UM ESTUDO DAS RESISTÊNCIAS AO TRANSPORTE DE VAPOR SOBRE UMA CULTURA DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.)

RENATO DOS SANTOS

Orientador: Dr. ROMISIO GERALDO BOUHID ANDRÉ

Dissertação apresentada a Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de Concentração: "Agrometeorologia".

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Novembro, 1985

Aos meus pais

WALDELINO e ARICLÊ

DEDICO

Às minhas irmãs

RITA, MARIA LUIZA e PATRICIA

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Romisio Geraldo Bouhid André, pela orientação, incentivo e amizade.

Ao Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi, pela amizade e imprescindível colaboração na montagem e condução do experimento.

Ao Prof. Dr. Luiz Roberto Angelocci, pela colaboração e sugestões apresentadas.

À Seção de Climatologia do Instituto Agronômico de Campinas, na pessoa do Dr. Orivaldo Brunini, pelo empréstimo de aparelhos utilizados no experimento.

Aos Professores do Departamento de Física e Meteorologia, cuja experiência contribuiu para minha formação.

Aos colegas Eloi A. Pauletto e Paulo A. Manfron, pela ajuda no acompanhamento do experimento.

Aos colegas Ana Rita F. Rodrigues, Francisco Mandelli, Hamilton J. Vieira e Homero Bergamaschi, pela amizade e colaboração na coleta dos dados.

Ao Dr. Eduardo Antonio Bulisani, do Instituto Agronômico de Campinas, pela cessão de sementes utilizadas.

Aos funcionários Francisco e Edvaldo, pela colaboração na coleta dos dados.

À Maria de Lourdes Moretto, pelos serviços de datilografia.

Aos desenhistas João Ernani da Silva e Joaquim Godoi Filho, pela confecção das Figuras.

À Profa. Glória M. B. Brusadin, pela revisão do texto.

ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	ix
SUMMARY.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1. Caracterização do local.....	15
3.2. Caracterização e manejo da cultura.....	16
3.3. Observações de campo.....	17
3.4. Determinação dos parâmetros aerodinâmicos.....	18
3.4.1. Deslocamento do planto zero (d).....	20
3.4.2. Parâmetro de rugosidade (z_0).....	21
3.4.3. Velocidade de fricção (U_*).....	22
3.4.4. Resistência aerodinâmica (r_a).....	22
3.5. Obtenção dos parâmetros fisiológicos.....	24
3.5.1. Temperatura da folha, resistência estomã tica e transpiração foliar.....	24
3.5.2. Potencial da água na folha (ψ_F).....	25
3.5.3. Resistência da cobertura (r_c).....	26
3.5.4. Análise de crescimento.....	27
3.6. Balanço de energia.....	28
3.6.1. Saldo de radiação (R_L).....	30
3.6.2. Fluxo de calor no solo (F_C).....	30
3.6.3. Fluxo de calor sensível (H).....	31
3.6.4. Fluxo de calor latente (LE).....	31
3.6.4.1. Método residual.....	32
3.6.4.2. Método de Penman modificado.....	32
3.7. Balanço hídrico.....	33
3.7.1. Variação do armazenamento da água no solo (ΔA).....	34

	Página
3.7.2. Drenagem profunda (D).....	35
3.7.2.1. Condutividade hidráulica ($K(\theta)$)..	36
3.7.2.2. Gradiente de potencial hidráulico ($\frac{\Delta\psi_h}{\Delta Z}$).....	37
3.7.3. Precipitação (P).....	37
3.7.4. Irrigação (I).....	37
3.7.5. Coeficiente de cultura (k_c).....	38
3.7.6. Variação do potencial da água no solo ($\Delta\psi_s$)..	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1. Ciclo da cultura.....	39
4.2. Seleção dos dados micrometeorológicos.....	43
4.3. Fluxo de calor latente.....	43
4.4. Caracterização dos dias estudados.....	47
4.4.1. Dia 01/03/84.....	47
4.4.2. Dia 06/03/84.....	49
4.4.3. Dia 09/03/84.....	51
4.4.4. Dia 10/03/84.....	53
4.5. Análise das resistências r_a e r_c	55
4.5.1. Resistência aerodinâmica (r_a).....	55
4.5.2. Resistência da cobertura (r_c).....	61
4.5.2.1. Comportamento ao longo do dia...	61
4.5.2.2. r_c e a resistência estomática (r_{st}).....	61
4.5.2.3. r_c e a fração da energia disponível ($LE/(R_L - F_c)$).....	64
4.5.2.4. r_c e a demanda atmosférica.....	65
4.5.2.5. r_c e os potenciais da água na folha (ψ_F) e solo (ψ_s).....	67
5. CONCLUSÕES.....	70
6. LITERATURA CITADA.....	72
APÊNDICE.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS

A	= Armazenamento de água no perfil de solo considerado (mm)
A_D	= Energia disponível à cultura por efeito da advecção ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
AF	= Área foliar amostrada (cm^2)
AS	= Área de solo amostrada (cm^2)
c_p	= Calor específico do ar à pressão constante ($0,24 \text{ cal g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)
D	= Drenagem profunda (mm)
d	= Deslocamento do plano zero (cm)
E	= Evapotranspiração instantânea ($\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
E_F	= Energia utilizada nos processos fotoquímicos ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
E_V	= Energia armazenada no interior do dossel ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
ET	= Evapotranspiração média (mm)
ET_0	= Evapotranspiração de referência (mm)
$e(T_0)$	= Pressão de vapor à temperatura T_0 (mb)
$e_s(T_0)$	= Pressão de saturação à temperatura T_0 (mb)
$e(T_z)$	= Pressão de vapor à temperatura T_z (mb)
$e_s(T_z)$	= Pressão de saturação à temperatura T_z (mb)
F_C	= Fluxo de calor a partir da superfície do solo ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
g	= Aceleração da gravidade (980 cm s^{-2})
H	= Fluxo de calor sensível ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
I	= Irrigação (mm)
IAF	= Índice de área foliar (adimensional)

K_0	= Condutividade hidráulica do solo saturado (cm h^{-1})
K_θ	= Condutividade hidráulica do solo (cm h^{-1})
k	= Constante de Von Karman (0,41)
k_c	= Coeficiente de cultura (adimensional)
L	= Calor latente de vaporização (590 cal g^{-1})
LE	= Fluxo de calor latente ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
LE_p	= Fluxo de calor latente obtido pelo método de Penman ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
P	= Precipitação (mm)
R	= Escoamento superficial (mm)
R_i	= Número de Richardson (adimensional)
R_L	= Saldo de radiação ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)
r_a	= Resistência aerodinâmica (s cm^{-1})
r_{ab}	= Resistência estomática da face abaxial (s cm^{-1})
r_{ad}	= Resistência estomática da face adaxial (s cm^{-1})
r_c	= Resistência da cobertura (s cm^{-1})
r_{st}	= Resistência estomática média (s cm^{-1})
$\bar{T}$	= Temperatura média do ar entre 2 níveis acima do dossel ($^{\circ}\text{C}$)
T_0	= Temperatura do ar ao nível do dossel ($^{\circ}\text{C}$)
T_z	= Temperatura do ar ao nível de referência z ($^{\circ}\text{C}$)
Transp.	= Taxa de transpiração foliar ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) ($\mu\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
$U_{(z)}$	= Velocidade média do vento no nível z (cm s^{-1})
U_*	= Velocidade de fricção (cm s^{-1})
z	= Nível de referência a partir da superfície do solo
z_0	= Parâmetro de rugosidade (cm)

α	= Inverso do coeficiente angular da regressão $(\theta_s - \theta) \times \ln t$
γ	= Constante Psicrométrica ($0,66 \text{ mb } ^\circ\text{C}^{-1}$)
θ	= Umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)
θ_s	= Umidade volumétrica do solo saturado ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)
ρ	= Densidade do ar seco ($1,225 \cdot 10^{-3} \text{ g cm}^{-3}$)
Φ_M	= Fator de correção para estabilidade atmosférica (adimensional)
ψ_S	= Potencial matricial da água no solo (mb)
ψ_F	= Potencial da água na folha (mb)

UM ESTUDO DAS RESISTÊNCIAS AO TRANSPORTE DE VAPOR SOBRE
UMA CULTURA DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris*, L.)

Autor: RENATO DOS SANTOS

Orientador: Dr. ROMISIO GERALDO BOUHID ANDRÉ

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho foi analisar o fluxo vertical de vapor d'água e as resistências impostas a este fluxo em função de parâmetros micrometeorológicos e fisiológicos da cultura do feijão.

Em vista a isto, um experimento micrometeorológico foi desenvolvido sobre um campo cultivado com feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.), cultivar Aroana 80, durante o verão de 1984, na ESALQ/USP.

Foram feitas medidas no solo, micrometeorológicas e fisiológicas, utilizando-se de instrumentação específica.

Foram utilizados os balanços hídrico (períodos) e energético (variação diurna), como base para as análises no final do estágio vegetativo e início do florescimento.

Os resultados mostraram boa correlação entre resistências aerodinâmica e da cobertura vegetal com os parâmetros micrometeorológicos, bem como entre esta última e os parâmetros fisiológicos da cultura.

A STUDY OF RESISTANCES TO THE WATER VAPOUR TRANSPORT
ABOVE A BEAN (*Phaseolus vulgaris*, L.) CROP

Author: RENATO DOS SANTOS

Adviser: Dr. ROMISIO GERALDO BOUHID ANDRÉ

SUMMARY

The objective of this work was to determine the vertical latent heat flux and the corresponding resistances related to micrometeorological and physiological parameters of a bean (*Phaseolus vulgaris*, L.) crop cv. Aroana 80.

The experiment was carried out in 1984 summer at the Agriculture College ESALQ - University of S. Paulo, Piracicaba County, S. Paulo State, Brazil where all the micrometeorological and physiological measurements were taken.

Energy (diurnal cycle) and water balance (periods) were computed for the analysis in the final vegetative and initial blooming stages.

The results showed good correlation between aerodynamic and canopy resistances with micrometeorological parameters, as well as the canopy resistance was related to the physiological parameters.

1. INTRODUÇÃO

Existem inúmeras proposições para a medida ou estimativa das perdas de água em uma cultura sob a forma de evapotranspiração; entretanto, tão importante quanto à preocupação em quantificar as perdas é a avaliação dos parâmetros físicos e fisiológicos envolvidos no processo.

Já é consagrada a analogia entre o caminhamento da água no sistema solo-planta-atmosfera e o transporte de cargas elétricas em função de uma diferença de potencial, o que levou à necessidade de se definir dois tipos de resistências oferecidas ao transporte vertical de vapor a partir de uma comunidade vegetal: uma de caráter fisiológico, envolvendo o processo de difusão do vapor d'água a partir da cavidade estomática até o ar adjacente externo à folha (resistência da cobertura vegetal - r_c), e outra de origem física, que avalia a restrição oferecida pela atmosfera à difusão desse vapor liberado pelas plantas até um nível de referência qualquer acima da co

bertura (resistência aerodinâmica - r_a).

Estes parâmetros relacionados ao balanço de energia, têm aberto um caminho para a elaboração de modelos da estimativa da evapotranspiração real que possibilitam não apenas a quantificação, mas também uma avaliação qualitativa do processo.

A resistência aerodinâmica, por ter sido definida anteriormente à da cobertura, é mais fundamentada, ao passo que r_c , além de ser introduzida posteriormente, carrega consigo a complexidade dos mecanismos fisiológicos que interferem no caminhamento da água através dos vegetais.

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo analisar o fluxo vertical de vapor e as resistências impostas a esse fluxo, avaliando seu comportamento em função de parâmetros fisiológicos, como transpiração foliar, resistência estomática e potencial da água na folha, e também parâmetros físicos como a fração da energia disponível ao processo evaporativo, demanda atmosférica e potencial da água no solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Em uma comunidade vegetal, o movimento da água desde o solo, na corrente transpiratória, através da planta até o ar circundante, é resultado de um gradiente de potencial da água que se estabelece ao longo deste sistema. Tal conceitua
ção foi originalmente dada por Gradman (1928), posteriormente ratificada por Van Den Honert em 1948, citados por RUTTER (1975).

Para a análise do fluxo de vapor a partir da su
perfície vegetada deve-se tomar como base a interdependência do sistema como um todo, ou seja, o contínuo físico, unificado e dinâmico denominado por Philip (1966), citado por HILLEL (1970), de sistema solo-planta-atmosfera. O movimento da água neste sistema ocorre do potencial mais elevado (menos negativo) para o mais baixo (mais negativo), o que significa caminhar no sen
tido de diminuir sua energia potencial (REICHARDT, 1975).

Além da diferença de potencial, o fluxo de água é variável em função da resistência imposta a este mesmo fluxo,

que pode ser oriunda de fatores fisiológicos internos da planta, como também de fatores externos do ambiente. Segundo MONTEITH (1973), existe uma analogia entre a dinâmica da água e a dinâmica nas cargas elétricas, para a qual, segundo a Lei de Ohm, o fluxo é relacionado diretamente com a diferença de potencial e inversamente com a resistência, sendo que a complexidade do sistema envolve inúmeras resistências dispostas em série e em paralelo. Este tipo de analogia é, porém sujeita a críticas, pois, enquanto BAVER et alii (1973) sugerem a análise individual das partes do sistema para posterior avaliação da interdependência entre elas, FICUS (1975) acha discutível este procedimento sem que haja um perfeito conhecimento da natureza dos obstáculos ao transporte de água nas várias partes, além da necessidade de se considerar mais claramente as interações água-soluto. Segundo a mesma linha de raciocínio, LEVITT (1966) e RICHTER (1973) reconhecem a originalidade da proposição, no entanto afirmam que as resistências devem ser bem definidas visto que variam diferentemente ao longo da planta devido as diferenças das forças e fluxos responsáveis pelo transporte. REICHARDT (1979) afirma que "cada parte do sistema tem sua resistência e, de acordo com a diferença de potencial entre os extremos destas partes, resulta num fluxo. Assim, pode-se ter a resistência do solo (r_{solo}), resistência do cortex radicular (r_r), resistência do xilema (r_x), resistência da cutícula (r_{cut}), resistência estomática (r_{st}) e resistência da atmosfera (r_a); destas, algumas são variáveis como a r_{solo} devido à

variação da umidade do solo, r_{st} que é função da abertura dos estômatos, e r_a que é função da turbulência atmosférica". Dentre estas, SUTCLIFFE (1980) comenta que a resistência estomática assume um importante papel como principal controlador do movimento da água em todo o sistema.

Na Figura 1, extraída de HILLEL (1970), podem ser visualizadas as resistências envolvidas do sistema solo-planta-atmosfera e as respectivas variações do potencial da água ao longo do sistema.

