

## BALANÇO DE ENERGIA EM ÁREAS DE FLORESTA E DE PASTAGEM NA AMAZÔNIA (JI-PARANÁ, RO)

JOSÉ ALEXANDRE DA COSTA GALVÃO  
WM7 Meteorologia S/C Ltda  
Tv. Ubirassanga, 50, Campo Belo, São Paulo, SP, 04614-050  
alex\_galvao@bol.com.br

GILBERTO FISCH  
Centro Técnico Aeroespacial (CTA/IAE/ACA)  
12228-904, São José dos Campos, SP  
gfisch@iae.cta.br

### RESUMO

Medidas micrometeorológicas de superfície realizadas nas áreas de floresta e de pastagem do Projeto ABRACOS na região de Ji-Paraná (RO) foram utilizadas para avaliar o balanço de energia no período de transição do final da estação chuvosa e início da estação seca do ano de 1993. Os resultados indicaram que, durante o período chuvoso, a devolução de energia para a atmosfera é realizada predominantemente pelo fluxo de calor latente, cuja fração do saldo de radiação ( $LE/R_n$ ) utilizada foi 0,79 na floresta e 0,65 na pastagem. Uma pequena parte ( $H/R_n$ ) é usada para o aquecimento da atmosfera, correspondendo a 0,17 na floresta e 0,20 na pastagem. No período seco, a floresta continua a utilizar uma maior quantidade de energia para evaporar ( $LE/R_n=0,62$ ) e uma menor quantidade para aquecer o ar ( $H/R_n=0,18$ ), enquanto, na pastagem, a transferência de energia para a atmosfera ocorre em magnitudes similares entre os fluxos de calor latente e calor sensível (razão de Bowen=1), principalmente nos horários entre 11 e 14 Horas Locais (HL).

**Palavras-chave:** fluxos, razão de Bowen, fração evaporativa

### ABSTRACT: ENERGY BUDGET IN THE FOREST AND PASTURE SITES IN AMAZONIA

Micrometeorological observations of the Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study (ABRACOS) have been used to study the surface balance energy behaviour of paired forest and pasture sites at Ji-Parana (RO) during the transition on period from end of the wet season and the beginning of the dry season of 1993. The results show that during the transfer of energy to atmosphere is done mainly by the latent heat flux during the wet season, which used 0.79 of the net radiation ( $LE/R_n$ ) at the forest site and 0.65 at the pasture. The corresponding values to heat the atmosphere ( $H/R_n$ ) were 0.17 at the forest site and 0.20 at the pasture site. In the dry period, the forest continue to use most of the energy to evaporation and less energy to heat to the air. At the pasture the transfer of energy to atmosphere is made likely by latent heat flux and sensible heat flux (Bowen ratio=1), mainly between 11 e 14 Local Hour (LH).

**Key-words:** fluxes, Bowen ratio, evaporative fraction

## 1. INTRODUÇÃO

A Floresta Amazônica é reconhecida, amplamente, como importante fonte de energia e umidade para os processos que ocorrem na atmosfera tropical. Entretanto, a região vem sofrendo nas últimas décadas com o desmatamento de grandes áreas de floresta tropical densa para a extração de madeira ou substituição por

áreas de pastagens para a agricultura e/ou pecuária.

Esta substituição da cobertura vegetal de floresta por pastagens modifica as interações entre o sistema solo-planta-atmosfera. Se grandes extensões são desmatadas, podem-se esperar mudanças afetando os sistemas atmosféricos causadores das variações no Tempo, os quais, integrados por um longo período, formarão um novo clima (Institute of Hydrology, 1994).

Essas evidências vêm preocupando a comunidade científica, a sociedade e o Estado, sobre as conseqüências que o desmatamento poderá acarretar ao clima do globo. Com isso, vários estudos têm sido realizados para melhor entender a interação entre o solo, a vegetação e a atmosfera. Dentre esses estudos, podem-se citar, por exemplo, os trabalhos realizados por Sá et al.(1988); Viswanadham et al.(1990); Wright et al.(1992); Bastable et al.(1993) e Culf et al.(1996), sobre o balanço de energia em áreas de floresta densa e de pastagens.

A análise do balanço de energia é de fundamental importância para um melhor entendimento de como a floresta tropical interage com a atmosfera e sobre os possíveis impactos devido à substituição da vegetação original. Este entendimento é útil aos Modelos de Circulação Geral da Atmosfera (MCGA) que requerem parametrizações mais realísticas de muitos processos de superfície como, por exemplo, os fluxos de calor sensível e latente no limite inferior da atmosfera. Estas características de superfície (partição de energia) determinam os campos de temperatura, vento, umidade e precipitação da atmosfera livre.

O Projeto ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study) é um esforço conjunto entre cientistas britânicos e brasileiros, no sentido de coletar e analisar dados hidrometeorológicos que aumentem o conhecimento do ecossistema amazônico (de floresta tropical e de áreas desmatadas para pastagem) e possibilitem a melhoria dos MCGA em simulações climáticas (Shuttleworth et al.,1991, e Gash et al., 1996).

O objetivo deste trabalho é o de analisar o

comportamento dos componentes do balanço de energia e das variáveis microclimáticas de áreas experimentais de floresta e pastagem na região de Ji-Paraná (RO), durante a transição do final da estação chuvosa e início da estação seca do ano de 1993. O ciclo diário dessas variáveis também é analisado, com padrões característicos para os períodos chuvoso e seco.

