

RESULTADOS PRELIMINARES DE UM EXPERIMENTO MICROMETEOROLÓGICO NA FLORESTA AMAZÔNICA

Luiz Carlos B. Molion¹, Antonio Ocimar Manzi¹,
Carlos Afonso Nobre¹, Leonardo D. de Abreu Sá¹,
Vicente de Paula S. Filho, Ari de O. Marques Filho²,
Gilberto Fisch², Maria Nazaré Goes Ribeiro²,
Mauro Januário², Osvaldo M.R. Cabral³,
Sukaran R. Patel⁴, J. Carvalho de Moraes⁵
e Leandro Ferreira de Aguiar⁶

RESUMO: No período de agosto a outubro de 1983 realizou-se em Manaus, Amazonas, a primeira etapa do experimento micrometeorológico na região amazônica, desenvolvido conjuntamente por pesquisadores do Institute of Hydrology (Inglaterra) e por pesquisadores brasileiros. Neste trabalho apresentam-se alguns dos primeiros resultados obtidos no experimento, os quais consistem em: determinação de parâmetros de rugosidade da cobertura vegetal; estudo do comportamento dos perfis de umidade e temperatura acima e dentro da cobertura vegetal sob condições secas e úmidas; estudo da partição de energia incidente na floresta amazônica, tomando-se por base medições de covariância efetuadas com o novo equipamento intitulado "Hydra"; estudo das componentes de ondas curta e longa do balanço de radiação acima e abaixo da copa florestal. Tais resultados referem-se à campanha realizada na estação seca. Durante o ano de 1984 foram realizadas mais duas campanhas (estações chuvosa e seca), cujos resultados apresentar-se-ão em outra oportunidade.

Termos para indexação: Floresta amazônica, micrometeorologia, hidrologia.

PRELIMINARY RESULTS OF A MICROMETEOROLOGICAL EXPERIMENT IN THE AMAZON FOREST

ABSTRACT: In the period of August-October, 1983, the first phase of a joint anglo-brazilian micrometeorological experiment was conducted in a site near Manaus, State of Amazon. In this paper preliminary results are presented consisting of a) determining forest canopy roughness parameters; b) vertical humidity and temperature profiles above and within the forest for wet and dry conditions; c) energy partition (sensible, latent and radioactive heating) in the forest based on covariance measurements taken by up-to-date instrumentation; d) radiation balance components (short and long wave) above and below the forest canopy. All results are from the dry season, 1983. During 1984 intensive measurements were taken twice (wet and dry season). Results from these experiments will be published shortly.

Index terms: Amazon forest, micrometeorology, hydrology.

¹ CNPq/INPE. Caixa Postal 515. CEP 12200. São José dos Campos, SP.

² CNPq/INPA. Caixa Postal 478. CEP 69.000. Manaus, AM.

³ EMBRAPA-CNPDS. Caixa Postal 319. CEP 69000. Manaus, AM.

⁴ UFPE. Campus Universitário. CEP 58000. João Pessoa, PE.

⁵ UFPA. Campus Universitário do Guamá. CEP 66000. Belém, PA.

⁶ Fundação UFAM. CEP 69000. Manaus, AM.

INTRODUÇÃO, DESCRIÇÃO DO LOCAL E INSTRUMENTAÇÃO

A grande influência das florestas tropicais na circulação geral da atmosfera e a falta de estudos que envolvem uma floresta tropical chuvosa, extensa e com características continentais bem definidas, levou pesquisadores brasileiros, juntamente com pesquisadores do Institute of Hydrology do Natural Environment Research Council (NERC), Reino Unido, a desenvolverem um experimento micrometeorológico na floresta amazônica central. Os objetivos deste experimento, dentre outros, foram aumentar o conhecimento sobre a hidrologia e a climatologia da Amazônia, definir a interação entre a cobertura vegetal tropical e a atmosfera, e dar condições para o aprimoramento dos modelos numéricos de previsão de tempo.

