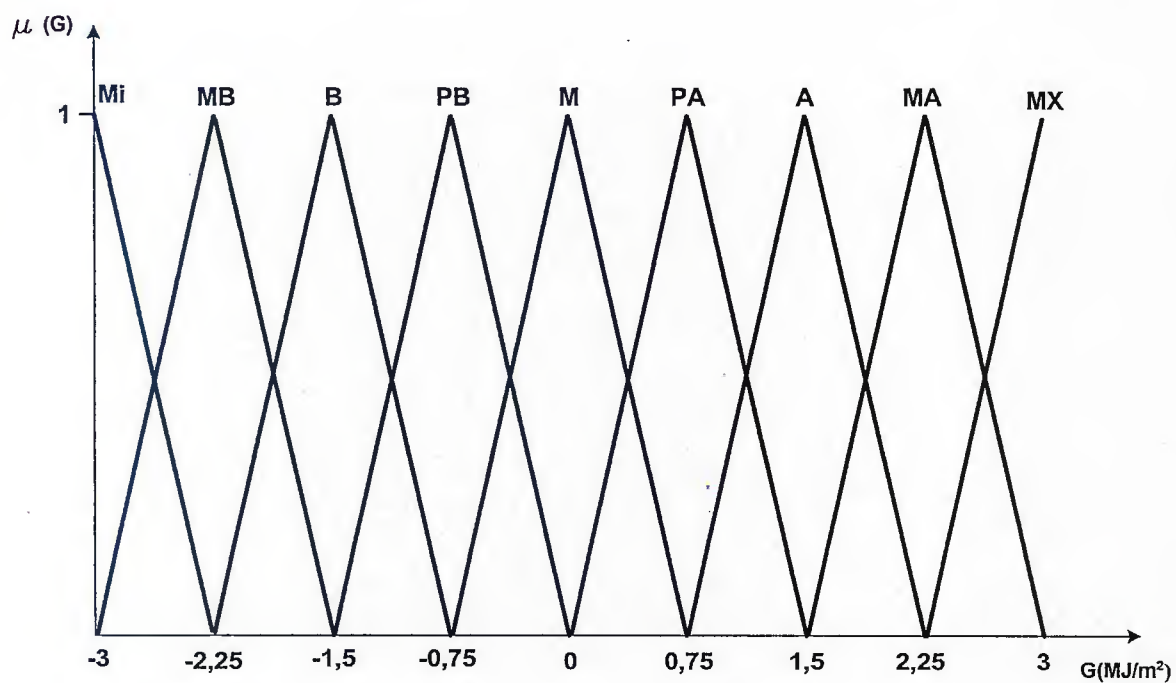


Figura 24 - Conjuntos fuzzy para o fluxo de calor no solo

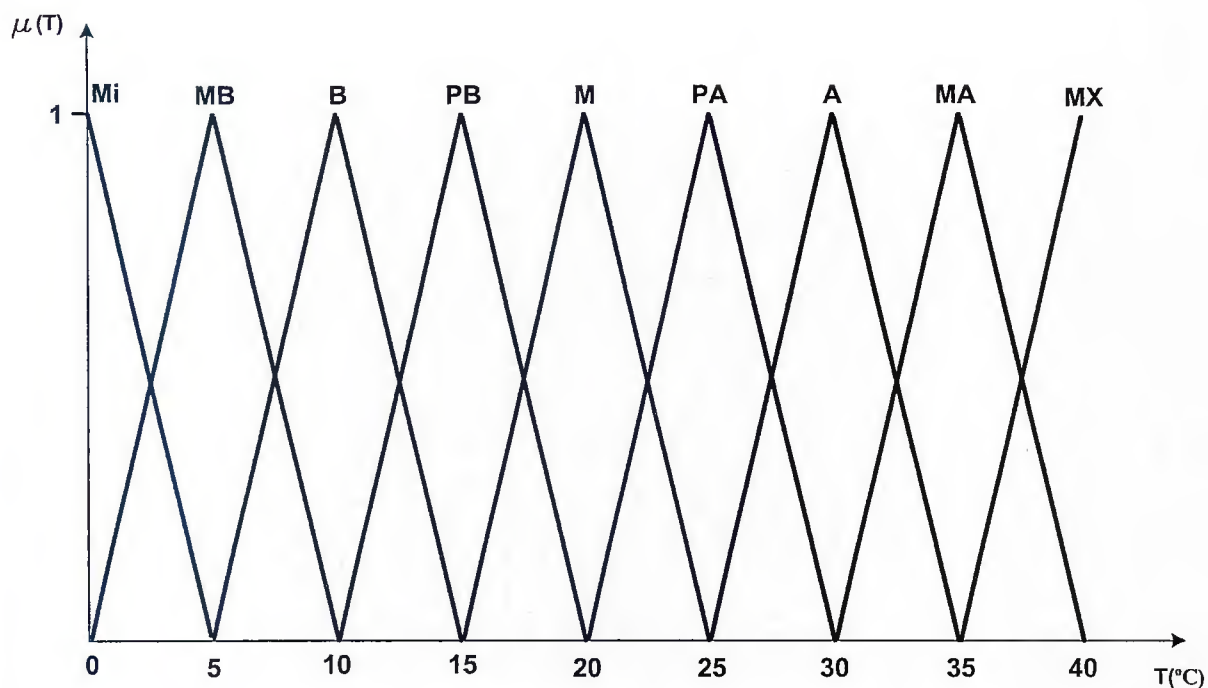


Figura 25 - Conjuntos fuzzy para a temperatura do ar

4.2.3 Determinação dos Conjuntos Fuzzy

A Teoria Fuzzy estabelece que cada elemento do conjunto fuzzy possui um grau de pertinência (μ), determinado em função dos índices de identificação do intervalo, com a sua respectiva variável, o qual representa o valor verdade ou pertinência do elemento dentro do conjunto, que demonstra a correlação da grandeza dentro de cada intervalo de variação onde ela se localiza. Este grau de pertinência tem valor variável entre o intervalo dos números reais $[0,1]$.

De acordo com as figuras 23, 24 e 25 cada elemento de R_n , G e T pertence a dois conjuntos fuzzy distintos e possui grau de pertinência relacionados a cada um desses conjuntos que são denotados por (μ) e (μ') onde μ' é o complementar de μ . Sendo o grau de μ determinado através do conjunto fuzzy mais à esquerda do elemento e μ' mais à direita deste.

Definidos os limites superiores e inferiores para R_n , G e T , bem como a amplitude dos intervalos de variação destas grandezas, os índices de identificação obtidos

através de um processo de linearização, e respectivos graus de pertinência dos conjuntos fuzzy, foram determinados como descrito a seguir: As variáveis R_n e T , tem a mesma quantidade de intervalos, com a origem de valor zero. Portanto, a determinação dos índices e graus de pertinência é semelhante a essas variáveis.