FIGURA 1 - Resistências do solo (r_s), da raiz (r_r), do xilema (r_x), da cutícula (r_{cut}), dos estômatos (r_{st}), do ar (r_a) e respectivas variações de potências (ψ), ao longo do sistema solo-planta-atmosfera (HILLEL, 1970).

A transpiração correspondente à parcela de água que vence as resistências ao longo do trajeto, associada à evaporação da água do solo e da água que permanece sobre as folhas de uma cobertura vegetal após um período chuvoso, tem como resultado um fluxo de vapor para a atmosfera denominado evapotranspiração (RUTTER, 1975). Segundo SLAVIK (1974), o processo depende basicamente de três fatores: 1) do balanço energético junto à superfície vegetada; 2) da direção e magnitude do gradiente de potencial da água no sistema solo-planta-atmosfera; 3) das resistências à difusão impostas pela cultura.

Uma das formas de determinação da evapotranspiração é o balanço hídrico local, que consiste em contabilizar os ganhos e perdas de água num volume de controle de solo cultivado; seus resultados são bastante realistas, desde que tomados para períodos superiores a cinco dias (REICHARDT, 1975). Outro método da estimativa da evapotranspiração é o balanço de energia (STEWART e THOM, 1973; ANDRÉ, 1981), que pode fornecer resultados em intervalos até de alguns minutos, a partir de dados de radiação, temperatura e pressão de vapor tomados em dois níveis acima da cultura. Para estimar a evapotranspiração a partir de uma superfície de água livre ou gramada sem restrição hídrica, Penman (1948), citado por THORNTHWAITE e HARE (1965); ANDRÉ (1973) e GRANT (1975), associou o balanço energético junto à superfície com suas características aerodinâmicas, de onde originou uma expressão que, embora contendo várias constantes empíricas relacionadas principalmente com o termo aerodinâmico

mico, é ainda muito utilizada às vezes com algumas modificações (THOM e OLIVER, 1977) em estudos, seja a nível regional ou mesmo micrometeorológicos (ANDRÉ, 1973; VILLA NOVA, 1973).

Segundo MONTEITH (1981), foi a partir da proposição inicial de Penman, que os aspectos termodinâmicos e aerodinâmicos envolvidos no processo passaram a merecer maior atenção por parte dos pesquisadores, como pode ser observado em LEMON (1965); THOM (1971), THOM (1975); SHAW (1977) e BRUIN e MOORE (1985).

Como em toda superfície regosa, o escoamento do ar, dado pela velocidade do vento acima de uma cobertura vegetada, gera um movimento turbulento decorrente das forças de atrito que se opõem ao transporte de momentum, e que tem reflexos no fluxo vertical de vapor. Além do atrito, a turbulência também é influenciada pela variação na densidade do ar que troca calor com a superfície (LEMON, 1965).

A turbulência atmosférica envolve o transporte de momentum, calor sensível e calor latente; assim, as resistências oferecidas ao transporte turbulento de cada uma destas propriedades dependem das características aerodinâmicas da superfície vegetada; sendo, portanto, denominada de resistência aerodinâmica (r_a), estimada a partir de perfis de velocidade do vento e temperatura. A caracterização do processo turbulento é feita sob condições de neutralidade atmosférica, onde as trocas ocorrem quase que exclusivamente por difusão turbulenta sem a interferência de gradientes térmicos acentuados (SHAW,

1977). Efeitos expressivos de uma inversão térmica (estabilidade) ou de uma convecção livre (instabilidade) são evidenciados pelo número de Richardson (R_i), que relaciona o gradiente de temperatura ao gradiente de velocidade do vento (WEBB, 1965); nestes casos deve-se incluir um fator de estabilidade na estimativa da resistência aerodinâmica que pode ser obtido a partir do próprio R_i , conforme proposições de Dyer (1974), citado por BAILEY e DAVIES (1981) e PRUITT *et alii* (1973).

Segundo SWINBANK e DYER (1967), as resistências aerodinâmicas ao transporte de calor sensível (r_{aH}) e latente (r_{aV}) podem ser consideradas iguais, uma vez que são governadas pelo mesmo mecanismo, a difusão turbulenta. THOM (1972) faz uma ampla análise do transporte turbulento, observando que embora se considere a validade da igualdade entre r_{aH} e r_{aV} , estas diferem da resistência aerodinâmica ao transporte de momentum (r_{aM}). BAILEY e DAVIES (1981) comentam que essa diferença ocorre devido ao fato de que a quantidade de movimento é transferida à superfície vegetada principalmente pela pressão exercida perpendicularmente sobre as folhas e demais partes das plantas, situação que não implica na transferência de calor, desta forma a transferência de momentum é mais eficiente, portanto, para se calcular r_{aH} e r_{aV} em função de r_{aM} , deve-se acrescentar a esta última uma resistência adicional calculada a partir da velocidade de fricção (U_*), procedimento adotado por DEHEER-AMISSAH *et alii* (1980), para uma cobertura gramada, e BAILEY e DAVIES (1981), para uma cultura de soja. Vários au

tores têm, no entanto, considerado desprezível este parâmetro adicional, tomando, para efeitos práticos a igualdade das resistências aerodinâmicas, generalizando-a como r_a (DAVIES, 1972; GRANT, 1975; HEILMAN e KANEMASU, 1976; VERMA *et alii*, 1976, BEVEN, 1979; BERKOWICS e PRAHM, 1982; PEDRO JR. e VILLA NOVA, 1983).

Quanto à variabilidade de r_a para diferentes coberturas vegetadas, MONTEITH (1965) observa que coberturas de porte elevado (Pinus) apresentam r_a menores comparativamente a coberturas de porte baixo (grama), isto porque, aerodinamicamente, uma plantação de Pinus possui um parâmetro de rugosidade (Z_0) maior, o que lhe confere uma maior superfície de contato facilitando a difusão turbulenta.

Em termos diários existe uma nítida tendência de r_a apresentar valores elevados nas primeiras horas do dia e no final da tarde, com os menores valores ocorrendo no decorrer do período diurno, como pode ser observado nos trabalhos de HEILMAN e KANEMASU (1976); PEDRO JR. e VILLA NOVA (1983) em soja; BROWN e ROSEMBERG (1973) para uma cultura de beterraba.

Antes do vapor d'água deixar a superfície foliar e interagir com o ar circundante através do processo de turbulência atmosférica, este deve vencer a resistência oriunda de fatores fisiológicos da planta, mais especificamente dos estômatos. Segundo SUTCLIFFE (1980), a resistência estomática (r_{st}) corresponde à maior parcela da resistência total oferecida ao fluxo de vapor a partir de uma superfície vegetada. Dada a im

portância deste parâmetro na descrição de fenômenos como um todo, algumas proposições têm sido colocadas, procurando conjugar fatores físicos do ambiente (como o balanço energético e as características aerodinâmicas da cultura), com fatores fisiolôgicos (MONTEITH, 1965; BLACK *et alii*, 1970).

O fluxo de vapor a partir da cavidade estomática em direção à atmosfera é controlado pelas células-guarda, que funcionam como válvulas regulando a abertura e fechamento dos estômatos. De acordo com JARVIS (1976), este complexo mecanismo depende fundamentalmente de cinco variáveis: 1) da luminosidade; 2) da concentração de CO_2 do ar circundante; 3) do deficit de pressão de vapor entre a folha e o ar adjacente; 4) da temperatura da folha; 5) do potencial da água na folha.

O processo de transpiração e a tendência do estômato se abrir em resposta à luminosidade têm um efeito estabilizador das diferenças entre a temperatura da folha e do ar (MONTEITH, 1981).

No que se refere à resposta de r_{st} às variações do potencial da água no sistema solo-planta-atmosfera, KANEMASU e TANNER (1969), trabalhando com uma cultura de feijão, e JUNG e SCOTT (1980), com soja, observaram que a medida em que o suprimento de água no solo vai sendo limitado (redução no potencial matricial - ψ_M) ocorre uma redução no potencial da água na folha (ψ_F), acompanhado de um aumento em r_{st} . BRADY *et alii* (1975) e TAN e BLACK (1976) também constataram uma relação inversa entre r_{st} e ψ_M para uma cultura de soja e uma floresta,

respectivamente, concluindo ainda que em termos de variação sazonal a resistência estomática média tende a aumentar com o aumento da demanda atmosférica.

De um modo geral, com exceção de algumas plantas da família das Cactáceas, Crassuláceas e Bromeliáceas; normalmente os estômatos se abrem durante o dia (baixos valores de r_{st}) e se fecham à noite (altos valores de r_{st}), havendo a possibilidade de fecharem durante o dia em resposta a altas temperaturas, conforme observaram Hofstra e Hesketh (1969), citados por SUMAYAO e KANEMASU (1979), ou ainda em função de uma alta demanda atmosférica (MONTEITH, 1981).

Dependendo do tipo de planta, suas folhas podem apresentar estômatos em ambas as faces (anfiestomáticas) ou em apenas uma delas (hipoestomáticas). O feijoeiro é uma planta anfiestomática, cuja densidade de estômatos na face abaxial excede em cerca de sete vezes a da face adaxial (MEYER *et alii*, 1960). A partir de dados de resistência estomática nas faces adaxial (r_{ad}) e abaxial (r_{ab}), pode-se determinar a resistência estomática média da folha, levando-se em conta a analogia com resistências elétricas em paralelo, e também o fato de que normalmente r_{ad} é maior do que r_{ab} (KANEMASU e TANNER, 1969; BLACK *et alii*, 1970).

Medidas de r_{st} podem ser efetuadas diretamente através de um porômetro de difusão (SLAVIK, 1974; BRUTSAERT, 1982), que pode fornecer também a taxa de transpiração e temperatura foliar. Valores mínimos de r_{st} observados por diversos

autores para diferentes culturas foram tabelados por RUTTER (19 75), de onde pode-se observar que plantas herbáceas como feijão, algodão e trigo apresentam resistência estomática mínima inferiores, relativamente a plantas arbóreas como pinus e citrus.

Ao introduzir um parâmetro fisiológico na equação de Penman, MONTEITH (19 65) define a resistência da cobertura (r_c) que tem por objetivo representar a influência dos estômatos no fluxo de vapor d'água para a atmosfera a partir de uma cobertura vegetal. O autor propõe a estimativa de r_c a partir de perfis de temperatura, pressão de vapor e velocidade do vento, comentando que "quando a evaporação do solo for negligível, r_c deve se portar como um parâmetro da planta que indica as variações diurnas ou sazonais da resistência estomática", concluindo que, quando a evaporação do solo é significativa, r_c passa a representar uma combinação entre a resistência das folhas da cultura e a resistência a difusão de vapor a partir do solo.

A estimativa da resistência da cobertura também pode ser feita a partir de dados do balanço de energia e da resistência aerodinâmica (BROWN e ROSEMBERG, 19 73; RUSSEL, 19 80; PEDRO JR. e VILLA NOVA, 19 83), ou em função da resistência estomática medida e do índice de área foliar (MILNE *et alii*, 1985).

Segundo BLACK *et alii* (19 76), a resistência da cobertura é um parâmetro praticamente impossível de ser medido, definindo-o como uma combinação das resistências do solo, dos

estômatos das plantas e do ar circulante no interior do dossel. Para MILNE (1979), trata-se de um parâmetro altamente correlacionado com a soma de várias resistências estomáticas em paralelo para as várias camadas foliares da vegetação.

O ciclo de variação de r_c é semelhante ao da resistência estomática, como pode ser observado nos valores obtidos por GRANT (1975) para cevada; TAN e BLACK (1976) para floresta e DEHEER-AMISSAH *et alii* (1980), para uma superfície gramada; além do que, uma vez representando um parâmetro fisiológico, algumas variáveis que afetam a resistência estomática também interagem com r_c , particularmente variações no deficit de pressão de vapor e no potencial da água no solo têm mostrado boas correlações com valores de r_c , tanto a nível sazonal (RUSSEL, 1980), como em termos diários (GRANT, 1975; TAN e BLACK, 1976).

Em valores absolutos, a resistência estomática é maior do que a resistência da cobertura, segundo TAN e BLACK (1976). Com relação à resistência aerodinâmica, BROWN e ROSEMBERG (1973) observam que r_c e r_a têm a mesma ordem de grandeza sendo r_a mais variável ao longo do dia, porém, sob condições de ventos leves r_a pode exceder r_c ; o inverso ocorre com relação a ventos fortes, com o que concordam PEDRO JR. e VILLA NOVA (1983).

Sendo r_c um parâmetro fisiológico relacionado às perdas de água pela vegetação, e r_a um indicativo da eficiência da atmosfera em difundir o vapor liberado; a resistência total

oferecida ao fluxo vertical de vapor, a partir da cobertura vegetada, pode ser obtida pela soma de ambas as resistências, uma vez que podem ser consideradas resistências em série (MONTEITH, 1981).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização do local

O experimento foi conduzido em área experimental pertencente ao Departamento de Física e Meteorologia da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", em Piracicaba, cujas coordenadas são:

- Latitude: $22^{\circ}42'30''$ S
- Longitude: $47^{\circ}38'00''$ W
- Altitude: 586 m

O clima da região, segundo Köeppen, é do tipo Cwa, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C , e que o caracteriza como sendo sub-tropical úmido com estiagem no inverno.

O solo da área em estudo, segundo RANZANI *et alii* (1966), pertence à série "Luiz de Queiroz", e é classificado como Terra Roxa Estruturada (Alfissol), tendo como material de origem rochas eruptivas básicas.

As dimensões do local totalizaram uma área de 3.132 m² (Figura 2).

FIGURA 2 - Dimensões da área e local das observações.

3.2. Características e manejo da cultura

A cultura utilizada foi a do feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.), cultivar Aroana-80, de hábito de crescimento in determinado arbustivo, com ciclo variando de 90 a 100 dias, e início da floração ocorrendo entre 35 e 40 dias após a emergência.

O plantio foi feito mecanicamente no dia 21/01/84, e de forma tal que após o desbaste resultasse numa população de 200.000 plantas/ha, com um espaçamento de 0,60 m entre sulcos.

Foram efetuados os tratos culturais convencionais como a adubação de plantio (60 kg P₂O₅/ha), desbaste, aduca

bação (por cobertura) nitrogenada, 40 dias após a semeadura (30 kg N/ha), capinas e também pulverizações contra pragas e doenças, sempre que necessário.

Quanto à disponibilidade hídrica, a cultura foi mantida sem limitação de água, através de um sistema de irrigação por aspersão instalado no local.

3.3. Observações de campo

A partir das observações de campo, foram efetuadas as determinações relativas aos parâmetros micrometeorológicos e fisiológicos para os diferentes estádios vegetativos da cultura do feijão. Determinações dos balanços de energia e hídrico, possibilitaram a caracterização do ambiente a que a cultura esteve sujeita.

