

Ari de Oliveira Marques Filho (*)

Maria de Nazaré Goes Ribeiro (*)

RESUMO

Uma análise sobre a vinculação entre os fluxos de vapor d'água e de calor sensível com os correspondentes gradientes de umidade específica e temperatura, observados acima da floresta, é desenvolvida para as condições de instabilidade atmosférica, estas parametrizadas por meio do comprimento de estabilidade de Monin-Obukhov, L ; as relações entre fluxos e gradientes são explicitadas através das funções adimensionais, ϕ_V e ϕ_T , que têm como variável independente comum, a razão adimensional associada à altura de observação acima do plano referencial, $(z-d)/L$. As integrais dessas funções, apropriadas aos estudos que tratam com estimativas de evaporação de floresta são também desenvolvidas. As informações utilizadas neste trabalho foram obtidas em campanhas intensivas do "Experimento Micrometeorológico na Região Amazônica", realizadas nos meses de setembro-outubro de 1983 e julho-agosto de 1984, na Reserva Florestal Ducke, Manaus-AM.

INTRODUÇÃO

Estimativas de evaporação de floresta na região Amazônica, por procedimentos indiretos - formulações que requeiram medidas de gradientes de temperatura, velocidade do vento e umidade específica do ar, ou mesmo, equações que recebam suporte apenas de parâmetros meteorológicos medidos na camada limite superficial - representam a alternativa mais importante para a obtenção de informações sobre esse componente do ciclo hidrológico, frente às dificuldades de caráter instrumental que são encontradas para a sua observação direta em largos períodos de tempo.

Medidas direta da liberação de vapor d'água para a atmosfera através do processo de evapotranspiração de floresta, foram realizadas no Experimento Micrometeorológico na Região Amazônica - Reserva Florestal Ducke, em campanhas sucessivas de curta duração, nos anos de 1983 e 1984. Aproveitando os períodos que apresentavam dados simultâneos de fluxos e gradientes, Marques Filho & Ribeiro (1986) desenvolveram um primeiro estudo sobre as funções adimensionais de estabilidade para o fluxo de momentum, conjuntamente com

(*) Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Manaus - AM.

a determinação dos parâmetros característicos da rugosidade da vegetação.

Uma condensação ampla de resultados sobre as relações fluxos e gradientes (momentum - calor sensível - calor latente) foi apresentada na revisão de Yaglom (1976), com inclusão de uma discussão dos aspectos teóricos e limitações experimentais a eles vinculados. Desses estudos, as funções adimensionais estabelecidas por Dyer (1967) e Dyer & Hicks (1970), em situações de instabilidade atmosférica, aparentam ser as mais apropriadas e aceitas na determinação dos fluxos a partir do conhecimento dos respectivos gradientes, observados na atmosfera.

Como objetivos do presente trabalho, têm-se o estabelecimento das funções adimensionais de estabilidade para os fluxos de vapor d'água e de calor sensível em condições de instabilidade atmosférica, e uma comparação desses resultados com as funções obtidas para outras superfícies naturais em diferentes locais. A implicação das diferenças entre essas funções para os estudos de evaporação é também analisada.

MATERIAL E MÉTODOS

O conjunto de medidas simultâneas de fluxos e gradientes de temperatura, umidade específica e velocidade do vento, foi formado nas campanhas intensivas de agosto-setembro de 1983 e julho-agosto de 1984, realizadas na Reserva Florestal Ducke, Manaus-AM. Os aspectos gerais dessas atividades foram descritos por Shuttleworth *et al.* (1984 a, b).

Na torre meteorológica instalada no interior da floresta e sobressaindo aproximadamente 15 m acima das copas das árvores, medidas de velocidade do vento foram obtidas através de anemômetros de conchas, fixados nas extremidades de tubos metálicos, que os mantêm afastados 3,5 m das laterais da torre, em seis diferentes níveis (35,5m; 37,52m; 39,33m; 41,04m; 42,82m; e 44,66m); medidas de temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido foram efetuadas em quatro níveis diferentes (35,69m; 39,33m; 40,94m; e 44,65m), que, primariamente, permitem a composição de gradientes de temperatura e de umidade específica para duas camadas de ar acima da vegetação; os erros sistemáticos de medidas nessas camadas são eliminados por meio do sistema de intercâmbio de posições (McNeil & Shuttleworth, 1975). Os sensores de temperatura são termômetros de cristal de quartzo. A aquisição e armazenamento das informações é realizada por um sistema de microcomputação, que interroga os sensores, controla o intercâmbio de posições dos termômetros, e processa os valores médios de velocidade do vento, temperatura e umidade específica do ar em intervalos de 20 minutos.

As medidas dos fluxos de calor sensível, calor latente e de momentum, foram efetuadas através do Hydra, sistema composto pelos seguintes sensores: um anemômetro sônico vertical, um higrômetro, um termômetro constituído por termo-par, e dois anemômetros de hélice; esses sensores estão acoplados a um microprocessador que executa o cálculo dos fluxos e de outras grandezas características da turbulência atmosférica, conforme descrição apresentada por Shuttleworth *et al.* (1984a).

Os conjuntos de dados relativos aos intervalos de 20 minutos, que se enquadram num

mesmo horário, foram aglutinados num único conjunto, este contendo as médias horárias das medidas originais. As medidas de temperatura e umidade específica do ar, velocidade do vento e radiação solar, entre outras, se enquadram nesse caso, enquanto que as medidas dos fluxos representam originalmente médias horárias.