O valor dos índices de identificação (K) e (I), respectivamente, para R_n e T , considerados inteiros e sem arredondamento, é determinado através de uma equação que estabelece o produto da variável em questão por $(n-1)$ graus de liberdade, onde n é o número de intervalos definidos, somado ao máximo valor que a variável pode atingir. O valor encontrado é dividido por esse valor máximo que normaliza a equação dando um valor adimensional para o índice.

Para a determinação do grau de pertinência o valor é encontrado através do produto do valor da amplitude do intervalo estabelecido para cada conjunto fuzzy da variável em questão, multiplicado pelo valor do índice determinado anteriormente e subtraído do valor dessa variável. Ao valor determinado divide-se pelo valor da amplitude do intervalo do conjunto fuzzy estabelecido para a variável, tendo-se um valor em percentagem. Para o cálculo do complemento μ' subtrai-se da unidade o valor calculado para μ .

Para a determinação do índice de identificação e grau de pertinência para R_n , o valor de n é nove e o máximo valor que esta variável pode atingir é 20 MJ/m^2 , de acordo com o que já foi discutido anteriormente. Assim as equações ficam definidas do seguinte modo:

$$K = \text{int} \left(\frac{8xR_n + 20}{20} \right) \quad (18)$$

$$\mu(R_n) = \left(\frac{2,5xK - R_n}{2,5} \right) \quad (19)$$

$$\mu'(R_n) = 1 - \mu(R_n) \quad (20)$$

Para a determinação do índice de identificação e grau de pertinência para T, o valor de n é nove e o máximo valor que esta variável pode atingir é 40°C, de acordo com o que já foi discutido anteriormente. Assim as equações ficam definidas do seguinte modo:

$$I = \text{int}\left(\frac{8xT + 40}{40}\right) \quad (21)$$

$$\mu(T) = \left(\frac{5xI - T}{5}\right) \quad (22)$$

$$\mu'(T) = 1 - \mu(T) \quad (23)$$

Para a variável G o procedimento na determinação das equações difere, em parte, do procedimento anteriormente descrito para Rn e T, pois os valores extremos de G são simétricos, sendo zero o valor médio dessa variável para os seus respectivos conjuntos fuzzy. Para a determinação do índice de identificação (J), considerado também inteiro e sem arredondamento, toma-se o valor de G somado ao produto de n intervalos a partir do valor médio (zero), ou seja, n=5 multiplicado pelo valor da amplitude do intervalo definido para os conjuntos de G, que é 0,75, tendo-se como resultado o valor 3,75. Finalmente divide-se o resultado encontrado por esta mesma amplitude para normalizar o valor de J (Equação 24).

Para a determinação de $\mu(G)$ (Equação 25), o procedimento se dá através do produto do índice de linearização, subtraído da soma do valor médio de G com o máximo valor que este possa assumir, ou seja, 3 MJ/m².dia. O valor encontrado é dividido pela amplitude do intervalo definido para os conjuntos fuzzy dessa variável, tendo-se finalmente o resultado em percentagem.

O cálculo do complementar $\mu'(G)$ (Equação 26) é determinado pela diferença do valor de $\mu(G)$ com a unidade. Assim as equações para o índice de identificação, grau de pertinência e respectivo complementar de G estão estabelecidos nas equações abaixo:

$$J = \text{int} \left(\frac{G + 3,75}{0,75} \right) \quad (24)$$

$$\mu(G) = \left(\frac{0,75xJ - G - 3}{0,75} \right) \quad (25)$$

$$\mu'(G) = 1 - \mu(G) \quad (26)$$

4.2.4 Cálculo das Regras Fuzzy

Para cada par ordenado de $R_n \times G$ e $(R_n \times G) \times T$, há uma resposta dada pelo fluxo de calor latente que interage no sistema planta e meio ambiente. Tendo em vista os resultados apresentados na literatura sobre o comportamento das variáveis estudadas, a tabela fuzzy dá o maior peso ao saldo da radiação, com relação ao fluxo de calor latente, pois é essa a configuração que melhor representa o comportamento da absorção de calor pela planta, de acordo com a intensidade de R_n e G envolvidos no interior da estufa.

No quadro 4 observamos o comportamento da interação entre as variáveis R_n e G , que deve ser a mesma configuração para a correlação entre $(R_n \times G)$ e T .

Quadro 4 - Correlação entre as variáveis Rn e G

$\begin{matrix} Rn \\ G \end{matrix}$	Mi	MB	B	PB	M	PA	A	MA	Mx
Mi	Mi	MB	B	PB	M	PA	A	MA	Mx
MB	Mi	MB	B	PB	M	PA	A	MA	Mx
B	Mi	MB	B	PB	M	PA	A	MA	Mx
PB	Mi	MB	B	PB	M	PA	A	MA	Mx
M	Mi	MB	B	PB	M	PA	A	MA	Mx
PA	Mi	MB	B	PB	M	PA	A	MA	Mx
A	Mi	MB	B	PB	M	PA	A	MA	Mx
MA	Mi	MB	B	PB	M	PA	A	MA	Mx
Mx	Mi	MB	B	PB	M	PA	A	MA	Mx

As combinações utilizadas para os seis graus de pertinências estão assim especificadas:

$$\{ \mu(T), \mu'(T) \} \text{ e } \{ \mu(G), \mu'(G) \} \text{ e } \{ \mu(Rn), \mu'(Rn) \}$$

Segundo a Teoria Fuzzy, a propriedade adequada para este caso é a associativa dada pela Equação 27:

$$(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C) \quad (27)$$

Assim foram efetuadas as seguintes combinações :

$$\mu(T) \cap \mu(G) \cap \mu(Rn)$$

Utilizou-se a regra "mínimo", que é a regra que determina a interseção das variáveis num conjunto fuzzy. Assim, para cada combinação entre os seis graus de pertinências, concomitantemente, o modelo indica o menor valor, denotado por μ_n , onde n varia de 1 até a enésima combinação. No caso, para o modelo proposto, a variação é de 1 até 8, abaixo especificado:

$$\begin{aligned}\mu_1 &= \min \{ \mu(Rn), \mu(G), \mu(T) \} \\ \mu_2 &= \min \{ \mu(Rn), \mu'(G), \mu(T) \} \\ \mu_3 &= \min \{ \mu(Rn), \mu(G), \mu'(T) \} \\ \mu_4 &= \min \{ \mu(Rn), \mu'(G), \mu'(T) \} \\ \mu_5 &= \min \{ \mu'(Rn), \mu(G), \mu(T) \} \\ \mu_6 &= \min \{ \mu'(Rn), \mu'(G), \mu(T) \} \\ \mu_7 &= \min \{ \mu'(Rn), \mu'(G), \mu'(T) \} \\ \mu_8 &= \min \{ \mu'(Rn), \mu(G), \mu'(T) \}\end{aligned}$$

Quadro 5 - Nomenclatura e símbolos para os conjuntos fuzzy da correlação Rn,G e T que indicam os resultados obtidos para o fluxo de calor latente

CONJUNTOS FUZY	SÍMBOLO	VALOR DE LE
Mínimo	Mi	0
Muito Baixo	MB	2,25
Baixo	B	4,5
Pouco Baixo	PB	6,75
Médio	M	9,0
Pouco Alto	PA	11,25
Alto	A	13,5
Muito Alto	MA	15,75
Máximo	Mx	18,0

4.2.5 Defuzzyficação

A defuzzyficação determina o valor do calor latente que é definido a partir da fórmula do centro de massa que correlaciona os valores calculados para as regras fuzzy ou o grau de pertinência. O programa calcula o somatório dos produtos de cada μ_n pelo valor de LE correspondente ao respectivo conjunto fuzzy, indicado no quadro 5. O resultado é dividido pela soma dos valores de μ_n , conforme a equação 28, dando finalmente o valor de LE para o período considerado.