Com exceção das medições relativas aos cálculos de análise de crescimento, todas as demais observações de campo foram tomadas nas proximidades do centro da área em estudo (Figura 2).

O balanço hídrico foi efetuado em base diária, enquanto as demais medições, que visaram à avaliação dos fluxos de energia, foram efetuadas de modo a ter uma abrangência para diferentes estádios de desenvolvimento do feijoeiro, distribuídas da seguinte forma:

DATA DO PLANTIO: 21/01/84		
Estádios de desenvolvimento	Período	Coleta de dados
Período vegetativo	22/01 a 02/03/84	29/02 e 01/03/84
Período de florescimento	03/03 a 24/03/84	05-06 e 09-10/03/84
Período de enchimento de grãos	12/03 a 30/03/84	19/03 e 20/03/84
DATA DA MATURAÇÃO FISIOLÓGICA: 09/04/84		

A caracterização do período correspondente a cada estágio fenológico foi feita através de observações diárias, conforme metodologia proposta por PORTES (1981).

3.4. Determinação dos parâmetros aerodinâmicos

A partir do perfil logarítmico de velocidade do vento e do perfil de temperatura, foram determinados os parâmetros aerodinâmicos do feijoeiro, a resistência imposta pela cultura ao transporte de momentum (resistência aerodinâmica - r_a), e também a resistência oferecida pela cobertura ao transporte de vapor (resistência da cobertura - r_c), para as diferentes fases de desenvolvimento da cultura.

Para a medida da velocidade do vento, utilizou-se um sistema registrador "Wind Profile Register System", modelo 106 da C.W. Thornthwaite Associates, com anemômetros de caneca posicionados em 5 níveis: 0, 20, 60, 140 e 300 cm, contados a partir da altura média do dossel. Os valores foram obtidos a partir da média para intervalos de 10 minutos e relacio

nados com dados de temperatura, coletados simultaneamente e nos mesmos níveis da velocidade do vento, em intervalos de 30 minutos.

Os dados de temperatura foram obtidos a partir do seguinte sistema montado no local: para cada nível foi confeccionado um suporte, onde os termopares de fio de cobre-constantan, em número de 2, permaneciam acondicionados em um cano de alumínio, de modo que apenas os elementos sensíveis ficavam expostos ao meio externo, mesmo assim, protegidos por uma placa de PVC, para evitar a incidência direta de radiação solar sobre os mesmos. Junto a um dos termopares foi acoplado um recipiente contendo água destilada interligados por uma mecha de gaze. Desta forma, um termopar fazia a função do chamado termômetro de "bulbo seco" (T_S) e o outro indicava a temperatura do termômetro de "bulbo úmido" (T_U). Cada conjunto deste (de um total de 5) foi fixado a um mastro nas alturas indicadas. Houve a preocupação de se proteger os fios de modo a evitar que um possível aquecimento provocasse algum tipo de alteração nas leituras. O sistema foi conectado a um potenciômetro da Cambridge Instruments Co Ltd., com adaptações para 13 canais e sensibilidade de 0,001 milivolt.

Dos perfis obtidos, foram selecionados aqueles considerados próximos à neutralidade, através do número de Richardson (R_i), tomando-se como base os níveis 2 (20 cm) e 4 (140 cm), a partir da seguinte expressão (WEBB, 1965):

$$R_i = \frac{g \Delta T / \Delta Z}{\bar{T} (\Delta U / \Delta Z)^2} \quad (1)$$

onde: g = aceleração da gravidade (980 cm s^{-2})

$\bar{T}$ = temperatura média entre os 2 níveis considerados ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT = variação da temperatura entre os 2 níveis ($^{\circ}\text{C}$)

ΔU = variação da velocidade do vento entre os 2 níveis (cm s^{-1})

ΔZ = distância entre os 2 níveis (cm).

Foram considerados os perfis cujos valores de R_i estivessem entre $-0,03$ e $+0,03$ (PRIESTLEY, 1959; WEBB, 1970; PRUITT *et alii*, 1973) e, a partir destes, foi calculado o deslocamento do plano zero (d), o parâmetro de rugosidade (Z_0) e a velocidade de fricção (U_*) (VASQUES, 1978; VILLA NOVA, 1973).

3.4.1. Deslocamento do plano zero (d)

A obtenção de d foi feita segundo o método descrito por MONTEITH (1973), ou seja, a partir da expressão do perfil logaritmo do vento:

$$U(Z) = \frac{U_*}{K} \ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right) \quad (2)$$

Pela relação entre a velocidade do vento para 3 níveis distintos, resulta numa equação do tipo:

$$\frac{U_1 - U_2}{U_1 - U_3} = \frac{\ln\left(\frac{Z_1 - d}{Z_2 - d}\right)}{\ln\left(\frac{Z_1 - d}{Z_3 - d}\right)} \quad (3)$$

onde: z_1, z_2, z_3 = alturas de onde foram efetuadas as medições (cm)

U_1, U_2, U_3 = velocidades do vento nos níveis z_1, z_2, z_3 (cm s^{-1})

d = deslocamento do plano zero (cm)

Para valores de d variando de 0,2 a 0,8 h, sendo h a altura média da cobertura, foi selecionado aquele cujo valor resulta na igualdade da equação 3.

3.4.2. Parâmetro de rugosidade (z_0)

Foi obtido a partir do coeficiente linear de uma regressão do tipo $\ln(z-d) \times U$, onde, segundo THOM (1975), o valor de $\ln(z-d)$, para o qual U se anula, corresponde ao próprio $\ln z_0$, ou seja, a espessura da camada que atua como sorvedouro do momentum, como pode ser observado na Figura 3 (SHAW, 1977).

FIGURA 3 - Caracterização do perfil logarítmico de velocidades do vento e os parâmetros aerodinâmicos.

3.4.3. Velocidade de fricção (U_*)

A velocidade de fricção foi determinada, como pode ser observado na Figura 3, pela tangente à inclinação da reta (MONTEITH, 1973).

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_*}{k} \quad (4)$$

sendo k , a constante de Von Karman, cujo valor considerado foi de 0,41 (HÖGSTRÖM, 1985).

3.4.4. Resistência aerodinâmica (r_a)

A determinação da resistência aerodinâmica oferecida pela cobertura vegetada ao transporte de vapor (r_{a_v}) foi feita assumindo-se que esta é igual a resistência aerodinâmica ao transporte de momentum (r_{a_M}), sendo ambas simbolizadas por r_a (THOM, 1975; BAILEY e DAVIES, 1981; BRUTSAERT, 1982).

A estimativa de r_a foi feita a partir de uma expressão oriunda daquela que descreve o fluxo de momentum (τ). Sabendo-se que τ pode ser expresso tanto em função de $U(z)$ como em função de U_* (THOM, 1975):

$$\tau = \rho \frac{1}{r_a} U(z) \quad (5)$$

$$\tau = \rho U_*^2 \quad (6)$$

sendo,

τ = densidade de fluxo de momentum ($\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-2}$)
 ρ = densidade do ar (g cm^{-3})
 r_a = resistência aerodinâmica ao transporte de momentum (s cm^{-1})
 $U(Z)$ = velocidade do vento na altura Z (cm s^{-1})
 U_* = velocidade de fricção (cm s^{-1})

A partir das equações 5 e 6, r_a pode ser expresso (BAILEY e DAVIES, 1981):

$$r_a = \frac{U(Z)}{U_*^2} \quad (7)$$

ou, então, tendo em conta a equação (2)

$$r_a = \left[\ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right) + \Phi_M \right]^2 K^2 U(Z) \quad (\text{s cm}^{-1}) \quad (8)$$

Observa-se na equação (8) a introdução de um fator Φ_M de correção para a estabilidade do perfil logarítmico que, segundo DYER (1974):

$$\Phi_M = (1 - 5 R_i)^{-1}, \text{ para } R_i > +0,03 \text{ (estável)} \quad (9)$$

$$\Phi_M = 1, \text{ para } -0,03 < R_i < +0,03 \text{ (neutro)} \quad (10)$$

$$\Phi_M = (1 - 16 R_i)^{-1/4}, \text{ para } R_i < -0,03 \text{ (instável)} \quad (11)$$

Desta forma, foram determinados valores de r_a em diferentes estádios vegetativos do feijoeiro, nos dias em que eram efetuadas observações micrometeorológicas.

3.5. Obtenção dos parâmetros fisiológicos

A análise da resposta da cultura do feijão diante das condições ambientes, nos vários estádios vegetativos, foi feita através de medidas diretas e também da estimativa de alguns parâmetros fisiológicos relacionados aos mecanismos de perda de água pelas plantas. Além destes dados obtidos nos dias das observações, foram também coletadas, semanalmente, plantas juntamente com uma amostragem da altura média do dossel, para efeito de análise de crescimento.

3.5.1. Temperatura da folha, resistência estomática e transpiração foliar

A temperatura da folha (T_F - $^{\circ}\text{C}$), resistência estomática (r_{st} - s cm^{-1}) e a transpiração foliar (Transp. - $\mu\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram medidas através de um porômetro (Steady-State Porometer), LI-1600 da LI-COR. INC.

A coleta de dados era iniciada logo que se observava a ausência de orvalho sobre a folhagem e, a partir de então, em intervalos horários.

Para se garantir a representatividade das medições, os dados utilizados são provenientes de 3 plantas escolhidas ao acaso por ocasião de cada medição. Em cada planta eram efetuadas três leituras relativas à parte adaxial e abaxial de três folhas distintas localizadas na parte superior da planta, o que permitiu a caracterização de T_F , r_{st} e Transp., em termos médios para o dossel.

A r_{st} média foi determinada segundo KANEMASU e TANNER (1969) e BLACK *et alii* (1970), que consideram, além da analogia das resistências nas fases adaxial e abaxial com resistências elétricas em paralelo, a diferença de sensibilidade destas em função da variação do potencial da água na folha (ψ_F), resultando numa expressão do tipo:

$$r_{st} = \frac{2 r_{ad} \cdot r_{ab}}{r_{ad} + r_{ab}} \quad (s \text{ cm}^{-1}) \quad (12)$$

A temperatura considerada representativa das condições das folhas localizadas na parte superior das plantas, foi obtida pela média aritmética de T_F nas faces adaxial e abaxial, enquanto a taxa transpiratória foi determinada pela soma dos valores medidos nas duas faces.

3.5.2. Potencial da água na folha (ψ_F)

Foi medido por meio de um microvoltímetro WESCOR HR-33T e de 3 câmaras de amostragem WESCOR C-52, de fabricação da WESCOR Inc., devidamente calibradas.

O critério de amostragem foi o mesmo citado por JUNG e SCOTT (1980), através da coleta da amostra em uma folha nova, já totalmente formada, localizada na parte superior da planta e exposta à radiação solar. Para a coleta foi utilizado um vazador apropriado que permitia a coleta de amostras cilíndricas de 0,5 cm de diâmetro, sempre na região central da folha, entre a nervura central e as bordas.

As coletas eram feitas em 3 plantas distintas, perfazendo um total de 3 amostras tomadas a cada 2 horas. A leitura propriamente dita era efetuada pouco antes da nova coleta, já que neste intervalo de tempo, as amostras eram conservadas no interior das câmaras, que permaneciam em repouso num local próximo ao experimento com temperatura conhecida. Tal procedimento visava a assegurar o equilíbrio entre o ambiente da câmara e a amostra, quando então eram efetuadas as leituras, e nova amostragem era realizada.

3.5.3. Resistência da cobertura (r_c)

A resistência oferecida pela cultura à difusão de vapor, por efeito da abertura e fechamento dos estômatos e da evaporação da água do solo, é dada por:

$$r_c = \frac{\rho c_p}{\gamma L} \frac{e_s(T_0) - e(T_0)}{E} 60 \quad (\text{s cm}^{-1}) \quad (13)$$

onde: ρ = densidade do ar (g cm^{-3})

c_p = calor específico do ar à pressão constante
($\text{cal g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)

γ = constante psicrométrica ($\text{mb } ^\circ\text{C}^{-1}$)

L = calor latente de vaporização (cal g^{-1})

$e_s(T_0)$ = pressão de saturação à temperatura da cobertura
(T_0) - (mb)

$e(T_0)$ = pressão parcial de vapor junto à cobertura (mb)

E = evapotranspiração ($\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)

Os valores de $e_s(T_0)$ e $e(T_0)$ foram obtidos a partir da metodologia proposta por MONTEITH (1965), com dados dos perfis de temperatura, pressão de vapor e velocidade do vento. Segundo o autor, quando estes apresentam a mesma conformação, plotando em um gráfico a temperatura (e pressão de vapor) contra a velocidade do vento em vários níveis, o resultado é uma reta, para a qual $T = T_0$ e $e = e(T_0)$ em $U = 0$.

O valor de E da equação (13) foi determinado a partir do balanço de energia, de forma residual conforme metodologia descrita no item 3.6., a seguir.

3.5.4. Análise de crescimento

O desenvolvimento do feijoeiro foi acompanhado e analisado através de dados relativos à variação da altura das plantas, da caracterização da duração de cada estágio de desenvolvimento e da evolução do índice de área foliar (IAF). A metodologia utilizada na avaliação destes parâmetros foi aquela descrita por PORTES (1981).

A altura média das plantas foi dada por amostragem de 5 plantas previamente selecionadas, das quais, semanalmente, era medida a altura desde a inserção da haste principal no solo, até o último nó da mesma haste.

Também, semanalmente, eram coletadas 3 amostras de um metro linear de plantas para determinação do IAF. A planta teve suas partes separadas em folhas, haste + pecíolo e vagens + grãos, que em seguida eram colocadas em uma estufa a 65°C por

48 horas. Das folhas, eram tomadas ao acaso 50 discos circulares (por meio de um vazador) de área igual a 1,539 cm². A relação entre o peso seco total das folhas e o peso seco dos discos forneceu a área foliar (AF) contida na área do solo amostrada:

$$AF = \frac{\text{Peso seco total das folhas}}{\text{Peso seco dos discos}} \times \text{Área dos 50 discos}$$

O peso seco total das folhas foi considerado o peso seco das folhas acrescido do peso seco dos discos.

Sendo a área de solo amostrado (AS) igual a 60 cm², ou seja, um metro linear por 60 cm de largura (30 cm de cada lado da linha de plantio); o IAF é dado por:

$$IAF = \frac{AF}{AS} \quad (\text{adimensional}) \quad (14)$$

Os dados de peso seco da parte aérea da planta (discos + folhas + caule + pecíolo + vagens + grãos) permitiram o acompanhamento da produção de matéria seca do feijoeiro ao longo do ciclo de desenvolvimento (g m⁻²).