O sítio experimental escolhido como representante da floresta está localizado na reserva florestal Ducke a 25 km a leste de Manaus, na latitude 2°57' Sul e longitude 59°57' Oeste. A média de altura das árvores é de aproximadamente 35m, e os instrumentos de medida foram montados sobre uma torre de alumínio de 45m de altura.

Solarímetros do tipo Kipp faceados para baixo e saldoradiômetros do tipo Funk foram usados para medidas de radiação solar refletida ($S\uparrow$) e de saldo da radiação (R_N), respectivamente. Instrumentos dos mesmos tipos foram usados nas medidas de radiação solar incidente ($S\downarrow$) acima da copa e de radiação solar (S_{BC}) e de saldo de radiação (R_{BC}) abaixo da cobertura vegetal. Foi usado um radiômetro unidirecional no topo da torre para medidas de radiação incidente de todos os comprimentos de onda (U).

Os fluxos de momentum, calor sensível e evaporação foram medidos com um "Hydra", sistema que compreende um anemômetro sônico vertical, um hidrômetro in-

fravermelho (banda 2,7 μ m), um termopar e dois anemômetros de hélice "Gill" montados ortogonalmente no plano horizontal. Duas estações climatológicas foram usadas na obtenção de médias horárias de temperatura, depressão de bulbo úmido, saldo de radiação, precipitação, velocidade e direção do vento. As estações climatológicas automáticas e o "Hydra" foram montados a uma altura de 45 e 48,4m, respectivamente.

As medidas de temperatura e umidade abaixo e acima da copa foram feitas com psicrômetros aspirados de cristal de quartzo. Acima da cobertura vegetal foi usado um duplo Sistema de Intercâmbio de Termômetros (SIT), enquanto para medidas da velocidade do vento horizontal foram usados anemômetros de copo em onze níveis.

Para a medição de precipitação que atingiu o solo utilizaram-se 16 pluviômetros, recolocados aleatoriamente após cada chuva.

São apresentados alguns resultados preliminares do balanço de energia abaixo e acima da copa, partição da energia disponível e estrutura vertical da temperatura, da umidade específica e da velocidade do vento horizontal médio, referente aos dados coletados na primeira etapa do experimento micrometeorológico na região amazônica, realizada no período de agosto a outubro de 1983.

BALANÇO DE RADIAÇÃO

O balanço de radiação obedece à equação:

$$R_N = S\downarrow - S\uparrow + L\downarrow - L\uparrow$$

$$R_N = S\downarrow(1 - a) + L\downarrow - L\uparrow, \quad (1a)$$

$$R_N = U - S\uparrow - L\uparrow, \quad (1b)$$

onde: a é o albedo da superfície, $L\downarrow$ representa a incidência de onda longa da atmosfera e $L\uparrow$ a perda de radiação de onda longa pela superfície. Os valores de R_N , $S\downarrow$, $S\uparrow$

e U são medidos diretamente, enquanto $L\downarrow$ é calculado pela diferença entre U e $S\downarrow$, e $L\uparrow$ é determinado pela temperatura de corpo negro medida por um termômetro de resistência colocado na cavidade do radiômetro unidirecional (Lei de Stefan-Boltzmann) e pela Equação 1b.

Balanco Acima da Copa

Rejeitando-se dados horários, cujos valores médios da radiação solar incidente foram menores do que 20Wm^{-2} , ou em que os de radiação refletida foram menores do que 1Wm^{-2} , restaram 94 horas de dados com os quais foram calculadas médias horárias de albedo (a). Sob um ângulo de altitude solar de $43,8^\circ$, o albedo médio calculado foi $12,25 \pm 0,2$. Também foi observado que o valor do albedo varia com a elevação do sol.

Na Fig. 1 é mostrada a variação média diurna das componentes de onda curta e onda longa do fluxo de radiação para seis dias, nos quais os dados contínuos estiveram disponíveis. Ressalta-se que as componentes de onda longa são particularmente sensíveis a erros, uma vez que são calculadas como uma combinação de várias medidas de fluxo.