O cálculo de LE, através do modelo fuzzy, é baseado na equação que determina o centro de massa de uma distribuição discreta, sendo dado pela Equação 28:

$$LE = \frac{LE_1(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4) + LE_2(\mu_5 + \mu_6 + \mu_7 + \mu_8)}{\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_8} \quad (28)$$

LE₁ e LE₂ são os valores relativos ao intervalo em que o valor de R_n está contido.

Encontrado o valor de LE este pode ser convertido em quantidade de água irrigada uma vez que a mudança de estado físico da água de líquido para vapor demanda um consumo de energia da ordem de 590 cal/g. É este valor que propicia a transformação de LE dado em MJ/m² para a evapotranspiração em mm de água; resultando que para cada MJ/m² equivale a 2,470212 mm de água.

Calculado o valor da evapotranspiração diária é possível determinar a vazão necessária, ao suprimento hídrico da cultura, bastando para isso transformar o valor encontrado em mm de H₂O por dia para l/h pois, cada valor de ET, equivale a 1/24. Ou seja, divide-se o valor de ET por 24, para se obter o valor da vazão em l/h, indicado na tabela 2 e figura 26.

Para se verificar a viabilidade do modelo fuzzy, utilizou-se os dados de um experimento realizado no cultivo da rúcula (*Eruca sativa*), cujos valores estão

especificados na tabela 1. Esses dados foram utilizados em dois softwares: o Ball Juggler do programa Matlab para a Lógica Fuzzy e o Windows Excel.

Dos testes realizados entre os softwares, optou-se pelo Windows Excel, por apresentar a melhor resolução, decisão essa justificada no capítulo dos resultados e discussões. Ressalte-se, também, que este programa otimiza os cálculos intrínsecos ao modelo; propicia a manutenção contínua do sistema e ainda oferece as seguintes vantagens:

- Pode ser executado em uma única planilha deste software;
- A linguagem de programação é muito simples;
- É acessível para o operador que tenha o mínimo de conhecimento deste aplicativo;
- Facilidade de interação com os mais diversos tipos de periféricos existentes no mercado;
- Há uma grande viabilidade na sua utilização por ser um software de uso corrente em todo o território nacional e com isto há garantia de suporte local.

Através da tela do computador, na janela do Excel (Figura 26), o operador pode inserir os valores das três variáveis de entrada no modelo fuzzy. Com esses valores o programa calcula os graus de pertinência e seus respectivos complementares, fazendo a associação entre eles, segundo a propriedade da interseção da Teoria Fuzzy.

Os valores máximo e mínimo, de referência de LE, para cada conjunto fuzzy, definido a partir da correlação com os valores referentes ao saldo da radiação, são multiplicados pelo valor do resultado de cada associação dos graus de pertinência. Finalmente é encontrado o valor de LE, a partir da média entre seus valores.

DADOS DE ENTRADA

Rn	G	T
7,05	2,2	25,8

Índice das Variáveis			Grau de Pertinência					
K	J	I	u(Rn)1	u(Rn)2	u(G)1	u(G)2	u(T)1	u(T)2
3	7	6	0,18	0,82	0,07	0,93	0,84	0,16

Conjunto	Símbolo	Valor LE	Valor Rn	Resultados da Simulação					
Mínimo	Mi	0,00	0,00	0,18	0,07	0,84	0,07	6,75	0,45
Muito Baixo	MB	2,25	2,50	0,18	0,93	0,84	0,18	6,75	1,22
Baixo	B	4,50	5,00	0,18	0,07	0,16	0,07	6,75	0,45
Pouco Baixo	PB	6,75	7,50	0,18	0,93	0,16	0,16	6,75	1,08
Médio	MB	9,00	10,00	0,82	0,07	0,84	0,07	4,5	0,30
Pouco Alto	PA	11,25	12,50	0,82	0,93	0,84	0,82	4,5	3,69
Alto	A	13,50	15,00	0,82	0,07	0,16	0,07	4,5	0,30
Muito Alto	MA	15,75	17,50	0,82	0,93	0,16	0,16	4,5	0,72
Máximo	Mx	18,00	20,00				1,59		8,21

Valor LE	Valor ET	Vazão
6,08	2,46	0,1026

Figura 26 - Planilha de simulação - Modelo Fuzzy

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para se determinar o valor de LE as variáveis de entrada, R_n , G , T , foram inseridas no programa de acordo com o modelo fuzzy com valores médios diários, sendo essas variáveis medidas por sensores instalados no abrigo. Portanto, como são variáveis reais que permitem ao controlador fuzzy atuar diretamente sobre esses dados, o programa então determinou de modo direto o valor do volume de água para a irrigação da cultura, diariamente, a partir do valor do fluxo de calor latente, obtido pelo método proposto por este trabalho.

Para a implementação do modelo fuzzy foram testados dois softwares: o Ball Juggler do programa Matlab para a Lógica Fuzzy e o Windows Excel. Os resultados mostraram que a correlação entre o calor latente calculado através do método da razão de Bowen e pelo modelo fuzzy, fornecido pelo software Matlab, não foram significativos, isto porque o programa do Matlab não leva em conta os valores do grau de pertinência para cada variável, considerando tão somente as regras fuzzy para as variáveis envolvidas no modelo. Entretanto, os resultados encontrados através do software Excel apresentaram alta correlação

entre o modelo proposto e o modelo clássico de Bowen. São esses os valores que estão apresentados e discutidos nesse capítulo.

Os valores obtidos para o fluxo de calor latente, dado em $\text{MJ/m}^2.\text{dia}$, determinados a partir do saldo da radiação, do fluxo de calor latente, dados em $\text{MJ/m}^2.\text{dia}$, e ainda da temperatura ambiente em $^{\circ}\text{C}$, pelo método de Bowen e pelo modelo fuzzy, estão plotados no gráfico da Figura 27 e apresentados no Tabela 1.