3.6. Balanço de energia

As formas de utilização da energia colocada a disposição da cultura do feijoeiro foram analisadas através da partição de energia ou balanço de energia, que quantifica os fluxos energéticos verticais incidentes e emergentes sobre o dossel (LEMON, 1965; VILLA NOVA 1973; ANDRÉ, 1981).

$$R_L - LE - H - F_C - E_F - E_V - A_D = 0 \quad (15)$$

onde: R_L = saldo de radiação

LE = fluxo de calor latente

H = fluxo de calor sensível

F_C = fluxo de calor a partir da superfície do solo

E_F = energia utilizada nos processos fotoquímicos

E_V = energia armazenada no interior do dossel vegetativo

A_D = energia disponível ao sistema por efeito de advecção

O termo relativo à energia utilizada nos processos fotoquímicos (E_F) foi considerada desprezível, por representar normalmente, uma parcela inferior a 1% do saldo de radiação (TANNER, 1960; KING, 1961; LEMON, 1965; THORNTHWAITE e HARE, 1965).

A componente advectiva (A_D) também foi negligenciada, uma vez que as medições foram efetuadas no centro de uma área suficientemente grande, e as observações se limitaram a alturas de, no máximo, 1% da distância correspondente entre o local da medida e a bordadura do experimento (CAMPBELL, 1977); além do que, as dificuldades envolvidas na sua medição aliadas às providências para minimizá-la ao máximo, permitem que se anule tal componente (THOM, 1975; BRUTSAERT, 1982). O mesmo procedimento foi tomado com relação à energia armazenada pela vegetação (E_V), cujo valor não é significativo comparativamente à ordem de grandeza do saldo de radiação; seu estudo só se justifica quando se trata de culturas de porte elevado (STEWART e THOM, 1973; BILL *et alii*, 1976).

Assumindo a nulidade dos termos E_F , A_D e E_V , o balanço de energia passa a ser expresso da seguinte forma:

$$R_L - LE - H - F_C = 0 \quad (16)$$

O saldo de radiação (R_L) e o fluxo de calor no solo (F_C) foram medidos diretamente. Os fluxos de calor sensível e calor latente foram estimados a partir de R_L , F_C e dos parâmetros aerodinâmicos. O nível tomado como referência para a coleta dos dados e cálculos relativos ao balanço energético foi 140 cm acima da cobertura vegetada, em intervalos de 30 minutos.

3.6.1. Saldo de radiação (R_L)

Foi medido por um saldo radiômetro (Net Radiometer), de fabricação da Middleton, com constante de 28,173 mv/cal cm⁻² min⁻¹, instalado a 140 cm de altura acima do dossel.

3.6.2. Fluxo de calor no solo (F_C)

Os fluxos ascendentes (ou descendentes) de calor que ocorrem a partir da superfície do solo, e que são responsáveis, respectivamente, pelo incremento ou redução no saldo de radiação, foram medidos por dois fluxímetros da Middleton, ligados em série, e enterrados com uma camada de cerca de 0,5 cm de solo sobre as mesmas. Para uma medida mais representativa das condições locais, uma das placas foi colocada na linha de plantio e a outra na entrelinha. As constantes de calibra

ção são 16,55 e 17,05 mv/cal cm⁻² min⁻¹, perfazendo um valor médio de 16,80 mv/cal cm⁻² min⁻¹.

3.6.3. Fluxo de calor sensível (H)

Seu cálculo foi feito a partir de dados de temperatura do ar e da resistência aerodinâmica, conforme BROWN e ROSEMBERG (1973), HEILMAN e KANEMASU (1976) e VERMA *et alii* (1976); onde H é expresso por:

$$H = \rho c_p \frac{T_Z - T_0}{r_a} \quad (\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}) \quad (17)$$

onde: H = fluxo de calor sensível a partir de Z = 140 cm

ρ = densidade do ar (g cm⁻³)

c_p = calor específico do ar (cal g⁻¹ °C⁻¹)

T_Z = temperatura do ar no nível Z (°C)

T_0 = temperatura do ar junto à superfície vegetada (°C)

r_a = resistência aerodinâmica ao fluxo de calor (min cm⁻¹)

As temperaturas T_Z e T_0 foram obtidas a partir do perfil de temperatura, enquanto r_a foi estimado conforme descrito no item 3.4.4.

3.6.4. Fluxo de calor latente (LE)

Foi estimado a partir de dois modelos distintos, sendo um deles o balanço de energia (HEILMAN e KANEMASU, 1976; VERMA *et alii*, 1976), e o segundo, o método de Penman modificado

(THOM e OLIVER, 1977; MONTEITH, 1981). Tal critério teve como objetivo analisar a variabilidade dos valores de LE pelos dois métodos, assim como selecionar aquele que mais se aproxima das condições de campo.

3.6.4.1. Método residual

Por este modelo LE foi obtido de maneira residual, a partir dos dados de R_L e F_C medidos e da estimativa de H através da resistência aerodinâmica (item 3.6.3.), onde LE é dado por:

$$LE = -(\rho c_p \frac{T_Z - T_0}{r_a} + R_L - F_C) \text{ (cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}) \quad (18)$$

3.6.4.2. Método de Penman modificado

O cálculo de LE pelo modelo de Penman modificado leva em conta os termos energético e aerodinâmico, e foi feito utilizando-se da seguinte expressão:

$$LE_p = \frac{\Delta (R_L - F_C) + \rho c_p \{e_s(T_Z) - e(T_Z)\}}{\Delta + \gamma} \text{ (cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}) \quad (19)$$

sendo,

T_Z = temperatura do ar ao nível Z acima da cobertura ($^{\circ}\text{C}$)

Δ = tangente à curva de pressão de saturação à temperatura T_Z
($\text{mb } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

R_L = saldo de radiação ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)

F_C = fluxo de calor a partir do solo ($\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$)

ρ = densidade do ar (g cm^{-3})

γ = constante psicométrica ($\text{mb } ^\circ\text{C}^{-1}$)

c_p = calor específico do ar à pressão constante ($\text{cal g}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$)

$e_s(T_z)$ = pressão de saturação do vapor à temperatura T_z (mb)

$e(T_z)$ = pressão atual de vapor (mb)

r_a = resistência aerodinâmica (min cm^{-1})

3.7. Balanço hídrico

Ao se estudar os ganhos e perdas de água nos limites superior e inferior de um volume de solo cultivado, para um intervalo de tempo, tomando como base o princípio da conservação de massa, tem-se que:

$$\int_{t_0}^t (p + i \pm d - e \pm r) dt = \int_0^Z \int_{t_0}^t \frac{\partial \theta}{\partial t} dt \cdot dz \quad (20)$$

onde os termos a esquerda representam os fluxos verticais de água na unidade de tempo, expressos em equivalente de altura de água para a precipitação (p), irrigação (i), drenagem profunda (d), evapotranspiração (e) e escoamento superficial (r). À direita tem-se a variação do armazenamento de água no solo dev_{ido} aos ganhos e perdas (ΔA), sendo θ a unidade volumétrica do solo, t o tempo e Z a profundidade em estudo.

Integrando a equação (20) para um tempo t defido, a uma profundidade Z , chega-se a expressão:

$$P + I \pm D - ET \pm R = \Delta A \quad (\text{mm}) \quad (21)$$

Normalmente, os termos P , I , D , R e ΔA são medidos ou estimados e a equação (21) é resolvida para ET , que no presente estudo resultou em um balanço hídrico para intervalos de 10 dias.

3.7.1. Variação do armazenamento da água no solo (ΔA)

O solo, no transcorrer do ciclo da cultura, foi mantido próximo à capacidade de campo, de modo que a planta não sofreu restrição hídrica. Em vista disso, ΔA foi determinado através do método de integração da área formada entre dois perfis consecutivos de umidade até o nível Z , que resulta numa expressão do tipo (REICHARDT, 1975):

$$\Delta A = (\bar{\theta}_f - \bar{\theta}_i) Z \cdot 10 \quad (\text{mm}) \quad (22)$$

sendo,

$\bar{\theta}_f$ e $\bar{\theta}_i$ = umidade volumétrica (média do perfil), respectivamente, no final e no início do período considerado
($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)

Z = profundidade do perfil (cm)

Considerou-se, para fins de cálculo, um perfil de 60 cm de profundidade, suficientemente profundo para conter mais de 80% do sistema radicular do feijoeiro.

A umidade do solo (θ) foi obtida diariamente, através de leituras de tensiômetros e curvas características do solo.

Foram utilizadas 2 baterias de tensiômetros de manômetros de mercúrio, cada qual com dados em 6 profundidades (15, 30, 45, 60, 75 e 90 cm); no entanto, para as determinações, foram utilizadas apenas as leituras referentes à bateria instalada junto ao local das demais observações (Figura 2); com os dados transformados em potencial matricial (ψ_M).

A curva característica foi elaborada com dados já existentes para o local acrescidos de novos valores de ψ_M (tensiômetros) e θ coletados no decorrer do experimento, o que permitiu a elaboração de uma curva média, mais condizente com as condições atuais do solo. Os dados de θ foram obtidos semanalmente por amostragem gravimétrica (3 repetições) a 15 cm e, para as profundidades de 30, 45, 60, 75 e 90 cm, utilizou-se uma sonda de neutrons modelo 503 de fabricação da Campbell Pacific Nuclear Inc.; tomando-se a média de 5 leituras para cada profundidade.

3.7.2. Drenagem profunda (D)

A quantidade de água que entrou ou deixou o sistema pelo limite inferior do volume de solo foi determinada diariamente a partir da equação de Darcy, segundo a qual a drenagem profunda é proporcional ao gradiente de potencial hidráulico ($\Delta\psi_h/\Delta Z$) e a condutividade hidráulica do solo ($K(\theta)$) para a profundidade em questão ($Z = 60$ cm), ou seja:

$$D = -K(\theta) \frac{\Delta\psi_h}{\Delta Z} \quad (\text{mm}) \quad (23)$$

3.7.2.1. Condutividade hidráulica ($K(\theta)$)

Para a determinação de $K(\theta)$ utilizou-se o método do perfil instantâneo, idealizado por Hillel *et alii* (1972), com simplificações feitas por LIBARDI *et alii* (1980), cujas equações já haviam sido determinadas para a área em questão.

Tal metodologia consiste em se determinar a variação da umidade volumétrica (θ), a partir de uma condição de saturação em função do tempo.

Sendo $K(\theta)$ uma função de condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) e da variação exponencial de θ , seu comportamento, a partir da condição saturada, (θ_s) obedece a seguinte função:

$$K(\theta) = K_0 e^{\alpha(\theta - \theta_s)} \quad (\text{cm h}^{-1}) \quad (24)$$

O valor K_0 é a própria taxa de infiltração do solo saturado em equilíbrio dinâmico, enquanto θ_s é a umidade do solo na capacidade de campo.

O fator α , assim como K_0 , são considerados constantes para uma dada profundidade, sendo determinados a partir dos coeficientes da regressão $(\theta_s - \theta) \times \ln t$, que representam a variação da umidade em relação à condição saturada, tomados em vários intervalos de tempo decorridos a partir da condição de saturação inicial ($t = 0$).

Para a profundidade de 60 cm, a expressão final utilizada foi:

$$K(\theta) = 0,0263 e^{185,19(\theta - 0,399)} \quad (\text{cm h}^{-1}) \quad (25)$$

3.7.2.2. Gradiente de potencial hidráulico ($\frac{\Delta\psi_h}{\Delta Z}$)

As leituras diárias, em altura de coluna de mercúrio (cm Hg) dos tensiômetros nas profundidades de 45 e 75 cm foram transformadas em potencial hidráulico ($\psi_h = \psi_M - Z$).

A relação entre a diferença de potencial hidráulico e a distância entre os dois níveis considerados ($\Delta Z=30$ cm), possibilitou a estimativa do gradiente de potencial hidráulico para o nível médio de 60 cm:

$$\frac{\Delta\psi_h}{\Delta Z} = \frac{\psi_{h\ 45} - \psi_{h\ 75}}{30} \quad (26)$$

3.7.3. Precipitação (P)

A quantidade de água (mm) que chegou ao sistema sob a forma de precipitação foi medida por um pluviômetro tipo HH, instalado na Estação Agrometeorológica da ESALQ-USP, localizado a cerca de 100 metros do experimento.

3.7.4. Irrigação (I)

A fim de manter a cultura sem limitação de água, foi instalado no local um sistema de irrigação por aspersão, de modo que, sempre que o potencial matricial nas camadas superiores indicassem valores inferiores a -0,3/-0,4 atmosferas, o sistema era ativado, mantendo assim o solo sempre em condições de umidade próxima à capacidade de campo.

A medida de I foi feita por meio da coleta de água em 30 recipientes cilíndricos (de área de secção conhecida), distribuídos aleatoriamente sobre a cobertura vegetada, cuja média aritmética das 30 amostras fornecida a altura da água (em mm) adicionada por irrigação.

3.7.5. Coeficiente de cultura (k_c)

Os valores médios decendiais de ET foram correlacionados com a evapotranspiração de referência ET_0 , estimada pelo método da radiação proposto por DOORENBOS e PRUITT (1975), permitindo a determinação do coeficiente de cultura (k_c), ao longo do ciclo de desenvolvimento do feijoeiro, sendo:

$$k_c = \frac{ET}{ET_0} \quad (27)$$

3.7.6. Variação do potencial da água no solo ($\Delta\psi_s$)

Os tensiômetros montados no centro do experimento serviram, também, para determinações do potencial da água no solo, cuja variação horária ($\Delta\psi_s$) a 15 cm de profundidade, foram correlacionados com parâmetros fisiológicos da cultura do feijão, nos dias selecionados para análise dos dados micro meteorológicos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ciclo da cultura

O ciclo de desenvolvimento do feijoeiro compreendeu um período de 94 dias, desde o plantio até a colheita; e a cobertura vegetada atingiu a altura máxima (cerca de 45 cm) por volta do 50º dia após a data do plantio (15/03/84), quando também se observaram os maiores valores de índice de área foliar (em torno de 5), como pode ser observado na Figura 3.

Os dados relativos ao balanço hídrico local (Tabela 1), traduzem a alta demanda evaporativa a que a cultura esteve sujeita praticamente ao longo de todo o seu ciclo.

A evapotranspiração média diária variou desde um valor mínimo de 0,8 mm, observado no período próximo à data da maturação fisiológica (07 a 11/04/84), quando o IAF era de apenas 1,5 por efeito do amarelecimento e queda de folhas predominantes nesta fase, até o valor máximo de 7,23 mm de 27/02 a

07/03/84, que corresponde ao final do estágio vegetativo e início do período de florescimento, marcado por altos valores de IAF, ou seja, uma grande superfície evaporante, o que resultou no maior valor de k_c , de 1,43, próximo àquele citado por DOORENBOS e PRUITT (1975), de 1,2 para a cultura de feijão no fim do estágio vegetativo e sob condições de alta demanda atmosférica.