Na Fig. 1 são mostrados também os picos de radiação solar que aparecem antes do meio-dia. À tarde há um declínio suave, presumivelmente em resposta ao aumento da cobertura de nuvens. Este comportamento, certamente, tem influência na radiação solar refletida e no saldo da radiação. Durante à noite, entre 18:00 e 05:00 horas, o saldo de radiação médio permanece em torno de -40Wm^{-2} , quando as variações dos fluxos de radiação de onda longa para cima e para baixo se correspondem. Esta tendência diária, nas componentes de fluxo médio e albedo, exprime a alta correlação existente entre as duas grandezas.

Feita a análise de regressão linear entre os dados de radiação solar incidente e

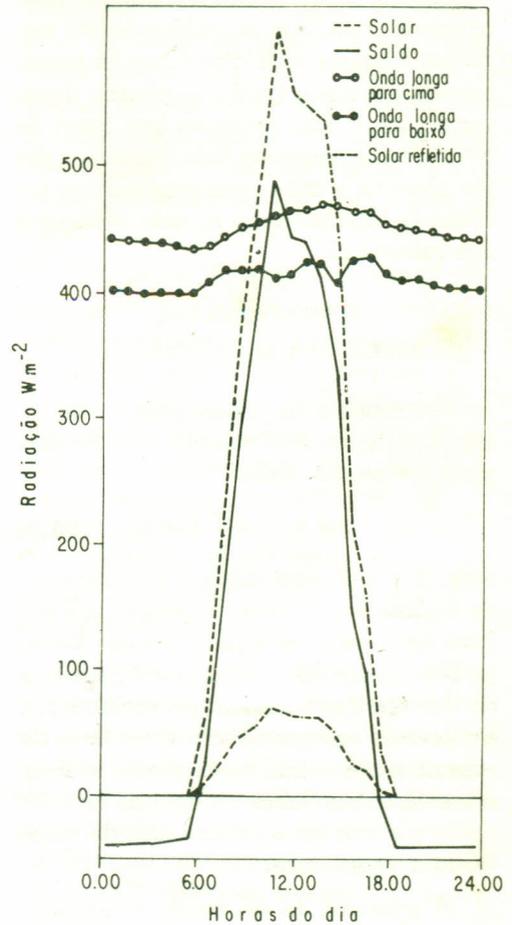


FIG. 1. Valores médios dos componentes de radiação sobre a floresta amazônica chuvosa. Fonte: Shuttleworth et al. (1984c).

os de saldo de radiação foi obtida a equação:

$$R_N = (0,858 \pm 0,006)S\downarrow - (35,0 \pm 1,9) \quad (2)$$

com coeficiente de correlação de 0,99.

Fluxo Abaixo da Copa

A radiação solar que atinge o chão é, em média, 1,2 por cento daquela acima da cobertura vegetal, isto é, um fluxo horário médio em torno de 4Wm^{-2} durante as doze horas à luz do dia. A tendência diária do saldo de radiação abaixo da copa é

bem menor do que o correspondente fluxo acima da copa, com um saldo positivo médio em torno de $0,06\text{MJm}^{-2}$ nas 24 horas, aproximadamente igual à incidência de radiação solar. Esta radiação (em torno de 4Wm^{-2}) que chega ao solo durante o dia e é liberada a noite, tem suas médias horárias de fluxo de calor no solo, efetuadas separadamente.

PARTIÇÃO DA ENERGIA DISPONÍVEL

Adotando a homogeneidade horizontal, a partição da energia da floresta pode ser escrita como:

$$A = \lambda E + H = R_N - G - S - P \quad (3)$$

onde: A é a energia disponível por unidade de área na unidade de tempo; λE é o fluxo de calor latente para fora da floresta; H é o fluxo de calor sensível para fora da floresta; R_N é o saldo de radiação; g é o fluxo de energia no solo; S é o fluxo de energia armazenada na biomassa; e P representa outros fluxos de energia (ocasionados por processos combinados de respiração e fotossíntese).