De acordo com a teoria de similaridade para uma camada de fluxo constante (Monin & Yaglom, 1977), os gradientes adimensionais de momentum, temperatura e vapor d'água, podem ser expressos como

$$\frac{\partial S}{\partial z} = \frac{S_*}{k(z-d)} \phi_S \quad \text{para } z > h \quad (1)$$

em que S pode representar a velocidade do vento u , temperatura potencial, umidade específica, e quaisquer outras quantidades, tais como matéria particulada na altura z . S_* representa qualquer um destes parâmetros de escala.

A partir dessa forma generalizada, podem ser estabelecidas equações para os principais fluxos que ocorram como resultado da interação entre superfícies naturais e a atmosfera. Particularmente, os fluxos de vapor d'água e de calor sensível podem então ser relacionados aos seus gradientes por meio das equações,

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{-H/(\rho c_p u_*^*)}{k(z-d)} \phi_T \quad (2)$$

e,

$$\frac{\partial q}{\partial z} = \frac{-E/(\rho u_*^*)}{k(z-d)} \phi_V \quad (3)$$

Nas equações acima, os símbolos têm os seguintes significados:

- k → constante de von Kármán (0,4) adimensional;
- z → altura de observação (m);
- d → altura de deslocamento do plano de referência (m);
- ϕ_S → função adimensional de estabilidade para o elemento S ;
- θ → temperatura potencial ($^{\circ}\text{K}$);
- H → fluxo de calor sensível (Watt/m^2);
- ρ → densidade do ar (kg/m^3);
- c_p → calor específico do ar a pressão constante ($\text{Joule}/(\text{kg}^{\circ}\text{K})$);
- u_*^* → velocidade de fricção (m/s);
- ϕ_T → função adimensional de estabilidade para o fluxo de calor;
- q → umidade específica do ar;
- E → fluxo de vapor d'água ($\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$);
- ϕ_V → função adimensional de estabilidade para o fluxo de vapor d'água.

As funções adimensionais têm o papel de corrigir os desvios nas relações apresentadas decorrentes das diferentes condições de estabilidade atmosférica durante as observações; em condições de neutralidade atmosférica, $\partial\theta/\partial z \approx 0$, essas funções assumem o valor unitário, e as equações fluxos-gradientes podem ser integradas, produzindo-se então nesse caso, os conhecidos perfis logarítmicos.

Em outras condições (estabilidade e instabilidade atmosférica) a integração das equações 2 e 3 depende do estabelecimento prévio das relações entre as funções adimensionais e as condições atmosféricas, estas parametrizadas de alguma forma. Monin & Obukhov propuseram como parâmetro adequado a essa finalidade, o seu comprimento de estabilidade L , que resultou de uma análise dimensional, na qual a hipótese básica assumida consistiu em que para turbulência completamente desenvolvida, os gradientes verticais de alguma propriedade seriam determinados pelas seguintes grandezas: fluxo de momentum; fluxo de calor sensível; fluxo da propriedade envolvida; parâmetro característico da flutuabilidade, g/T ; e da coordenada vertical, tomada acima do plano de referência, $(z-d)$ (Calder, 1967). Isso é equivalente a pesquisa de relações $\phi_V = \phi_V\{(z-d)/L\}$ e $\phi_T = \phi_T\{(z-d)/L\}$ nas quais L é dado pela seguinte expressão:

$$L = - \frac{u_*^3 c_p \rho T}{kg(H+0,61ETc_p)} \quad (4)$$

onde, as grandezas ainda não definidas têm os seguintes significados: T temperatura a uma dada altura de referência ($^{\circ}K$); e g representa a aceleração da gravidade em m/s^2 ; no comprimento de estabilidade L , a inclusão da correção relacionado com o fluxo de vapor d'água ($0,61ETc_p$) foi posterior ao trabalho original de Monin-Obukhov.

As variações das funções adimensionais com relação às condições de instabilidade atmosférica, têm sido amiudemente estabelecidas segundo a equação,

$$\phi_{V,T} = \{1 - \alpha(z-d)/L\}^{-\beta} \quad (5)$$

na qual, α e β são parâmetros que devem ser estimados a partir de dados experimentais. Observações simultâneas em vários níveis de temperatura e umidade do ar, permitem a determinação, através das diferenças finitas, dos gradientes dessas grandezas, que em conjunto com as medidas diretas dos fluxos de vapor d'água, calor sensível e momentum, completam o quadro de informações necessárias para o cálculo dos valores experimentais das funções adimensionais, segundo as equações 2 e 3, e os correspondentes valores da razão $(z-d)/L$.

O ajuste desses dados experimentais segundo a forma da equação 5, com a consequente determinação dos parâmetros que a descrevem, pode ter como critério "a minimização da soma dos quadrados das diferenças entre valores observados e calculados" expressa pela seguinte função objetiva, ZT :

$$ZT = \sum_{i=1}^N (\phi_o - \phi_c)^2 \quad (6)$$

A conformação dessa função pode revelar para quais valores de α e β ela assume um mínimo, procedimento de análise bem mais simplificado se comparado aos métodos iterativos que necessitam usualmente o desenvolvimento de algumas das derivadas da função objetiva. A pesquisa dos valores ótimos dos parâmetros no presente trabalho foi efetuada por meio da inspeção da conformação de ZT .