A variação diária dos parâmetros D , ΔA , P e I , ao longo do ciclo da cultura pode ser observada na Figura 4.

FIGURA 3 - Variação da altura da cobertura vegetada e do índice de área foliar (IAF), ao longo do ciclo de desenvolvimento do feijoeiro.

TABELA 1 - Dados de precipitação (P), irrigação (I), drenagem profunda (D), variação do armazenamento de água no solo (ΔA), evapotranspiração (ET), evapotranspiração de referência (ET_0) e coeficiente de cultura (k_c), para o ciclo da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Aroana 80, em intervalos de 10 dias, considerando um perfil de solo (TRE) de 60 cm de profundidade.

Período	P (mm)	I (mm)	D (mm)	ΔA (mm)	ET (mm)	ET (mm/dia)	ET_0	k_c
28/01 a 06/02/84	58,2	0	-73,6	-27,0	11,59	1,16	5,86	0,20
07/02 a 16/02/84	10,9	39,1	-0,6	+10,6	38,70	3,87	5,81	0,67
17/02 a 26/02/84	2,2	62,5	+0,0	-0,1	64,83	6,48	7,29	0,89
27/02 a 07/03/84	29,1	41,2	+0,0	-2,0	72,35	7,23	5,05	1,43
08/03 a 17/03/84	0	47,3	0	+0,9	46,34	4,63	6,14	0,75
18/03 a 27/03/84	14,5	36,6	-3,1	+0,6	47,29	4,73	4,78	0,99
28/03 a 06/04/84	22,4	0	+7,8	-2,0	32,27	3,23	4,40	0,73
07/04 a 11/04/84	3,7	0	0	-0,3	4,00	0,80	5,16	0,15
Média	-	-	-	-	39,67	4,01	5,56	0,73

FIGURA 4 - Variação da drenagem profunda (D), variação do armazenamento de água no solo (ΔA), precipitação (P) e irrigação (I), ao longo do ciclo da cultura.

4.2. Seleção dos dados micrometeorológicos

A partir dos oito dias de observações micrometeorológicas foram selecionados quatro dias para efeito dos cálculos. Foi adotado como critério, primeiramente a seqüência sistemática das observações ao longo do dia; neste sentido, os dias 20/03 e 05/04/84 foram desconsiderados, devido à ocorrência de precipitação durante o período de observações. Outro critério de seleção deveu-se ao mau funcionamento do instrumental, o que ocorreu nos dias 29/02 e 19/03, quando problemas com o registrador do perfil de vento e na leitura do potenciômetro prejudicaram a coleta de alguns dados essenciais. Assim, os dias considerados para o estudo em questão reduziram-se a 4, sendo um deles pertencente ao final do estágio vegetativo (dia 01/03/84), e os 3 restantes pertencentes à fase de florescimento (dias 06-09 e 10/03/84).

4.3. Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente (LE), para os 4 dias considerados, foi obtido a partir dos dados medidos de R_L e F_C , e valores estimados de H , pelo método da resistência e também, pela proposição de Penman (LE_p). A comparação entre as duas estimativas foi feita por meio de uma regressão linear, de acordo com a Figura 5.

FIGURA 5 - Correlação entre os fluxos de calor latente (LE), estimados pelo balanço de energia e pelo método de Penman (LE_p).

Verifica-se que existe uma alta correlação entre os dois parâmetros, no entanto, em termos de variação diária (Figura 6), há uma tendência de LE_p superar LE, notadamente após às 15:00 horas, quando o efeito da advecção é mais pronunciada. Possivelmente, os maiores valores de LE_p encontrados se devem ao fato de nele estarem incluídos grande parte dos erros de aproximação oriundos dos demais componentes de equação de partição de energia, o que é minimizado pelo B.E resolvido de forma residual, onde LE divide os erros com o fluxo de calor sensível (H).

FIGURA 6 - Comportamento diário dos valores de $(R_L - F_C)$ medidos e de LE e LE_p estimados, para os 4 dias considerados.

Em termos gerais, o comportamento de LE_p , em certos períodos, apresentou-se defasado em relação à $(R_L - F_C)$, ao passo que LE mostrou uma variação mais regular em torno de $(R_L - F_C)$, que é a energia que efetivamente fica à disposição da cultura; em vista disso, os cálculos relativos ao balanço de energia (equação 16) e à resistência da cobertura (equação

13) foram efetuados tendo como base o valor de LE, pela resolução da equação (18).

Considerando que a cultura foi mantida sem limitação de água, e que a cobertura foliar era total na época das observações micrometeorológicas, procedeu-se à comparação entre LE e a taxa de transpiração medida (Figura 7), uma vez que esta deve predominar no processo de perda d'água, o que demonstrou uma boa correlação entre ambas.

FIGURA 7 - Correlação entre os valores de LE estimado pelo método residual e a transpiração medida.

VERMA *et alii* (1976), trabalhando com sorgo no estágio de máximo desenvolvimento vegetativo, encontraram uma boa concordância (da ordem de 10%) entre a estimativa fornecida pelo modelo e o valor de LE medido através de um lisímetro de precisão.

4.4. Caracterização dos dias estudados

4.4.1. Dia 01/03/84

Corresponde ao final do estágio vegetativo. É caracterizado por um dia de alta demanda evaporativa, com a temperatura máxima de $37,0^{\circ}\text{C}$ e mínima de $20,6^{\circ}\text{C}$, a radiação solar global foi de $626 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com 8,1 horas de insolação, e evaporação medida pelo Tanque Classe A de 7,4 mm.

O IAF da cultura neste dia foi de 3,0, com uma altura média do dossel igual a 40 cm. O parâmetro de rugosidade (z_0) e o deslocamento do plano zero (d) eram, respectivamente, 4,3 e 29,0 cm.

A Figura 8 mostra a variação diurna dos termos do balanço de energia e as resistências aerodinâmica e da cobertura vegetal. Observa-se que o fluxo de vapor d'água representa uma parcela significativa do saldo de radiação. O fluxo de calor sensível é relativamente pequeno, mas inverte de sinal após às 12:00 horas, favorecendo a advecção à tarde. O fluxo de calor para o interior do solo é significativo nas primeiras horas do dia, diminuindo durante a tarde. Esta partição de ener

gia ocorre devido a superfície do solo estar quase completamente coberta pela cultura e não haver restrição de umidade à mesma.

FIGURA 8 - Variação diurna do saldo de radiação (R_L), fluxo de calor no solo (F_C), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e das resistências aerodinâmica (r_a) e da cobertura (r_c) para o dia 01/03/84.

A resistência aerodinâmica média para o dia foi de $0,53 \text{ s cm}^{-1}$, oscilando entre $0,35$ e $0,68 \text{ s cm}^{-1}$ no período das 9:00 às 15:00 horas; entre $0,50$ e $1,00 \text{ s cm}^{-1}$ no início da manhã e de $0,33$ a $0,69 \text{ s cm}^{-1}$ no final da tarde.

A resistência da cobertura permaneceu das 10:30 às 14:00 horas entre valores de $0,57$ e $0,81 \text{ s cm}^{-1}$, sendo o primeiro valor (mínimo para o período) observado às 12:30 horas. No início da manhã e final da tarde a variação foi de $0,83$ a $2,5 \text{ s cm}^{-1}$.

4.4.2. Dia 06/03/84

Refere-se ao início da fase de florescimento. É caracterizado por um dia de baixa demanda evaporativa, devido à nebulosidade, com insolação de $0,5$ hora. A temperatura máxima foi de $35,2^{\circ}\text{C}$ e a mínima de $20,4^{\circ}\text{C}$, ficando a radiação solar global na ordem de $354 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e a evaporação medida do Tanque Classe A de $5,0 \text{ mm}$.

Para este dia o IAF subiu a $4,5$ e a altura da cobertura chegou a 43 cm . O parâmetro de rugosidade (Z_0) foi de $3,2 \text{ cm}$ e o deslocamento do plano zero (d) de $30,0 \text{ cm}$.

A Figura 9 mostra a variação diurna dos termos do balanço de energia e as resistências aerodinâmica e da cobertura vegetal. Apesar de ser um dia de baixa demanda evaporativa, quase toda energia disponível foi utilizada pelo fluxo de vapor d'água. Os fluxos H e F_C representam uma parcela muito pequena de R_L e a advecção não afetou o processo. Com o aumento da cobertura, a partição de energia mostrou um LE relativamente maior e H e F_C bem menores.

FIGURA 9 - Variação diurna do saldo de radiação (R_L), fluxo de calor no solo (F_c), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e das resistências aerodinâmica (r_a) e da cobertura (r_c) para o dia 06/03/84.

A resistência aerodinâmica média para o dia aumentou para $0,646 \text{ s cm}^{-1}$, permanecendo desde às 7:30 até às 17:00 horas entre $0,51$ e $0,82 \text{ s cm}^{-1}$, com exceção para os horários das 12:30 e das 15:30 horas, quando os valores estimados foram $0,97$ e $1,03 \text{ s cm}^{-1}$, respectivamente. Às 17:30 horas, r_a caiu para $0,27 \text{ s cm}^{-1}$, voltando em seguida a apresentar valores crescentes no início da noite

Quanto à resistência da cobertura, com exceção dos horários 9:30 ($1,43 \text{ s cm}^{-1}$) e 11:00 horas ($1,08 \text{ s cm}^{-1}$), seu valor oscilou entre $0,68$ e $0,85 \text{ s cm}^{-1}$ desde às 7:30 até às 14:00 horas, quando passou a assumir valores crescentes à medida em que foi se aproximando o final da tarde.

4.4.3. Dia 09/03/84

Correspondente à fase de florescimento. É caracterizado por um dia de alta demanda atmosférica, com temperatura máxima de $30,9^{\circ}\text{C}$ e mínima de $19,2^{\circ}\text{C}$, a radiação solar global foi de $699 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ com 10,2 horas de insolação e 6,1 mm de evaporação do Tanque Classe A.

O IAF chegou a 5,0, com a altura média do dossel chegando a seu valor máximo, 43,0 cm. O parâmetro Z_0 e o deslocamento d foram, respectivamente, 3,18 e 39,0 cm.

A Figura 10 mostra a variação diurna dos termos do balanço de energia e as resistências aerodinâmica e da cobertura vegetal. A partição mostra um LE elevado com H e F_C pequenos, o que é normal, pois, nesta fase, a cobertura vegetal é total e a cultura não possuía restrição de umidade. A advecção não afetou o processo.

A resistência aerodinâmica média para o dia foi $0,55 \text{ s cm}^{-1}$, oscilando entre $0,50$ e $0,71 \text{ s cm}^{-1}$, das 8:30 às 14:00 horas, com os maiores valores observados no início da manhã e uma tendência de apresentar menores valores no final da tarde (de $0,02$ a $0,40 \text{ s cm}^{-1}$).

FIGURA 10 -Variação diurna do saldo de radiação (R_L), fluxo de calor no solo (F_C), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e das resistências aerodinâmica (r_a) e da cobertura (r_c) para o dia 09/03/84.

A resistência da cobertura variou no horário das 11:00 às 14:30 horas entre 0,41 (valor mínimo do dia) e 0,90 s cm⁻¹, apresentando valores crescentes no final da tarde e também altos valores no início da manhã.

4.4.4. Dia 10/03/84

Fase de florescimento. É caracterizado por um dia de alta demanda evaporativa, com temperatura máxima de $31,6^{\circ}\text{C}$ e mínima de $19,2^{\circ}\text{C}$. A radiação solar global foi de $692 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com 9,6 horas de insolação e 7,7 mm de evaporação medida no Tanque Classe A.

Com um IAF de 5 e altura média do dossel de 43 cm, a cultura do feijão, neste dia, apresentou um Z_0 de 3,3 cm e deslocamento do plano zero (d) igual a 39,5 cm.

A Figura 11 mostra a variação diurna dos termos do balanço de energia e as resistências aerodinâmica e da cobertura vegetal. Este dia, também, apresentou um R_L elevado e, da mesma forma, a partição revelou um LE elevado e H e F_C pequenos. A partir das 13:00 horas H sofreu inversão, favorecendo o processo da advecção. O F_C manteve o mesmo comportamento dos dias anteriores.

A resistência aerodinâmica oscilou entre 0,30 e $0,48 \text{ s cm}^{-1}$, das 10:30 às 17:30 horas; entre 0,63 e $1,66 \text{ s cm}^{-1}$ no início da manhã e, de 0,51 a $0,84 \text{ s cm}^{-1}$, a partir das 18:00 horas.

A resistência da cobertura mostrou-se decrescente do início da manhã (8:00 horas) até às 11:00 horas com valores de 1,59 a $0,65 \text{ s cm}^{-1}$, que é o mínimo valor para o dia. Apresenta um aumento das 11:30 ($0,90 \text{ s cm}^{-1}$) às 13:00 horas ($1,07 \text{ s cm}^{-1}$), voltando a decrescer às 13:30 horas ($0,64 \text{ s cm}^{-1}$)

e, em seguida, assumindo valores crescentes à medida que se aproxima o final da tarde.

Os valores determinados para os componentes do balanço de energia e demais parâmetros utilizados para a obtenção e análise das resistências, ao longo dos 4 dias, encontram-se nos Apêndices 1 a 4.

FIGURA 11 -Variação diurna do saldo de radiação (R_L), fluxo de calor no solo (F_c), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e das resistências aerodinâmica (r_a) e da cobertura (r_c) para o dia 10/03/84.

4.5. Análise das resistências r_a e r_c

4.5.1. Resistência aerodinâmica (r_a)

Os valores de r_a , ao longo dos dias, se mantiveram abaixo daqueles observados para r_c (Figuras 8, 9, 10 e 11), o que também foi constatado por BROWN e ROSEMBERG (1973) em *beterraba*, VERMA *et alii* (1976) para *sorgo* e por PEDRO JR. e VILLA NOVA (1983) para uma cultura de *soja*; indicando que as trocas de calor latente por efeito da difusão turbulenta são mais eficientes comparativamente à difusão de vapor a partir da cobertura foliar, que impõem maiores restrições aos fluxos verticais por estar relacionados aos mecanismos fisiológicos da planta.

BLACK *et alii* (1970) encontraram, para a cultura do *feijão*, valores médios diários de r_a da ordem de 0,3 a 0,5 $s\ cm^{-1}$, um pouco inferior aos 0,53 $s\ cm^{-1}$ (01/03), 0,65 $s\ cm^{-1}$ (06/03); 0,55 $s\ cm^{-1}$ (09/03) e 0,59 $s\ cm^{-1}$ (10/03), encontrados neste estudo. Nota-se, entretanto, que as médias encontradas pelos autores correspondem ao estágio inicial de crescimento vegetativo, quando Z_0 e d eram de cerca de 0,4 e 20 cm, respectivamente. Para o final do estágio vegetativo e início do florescimento, maiores valores de Z_0 e d levam a um incremento de r_a . Os dados relativos aos cálculos de r_a para os 4 dias e os respectivos parâmetros aerodinâmicos são dados nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

TABELA 2 - Velocidade do vento ($U(Z)$), número de Richardson (R_i), fator de estabilidade atmosférica (Φ_M) e resistência aerodinâmica (r_a), determinados para o dia 01/03/84.