A presença de um termo de armazenamento nesta partição de energia adiciona considerável complexidade à medição e modelagem do ciclo diário de partição de energia na floresta. Devido ao tamanho, complexidade e densidade da floresta tropical, a taxa de armazenamento de energia deve se tornar uma componente particularmente importante, mas de difícil cálculo, pois exige modelos de armazenamento complexos.

Considerando o processo das covariâncias de flutuações, opta-se por uma medição direta dos fluxos que evita o emprego de parâmetros indiretamente associados a eles, embora a presença do termo de armazenamento comprometa a precisão das medidas em grande extensão. Por conseguinte, preferiu-se adotar, em primeira aproximação, o termo de armazenamento

(S) e o fluxo de calor no solo (G), na Equação 3, com um valor de aproximadamente zero sobre a integração de um ciclo diário. Com esta suposição, o saldo de radiação acumulado durante um dia completo seria igual à soma cumulativa das medidas das covariâncias de flutuações de calor latente e sensível, isto é:

$$\sum R_N = \sum A = \sum (\lambda E + H). \quad (4)$$

Da comparação entre o saldo de radiação acumulado e a soma cumulativa de fluxo de energia para oito dias completos considerados nesta análise, há satisfatória concordância em torno de cinco por cento, mas a integração sobre todos os oito dias indica uma perda de fluxo nas medidas das covariâncias de flutuações de $6,3\text{MJm}^{-2}$, num total de radiação incidente de $96,5\text{MJm}^{-2}$.

Há uma partição razoavelmente constante da energia disponível, durante as horas do dia, em calor latente e calor sensível; freqüentemente alguma evaporação é mantida no início da noite, e a perda de energia radiante é da ordem de 30 a 40Wm^{-2} durante à noite, quando a floresta se resfria. A supressão da interação turbulenta entre a floresta e a atmosfera à noite, tipificada pelos baixos fluxos de energia, é uma característica expressa nos dados, a qual se aplica a todas as variáveis turbulentas.

Definida a "razão evaporativa" como:

$$\alpha = \sum \lambda E / \sum (\lambda E + H), \quad (5)$$

ou

$$\alpha' = \sum \lambda E / \sum R_N, \quad (6)$$

a integração diária do fluxo de energia radiante, calor sensível e calor latente para os oito dias em análise forneceu uma razão evaporativa em torno de 0,7, o que corresponde a uma razão de Bowen, ($\beta = H / \lambda E$) de 0,43. Estes resultados são confirmados pelas medições do SIT com duas medidas diferenciais de temperatura e umidade, entre os intervalos de 35,6m a 39,3m e 40,9m a 44,6m. Sob a suposição de que os fluxos de calor sensível e de ca-

lor latente obedecem a uma equação unidirecional de difusão, e de que as difusividades turbulentas para o calor e vapor d'água são iguais, a razão entre os gradientes de temperatura e umidade medidos fornece a razão de Bowen em condições de regime permanente. A razão evaporativa é calculada diretamente desta razão através da expressão:

$$\alpha = (1 + \beta)^{-1} \quad (7)$$

Os resultados obtidos pelo método das covariâncias de flutuação estão em concordância com os valores calculados pelo SIT para as horas do dia, quando as medidas relevantes estiverem disponíveis.

Dentro do esforço para melhor compreender o processo de trocas energéticas na copa da floresta, foram feitas medidas paralelas de interceptação para 25 dias durante o mês de setembro, em local adjacente à torre meteorológica. A perda total por interceptação medida foi de 32,7mm em um total de precipitação de 193,3mm, o que fornece uma taxa de perdas por interceptação de aproximadamente 17 por cento.

DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE RUGOSIDADE DA COBERTURA VEGETAL

Em condições de estabilidade neutra, o perfil vertical do vento horizontal médio sobre a vegetação alta pode ser descrito pela equação:

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln \frac{z - d}{z_0} \quad (8)$$

onde: $u(z)$ é o vento horizontal médio na altura z acima do chão, u^* é a velocidade de fricção, k é a constante de von Kármán, z_0 é o comprimento de rugosidade e d é o deslocamento do plano zero.