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

Os principais dados utilizados nesta análise estão aglutinados na Tabela 1, e são constituídos por valores médios horários das seguintes grandezas: perfil de temperatura potencial (quatro níveis de observação no sistema de intercâmbio de posições) e umidade específica do ar; fluxo de energia equivalente à evaporação, LE; fluxo de calor sensível, H; velocidade de fricção, u_* (esta coluna mostra períodos que apresentam a melhor concordância entre valores de u_* medidos pelo Hydra e os valores implícitos nas porções inferiores dos perfis de velocidade do vento, numa tolerância para discrepâncias próximas ao próprio erro de medida fornecido pelo Hydra, 33%); a última coluna apresenta o valor calculado para o comprimento de estabilidade de Monin-Obukhov, segundo a equação 4, em cada período horário.

Nesta tabela podem ser observadas as dificuldades para a obtenção dos perfis de temperatura e dos perfis de umidade específica do ar. Esta última grandeza apresenta uma dependência muito grande com relação ao bom funcionamento dos termômetros de bulbo úmido, fator que determina a perda de grande quantidade de informação; a eliminação dos erros sistemáticos nas medidas dos termômetros, que compõem cada par do sistema de intercâmbio de posição, favorece a obtenção de valores de temperatura com um alto grau de confiabilidade; como conseqüência, os gradientes observados na camada de ar associada a cada par de termômetros apresentam uma alta precisão, mas a combinação de termômetros de pares diferentes para a definição de novas camadas de ar com seus respectivos gradientes, leva a uma perda substancial na qualidade das informações. Esse aspecto é bem aparente nos perfis de umidade específica do ar. O evento favorável em que dois termômetros funcionem adequadamente, fornecendo a diferença de temperatura sem erro instrumental para uma dada camada de ar, é bem mais provável do que o evento no qual quatro termômetros (com a complicação adicional dos bulbos úmidos) devem funcionar perfeitamente para que a correspondente diferença de umidade específica do ar seja obtida.

Os critérios adotados para a rejeição de dados são, em linhas gerais, semelhantes aqueles utilizados por Marques Filho & Ribeiro (1986), e cuja descrição resumida pode ser apresentada nas seguintes proposições:

- Valor médio da velocidade do vento medida ao nível do Hydra (48,4) menor do que 1 m/s;
- Horários com excessiva variação nas condições meteorológicas locais (radiação, cobertura de nuvens, etc);
- Discrepâncias entre os valores da velocidade de fricção medida pelo Hydra e u_* determinado a partir das características dos perfis de velocidade do vento, superiores ao erro instrumental;
- Como regra geral, os gradientes de temperatura e umidade específica, correspondentes ao par inferior do sistema de intercâmbio (35, 65-39,35) foram rejeitados; essa rejeição se apoia em análises anteriores dos perfis de velocidade do vento, que evidenciaram uma disposição dos instrumentos entre as copas das árvores na altura de 35,65m. No estudo sobre os parâmetros de rugosidade da vegetação esse ponto de medida tinha sido

também desprezado.

Com os elementos da Tabela 1, os valores horários adequados da densidade do ar ρ e do calor específico a pressão constante c_p , e uma estimativa do deslocamento do plano de referência, d , as equações 2 e 3 fornecem valores experimentais para as funções adimensionais. Objetivando descrevê-las através de uma parametrização das condições atmosféricas, o valor experimental da variável independente é calculado simplesmente como a razão adimensional, $(z-d)/L$.

Uma ilustração dos pontos experimentais assim estabelecidos, é apresentada na Figura 1, para a função adimensional relativa ao fluxo de calor sensível. A Figura 2 está relacionada com a distribuição dos pontos determinados para a função adimensional relacionada com o fluxo de vapor d'água. Pelas dificuldades expostas anteriormente para a medida da umidade específica, a maior densidade de pontos na Figura 1 seria um fato esperado. A relativa compacidade dessa distribuição permite uma segura determinação da relação $\phi_T = \phi_T \{(z-d)/L\}$; esses aspectos favoráveis não se reproduzem na distribuição dos pontos experimentais da função adimensional para o fluxo de vapor d'água ϕ_V .

O ajuste de cada uma dessas funções foi procedido por processamento em microcomputador da função objetiva estabelecida na equação 6, tendo como resultante estimativas dos parâmetros α e β , em conformidade com a equação 5. Os valores ótimos obtidos acarretam as seguintes relações para as duas funções:

$$\phi_T = \{1 - 47(z - d)/L\}^{-3/5} \quad (7)$$

e

$$\phi_V = \{1 - 48(z - d)/L\}^{-1/2} \quad (8)$$

Estudos sobre a forma dessas funções para coberturas vegetais de pequeno e médio porte foram realizados por Dyer (1967) e Dyer & Hicks (1970); entre as conclusões desses trabalhos salienta-se a preconização da igualdade entre as funções adimensionais para os fluxos de calor sensível e de vapor d'água, nas suas variações decorrentes das diferentes condições de estabilidade atmosférica. Por outro lado, uma bem demarcada diferença entre essas duas funções quando comparadas à função adimensional para momentum também sobressai desses estudos.