Tabela 1- Demonstrativo dos valores obtidos para o fluxo de calor latente(LE) determinados pelo método de Bowen e pelo modelo fuzzy

DATA	Rn	G	T	LE Bowen	LE Fuzzy
19/09/2002	7,05	2,2	25,8	4,03	6,08
20/09/2002	2,6	0,02	21,0	2,03	2,50
21/09/2002	1,5	0,34	18,9	0,88	1,21
22/09/2002	0,34	-0,84	15,4	0,91	0,66
23/09/2002	3,4	0,41	19,4	2,5	3,23
24/09/2002	4,52	0,07	16,6	3,45	2,77
25/09/2002	0,05	-0,09	14,0	0,08	0,14
26/09/2002	7,5	1,34	20,3	5,85	4,50
27/09/2002	8,4	0,57	20,2	7,2	7,68
28/09/2002	8,28	1,12	22,0	6,49	7,67
29/09/2002	8,47	0,9	24,0	7,73	7,78
30/09/2002	7,83	0,26	24,8	9,22	7,29
01/10/2002	0,39	-0,2	20,7	0,56	0,71
02/10/2002	5,1	0,07	23,0	4,72	4,77
03/10/2002	7,71	-0,12	22,2	7,97	7,21
04/10/2002	9,5	0,31	24,8	9,62	8,31
05/10/2002	9,12	0,13	24,9	10,67	8,11
06/10/2002	8,96	0,01	24,0	11,58	8,05
08/10/2002	0,07	-0,08	21,3	0,56	0,19

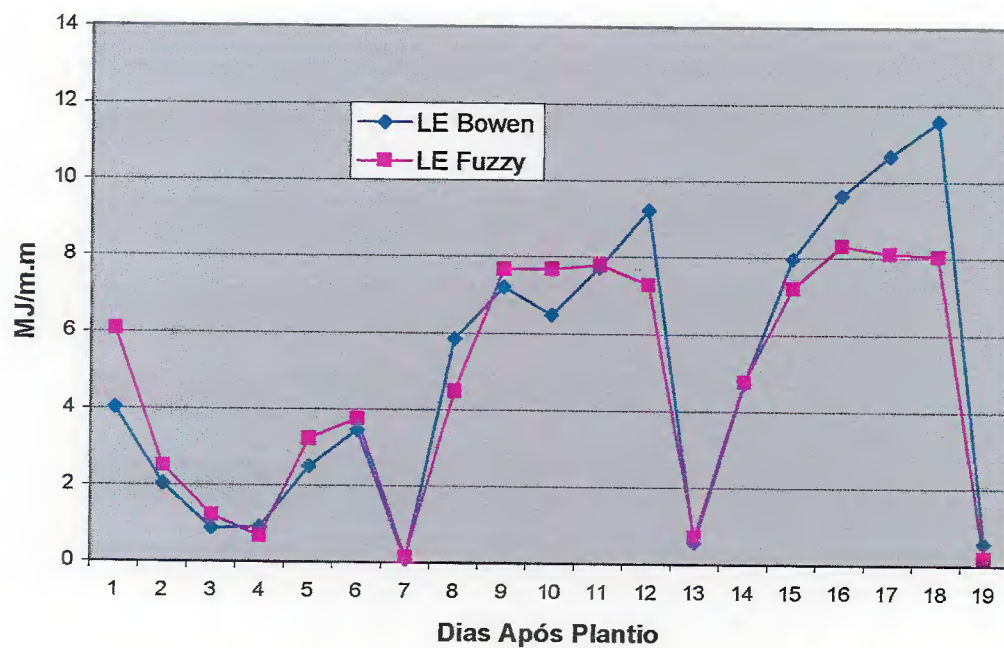


Figura 27 - Curvas de LE determinadas pelo Método de Bowen e pelo modelo fuzzy

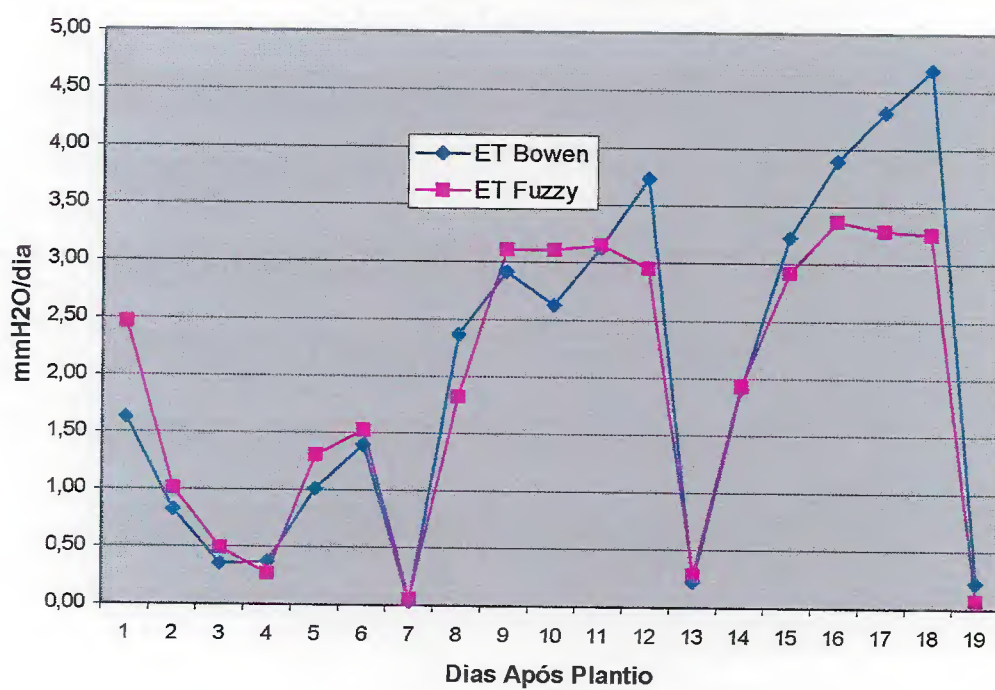


Figura 28 Curvas de ET determinadas pelo Método de Bowen e pelo modelo fuzzy

Decorrente dos valores obtidos para LE, determinamos os valores da evapotranspiração dados em mm H₂O ao dia, determinando assim o valor da lâmina de água de irrigação para a cultura, por m²; a razão entre Rn e LE e a vazão em l/h para os métodos de Bowen e de fuzzy que se encontram demonstrados no Tabela 2 e Figura 28, 29 e 30.