Os valores de d foram calculados pelo método de conservação de massa de Mo-

lion & Moore (1983). Uma vez determinado d , os valores de z_0 e u^* foram encontrados pelo método dos mínimos quadrados. Os valores de u^* assim encontrados foram comparados com os valores de u^* estimados diretamente pelo "Hydra", o qual utiliza covariâncias de flutuações de velocidade.

Estimativas de d , z_0 e u^* foram obtidas a partir de 19 conjuntos de dados sob condições próximas de neutralidade (taxa de variação vertical de temperatura entre $-0,008$ e $0,012^\circ\text{Cm}^{-1}$) os quais apresentaram velocidade superiores a $2,00\text{ms}^{-1}$ ao nível de 44,6m de altura. Os valores estimados foram: $d = (23,46 \pm 1,76)\text{m}$ e $z_0 = (6,38 \pm 1,27)\text{m}$, que correspondem a $0,67 \pm 0,05\text{h}$ e $0,18 \pm 0,04\text{h}$, respectivamente, onde h é a altura média da floresta estimada em 35 metros.

Os valores de u^* obtidos pelo método de conservação de massa são sempre maiores que aqueles medidos com "Hydra". Essa subestimação de u^* pelo "Hydra" pode ser atribuída a limitações na exposição de seus anemômetros "Gill" ao vento horizontal. Efetuada uma regressão linear entre esses valores, obteve-se a equação:

$$u^*_{CM} = 1,12 u^*_{HY} + 0,40 \quad (9)$$

onde: u^*_{CM} e u^*_{HY} são velocidades de fricção estimadas pelo método de conservação de massa e pelo "Hydra", respectivamente.

As velocidades de evento horizontal médio obtidas para níveis abaixo de copa estiveram quase sempre entre $0,0$ e $1,0\text{ms}^{-1}$. Estes valores não foram considerados, uma vez que os anemômetros de copo não têm boa precisão para velocidades tão baixas do vento.

ESTRUTURA VERTICAL DA TEMPERATURA E UMIDADE

Na Fig. 2 são apresentados os dois dias consecutivos, os quais foram de parti-

cular interesse, pois forneceram elementos para comparação entre medidas de um dia com céu claro (27/09/83) e de outro quando ocorreram chuvas rápidas. As chuvas que ocorreram no segundo dia (28/09/83) entre 6:00 e 7:00 horas e 15:00 e 16:00 horas foram de natureza convectiva, com duração de 30 minutos, tendo sido consideradas moderadas.

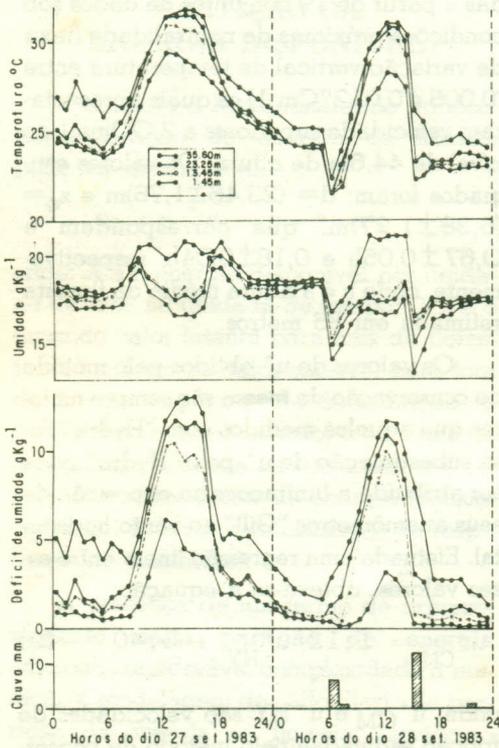


FIG. 2. Variação diária de temperatura, umidade e déficit de umidade medidas em quatro níveis através e imediatamente acima da floresta, juntamente com as medidas de chuva acima da copa para os dias 27 e 28 de setembro de 1983. Adaptado de Shutleworth et al.(1984a).