Na Figura 3 estão reunidos os gráficos das diferentes funções obtidas com dados do experimento micrometeorológico da região Amazônica: as funções adimensionais para os fluxos de calor sensível e de vapor d'água, aqui estabelecidas, e a função adimensional para momentum, estabelecida anteriormente; a figura revela uma clara diferença entre a função adimensional para momentum em comparação com as outras duas. Estas últimas não apresentam entre si uma diferença tão destacada, e para a formação dessa diferença é razoável atribuir-se um peso considerável aos problemas de amostragem (quantidade dos pontos experimentais, limitações instrumentais, etc). De qualquer modo a hipótese de igualdade entre elas, pelos resultados ora apresentados, não pode ser descartada; antes, pelo contrário, uma quantidade maior de informação provavelmente venha a confirmá-la.

Nessa mesma figura os gráficos das funções ϕ_T e ϕ_V desenvolvidas por Dyer (1967)

apresentados. A comparação dessas funções com aquelas acima descritas e válidas para a região Amazônica, revela diferenças acentuadas, que se distribuem regularmente por todo o campo de valores da razão adimensional $(z-d)/L$, tanto para a função associada com o fluxo de calor sensível como para aquela relacionado com o fluxo de vapor d'água; isso indica que as condições específicas de cada experimento produzem funções adimensionais de estabilidade diferentes, como um reflexo do fato de que as condições ideais para as quais as funções seriam universais em realidade são difíceis de serem encontradas na natureza.

A partir do conhecimento das funções adimensionais ϕ_T e ϕ_V , as equações 2 e 3 tornam-se integráveis, e suas formas integradas têm uma grande aplicação para estimativas de taxas de evaporação; as informações adicionais reduzem-se às medidas das variáveis meteorológicas em dois níveis, ou até mesmo, em um nível apenas na camada limite superficial.

Seguindo o mesmo procedimento utilizado no estudo de Marques Filho & Ribeiro (1986) para a integração do perfil de velocidade do vento, assumindo agora que $x = [1 - 47(z-d)/L]^{1/5}$; $x_0 = [1 - 47z_0/L]^{1/5}$; $\Theta = \Theta_s$ (temperatura potencial na superfície) para $z=d+z_0$, e transformando a integral obtida para uma forma em que se tenha explicitado o perfil logarítmico generalizado, obtêm-se as seguintes expressões para o perfil de temperatura potencial,

$$\Theta - \Theta_s = \frac{-H/(\rho c_p u_*^*)}{\ln \frac{z-d}{z_0} - \Psi_T} \quad (9)$$

na qual a função integral de estabilidade Ψ_T é descrita pela seguinte equação,

$$\Psi_T = (1-R_3) \left\{ \ln \frac{x^2 - 2R_1x + 1}{x_0^2 - 2R_1x_0 + 1} + \frac{2R_1}{R_2} \left[\arctg \frac{x-R_1}{R_2} - \arctg \frac{x_0-R_1}{R_2} \right] \right\} + \\ + (1-R_1) \left\{ \ln \frac{x^2 - 2R_3x + 1}{x_0^2 - 2R_3x_0 + 1} + \frac{2R_3}{R_4} \left[\arctg \frac{x-R_3}{R_4} - \arctg \frac{x_0-R_3}{R_4} \right] \right\}$$

As constantes que aparecem nesta última equação têm sua origem no desmembramento do polinômio $(x^5 - 1)$, que surge após transformações necessárias ao desenvolvimento da integração da equação 2, em suas raízes imaginárias, de acordo com a formulação genérica, $\cos(j2\pi/5) + i \operatorname{sen}(j2\pi/5)$, $j=0,1,2,3,4$. Os seus valores são os seguintes: $R_1 = \cos 72^\circ$; $R_2 = \operatorname{sen} 72^\circ$; $R_3 = \cos 144^\circ$; $R_4 = \operatorname{sen} 144^\circ$.

Analogamente, o perfil de umidade específica pode ser estabelecido com as seguintes considerações: $y = [1 - 48(z-d)/L]^{1/2}$; ainda $y_0 = [1 - 48z_0/L]^{1/2}$; $q = q_s$ para $z=d+z_0$, resultando a expressão, similar em sua forma àquela determinada por Paulson (1970),

$$q - q_s = \frac{-\{E/(\rho u_*^*)\}}{k} \left[\ln \frac{z-d}{z_0} - \Psi_V \right] \quad (10)$$

na qual, a função integral de estabilidade é descrita pela equação

$$\Psi_V = \ln \frac{y + 1}{y_0 + 1}$$

As funções adimensionais para os fluxos de momentum, de calor sensível e de calor sensível e de calor latente, foram determinadas tendo como variável independente a razão adimensional relacionada ao comprimento de estabilidade de Monin-Obukhov. O conhecimento desse parâmetro depende de medidas dos fluxos acima indicados. Um parâmetro alternativo que descreve as condições de estabilidade atmosférica e que depende apenas das medidas dos gradientes de velocidade do vento, de temperatura e de umidade específica, é o número de Richardson, Ri, dado pela equação

$$Ri = -(g/T)(\partial\theta/\partial z)/(\partial u/\partial z)^2 \quad (11)$$

É importante para estudos que tratam com estimativas de evaporação, o conhecimento da vinculação entre esses dois parâmetros Ri e $(z-d)/L$. Essa conexão pode ser estabelecida a partir das equações que descrevem os gradientes, podendo ser encontrada a seguinte equivalência,

$$Ri = \{(z-d)/L\}(\phi_T/\phi_M^2) \quad (12)$$

A Figura 4 mostra a variação da razão entre a função ϕ_T e o quadrado da função ϕ_M com as condições de estabilidade atmosférica. A equação 12 permite a determinação da razão adimensional dada por $(z-d)/L$ por processo iterativo a partir das medidas dos gradientes das variáveis meteorológicas acima de uma cobertura vegetal.