ALTURA DA COBERTURA = 35 cm				
	$Z = 175 \text{ cm}$	$Z_0 = 4,3 \text{ cm}$	$d = 29,0 \text{ cm}$	
Hora	$U(Z) (\text{cm s}^{-1})$	R_i	Φ_M	$r_a (\text{s cm}^{-1})$
7:00	159,39	-2,13	0,41	0,50
7:30	174,49	-1,58	0,44	0,46
8:00	67,62	-19,60	0,24	1,07
8:30	98,21	-0,84	0,51	0,86
9:00	110,95	-9,28	0,28	0,67
9:30	151,74	-28,48	0,22	0,47
10:00	204,50	-16,46	0,25	0,36
10:30	232,01	-0,003	1,00	0,46
11:00	171,98	-1,26	0,47	0,48
11:30	247,01	-27,42	0,22	0,42
12:30	194,49	-0,43	0,60	0,45
13:30	149,19	-1,23	0,47	0,55
14:00	156,84	-0,03	1,00	0,68
15:00	133,90	+1,44	-0,16	0,42
15:30	100,76	-0,19	0,61	0,69
17:30	176,99	+0,67	-0,42	0,27
18:00	171,98	+1,42	-0,16	0,33
18:30	169,49	+1,23	-0,19	0,33

TABELA 3 - Velocidade do vento ($U(Z)$), número de Richardson (R_i), fator de estabilidade atmosférica (Φ_M) e resistência aerodinâmica (r_a), determinados para o dia 06/03/84.

ALTURA DA COBERTURA = 40 cm				
	$Z = 180 \text{ cm}$	$Z_0 = 3,15 \text{ cm}$	$d = 30,0 \text{ cm}$	
Hora	$U(Z) (\text{cm s}^{-1})$	R_i	Φ_M	$r_a (\text{s cm}^{-1})$
7:30	171,98	-1,03	0,49	0,56
8:00	156,84	-1,02	0,49	0,62
8:30	166,98	-0,96	0,50	0,58
9:00	186,99	-1,11	0,48	0,52
9:30	146,64	-2,83	0,38	0,63
10:00	128,80	-1,75	0,43	0,73
10:30	121,15	-0,68	0,54	0,82
11:00	192,00	-0,79	0,52	0,51
11:30	192,00	-0,69	0,54	0,52
12:00	138,99	-2,85	0,38	0,66
12:30	93,11	-4,02	0,35	0,97
13:30	110,95	-4,71	0,34	0,81
14:00	118,60	-2,25	0,40	0,78
14:30	146,64	-4,11	0,35	0,62
15:00	146,64	-0,87	0,51	0,67
15:30	82,92	-18,05	0,24	1,03
16:00	131,35	-0,88	0,51	0,75
16:30	133,90	-1,29	0,46	0,71
17:00	192,00	+0,03	1,00	0,64
17:30	174,49	+0,47	-0,74	0,28
18:00	197,00	+0,89	-0,29	0,32
18:30	133,90	+0,81	-0,33	0,46

TABELA 4 - Velocidade do vento ($U(Z)$), número de Richardson (R_i), fator de estabilidade atmosférica (ϕ_M) e resistência aerodinâmica (r_a), determinados para o dia 09/03/84.

ALTURA DA COBERTURA = 43 cm				
Z = 183 cm		Z ₀ = 3,18 cm	d = 39,0 cm	
Hora	U(Z) (cm s ⁻¹)	R _i	ϕ_M	r _a (s cm ⁻¹)
7:00	85,47	-2,32	0,40	1,036
7:30	59,98	-48,64	0,19	1,32
8:30	180,30	-2,39	0,40	0,49
10:30	116,05	-13,51	0,26	0,71
11:00	164,49	-2,34	0,40	0,54
11:30	183,60	-2,13	0,41	0,48
12:00	121,15	-2,78	0,38	0,72
12:30	110,95	-3,69	0,36	0,78
13:00	154,29	-1,40	0,45	0,59
13:30	146,64	-1,27	0,46	0,62
14:00	118,60	-6,95	0,31	0,71
14:30	239,52	-0,62	0,55	0,40
15:00	272,03	-0,37	0,62	0,36
15:30	297,03	+0,28	-2,50	0,02
16:30	299,54	+0,23	-0,89	0,13
17:00	282,02	-0,03	1,00	0,42
17:30	176,99	+0,30	-2,00	0,07

TABELA 5 - Velocidade do vento ($U(Z)$), número de Richardson (R_i), fator de estabilidade atmosférica (Φ_M) e resistência aerodinâmica (r_a), determinados para o dia 10/03/84.

ALTURA DA COBERTURA 43 cm				
$Z = 183 \text{ cm}$		$Z_0 = 3,27 \text{ cm}$	$d = 39,5 \text{ cm}$	
Hora	$U(Z) (\text{cm s}^{-1})$	R_i	Φ_M	$r_a (\text{s cm}^{-1})$
7:00	70,17	0	1	1,66
7:30	77,82	-14,71	0,25	1,03
8:00	134,00	-4,53	0,34	0,63
8:30	105,85	-12,52	0,26	0,76
9:00	105,85	-3,96	0,35	0,80
9:30	65,07	-21,73	0,23	1,22
10:00	105,85	-5,56	0,32	0,79
10:30	189,49	-1,05	0,49	0,48
11:00	126,25	-2,73	0,39	0,69
11:30	192,00	-2,42	0,40	0,45
12:00	269,52	-0,67	0,54	0,35
12:30	244,52	-1,19	0,47	0,37
13:00	217,00	-0,59	0,56	0,43
13:30	282,02	-0,33	0,63	0,35
14:00	274,52	-0,43	0,60	0,35
14:30	337,05	-0,17	0,72	0,30
15:00	282,02	-0,02	1,00	0,41
15:30	282,02	-0,55	0,56	0,33
16:00	239,52	-0,61	0,55	0,39
16:30	329,54	-0,03	1,00	0,35
17:00	400,87	-0,007	1,00	0,29
17:30	262,02	-0,0014	1,00	0,44
18:00	229,51	0	1,00	0,51
18:30	138,99	+0,15	4,00	0,84

Sendo r_a um parâmetro indicativo das restrições impostas pela vegetação ao transporte de momentum e, dado que este é obtido através da velocidade do vento, r_a e U devem apresentar boa correlação. Para a cultura da soja, VERMA *et alii* (1976) chegaram a um coeficiente de correlação de 0,96 entre ambos. Na Figura 12 são mostrados dados de r_a e U tomado a 140 cm acima do dossel correlacionados dia-a-dia.

FIGURA 12 - Correlações entre a resistência aerodinâmica (r_a) e a velocidade do vento a 140 cm acima do dossel (U -plotado em escala logarítmica), para os 4 dias estudados.

Agrupando os dados dos 4 dias, o coeficiente de correlação (r) foi de 0,86, resultando uma expressão do tipo:
 $r_a = 3,448 - 0,569 \ln U$.

4.5.2. Resistência da cobertura (r_c)

4.5.2.1. Comportamento ao longo do dia

A variação diária de r_c encontradas neste trabalho (Figura 13), com os maiores valores no início do dia e final da tarde e valores mínimos por volta das 12:00 horas, são coincidentes com aqueles determinados para diversas culturas, seja de porte elevado como florestas (TAN e BLACK, 1976; THOM e OLIVER, 1977), de porte médio como sorgo (HEILMAN e KANEMASU, 1976; VERMA *et alii*, 1976) ou, ainda, de porte mais baixo como o próprio feijão (KANEMASU e TANNER, 1969; DAVIES, 1972), soja (BRADY *et alii*, 1975; JUNG e SCOTT, 1980), beterraba (BROWN e ROSEMBERG, 1973) e grama (DEEHER-AMISSAH *et alii*, 1980).

4.5.2.2. r_c e a resistência estomática (r_{st})

Com a finalidade de verificar o comportamento de r_c com r_{st} , são apresentadas as variações diurnas para os 4 dias considerados (Figura 13).

FIGURA 13 - Variação diurna da resistência da cobertura (r_c) e da resistência estomática medida (r_{st}) para os 4 dias.

Em termos quantitativos, r_{st} mostrou-se superior a r_c , o que ficou evidenciado nos dias de alta demanda atmosférica (01, 09 e 10/03/84). No dia 06/03/84 as diferenças foram menos pronunciadas. Sendo r_{st} e r_c dependentes, respectivamente, da temperatura da folha e da temperatura do ar adjacente à folhagem. Uma possível explicação para tais diferenças pode estar relacionada ao fato de que, sob condições de nebulosidade, a temperatura das folhas e do ar circundante tende a se equilibrar, o que ocorre com menos eficiência em dias de alta energia incidente.

Ainda que tais diferenças ocorram, nota-se uma boa correlação ($r = 0,74$) entre r_c e r_{st} , como pode ser observado na Figura 14, o que vem a ratificar a observação de MONTEITH (1965), segundo o qual r_c reflete as variações ocorridas no mecanismo de abertura e fechamento dos estômatos.

FIGURA 14 - Correlação entre a resistência da cobertura (r_c) e a resistência estomática medida (r_{st}), a partir dos dados obtidos para os 4 dias.

4.5.2.3. r_c e a fração da energia disponível ($LE/(R_L - F_C)$)

Existe uma relação inversa entre r_c e a fração da energia que efetivamente permanece disponível para o processo da evaporação. De acordo com MONTEITH (1965), esta relação, considerando médias diárias, é aproximadamente constante para vários tipos de coberturas como feijão, cevada, grama e pinus. Esta relação é confirmada, seja a partir de dados médios diários ou a partir dos dados tomados a cada meia hora, com uma inclinação diferente daquela proposta pelo autor (Figura 15).

FIGURA 15 - Correlação entre a fração da energia disponível à evaporação $LE/(R_L - F_C)$ e a resistência estimada da cobertura vegetal (r_c). Comparação com a relação obtida por MONTEITH (1965).

4.5.2.4. r_c e a demanda atmosférica

A variação diurna de r_c e a diferença de pressão de vapor (Δe) entre o nível da cobertura vegetal ($e(T_0)$) e o nível de referência ($e(T_z)$) são mostradas na Figura 16 para os 4 dias considerados.

Os valores mínimos de r_c observados nos horários com temperaturas mais elevadas do dia são resultados da maior demanda atmosférica (valores elevados de Δe), o que promove um aumento no fluxo de calor latente para a atmosfera, levando conseqüentemente a um decréscimo na resistência imposta pela cobertura da perda de água.

Segundo Plaut e Moreshet (1973), citados por PEDRO JR. e VILLA NOVA (1983), o valor mínimo de r_c para feijão é da ordem de $0,48 \text{ s cm}^{-1}$, próximo ao de $0,41 \text{ s cm}^{-1}$, observado dia 09/03/84 às 12:30 horas. Entre 8:00 e 15:00 horas, nos 4 dias r_c se situou geralmente entre 0,5 e $0,9 \text{ s cm}^{-1}$, semelhante aos dados obtidos por DAVIES (1972).

Sob condições de alta demanda atmosférica, normalmente típicas por volta das 12:00 horas, as plantas podem ser induzidas a ativar o mecanismo de fechamento dos estômatos e reduzir a transpiração, promovendo uma certa elevação em r_c , tal situação foi observada no dia 09/03/84, quando r_c variou de $0,70 \text{ s cm}^{-1}$ às 11:30 horas para $0,81 \text{ s cm}^{-1}$ às 12:00 horas, voltando a baixar para $0,41 \text{ s cm}^{-1}$ às 12:30 horas; Δe nestes horários era de cerca de 5,0 mb. No dia 10/03/84, este aspecto

FIGURA 16 - Variação diurna da resistência da cobertura (r_c) e da diferença de pressão de vapor para os 4 dias.

ficou mais evidente com Δe de cerca de 9 mb, entre 11:00 e 12:00 horas, o que fez com que r_c passasse de 0,65 a 1,36 s cm⁻¹ neste período. Comportamento semelhante foi observado por PEDRO JR. e VILLA NOVA (1983), para uma cultura de soja.

A intensa nebulosidade presente no dia 06/03/84 com uma baixa energia disponível, proporcionou um r_c mínimo (cerca de 0,75 s cm⁻¹), maior que os observados para os demais dias, com uma variação diária não tão acentuada como estes.

Com exceção do dia 10/03/84, não se observou um comportamento decrescente de r_c a partir das primeiras horas da manhã, conforme se verifica (de modo inverso) à medida que se aproxima o final da tarde. O mesmo foi constatado por DEEHER-AMISSAH (1980), e é devido à presença de orvalho sobre a folhagem no início da manhã, o que facilita o fluxo evaporativo com conseqüente redução de r_c .

4.5.2.5. r_c e os potenciais da água na folha (ψ_F) e solo (ψ_S)

Comparando r_c com a variação horária do potencial total da água na folha (ψ_F), nota-se que uma diminuição em ψ_F implica numa redução em r_c conforme observaram JUNG e SCOTT (1980) em soja, que também verificaram os maiores valores de ψ_F e menores de r_c por volta das 12:00 horas. Nos 4 dias, o valor mínimo de ψ_F manteve-se em torno de -8,0 mb. Quanto à $\Delta\psi_S$, as maiores variações ao longo do dia foram observadas nos

dias 01 e 06/03/84, superando 30 mb no primeiro e chegando a 24 mb no segundo dia. Para os dias 09 e 10/03/84, $\Delta\psi_S$ ficou em torno de 11 mb (Figura 17).

KANEMASU e TANNER (1969), trabalhando com feijão, verificaram uma mesma tendência de variação ao longo do dia entre os potenciais ψ_S e ψ_F , confirmando a relação inversa entre estes e a resistência estomática (r_{st}). Semelhante comportamento pode ser observado na Figura 17, com $\Delta\psi_S$ atingindo seus maiores valores coincidentemente com os máximos ψ_F , e que o aumento de ambos implica numa redução na resistência r_c .

Existe uma tendência de que a variação de $\Delta\psi_S$ ao longo do dia diminua do dia 01/03 para o dia 06/03, e deste para os dias 09 e 10/03/84, isto deve ter ocorrido devido à maior exposição do solo no dia 01/03/84 (com IAF de 3), o qual à medida que foi sendo menos exposto, apresentou variações menores de $\Delta\psi_S$ com o dia 06/03/84, indicando um IAF de 4,5 e os dias 09 e 10/03/84 um IAF de 5.