Tabela 2 - Demonstrativo dos valores obtidos para a evapotranspiração (ET); para a razão Rn/LE e à vazão derminados pelo método de Bowen e pelo modelo fuzzy

DATA	METODO DE BOWEN			MODELO FUZZY		
	ET	Rn/LE	Vazão	ET	Rn/LE	Vazão
19/09/2002	1,63	1,75	0,07	2,46	1,16	0,10
20/09/2002	0,82	1,28	0,03	1,01	1,04	0,04
21/09/2002	0,36	1,70	0,01	0,49	1,34	0,02
22/09/2002	0,37	0,37	0,02	0,27	0,52	0,01
23/09/2002	1,01	1,36	0,04	1,31	1,05	0,05
24/09/2002	1,40	1,31	0,06	1,53	1,20	0,06
25/09/2002	0,03	0,63	0,00	0,06	0,36	0,00
26/09/2002	2,37	1,28	0,10	2,82	1,67	0,08
27/09/2002	2,91	1,17	0,12	3,11	1,09	0,13
28/09/2002	2,63	1,28	0,11	3,10	1,08	0,13
29/09/2002	3,13	1,10	0,13	3,15	1,09	0,13
30/09/2002	3,73	0,85	0,16	2,95	1,07	0,12
01/10/2002	0,23	0,70	0,01	0,29	0,55	0,01
02/10/2002	1,91	1,08	0,08	1,93	1,07	0,08
03/10/2002	3,23	0,97	0,13	2,92	1,07	0,12
04/10/2002	3,89	0,99	0,16	3,36	1,14	0,14
05/10/2002	4,32	0,85	0,18	3,28	1,12	0,14
06/10/2002	4,69	0,77	0,20	3,26	1,11	0,14
08/10/2002	0,23	0,13	0,01	0,08	0,37	0,00

Dado que o fluxo de calor latente determinado pelos métodos de Bowen e fuzzy estarem sujeitos a erros experimentais ponderáveis, o índice de correlação linear (r) é o mais indicado para verificar a correlação entre os dados obtidos pelos respectivos métodos.

A análise estatística comparativa dos resultados da tabela 1, para LE determinado pelo método de Bowen e LE pelo modelo fuzzy desenvolvido, apresentou o valor de 0,90 para o coeficiente de correlação r , indicando que as diferenças encontradas não foram significativas para 0,01% de probabilidade de acordo com o teste t realizado para r , havendo 94% de probabilidade dos valores de LE estarem correlacionados para os dois métodos.

Ao fluxo de calor latente converge a maior partição do saldo da radiação, já constatado ser um padrão de comportamento, com relação às demais variáveis pelo método de Bowen, já discutido no capítulo de Materiais e Métodos.

Quando analisamos os dados obtidos pela relação entre o saldo da radiação com o fluxo de calor latente, para o método de Bowen e modelo fuzzy (Tabela 2), verificamos que os mesmos também apresentam uma correlação significativa para 99,9% dos dados, tendo-se encontrado para r o valor de 0,57 que indica uma probabilidade de 71% dos valores das razões obtidas estarem correlacionados.

Na figura 29 observamos que as curvas da razão entre o saldo da radiação e do fluxo de calor latente para o método de Bowen e para o método fuzzy, tem uma correlação muito próxima como ocorre com as curvas das figuras 27 e 28. A importância de correlacionar as razões de R_n com LE é mostrar o quanto é forte a interação entre o fluxo de calor latente com o saldo da radiação para os dois métodos, tendência esta que foi decisiva para estabelecermos as regras de pertinência para o método utilizado através da Lógica Fuzzy.

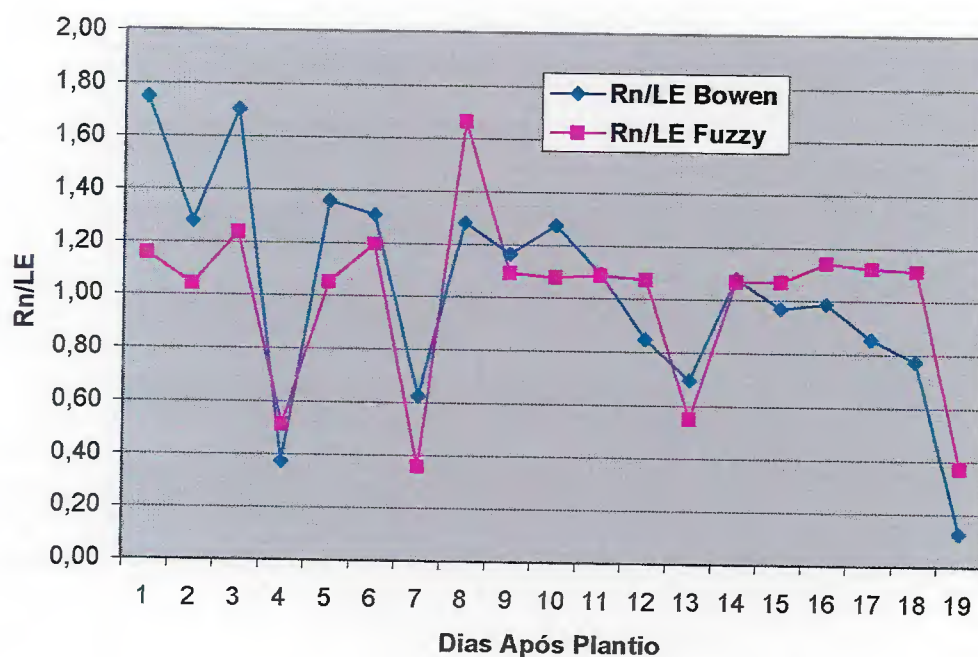


Figura 29 - Curvas da razão entre o saldo da radiação com o fluxo de calor latente para os métodos de Bowen e fuzzy.

Os valores estimados de LE apresentam variações semelhantes aos valores medidos de Rn para os dois métodos, inclusive nos dias em que LE superou Rn, fenômeno este ocorrido em 15% dos dados estimados.

Valores de $LE > Rn + G$ pelo método Fuzzy se confirmaram com o método de Bowen, indicando incremento de uma fonte adicional de calor no processo de mudança de estado físico da água.

O fluxo de calor latente equivalente em mm de água pela evapotranspiração foi de 38,88 mm/ciclo para o método de Bowen e de 36,38 mm/ciclo para o método do modelo fuzzy, havendo portanto um decréscimo próximo a 1% do modelo clássico em relação ao modelo proposto no presente trabalho, mostrando que a diferença não é significativa, em percentagem, entre os dois métodos.

Nas razões de fracionamento do saldo da radiação (Rn), com os fluxos de calor latente (LE) apresentados na tabela 2, para os dois métodos, observamos que, em média, Rn foi consumido em 95,3% para LE no método da razão de Bowen e de 91% para LE

no método do modelo fuzzy, mantendo-se praticamente as mesmas relações, o que demonstra a validade do método proposto.

Outra observação que pode ser verificada é quanto à evapotranspiração que tende a crescer à medida que o tamanho da área foliar da cultura também cresce. Esta tendência é verificada na determinação da LE pelo método de Bowen, perfeitamente constatada pelos valores determinados pelo modelo adotado neste trabalho.