As variações das funções integrais de estabilidade com relação às condições de instabilidade atmosférica, é mostrada na Figura 5. Procurando enfocar o aspecto qualitativo dessas variações, foram assumidos os seguintes valores para os parâmetros que caracterizam a rugosidade da vegetação: $d=30,7m$; $z_0=2,2m$, valores estimados no estudo de Marques Filho & Ribeiro (1986). A função integral de estabilidade associada aos resultados de Dyer & Hicks (1970) e estabelecida por Paulson (1970) também é mostrada nessa figura. A boa aproximação entre as funções determinadas para a região Amazônica Ψ_V e Ψ_T , é uma consequência da relativa semelhança das funções adimensionais que as originam. As largas diferenças entre qualquer uma dessas duas funções integrais comparada àquela função integral originária do estudo de Dyer & Hicks (1970) tem igualmente a mesma explicação.

CONCLUSÕES

As funções adimensionais de estabilidade para os fluxos de calor sensível e de vapor d'água foram estabelecidas em condições de instabilidade atmosférica na região Amazônica. Essas funções são adequadas para se fazer as correções aos valores dos fluxos inferidos a partir de medidas de gradientes das correspondentes grandezas meteorológicas, no intervalo de instabilidade $-2 < (z-d)/L < 0$.

Os resultados alcançados para as formas das funções adimensionais implicam em que não é mais possível, nas condições de instabilidade atmosférica, utilizar-se a simplificação $Ri=(z-d)/L$, tão útil nas aplicações práticas; isto decorre da desigualdade encontrada: $\phi_T \neq \phi_M^2$.

As funções integrais de estabilidade aqui desenvolvidas são apropriadas nos estudos relacionados com estimativas de evaporação de floresta, quando as informações disponíveis são limitadas e constituídas por medidas das variáveis meteorológicas num único nível de referência na camada limite superficial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos pesquisadores britânicos W. J. Shuttleworth, J. H. C. Gash, C. R. Lloyd, C. J. Moore, J. M. Roberts do Institute of Hydrology - Wallingford, UK; e aos pesquisadores brasileiros L. C. B. Molion, L. D. A. Sá, J. C. Nobre, L. M. R. Cabral, S. R. Patel, J. C. Moraes, V. P. Silva Filho, G. F. Fisch, que viabilizaram a realização das campanhas intensivas do Experimento Micrometeorológico na Região Amazônica, nos anos de 1983 e 1984.

SUMMARY

Analysis about the relationship between sensible heat and water vapor fluxes and their respective gradients of temperature and specific humidity, observed above forest, is developed for atmospheric instability conditions, these parametrized by Monin-Obukhov's stability length, L . The relations flux-gradients are represented by dimensionless functions, which have how independent variable the ratio associated to the observation level above the referencial plan, $(z-d)/L$. The integrals of these function, appropriated to the forest evaporation studies, are also developed. The informations were collected during intensive work of "Amazonian Micrometeorological Experiment", in september-october 1983 and July-August 1984, in the Reserva Florestal Duque, Manaus/AM.

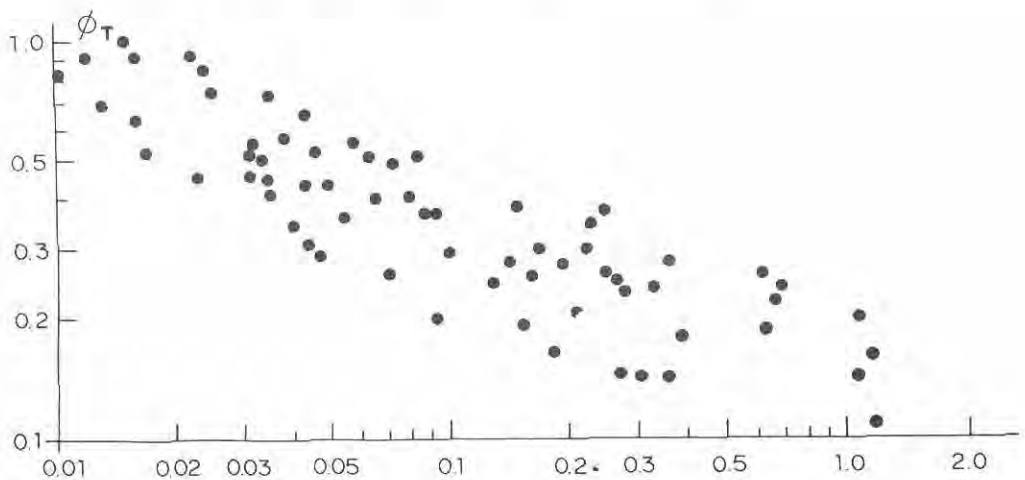


Fig. 1. Valores experimentais de ϕ_T versus $(z-d)/L$.