FIGURA 17 - Comportamento da resistência da cobertura (r_c) em comparação com o potencial da água na folha (ψ_F) e a variação horária do potencial da água no solo a 15 cm ($\Delta\psi_s$), ao longo dos 4 dias.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e discutidos, conclui-se que:

1) O balanço hídrico mostrou ser um eficiente instrumento para caracterizar as diversas fases da cultura, em termos do consumo de água. O coeficiente de cultura calculado com base neste balanço e no método da radiação variou de 0,15 a 1,43.

2) Tomando-se como referência os valores medidos de $(R_L - F_C)$, o balanço de energia estimado da forma residual para LE, e LE_p estimado a partir da proposição de Penman, traduz satisfatoriamente, para valores instantâneos, o transporte vertical de vapor para uma cobertura vegetada, sendo os valores de LE ligeiramente inferiores a LE_p e menos sensíveis às variações devido à advecção.

3) A resistência aerodinâmica (r_a) se correlaciona de uma forma exponencial com a velocidade do vento a 140 cm

acima do dossel, e sua estimativa feita com dados de U em apenas um nível, resultou na expressão ($r \approx 0,90$). Com respeito a valores médios diários, para o estágio de máximo desenvolvimento vegetativo, r_a é de cerca de $0,57 \text{ s cm}^{-1}$.

4) A resistência de cobertura (r_c) é influenciada por parâmetros físicos e fisiológicos, ou seja:

a) r_c mostrou uma correlação relativamente boa com a fração de energia disponível para a evapotranspiração, sendo esta correlação uma exponencial negativa;

b) r_c mostrou-se bastante sensível às variações diurnas da diferença de pressão de vapor (Δe) e com o potencial de água no solo (ψ_s);

c) a correlação entre r_c e a resistência estomática (r_{st}) é positiva, sendo r_{st} relativamente mais elevada do que r_c .

d) as variações diurnas de r_c e do potencial de água na folha (ψ_F) evidenciaram que r_c é sensível às variações de ψ_F , com exceção nos horários com temperaturas elevadas.

5) Com este estudo, ficou evidenciada a necessidade de se proceder a novos levantamentos de dados no sistema solo-planta-atmosfera, visando a quantificar, para várias condições, as relações entre resistências ao transporte de água e fatores físicos e fisiológicos.

6. LITERATURA CITADA

- ANDRÉ, R.G.B., 1973. *Obtenção da razão de Bowen para a estimativa da evaporação potencial em condições micrometeorológicas*. São Carlos, EESC/USP, 71 p. (Dissertação de Mestrado).
- ANDRÉ, R.G.B., 1981. *Um estudo dos transportes verticais de momentum, calor sensível e vapor d'água sobre superfície vegetada nos trópicos*. São José dos Campos, INPE/CNPq, 112 p. (Tese de Doutorado).
- BAILEY, W.G. e J.A. DAVIES, 1981. The effect of uncertainty in aerodynamic resistance on evaporation estimates from the combination model. *Boundary-Layer Meteorology*, Dordrecht, 20:187-199.
- BAVER, L.D.; W.H. GARDNER e W.R. GARDNER, 1973. *Física de solos*. México, Union Tipográfica Hispano-Americana. 529 p.
- BERKOWICS, R. e L.P. PRAHM, 1982. Sensible heat flux estimated from routine meteorological data by the resistance method. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, 21:1845-1864.

- BEVEN, K., 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hidrology*, 44:169-190.
- BILL JR., R.G.; L.H. ALLEN JR.; T. AUDUNSON; B. GEBHART e E. LEMON, 1976. Turbulent transport within and above a maize canopy. *Boundary-Layer Meteorology*, Dordrecht, 10:199-220.
- BLACK, T.A.; TANNER, C.B. e W.R. GARDNER, 1970. Evapotranspiration from a snap bean crop. *Agronomy Journal*, Madison, 62:66-69.
- BRADY, R.A.; S.M. GOLTZ; W.L. POWERS e E.T. KANEMASU, 1975. Relation of soil water potencial to stomatal resistance of soybean. *Agronomy Journal*, Madison, 67:97-99.
- BROWN, K.W. e N.J. ROSEMBERG, 1973. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field. *Agronomy Journal*, Madison, 65:341-347.
- BRUIN, H.A.R. e C.J. MOORE, 1985. Zero plane displacement and roughness length for tall vegetation, derived from a simple mass conservation hypotesis. *Boundary-Layer Meteorology*, Dordrecht, 31:39-49.
- BRUTSAERT, W., 1982. *Evaporation into the atmophere*. Holanda, D. Reidel Publishing Co. 299 p.
- CAMPBELL, G.S., 1977. *An introduction to environmental biophysics*. Nova Iorque, Springer-Verlag. 159 p.

- DAVIES, J.A., 1972. Actual, potencial and equilibrium evaporation for a beanfield in southern Ontário. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, 10:331-348.
- DEHEER-AMISSAH, A.; U. HÖGSTRÖM e A.S. SMEDMAN-HÖGSTRÖM, 1981. Calculation of sensible and latent heat fluxes and surface resistance from profile data. *Boundary-Layer Meteorology*, Dordrecht, 20:35-49.
- DOORENBOS, J. e W.O. PRUITT, 1975. *Crop water requirements*. Roma, FAO. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).
- DYER, A.J., 1974. A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorology*, Dordrecht, 7:363-372.
- ELSTON, J. e J.L. MONTEITH, 1975. Micrometeorology and ecology. In: MONTEITH, J.L. *Vegetation and the atmosphere*. London, Academic Press., p. 1-11.
- FICUS, E.L. e P.J. KRAMER, 1975. Liquid phase resistance to water flow in plants. *What's New in Plant Physiology*, 7: 1-4.
- GRANT, D.R., 1975. Comparison of evaporation from barley with Penman estimates. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, 15: 49-60.
- HEILMAN, J.L. e E.T. KANEMASU, 1976. An evaluation of a resistance form of the energy balance to estimate evapotranspiration. *Agronomy Journal*, Madison, 68:607-611.

- HILLEL, D., 1970. *Solo e água. Fenômenos e princípios físicos*. Porto Alegre, Departamento de Solos, UFRS. 231 p.
- HÖGSTRÖM, U., 1985. Von karman's constant in atmospheric Boundary-Layer Flow: Reevaluated. *Journal of Atmospheric Sciences*, Boston, 42:263-270.
- JARVIS, P.G., 1976. The interpretation of the variation in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. R. Soc.*, London, 273B:593-610.
- JUNG, P.K. e H.D. SCOTT, 1980. Leaf-water potential, stomatal resistance and temperature relations in field grown soybeans. *Agronomy Journal*, Madison, 72:986-990.
- KANEMASU, E.T. e C.B. TANNER, 1969. Stomatal diffusion resistance of snap beans. I. Influence of leaf-water potential. *Plant Physiology*, Baltimore, 44:1547-1552.
- KING, K.M., 1961. Evaporation from land surface. *Proceedings of Hidrology Symposium*, Nº 2, Evaporation, p. 55-80.
- LEMON, E., 1966. Micrometeorology and the physiology of plants in their natural environmental. In: STEWARD, F.C. *Plant Physiology*. Nova Iorque, Academic Press, IV-A:203-227.
- LEVITT, J., 1966. Resistance to water transport in plants - a misconception. *Nature*, Outubro, p. 527.
- LIBARDI, P.L.; K. REICHARDT; D.R. NIELSEN e J.W. BIGGAR, 1980. Simple field method for estimating soil hidraulic conductivity. *Soil Sc. Soc. Am. Journal*, Madison, 44:3-7.

- MEYER, B.S.; D.B. ANDERSON e R.H. BÖHNING, 1960. *Introdution to plant physiology*. Nova Jersey, Nostrand Co. 541 p.
- MILNE, R., 1979. Water loss and canopy resistance of a young sitka spruce plantation. *Boundary-Layer Meteorology*, Dordrecht, 16:67-81.
- MILNE, R.; J.D. DEANS; E.D. FORD; P.G. JARVIS; J. LEVERENZ e D. WHITEHEAD, 1985. A comparison of two methods of estimating transpiration rates from a sitka spruce plantation. *Boundary-Layer Meteorology*, Dordrecht, 32:155-175.
- MONTEITH, J.L., 1965. Evaporation and environment. In: FOGG, G.F. *The state and movement of water in living organisms*. Nova Iorque, Academic Press., p. 205-234.
- MONTEITH, J.L., 1973. *Principles of environmental physics*. Londres, Edward Arnold Ltd. 241 p.
- MONTEITH, J.L., 1981. Evaporarion and surface temperature. *Quart. J. R. Met. Society*, London, 107:1-27.
- PEDRO JR., M.J. e N.A. VILLA NOVA, 1983. Estimativa da resistência ao transporte de vapor d'água em uma cultura de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 18:691-694.
- PORTES, T.A., 1981. *Manual de métodos de pesquisa em feijão-parâmetros fisiológicos e agrônômicos comumente empregados na pesquisa com feijão (Phaseolus vulgaris, L.)*. Suplemento I. Goiânia, EMBRAPA. 22 p.

- PRUITT, W.O.; D.L. MORGAN e F.J. LOURENCE, 1973. Momentum and mass transfers in the surface Boundary-Layer. *Quart. J. R. Met. Society*, London, 99:370-386.
- RANZANI, G.O.; O. FREIRE E. T. KINJO, 1966. *Carta de solos do município de Piracicaba*. Piracicaba, Centro de Estudos do Solo, ESALQ/USP.
- REICHARDT, K., 1975. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. Piracicaba, Publicação Especial do CENA e Fundação CARGILL. 286 p.
- REICHARDT, K., 1979. A água: absorção e translocação. In: FERRI, M.G. *Fisiologia vegetal*. São Paulo, Ed. da Universidade de São Paulo, 1:3-24.
- REVFEIM, K.J.A. e R.B. JORDAN, 1976. Precision of evaporation measurements using the Bowen ratio. *Boundary-Layer Meteorology*, Dordrecht, 10:97-111.
- RICHTER, H., 1973. Frictional potential losses and total water potencial in plants: A re-evaluation. *Journal of Experimental Botany*, 24:983-994.
- RUSSEL, G., 1980. Crop evaporation, surface resistente and soil water status. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, 21: 213-226.
- RUTTER, A.J., 1975. The hidrological cycle in vegetation. In: MONTEITH, J.L. *Vegetation and the atmosphere*, Londres, Academic Press. p. 111-150.

- SHAW, R.H., 1977. *Curso de Micrometeorologia*. Piracicaba, Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP. 114 p.
- SLAVIK, B., 1974. *Methods os studying plant water relations*. Praga, Springer-Verlag. 449 p.
- SPITTLEHOUSE, D.L. e T.A. BLACK, 1979. Determination of forest evapotranspiration using Bowen ratio and eddy correlation measurements. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, 18: 647-653.
- STEWART, J.B. e A.S. THOM, 1973. Energy budgets in pine forest. *Quart. J. R. Met. Society*, London, 99:154-170.
- SUMAYAO, C.R. e E.T. KANEMASU, 1979. Temperature and stomatal resistance of soybeans leaves. *Canadian Journal of Plant Science*, 59:153-162.
- SUTCLIFFE, J., 1980. *As plantas e a água*. São Paulo, Ed. da Universidade de São Paulo. 126 p. (Coleção Temas de Biologia, 23).
- SWINBANK, W.C. e A.J. DYER, 1967. An experimental study in micrometeorology. *Quart. J. R. Met. Society*, London, 93-494-500.
- TAN, C.S. e T.A. BLACK, 1976. Factors affecting the canopy resistance of a Douglas-Fir forest. *Boundary Layer Meteorology*, Dordrecht, 10:475-488.
- TANNER, C.B., 1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Soil Science Soc. of American Proc.*, Madison, 24:1-9.

- THORNTHWAITE, C.W. e F.K. HARE, 1965. The loss of water to the air. *Meteorological Monographs*, Boston, 6(28):163-172.
- THOM, A.S., 1971. Momentum absorption by vegetation. *Quart. J. R. Met. Society*, London, 97:414-428.
- THOM, A.S., 1972. Momentum, mass and heat exchange of vegetation. *Quart. J. R. Met. Society*, London, 98:124-134.
- THOM, A.S., 1975. Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In: MONTEITH, J.L. *Vegetation and the atmosphere*. Londres, Academic Press. p. 57-109.
- VASQUES, E.J., 1978. Determinação de parâmetros micrometeorológicos através do ajuste do perfil de vento. Piracicaba, ESALQ/USP. 92 p. (Dissertação de Mestrado).
- VERMA, S.B.; N.J. ROSEMBERT; B.L. BLAD e M.W. BARADAS, 1976. Resistance-energy balance model for predicting evapotranspiration: Determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects. *Agronomy Journal*, Madison, 68: 776-782.
- VILLA NOVA, N.A., 1973. Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz. Piracicaba, ESALQ/USP. 89 p. (Tese de Livre-Docência).
- WEBB, E.K., 1965. Aerial microclimate. *Meteorological monographs*, Boston, 6:27-58.
- WEBB, E.K., 1970. Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability. *Quart. J. R. Met. Society*, London, 96(407):67-70.

A P Ê N D I C E

APÊNDICE 1 - Componentes do balanço de energia (R_L , F_C , H , LE e LE_p), transpiração foliar (Transp.), resistências da cobertura (r_c) e estomática (r_{st}), dados de temperaturas (T_0 e T_z), pressão de vapor ($e_s(T_0)$, $e(T_0)$, $e_s(T_z)$ e $e(T_z)$), potencial da água na folha (ψ_p) e variação do potencial da água no solo ($\Delta\psi_s$), obtidos ao longo do dia 01/03/84.