Dos resultados obtidos chega-se à conclusão que praticamente não há diferença significativa entre o método de Bowen e o método baseado no modelo fuzzy.

A grande vantagem do modelo desenvolvido é que o mesmo pode ser implementado através de um programa computacional em conjunto com um sistema de acionamento e controle, não havendo portanto necessidade de um operador consultar e monitorar outros equipamentos, como tensiômetros por exemplo, para tomar a decisão da quantidade de água a ser irrigada na cultura.

Associado ao controle fuzzy pode ser instalado um sistema de supervisão, para que o próprio sistema calcule a quantidade de água a ser irrigada. Para isto é necessário que ao sistema estejam instalados sensores de medida das variáveis de entrada do modelo proposto, cujos dados sejam levados ao computador, por exemplo, através de uma placa de aquisição dos dados.

Dependendo do modelo de irrigação adotado para ambientes protegidos (no geral o método usado em ambientes protegidos é o de tubos gotejadores), pode ainda o sistema estabelecer o tempo de irrigação a ser adotado, conhecida a vazão dos tubos.

A Figura 30 mostra a correlação dos valores obtidos para a vazão de água necessária ao suprimento hídrico, de acordo com a tabela 2, para o método da razão de Bowen em comparação com o modelo fuzzy proposto por este trabalho. Observa-se que o valor obtido para o coeficiente de determinação foi de 0,90, estando na faixa considerada de alta correlação, o que comprova a validade do método proposto.

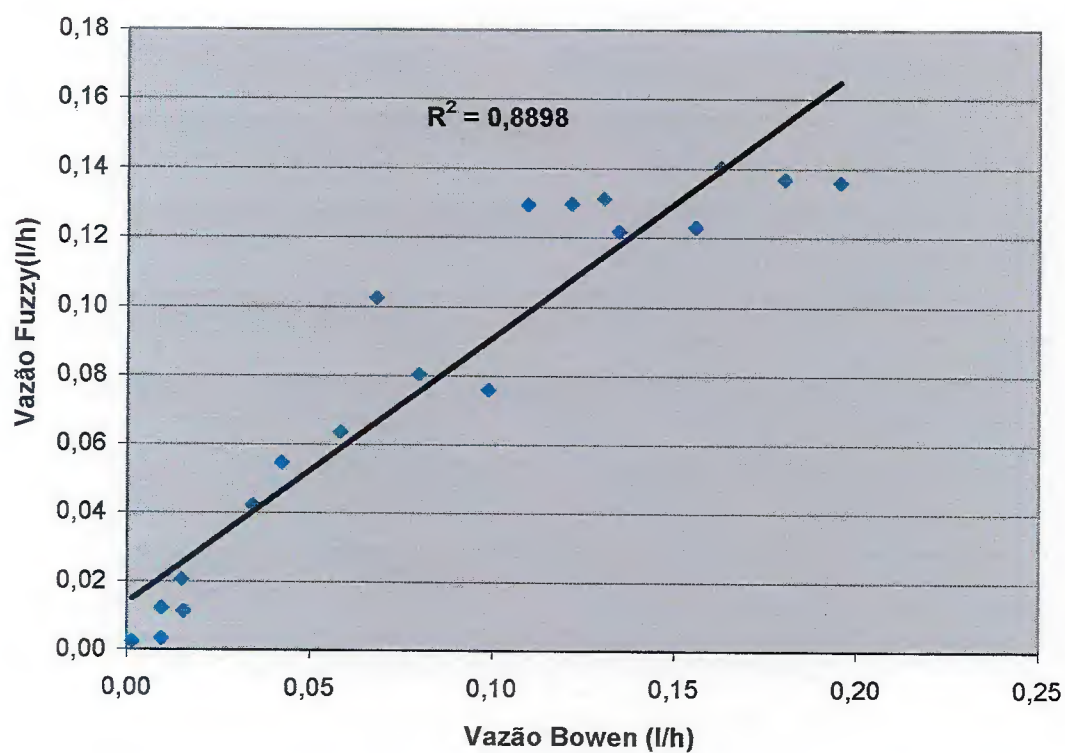


Figura 30 - Relação entre os valores da vazão obtidos para o método de Bowen e o modelo fuzzy.

Alguns autores têm afirmado que a pequena quantidade de dados proporciona uma baixa correlação entre variáveis observadas, porém este fato não se verificou entre os valores estudados para os dois métodos.

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um modelo matemático, a partir da Teoria Fuzzy, que resultasse, através de uma nova metodologia, na determinação do fluxo de calor latente, de forma eficiente e menos complexa que os modelos clássicos, a partir da equação do saldo da radiação, o que foi atingido plenamente.

O modelo foi elaborado para abrigar um espectro amplo dos possíveis valores do fluxo de calor latente, daí que, apesar do modelo ter utilizado dados da cultura da rúcula, para verificar a sua viabilidade, o mesmo pode ser utilizado para quaisquer culturas cultivadas em ambiente protegido.

Como relevância considerando os valores encontrados e as respectivas análises que testaram os resultados obtidos, apresentando um erro médio de 1%, aproximadamente, em comparação com o modelo clássico de Bowen, o modelo desenvolvido possibilita estimar de modo confiável e eficiente o cálculo da quantidade de água necessária para suprir as necessidades hídricas da cultura, através de um sistema de acionamento e

controle, que pode tomar a decisão de irrigar, sem a necessidade do operador consultar as condições climáticas a que está sujeito o sistema.

Outra possibilidade que o modelo prevê é que, se o sistema de controle dos dados estiver interligado a uma estação meteorológica o operador pode consultar as condições impostas à cultura, através do computador, em tempo real, para obter informações com o objetivo de promover ou não a irrigação, sem que o mesmo tenha necessidade de colher os dados e fornecer ao computador.

A relevância do modelo desenvolvido é que, com a perspectiva de determinação da vazão calculada para a irrigação da cultura, decorrente da determinação de LE, o mesmo permite se obter o tempo e o volume necessário para o fornecimento de água ao sistema, possibilitando um desenvolvimento de forma sustentável da atividade agrícola com o uso racional da água e da energia.

Para o perfeito dimensionamento e manejo do cultivo vegetal, propõe-se como necessário a implementação de um sistema de controle da vazão de água para o suprimento do vegetal, com o fim de viabilizar as vantagens decorrentes da proposta primordial do trabalho.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRINTHER. Estufa modelo "AGRI VENLO". Disponível em:

<<http://www.agrinther.com.br/agrinvelo.htm>>. Acesso em: 05 mai. 2003a.

AGRINTHER. Sistema de Ventilação. Disponível em:

<http://www.agrinther.com.br/r_ventilacao.htm>. Acesso em: 27 jan. 2003b.

ALPI, A.; TOGNONI, F. **El cultivo en invernadero**. Lisboa: Presença, 1984. 196p.