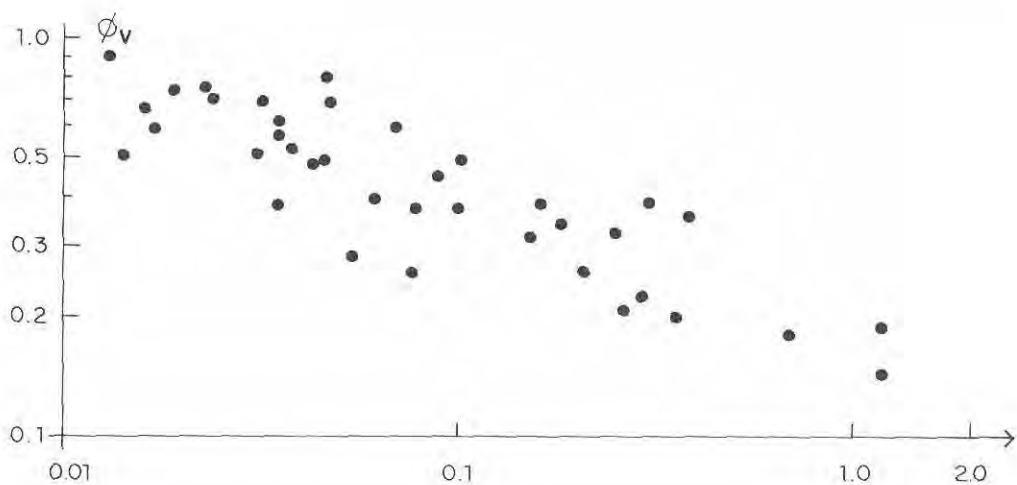


Fig. 2. Valores experimentais de ϕ versus $(z-d)/L$.

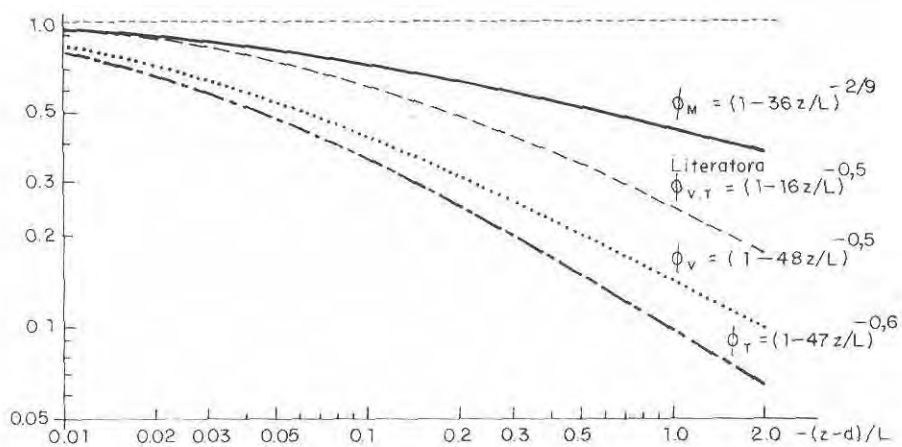


Fig. 3. Funções adimensionais de estabilidade atmosférica.

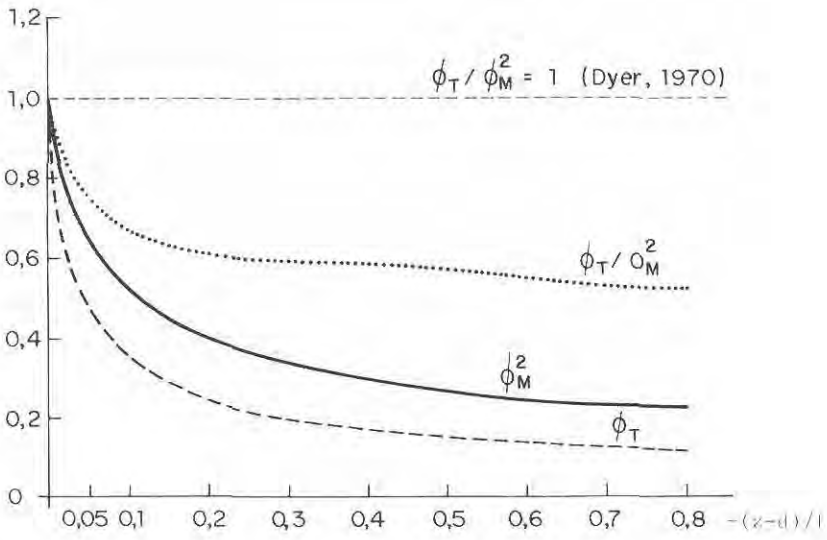


Fig. 4. Variação da razão ϕ_T / ϕ_M^2 em função da estabilidade.