Hora	cal cm ⁻² min ⁻¹				s cm ⁻¹				°C				mb			
	R_L	F_C	H	LE	LE_p	Transp.	r_c	r_{st}	T_0	T_z	$e_s(T_0)$	$e(T_0)$	$e_s(T_z)$	$e(T_z)$	ψ_p	$\Delta\psi_s$
7:30	0,177	0	-0,052	0,125	0,177	-	1,288	-	23,24	21,40	28,54	22,82	25,50	22,48	-	4,95
8:00	0,272	0,026	-0,015	0,231	0,246	-	1,120	-	27,40	25,65	36,53	27,33	32,96	27,43	0,0039	-
8:30	0,345	0,039	0,006	0,300	0,306	0,353	0,827	0,914	26,95	26,50	35,58	26,76	34,65	24,40	-	3,70
9:00	0,492	0,050	0,156	-	0,429	-	-	-	34,59	26,55	55,06	29,30	34,75	25,53	-	-
9:30	0,529	0,096	0,086	0,347	0,491	0,590	1,383	0,019	26,70	29,81	41,99	24,93	35,06	23,81	-	6,18
10:00	0,678	0,125	0,138	0,415	0,644	-	-	-	27,45	30,46	43,58	22,95	36,64	24,71	-	-
10:30	0,793	0,141	0,040	0,612	0,731	0,903	0,810	0,597	30,26	29,15	43,09	25,47	40,44	23,81	0,0069	16,07
11:00	0,821	0,179	0,023	0,619	0,731	-	0,773	-	30,46	28,90	43,58	26,57	39,87	22,13	-	-
11:30	0,895	0,216	-	-	0,746	1,160	-	0,494	32,00	27,90	47,60	21,51	37,62	23,24	-	21,01
12:00	0,921	0,221	-	-	-	-	-	-	-	28,55	-	-	39,06	22,81	-	-
12:30	0,937	0,068	-0,031	0,900	0,898	1,149	0,573	0,734	30,36	30,55	43,33	25,00	43,83	23,61	-	23,48
13:00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13:30	0,860	0,061	-0,034	0,883	0,847	-	0,683	-	31,46	30,65	46,13	24,69	44,18	25,22	-	30,91
14:00	0,828	0,080	-0,061	0,809	0,834	1,052	0,741	0,795	31,90	33,15	47,33	26,04	50,79	21,41	-	-
14:30	-	-	-	-	-	-	-	-	29,20	-	-	-	40,56	22,27	0,0082	38,31
15:00	-	-	-0,153	0,303	-	-	1,240	-	26,38	29,80	34,45	21,10	41,99	20,41	-	-
15:30	0,511	0,012	-	-	-	0,661	-	0,929	30,05	31,90	42,48	23,85	41,15	22,68	-	28,43
16:00	0,366	0,008	-	-	-	-	-	-	30,20	-	-	-	42,97	19,48	0,0074	-
16:30	0,348	0	-	-	-	-	-	-	28,70	-	-	-	39,41	20,68	-	25,96
17:00	0,125	-0,023	-	-	-	-	-	-	27,80	-	-	-	37,40	21,28	-	-
17:30	0,091	-0,050	-0,183	0,279	0,512	0,231	1,315	3,039	26,69	28,80	35,06	22,02	39,64	20,95	0,0053	14,83
18:00	0,046	-0,006	-0,203	0,256	0,379	-	1,008	-	25,39	29,10	32,47	23,30	40,33	22,34	-	-
18:30	-0,042	-0,017	-0,124	0,124	0	0,092	2,544	24,700	24,79	26,90	31,33	20,12	35,48	20,44	-	14,84

APÊNDICE 2 - Componentes do balanço de energia (R_L , F_C , H , LE e LE_p), transpiração foliar (Transp.), resistências da cobertura (r_c) e estomática (r_{st}), dados de temperaturas (T_0 e T_z), pressão de vapor ($e_s(T_0)$, $e(T_0)$, $e_s(T_z)$ e $e(T_z)$), potencial da água na folha (ψ_p) e variação do potencial da água no solo ($\Delta\psi_s$), obtidos ao longo do dia 06/03/84.

Hora	cal cm ⁻² min ⁻¹				s cm ⁻¹			°C			mb			
	R_L	F_C	H	LE	LE_p	Transp.	r_c	r_{st}	T_0	T_z	$e_s(T_0)$	$e(T_0)$	$e_s(T_z)$	$e(T_z)$
7:30	0,093	-0,009	0,018	0,085	0,081	-	0,685	-	22,60	21,65	27,44	25,37	25,90	25,33
8:00	0,083	-0,007	0,024	0,066	0,083	-	0,742	0,232	22,16	21,10	26,70	24,96	25,04	23,52
8:30	0,158	0	0,009	0,149	0,136	-	-	-	22,82	22,25	27,78	26,22	26,86	25,16
9:00	0,232	0,002	0	0,229	0,220	-	-	-	24,78	21,30	31,33	25,81	25,35	21,70
9:30	0,317	0,028	0,034	0,255	0,280	-	1,433	-	28,12	23,55	38,06	25,08	29,06	23,31
10:00	0,282	0,016	0,016	0,249	0,207	0,350	0,852	1,139	25,31	24,05	32,28	24,74	29,95	28,66
10:30	0,344	0,026	0,001	0,316	0,297	-	0,840	-	26,35	25,65	34,25	24,82	32,96	26,01
11:00	0,273	0,005	0,036	0,232	0,286	0,292	1,082	1,106	25,73	24,30	33,05	24,13	30,40	24,26
11:30	0,328	0,016	0,011	0,301	0,347	-	0,823	-	26,03	25,90	33,64	24,84	33,45	25,10
12:00	0,366	0,036	0,020	0,310	0,336	0,362	-	1,040	31,87	26,50	47,33	28,31	34,65	26,28
12:30	0,320	0,023	0,022	0,275	0,300	-	0,819	-	27,29	27,45	36,32	28,32	36,64	25,89
13:00	0,416	0,025	-	-	-	-	-	-	-	26,95	-	-	35,58	25,15
13:30	0,445	0,046	-0,015	0,384	0,408	-	0,855	-	29,18	29,15	40,56	28,90	40,44	27,70
14:00	0,638	0,049	-0,032	0,557	0,588	0,547	0,764	1,002	29,35	29,75	40,92	25,79	41,87	25,58
14:30	0,433	0,039	0,036	0,358	0,406	-	1,119	-	29,87	27,05	42,23	28,00	35,79	26,04
15:00	0,337	0,032	-0,008	0,297	0,347	-	1,248	0,642	28,52	28,00	38,95	25,78	37,84	26,25
15:30	0,270	0,023	-0,004	0,244	0,249	-	1,001	-	27,89	27,15	36,62	27,94	36,00	26,69
16:00	0,184	0,011	-0,033	0,140	0,244	-	1,156	1,107	27,22	28,20	36,11	30,36	38,28	25,40
16:30	0,187	0,009	-0,031	0,148	0,246	-	1,917	-	27,01	27,65	35,69	25,61	37,07	25,28
17:00	0,152	0	-0,035	0,117	0,213	0,231	1,862	1,995	25,92	27,20	33,45	25,71	36,11	26,77
17:30	0,103	-0,005	-0,075	0,033	0,310	-	5,757	-	24,99	26,70	31,70	24,95	35,06	26,03
18:00	0,050	-0,006	-0,035	0,020	0,281	0,105	14,143	5,762	26,65	27,50	34,96	24,91	36,75	25,14
18:30	0,045	-0,002	-0,058	0,076	0	0,008	-	184,140	23,97	25,50	29,86	27,26	32,66	25,88

APÊNDICE 3 - Componentes do balanço de energia (R_L , F_C , H , LE e LE_p), transpiração foliar (Transp.), resistências da cobertura (r_c) e estomática (r_{st}), dados de temperaturas (T_0 e T_z), pressão de vapor ($e_s(T_0)$, $e(T_0)$, $e_s(T_z)$ e $e(T_z)$), potencial da água na folha (ψ_F) e variação do potencial da água no solo ($\Delta\psi_S$), obtidos ao longo do dia 09/03/84.

Hora	cal cm ⁻² min ⁻¹					s cm ⁻¹			°C		mb				
	R_L	F_C	H	LE	LE_p	Transp.	r_c	r_{st}	T_0	T_z	$e_s(T_0)$	$e(T_0)$	$e_s(T_z)$	$e(T_z)$	$\Delta\psi_S$
7:30	0,148	-0,007	0,058	0,085	0,081	-	0,685	-	22,62	16,20	27,44	15,83	18,42	16,09	- 1,24
8:00	0,267	0	-	-	-	-	-	-	-	19,10	-	-	22,12	21,51	0,0063
8:30	0,383	0,007	0,115	0,260	0,347	0,316	1,442	0,719	28,33	24,60	38,50	25,18	30,96	26,24	- 0,85
9:00	0,612	0,024	-	-	-	-	-	-	-	25,50	-	-	32,66	26,46	-
9:30	0,645	0,030	-	-	-	-	-	-	-	26,30	-	-	34,25	25,47	-
10:00	0,821	0,506	-	-	-	-	-	-	-	27,70	-	-	37,18	24,77	0,0072
10:30	1,009	0,530	0,121	0,835	0,864	-	1,619	-	38,80	28,60	69,36	21,24	39,18	25,37	-
11:00	0,933	0,543	0,055	0,832	0,845	0,753	0,748	0,975	33,18	30,20	50,93	29,06	42,97	29,18	-
11:30	0,886	0,642	0,103	0,719	0,796	-	0,705	1,180	32,25	27,90	48,14	30,13	37,62	25,36	- 11,13
12:00	0,925	0,071	0,022	0,832	0,813	-	0,911	-	33,87	31,15	52,96	28,99	45,36	28,55	0,0076
12:30	1,024	0,048	0,020	0,957	0,851	-	0,410	-	27,80	28,70	37,40	33,47	39,41	27,87	- 1,23
13:00	0,889	0,096	0,033	0,758	0,778	0,761	0,855	0,865	31,96	30,20	47,60	30,63	42,97	27,77	-
13:30	0,855	0,033	0,019	0,804	0,826	-	0,724	-	33,67	31,80	52,37	31,69	47,07	28,50	-
14:00	0,889	0,064	0,064	0,761	0,785	-	0,818	-	35,26	30,90	57,08	34,95	44,72	28,72	- 4,94
14:30	0,794	0,041	0,154	0,598	0,808	0,686	0,890	1,987	34,26	30,75	54,00	35,08	44,34	29,85	0,0079
15:00	0,724	0,019	0,107	0,598	0,833	-	1,248	1,340	33,48	31,00	51,79	32,59	44,98	27,74	- 2,48
15:30	0,589	-0,008	-	-	-	-	-	-	29,07	30,20	40,21	30,08	42,97	24,08	-
16:00	0,440	-0,022	-	-	-	-	-	1,107	-	-	-	-	-	-	0,0069
16:30	0,126	-0,011	-	-	-	-	-	-	27,45	30,40	36,64	26,12	43,46	24,18	-
17:00	0,031	-0,030	-0,053	0,115	0,312	0,267	1,862	4,350	29,34	29,90	40,92	26,48	42,23	23,91	- 6,18
17:30	0,047	-0,021	-0,301	-	-	-	-	15,480	29,72	29,60	41,75	23,06	41,51	24,71	-
18:00	0,047	-0,024	-	-	-	-	-	-	-	28,40	-	-	38,73	22,81	- 3,71
18:30	-0,062	-0,028	-	-	-	-	-	-	-	25,00	-	-	31,70	24,82	0,0059

APÊNDICE 4 - Componentes do balanço de energia (R_L , F_C , H , LE e LE_p), transpiração foliar (Transp.), resistências da cobertura (r_c) e estomática (r_{st}), dados de temperaturas (T_0 e T_z), pressão de vapor ($e_s(T_0)$, $e(T_0)$, $e_s(T_z)$ e $e(T_z)$), potencial da água na folha (ψ_F) e variação do potencial da água no solo ($\Delta\psi_S$), obtidos ao longo do dia 10/03/84.

Hora	cal cm ⁻² min ⁻¹				s cm ⁻¹			°C			mb					
	R _L	F _C	H	LE	LE _p	Transp.	r _c	r _{st}	T ₀	T _Z	e _s (T ₀)	e(T ₀)	e _s (T _Z)	e(T _Z)	ψ _F	Δψ _S
7:30	0,153	0,005	0,044	0,105	0,124	-	0,391	-	24,79	21,75	31,33	23,77	26,06	23,63	-	2,47
8:00	0,254	0,013	0,085	1,156	0,268	-	1,521	-	27,52	23,70	36,75	28,32	29,33	21,69	0,0057	-
8:30	0,359	0,022	0,061	0,276	0,303	0,495	1,593	2,030	29,99	24,55	42,48	26,86	30,87	25,23	-	1,24
9:00	0,468	0,031	0,052	0,385	0,429	-	1,383	-	31,04	27,75	44,98	26,06	37,30	27,14	-	-
9:30	0,594	0,048	0,027	0,519	0,478	0,545	1,249	1,820	34,57	29,70	55,06	32,02	41,75	31,73	-	0
10:00	0,694	0,062	0,081	0,551	0,594	-	-	-	37,05	29,35	64,56	24,45	40,92	28,07	0,0065	-
10:30	0,793	0,065	0,133	0,595	0,695	0,744	0,744	1,000	32,83	29,05	49,80	34,07	40,21	30,32	-	2,48
11:00	0,855	0,071	0,070	0,715	0,764	-	0,655	-	33,42	30,10	51,50	34,86	42,72	25,96	-	-
11:30	0,887	0,072	0,166	0,649	0,817	0,656	0,898	1,230	35,58	29,90	58,10	37,49	42,23	28,98	-	8,65
12:00	0,960	0,087	0,048	0,826	0,979	-	1,359	-	38,17	32,30	67,06	27,17	48,42	30,95	0,0079	-
12:30	0,985	0,109	0,043	0,833	0,997	0,942	-	0,990	40,91	32,15	77,47	24,25	48,00	26,98	-	8,65
13:00	0,969	0,099	-0,030	0,900	0,988	-	1,069	-	38,45	33,90	67,96	33,78	52,96	29,50	-	-
13:30	0,892	0,102	-0,037	0,827	0,970	0,740	0,644	1,900	32,61	32,60	49,24	30,32	49,24	27,97	-	6,18
14:00	0,870	0,111	-0,040	0,799	0,614	-	0,652	-	33,47	32,90	51,79	33,29	50,08	26,99	0,0081	-
14:30	0,775	0,024	0,006	0,749	0,617	0,815	0,830	0,617	34,70	33,95	55,37	33,28	53,11	27,35	-	11,13
15:00	0,706	0,007	-0,020	0,720	0,874	-	1,115	-	34,53	34,40	54,76	26,23	54,46	29,84	-	-
15:30	0,591	-0,012	0,064	0,540	0,790	0,774	1,007	1,550	33,73	32,10	52,37	31,70	47,87	29,36	-	9,88
16:00	0,523	0	-0,057	0,580	0,701	-	1,484	-	35,88	32,50	59,16	28,58	48,97	28,83	-	-
16:30	0,372	-0,019	-0,013	0,404	0,637	0,581	-	2,220	31,51	31,95	46,27	27,29	47,46	26,86	0,0080	0
17:00	0,278	-0,028	0,019	0,287	0,648	-	2,439	-	31,23	31,00	45,49	20,62	44,98	24,51	-	-
17:30	0,096	0	-0,037	0,133	0,292	0,267	3,348	5,440	29,75	30,35	41,99	29,75	43,33	27,04	-	1,24
18:00	0,004	-0,030	-0,010	0,134	0,219	-	4,778	-	30,58	29,90	43,96	21,21	42,23	25,97	-	-
18:30	-0,017	-0,031	-0,026	0,023	0	0,061	20,583	34,740	27,70	28,20	37,18	20,36	38,28	25,63	0,0067	3,71