ALTROCK, C. V. **Fuzzy logic & Neurofuzzy applications explained**. Prentice: Hall PTR, 1995. 347p.

ANDRÉ, R. G. B.; VISWANADHAN, Y. Radiation balance of soybeans grown in Brazil. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 30, p. 157-73, 1983.

ANDRÉ, R. G. B.; VISWANADHAN, Y. Distribuição de energia numa cultura de soja (*Glycine Max* L.). **Revista Brasileira de Meteorologia**, Brasília, v. 1, n.1, p. 20-37, 1986.

ASSIS, S. V. **Radiação solar em estufas de polietileno, nas orientações norte-sul e leste-oeste**. 1998. 81f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1998.

BERGAMASCHI, H.; OMETTO, J. C.; VIEIRA, H. J. Deficiência hídrica em feijoeiro, II. Balanço de energia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, DF, v. 23, n. 7, p. 745-757, 1988.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e Evapotranspiração**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Agronômicas, 1981. 96p. (Boletim técnico, n.7)

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: Editora Universidade Federal de Viçosa, 1995. 657p.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, New York, v. 27, p. 779-787, 1926.

BUGALHO SEMESDO, C. M. **A instensificação da produção hortícola**. Portugal:Europa-América, 1978. 191p.

BURIOL, G. A.; STRECK, N. A.; PETRY, C. Transmissividade à radiação solar do polietileno de baixa densidade utilizado em estufas. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 1-4, 1995.

BURIOL, G. A. et al. Modificação na temperatura mínima do ar causada por estufas de polietileno transparente de baixa densidade. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, n.1, p. 43-49, 1993.

CAMACHO, M. J. et al. Avaliação de elementos meteorológicos em estufa plástica em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 19-24, 1995.

CEBALLOS, J. C. Et al. Desempenho de heliógrafos e actinógrafos na estimativa de insolação e fluxo direcional. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Brasília, v. 7, n. 2, p. 563-581, 1992.

CERMEÑO, Z. S. **Estufas: Instalação e manejo**. Lisboa: Litexa, 1990. 355p.

CERVELLINI, A.; SALATI, E. Estimativa da distribuição da energia solar no estado de São Paulo. **Bragantia**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 31-40, 1966.

CRUZ, L. F. **Modelo fuzzy para obtenção do tempo de aeração em silos verticais visando reduzir o consumo de energia elétrica**. 2001. 102 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CUNHA, A.R. **Parâmetros agrometeorológicos de cultura de pimentão (*Capsicum annuum* L.) em ambientes protegidos e campo**. 2001. 128 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

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

CUNHA, A. R.; ESCOBEDO J. F.; KLOSOWSKI, E. S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p.735-743, 2002.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 9-16, 1994.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A. Balanço de energia em cultura de milho: estudo de casos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6., 1989. Maceió. **Anais....** São José dos Campos: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1989. p. 417-426.

CURY-LUNARDI, D. M.; CATANEO, A. Estimativas sazonais da radiação solar global em função da insolação para a região de Botucatu-SP. **Cultura Agronômica**, Ilha Solteira, v. 2, n.1, p. 89-97, 1993.

DOORENBOS, J.; KASSAM A. H. **Efeito da Água no Rendimento das Culturas**. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Las necesidades de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 1977. 194p.

ESCOBEDO, J. F.; MELO, J. M. D.; FRISINA, V. A. Radiações solar global e fração global refletida em estufa tipo túnel em cobertura de polietileno. In: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 7, p. 53-58, 1994, Vigo, Espanha. **Anais...** Vigo: Energias Limpas en Progreso, 1994.

FARIAS, J. R. et al. Alterações na temperatura umidade relativa do ar provocadas pelo uso da estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.1, n.1, p. 51-62, 1993.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 26, n. 3, p. 403-410, 1991.

FONTES, I. R. **Sistema de supervisão e controle de irrigação utilizando técnicas de inteligência artificial**. 2003. 226 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

FRISINA, V. A. **Otimização de um albedômetro e aplicação no balanço de radiação e energia da cultura de alface (*Lactuca sativa* L.) no exterior e interior de estufa de polietileno**. 1998. 86 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 1998.

FRITSCHEN, L. J. Miniature net radiometer improvements. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 4, n. 6, p. 525-532, 1965.

FUCHS, M.; TANNER, C. B. Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometry. **Agricultural Meteorology**, New York, v. 7, n. 4, p. 329-334, 1970.

FUNK, J.P. Improved polyethylene-shielded net radiometer. **Review Science Instrumental**, v. 26, p. 267-270, 1959.

FUNK, J. P. Direct measurements of radiative heat exchange of the human body. **Nature**, Washington, v. 201, p. 904-905, 1964.

GALVANI, E. **Avaliação Agrometeorológica do cultivo do pepino (*Cucumis sativus* L.) em ambientes protegido e a campo, em ciclos de outono-inverno e primavera-verão**. 2001. 124 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2001.

GRODZKI, L.; BRENNER, N. L.; SCOTTI, C. A. Estudo do ambiente em estufas plásticas na região de Curitiba, PR. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 9, n. 1, p. 55, 1991.

HUSCHKE, R.E. **Glossary of meteorology**. Boston: American Meteorological Society, 1970. 638 p.

IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**. New York: Academic Press, 1980. 390p.

KLAR, A. E. Critérios para escolha do método de irrigação. **Irriga**, Botucatu, SP, v. 5, n. 1, p. 52-82, 2000.

KNUTSON, G. D. **Pumping Energy Requirements for Irrigation in California**. Sacramento: California Department of Food and Agriculture, 1977. 56 p.

KURATA, K. Role of reflection in light transmissivity of greenhouse. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 52, n.4, p. 319-331, 1990.

LEE, C. C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controllers - Part I and II. **IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics**, v. 20, n. 2, p. 404-435, 1990.

LEME, K. B. Irrigação vale a pena. **Ciência e Prática**. Viçosa, v. 1, n. 5, p. 1-3, 2002. Disponível em: <http://www.gtacc.com.br/revista5.html>. Acesso em: 13 set. 2004.

MARTINS, G. **Uso de casa-de-vegetação com cobertura plástica na tomaticultura de verão**. 1992. 65 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1992.

MASTEKBAYEVA, G. A.; KUMAR, S. Effect of dust on the transmittance of low density polyethylene glazing in a tropical climate. **Solar energy**. Flórida, v. 68, n. 2, p. 135-141, 2000.

MEDEIROS, S. L. P. **Trocas verticais de energia e vapor d'água em cultura de milho** (*Pennisetum americanum*. L. Leek). 1990. 112p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1990.

- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment in the state and movement of water living organism. In: SYMPOSIUM OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL BIOLOGY, 19., San Diego. **Proceedings...** San Diego: Symp. Soc. Exp. Biol., 1965, p. 205-234.
- MONTERO, J. I. et al. Climate under plastic in the Almeria area. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 170, p. 227-234, 1985.
- NASCIMENTO, F. J. L.; TUBELIS, A. Estimativa do poder evaporante do ar pela evaporação Piche em Botucatu-SP. **Científica**, São Paulo, v. 9, n.1, p. 13-19. 1981.
- NEVILLE, V. B. R.; CARRIJO, A. Estufa, material de cobertura e cortinamento- durabilidade e transparência à radiação solar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11, REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 2, 1999, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Epagri, 1999.
- OLIVEIRA, M. R. V. O emprego de casas de vegetação no Brasil: vantagens e desvantagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 8, p. 1049-1060, 1995.
- OLIVEIRA, M. R. V. **Estufas, sua importância e ocorrência de pragas**. Brasília: EMBRAPA-CENARGEN, 1992. (Comunicado Técnico, 11). 7 p.
- OMETTO, J. C. **Estudo das relações entre: radiação solar global, radiação líquida e insolação**. 1968. 64 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.
- PEDRO, F. R.; VICENTE, L. L. M. **Aplicación de los plásticos em la agricultura**. 2ed, Madrid: Mundi-Prensa, 1988. 573p.
- PEDRO JUNIOR, M.J. **Balanço de energia em soja (*Glycine Max*. L. Merrill)**. 1977. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agronomia "Luis de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1977.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, London, v. 198, n. 1, p.116-140, 1948.

PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v.4, n. 1, p. 9-29, 1956.

PLASTICULTURA: A agricultura embalada para o presente. **UNESP: Jaboticabal em Notícias**, v. 4, n. 19, 1993.

PRADOS, N. C. **Contribución al estudio de los cultivos enarevados em Almeria:** necesidades hídricas e extracción del nutrientes del cultivo de tomate de crescimento indeterminado em abrigo de polietileno. 1986. 195 f. Tese (Doutorado em Ciências Agronómicas) – Caja Rural Provincial, Almeria, 1986.

PRIESTLEY, C. H. B.; TYLOR, R. J. On the assesement of surface heat flux and evaporation usin large-scale parameters. **Monthly Weather Review**. Karachi, n. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

RIBACIOKA, F. **Sistemas computacionais baseados em lógica fuzzy**. 1999. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) - Universidade Mackenzie, São Paulo, 1999.

ROBLEDO DE PEDRO, F.; VICENTE, L. M. **Aplication de los plásticos em la agricultura**. Madrid: Mundi-Prensa, 1988. 573p.

ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment**. 2 ed. New York: John Wiley, 1983. 495p.

SANTOS, R.; ANDRÉ, R. G. B.; VOLPE, C. A. Estimativa da radiação solar em Jaboticabal. **Científica**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 31-39, 1983.

SALVETTI, M. G. **O polietileno na agropecuária brasileira**. 2ed., São Paulo: Poliolefinas, 1983. 154p.

SCHNEIDER, F. M. et al. Modificação na temperatura do solo causada por estufa de polietileno transparente de baixa densidade em Santa Maria-RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 37-42, 1993.

SEEMAN, J. Grenhouse climate. **Agrometeorology**. Germany: Springer-Verlag, 1979. p. 65-78.

SILVA, M. A. A. **Variabilidade dos elementos energéticos e ambientais em meio protegido com polietileno, com e sem cultura de pimentão (*Capsicum annuum* L.)**. 2001. 108 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999. 165p.

SOUSA, J. W. **Efeito da cobertura de polietileno difusor de luz em ambiente protegido cultivado com pimentão (*Capsicum annuum* L.)**. 2002. 113 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

SOUZA, C. M. P. **Avaliação de elementos meteorológicos relacionados com a orientação geográfica de estufas de polietileno cultivadas com alface (*Lactuca sativa*, L.)**. 2000. 61 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

SOUZA, J. L. **Saldo radiômetro com termopilha de filme fino e aplicação no balanço de radiação e energia em cultivo de feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.) em casa de vegetação com cobertura de polietileno.** 1996. 172 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1996.

SOUZA, O. T. L. et al. Evapotranspiração da rúcula determinada em função da razão de Bowen e do tanque classe A em ambiente protegido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13, 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2003. v.1, p. 211-212.

STANGHELLINI, C. Evapotranspiration in greenhouse with special reference to Mediterranean conditions. **Acta Horticulturae**, Leuven, v. 335, n. 1, p. 296-304, 1993.

TANAKA, M.; GENTA, H. **Control del medio ambiente bajo invernadero y tunel plástico.** Salto: Estación Experimental de Citricultura, 1982. 61p.

TANNER, C. B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. **Proceedings Soil Science Society of America**. Madison, v. 24, n. 1, p. 1-9, 1960.

TARIFA, J. R. Estimativa da radiação solar em função da insolação para Presidente Prudente. **Cadernos Ciência da Terra**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 1-15, 1972.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geography Review**, New Jersey, n. 38, p. 55-94, 1948.

TIVELLI, S. W. **Sistemas de cultivo na cultura do pimentão (*Capsicum annum* L.) vermelho em ambiente protegido.** 1999. 157 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 1999.

TROPICAL Estufas Agrícolas Ltda. Estufas para Diversos Fins. Disponível em:
<<http://www.tropicalestufas.com.br/outras/p2.htm>>. Acesso em: 27 jan. 2003a.

TROPICAL Estufas Agrícolas Ltda. Estufas com Lanternim. Disponível em:
<<http://www.tropicalestufas.com.br/lanternin/p2.htm>>. Acesso em: 27 jan. 2003b.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1995. 374 p.

VALIATI, M. I. et al. Estimativa da evapotranspiração potencial em ambiente protegido utilizando o método do tanque classe A e de Penman-Monteith. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13, 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2003. v. 1, p. 63-64.

VAN BAVEL, C. H. M. Potencial evaporation: the combination concept and its experimental verification. **Water Resource Research**, v. 2, p. 455-467, 1966.

VAN DER HOEVEN Ind. Com. Estufas Agrícolas Ltda. Modelos de Estufas – Poly House. Disponível em: <<http://www.vanderhoeven.com.br/modelos/house.htm>>. Acesso em: 05 mar. 2003a.

VAN DER HOEVEN Ind. Com. Estufas Agrícolas Ltda. Modelos de Estufas – Viveiro. Disponível em: <<http://www.vanderhoeven.com.br/modelos/vive.htm>>. Acesso em: 05 mar. 2003b.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 2001. 532p.

VILLA NOVA, N. A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz**. 1973. 89 f. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agronomia “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1973.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**. New York: Academic Press, 1965. v. 8, p. 338-353.

ZADEH, L. A. et al. **Fuzzy sets and their application to cognitive and decision processes**. New York: Academic Press, 1975. 432p.

UNIVERSIDADE FEDERAL
RURAL DA AMAZÔNIA
BIBLIOTECA