Essa mesma figura sugere que a mistura do ar nos dois terços superiores da floresta é razoavelmente eficiente durante o dia. Nesta camada, a temperatura, umidade e déficit de umidade acompanham os dados da atmosfera acima, com diferenças em torno de 1°C , 1gKg^{-1} e 2gKg^{-1} , respectivamente, em condições secas. Por outro la-

do, os dados perto da base da floresta exibem durante o dia uma diferença significativa em relação aos altos níveis. A amplitude do ciclo de temperatura fica em torno de 60 por cento daquela no topo da floresta; a umidade absoluta é notavelmente maior, em torno de 2gKg^{-1} , e o déficit de umidade é de apenas 30 a 50 por cento dos valores acima da cobertura vegetal.

À noite, o comportamento é revertido. O ciclo de temperatura responde ao resfriamento por radiação de onda longa dos dois terços da base da floresta, e as temperaturas do ar nas partes superiores da floresta (e também da atmosfera acima) estão significativamente desacopladas daquelas da maior parte da vegetação próxima à superfície. Tal fato pode ser atribuído à diminuição das trocas turbulentas quando a estabilidade estática da atmosfera aumenta. Em condições de noite seca existe uma pequena variação na umidade absoluta por toda a floresta (tipicamente 1gKg^{-1}), a qual se reduz no decorrer da noite. Isto é acompanhado por uma reduzida variação na temperatura e no déficit de umidade na região correspondente aos dois terços superiores da floresta. Acima deste nível, temperatura e déficit de umidade podem permanecer significativamente maiores do que aqueles mais abaixo, de 1°C a 3°C , e de 1 a 3gKg^{-1} , respectivamente. A umidade absoluta decresce progressivamente da base até o topo da floresta durante todo o ciclo diário, tanto na condição seca como na úmida.

As duas chuvas convectivas perturbaram este comportamento. A temperatura e a umidade absoluta caíram rapidamente em todos os níveis após o início das chuvas. Contudo, o déficit de umidade nos dois níveis de observação no topo da floresta exibiu pouca resposta à presença de água livre na superfície da vegetação. Nos níveis mais baixos notou-se uma queda do déficit de umidade. Os perfis restabeleceram suas tendências diárias após duas a três horas.

Na Fig. 3 são mostradas as diferenças de temperatura e de umidade no intervalo de altura de 35,6m a 44,6m medidas com o SIT, para os dois dias considerados, das 06:00 às 18:00 horas. A linha tracejada na figura indica medidas do dia 27 de setembro e a linha cheia, as do dia 28 de setembro. A diferença de umidade é sempre negativa e indica um fluxo de calor latente para cima, isto é, evaporação. No começo da manhã, a diferença de temperatura é positiva, o que sugere que a radiação incidente até esta hora é insuficiente para compensar a razão de evaporação, e a floresta retira energia da atmosfera acima.

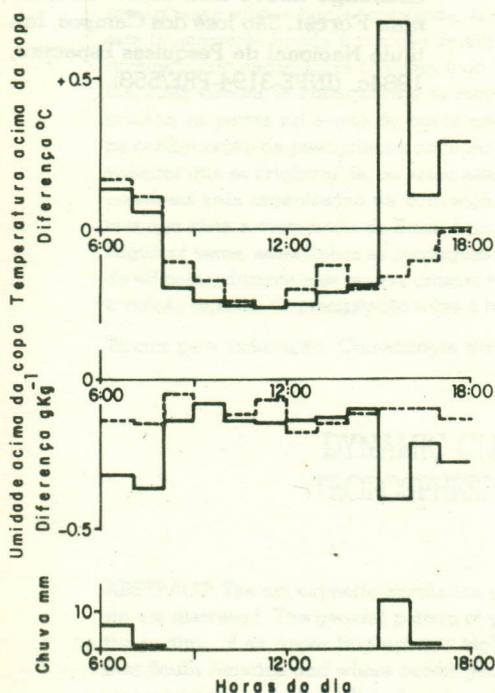


FIG. 3. Diferenças de temperatura e de umidade medidas acima da copa para as horas do dia 27 (tracejada) e 28 de setembro de 1983 (cheia), juntamente com as medidas de precipitação acima da copa. Fonte: Shuttleworth et al. (1984a).