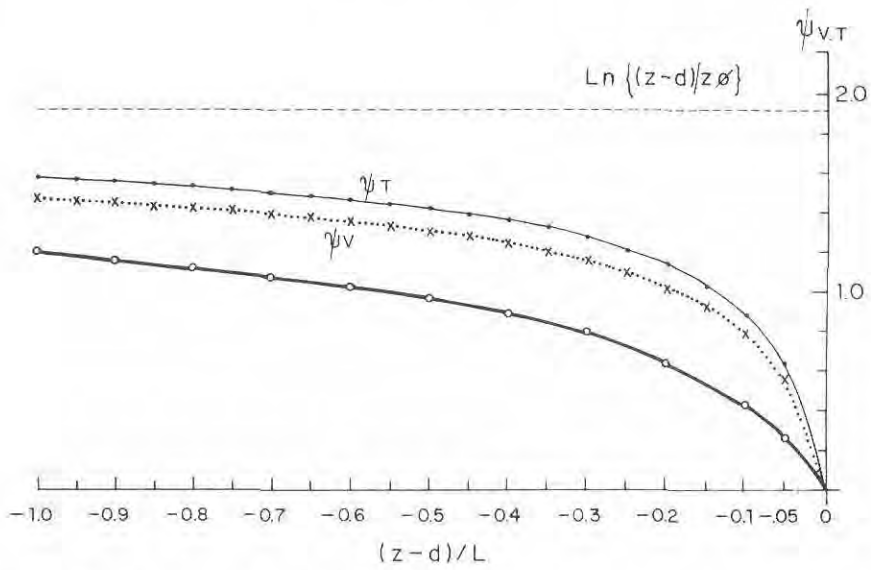


Fig. 5. Funções integrais de estabilidade.

Tabela 1. Observações de fluxos e perfis de temperatura e umidade específica.

| Data | Hora | θ_1 | θ_2 | θ_3 | θ_4 | q_1 | q_2 | q_3 | q_4 | LE | H | u_{ze} | -L |
|----------|------|------------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|-----------------------|-----|-----|----------|------|
| °C | | | | | g/kg | | | | Watt / m ² | | m/s | | m |
| 25.09.83 | 09 | 28,761 | 28,839 | 28,901 | 28,960 | 18,565 | 18,642 | | | 233 | 185 | 0,34 | 18 |
| 25.09.83 | 12 | 31,273 | 31,302 | 31,407 | 31,495 | 16,841 | 16,846 | | | 412 | 228 | 0,52 | 50 |
| 25.09.83 | 13 | 31,309 | 31,383 | 31,398 | 31,444 | 16,914 | 16,959 | | | 293 | 150 | 0,32 | 18 |
| 26.09.83 | 13 | 31,384 | 31,401 | 31,441 | 31,460 | 17,665 | 17,796 | | | 329 | 118 | 0,51 | 84 |
| 26.09.83 | 14 | 32,030 | 32,081 | 32,144 | 32,195 | 17,193 | 17,244 | | | 372 | 252 | 0,62 | 77 |
| 09.08.84 | 08 | 26,841 | 26,886 | 26,946 | 26,965 | 16,048 | 16,118 | 16,096 | 16,161 | 200 | 70 | 0,76 | 460 |
| 09.08.84 | 14 | 31,852 | 31,858 | 31,877 | 31,841 | 14,625 | 14,711 | | | 294 | 58 | 0,47 | 119 |
| 10.08.84 | 09 | 27,999 | 28,035 | 28,073 | 28,091 | 16,297 | 16,357 | | | 244 | 81 | 0,82 | 624 |
| 10.08.84 | 10 | 29,322 | 29,373 | 29,413 | 29,447 | 16,235 | 16,297 | | | 341 | 153 | 0,87 | 339 |
| 10.08.84 | 11 | 30,144 | 30,214 | 30,282 | 30,338 | 16,151 | 16,218 | | | 406 | 163 | 0,87 | 308 |
| 15.08.84 | 10 | 26,845 | 26,905 | 26,962 | 27,046 | 16,914 | 16,966 | 16,925 | 16,992 | 350 | 216 | 0,68 | 120 |
| 15.08.84 | 11 | 28,111 | 28,155 | 28,227 | 28,303 | 17,445 | 17,499 | 17,478 | 17,556 | 450 | 216 | 0,45 | 33 |
| 15.08.84 | 12 | 29,244 | 29,271 | 29,304 | 29,335 | 16,991 | 17,046 | 17,000 | 17,063 | 416 | 188 | 0,46 | 40 |
| 15.08.84 | 13 | 29,838 | 29,875 | 29,931 | 29,986 | 16,864 | 16,940 | 16,901 | 16,996 | 313 | 174 | 0,44 | 39 |
| 19.08.84 | 10 | 27,093 | 27,148 | 27,199 | 27,235 | 17,731 | 17,785 | 17,747 | 17,811 | 274 | 138 | 0,26 | 10 |
| 20.08.84 | 09 | 27,649 | 27,705 | 27,778 | 27,827 | 17,240 | 17,277 | 17,248 | 17,315 | 288 | 151 | 0,44 | 45 |
| 20.08.84 | 10 | 28,541 | 28,600 | 28,664 | 28,710 | 17,596 | 17,654 | 17,622 | 17,705 | 303 | 163 | 0,46 | 48 |
| 20.08.84 | 12 | 29,624 | 29,656 | 29,689 | 29,723 | 16,845 | 16,901 | 16,840 | 16,901 | 357 | 113 | 0,25 | 9 |
| 20.08.84 | 15 | 30,927 | 30,957 | 30,999 | 31,034 | 16,803 | 16,863 | 16,765 | 16,826 | 194 | 82 | 0,32 | 31 |
| 21.08.84 | 14 | 31,276 | 31,296 | 31,332 | 31,362 | 16,245 | 16,308 | 16,216 | 16,301 | 365 | 123 | 0,77 | 274 |
| 21.08.84 | 15 | 31,516 | 31,554 | 31,588 | 31,621 | 16,035 | 16,087 | 15,990 | 16,080 | 276 | 79 | 0,55 | 147 |
| 22.08.84 | 08 | 27,717 | 27,764 | 27,797 | 27,822 | 17,351 | 17,399 | 17,366 | 17,413 | 238 | 71 | 0,90 | 952 |
| 22.08.84 | 09 | 28,996 | 29,043 | 29,085 | 29,123 | 17,180 | 17,236 | 17,205 | 17,257 | 394 | 155 | 1,12 | 829 |
| 22.08.84 | 10 | 30,243 | 30,300 | 30,350 | 30,398 | 16,771 | 16,817 | 16,746 | 16,817 | 510 | 205 | 0,84 | 222 |
| 22.08.84 | 14 | 31,679 | 31,722 | 31,764 | 31,822 | 15,411 | 15,492 | 15,385 | 15,491 | 404 | 134 | 0,85 | 340 |
| 22.08.84 | 16 | 31,320 | 31,338 | 31,462 | 31,373 | 16,654 | 16,708 | 16,596 | 16,641 | 137 | 53 | 0,56 | 245 |
| 23.08.84 | 08 | 27,400 | 27,453 | 27,490 | 27,501 | 16,786 | 16,846 | 16,820 | 16,873 | 250 | 78 | 0,81 | 517 |
| 23.08.84 | 09 | 29,001 | 29,061 | 29,118 | 29,138 | 16,801 | 16,863 | 16,823 | 16,881 | 353 | 135 | 0,77 | 252 |
| 23.08.84 | 11 | 31,007 | 31,076 | 31,155 | 31,230 | 15,847 | 15,926 | 15,837 | 15,921 | 454 | 202 | 0,70 | 133 |
| 23.08.84 | 13 | 32,060 | 32,118 | 32,195 | 32,274 | 15,187 | 15,264 | 15,084 | 15,185 | 411 | 196 | 0,57 | 73 |
| 23.08.84 | 14 | 31,985 | 32,003 | 32,032 | 32,057 | 14,755 | 14,839 | 14,656 | 14,756 | 314 | 107 | 0,71 | 253 |
| 24.08.84 | 08 | 27,012 | 27,032 | 27,059 | 27,064 | 14,985 | 15,076 | 15,052 | 15,136 | 227 | 32 | 0,86 | 1833 |
| 24.08.84 | 10 | 30,248 | 30,313 | 30,376 | 30,411 | 15,823 | 15,889 | 15,791 | 15,869 | 436 | 137 | 0,71 | 193 |
| 24.08.84 | 13 | 32,066 | 32,094 | 32,145 | 32,181 | 15,120 | 15,200 | | | 412 | 124 | 0,48 | 65 |
| 25.08.84 | 09 | 28,916 | 28,945 | 28,986 | 29,005 | 17,622 | 17,680 | 17,634 | 17,694 | 218 | 106 | 0,61 | 172 |
| 25.08.84 | 10 | 29,856 | 29,902 | 29,851 | 29,985 | 18,369 | 18,414 | 18,360 | 18,421 | 312 | 166 | 0,49 | 58 |