Para o restante do dia seco, a diferença de temperatura é negativa, correspondendo a um fluxo de calor sensível para fora da floresta. Quando ocorreu chuva entre 15:00

e 16:00 horas em 28 de setembro, a diferença de temperatura sofreu uma rápida reversão. Claramente o alto déficit de umidade na atmosfera induziu a uma taxa de evaporação da copa umedecida, a qual não pôde ser sustentada unicamente por radiação, e ocorreu advecção de energia local. As diferenças de umidade aumentaram de modo significativo durante e imediatamente após as chuvas. Isto, em parte, reflete um aumento na taxa de evaporação da copa umedecida, mas esta interpretação é complicada pela coincidente diferença de temperatura reversa, a qual inverte a estabilidade atmosférica e reduz a efetividade da transferência turbulenta. Estas primeiras conclusões merecem um aprofundamento, o que será certamente empreendido em trabalhos futuros, nos quais serão igualmente discutidos aspectos do impacto da estação úmida sobre a floresta amazônica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados baseiam-se nos dados coletados de agosto a outubro de 1983 e abordados por Shuttleworth et al. (1984 a, b e c). No ano de 1984 foram realizadas mais duas campanhas: de março a maio e de julho a agosto, cujos dados estão em fase de análise. O experimento prevê outras quatro campanhas intensivas, duas em 1985 e duas em 1986. Espera-se com isto obter um conjunto de dados que permitam melhorar os conhecimentos sobre trocas de energia e de massa entre a floresta tropical amazônica e a atmosfera adjacente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração dos Drs. W. James Shuttleworth, Christopher J. Moore e John Robert e aos Srs. John H.C. Gash e Colin R. Lloyd, do Institute of Hydrology de Wallingford, Reino Unido, que formam a equipe britânica co-realizadora do Experimento Micrometeorológico na Amazônia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MOLION, L.C.B. & MOORE, C.J. Estimating the zero-plane displacement for tall vegetation using a mass conservation method. *Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht, Holland, 26:115-25, 1983.
- SHUTTLEWORTH, W.J.; GASH, J.H.C.; LLOYD, C.R.; MOORE, C.J.; ROBERTS, J.; MARQUES FILHO, A.O.; FISCH, G.; SILVA FILHO, V.P.; RIBEIRO, M.N.G.; MOLION, L.C.B.; SÁ, L.D.A.; NOBRE, C.A.; CABRAL, M.R.; SUKARAN, R.P. & MORAES, J.C. Daily variations of temperature and humidity within and above Amazonian Forest. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1984a. (INPE-3196-PRE/560).
- SHUTTLEWORTH, W.J.; GASH, J.H.C.; LLOYD, C.R.; MOORE, C.J.; ROBERTS, J.; MARQUES FILHO, A.O.; FISCH, G.; SILVA FILHO, V.P.; RIBEIRO, M.N.G.; MOLION, L.C.B.; SÁ, L.D.A.; NOBRE, C.A.; CABRAL, M.R.; SUKARAN, R.P. & MORAES, J.C. Eddy correlations measurements of energy partition for Amazonian Forest. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1983b. (INPE-3195-PRE/559).
- SUTTLEWORTH, W.J.; GASH, J.H.C.; LOOYD, C.R.; MOORE, C.J.; ROBERTS, J.C.; MARQUES FILHO, A.O.; FISCH, G.; SILVA FILHO, V.P.; RIBEIRO, M.N.G.; MOLION, L.C.B.; SÁ, L.D.A.; NOBRE, C.A.; CABRAL, M.R.; SUKARAN, R.P. & MORAES, J.C. Observations of radiation exchange above and below Amazonian Forest. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1984c. (INPE-3194-PRE/558).