Referências bibliográficas

- Calder, K. L. - 1967. A criticism of Bernstein's new adimensional approach to the Flux-gradient relationship near the ground. **Quart. Jour. Royal Met. Soc.**, 93(398): 544-551.
- Dyer, A. J. - 1967. The turbulent transport of heat and water vapor in an unstable atmosphere. **Quart. Jour. R. Met. Soc.**, 93: 501 - 508.
- Dyer, A. J.; Hicks, B. B. - 1970. Flux-gradient relationship in the constant flux layer. **Quart. Jour. R. Met. Soc.**, 96: 715 - 721.
- Marques Filho, A. O.; Ribeiro, M. N. G. - 1986. Determinação dos parâmetros de rugosidade e relações entre fluxos-gradientes sobre floresta. **Acta Amazonica** (no prelo).
- McNeil, D. D.; Shuttleworth, W. J. - 1975. Comparative measurements of energy fluxes over a pine forest. **Bound. Layer Met.**, 9: 297 - 313.
- Paulson, C. A. - 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. **Jour. Applied Meteorology**, 9: 857 - 861.
- Shuttleworth, W. J.; Gash, J. H. C.; Lloyd, C. R.; Moore, C. J.; Roberts, J. M.; Marques Filho, A. O.; Fisch, G. F.; Silva Filho, V. P.; Ribeiro, M. N. G.; Molion, L. C. B.; Sá, L. D. A.; Nobre, J. C.; Cabral, O. M. R.; Patel, S. R.; Moraes, J.C. - 1984a. Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. **Quart. Jour. R. Met. Soc.**, 110: 1143 - 1162.
- 1984b. Observations of radiation exchange above and below Amazonian forest. **Quart. Jour. R. Met. Soc.**, 110: 1163 - 1169.
- Yaglom, A. M. - 1977. Comments on wind and temperature flux-gradient relationship. **Boundary Layer Meteorology**, 11: 89 - 102.
- Monin, A. S.; Yaglom, A. M. - 1977. **Statistical Fluid Mechanics: Mechanics of Turbulence** I.M.I.T. Press Cambridge, USA. 769 p.

(Aceito para publicação em 17.03.1988)