## 2. DADOS E METODOLOGIA

No desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados os dados registrados por Estações Meteorológicas Automáticas (EMAs) e equipamentos de correlação de vórtices turbulentos (HYDRA), instaladas em dois sítios experimentais do Projeto ABRACOS: uma na área de floresta da Reserva Biológica do Rio Jaru, situada a  $10^{\circ} 05'S$ ,  $61^{\circ} 57'W$ , a 120 m acima do nível do mar, distante 80 km a nordeste da cidade de Ji-Paraná (RO) e outra na área de pastagem que é uma fazenda de pecuária (Fazenda Nossa Senhora Aparecida) localizada a  $10^{\circ} 45'S$ ,  $62^{\circ} 22'W$ , a 293 m acima do nível médio do mar, cerca de 15 km da cidade de Ouro Preto D'Oeste (RO) (Figura 1). A vegetação natural (floresta) foi totalmente substituída por gramínea (*brachiaria brizatha*). A distância entre os 2 locais de medidas é de aproximadamente 80 km.

As EMAs consistem de um solarímetro (Kipp e Zonen, Delft, The Netherlands) para medição de radiação solar global (no comprimento de onda de  $0,3$  a  $3 \mu m$ ), um sensor similar, porém invertido, para medir a radiação solar refletida, ambos com erros de medidas estimados em  $\pm 1\%$ ; um saldo radiômetro (Radiation Energy Balance

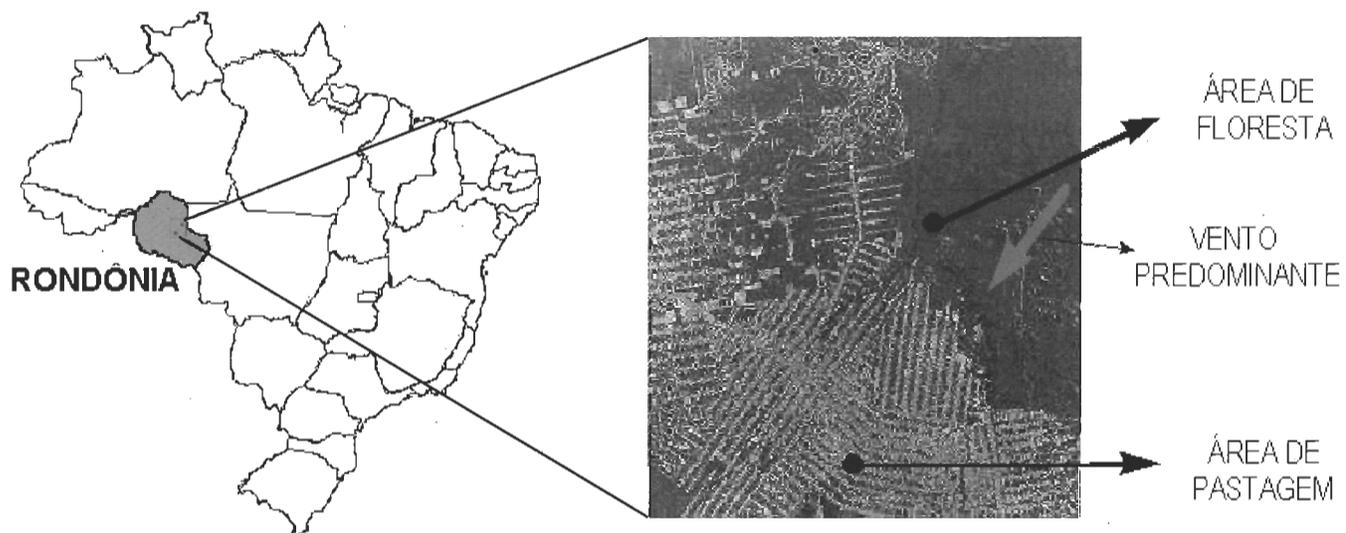


Figura 1 - Localização geográfica dos sítios na região de Ji-Paraná (RO). FONTE: INPE (1997)

System, Seattle, EUA) para medir o saldo de radiação; termômetros de bulbos úmido e seco de resistência de platina (Diddcot Instruments, Abington, RU), com uma precisão de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  em um psicrômetro aspirado (Instituto of Hydrology, RU); anemômetros de canecas metálicas (Diddcot Instruments, Abington, RU) com velocidade de partida de 0,3 a 0,4  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; duas placas de fluxo de calor no solo (modelos 610 Thornthwaite, Elmer, New Jersey, EUA), instalados à profundidade de 5 mm e um pluviógrafo de balança com precisão de 0,2 mm (Diddcot Instruments, Abington, RU).

Os dados (coletados com taxa de amostragem de 1 obs/min) fornecidos pelos instrumentos foram registrados por um sistema de aquisição automática (data logger CR 10 da Campbell Scientific, Shephed, RU), e armazenados em médias horárias. As EMAs eram visitadas semanalmente para a transferência dos dados e execução de serviços de manutenção.

Para medidas de fluxos de vapor d'água e de calor sensível, foi utilizado um equipamento de correlação de vórtice turbulento (MK2 'HYDRA' descritos em detalhe por Shuttleworth et al., 1988). Este equipamento era composto por um anemômetro sônico para a medida da velocidade vertical, um higrômetro de absorção infravermelho, um cabo fino termopar, um saldo radiômetro e um anemômetro de canecas metálicas. Todas as medidas foram realizadas em frequência de 10 Hz e processadas em tempo real (Wright et al., 1992). As medidas na pastagem foram efetuadas a 9 m de altura e, na floresta, no topo de uma torre micrometeorológica (5 m).

Para a análise dos principais termos do balanço de energia e das variáveis microclimáticas em ambos os sítios experimentais, calcularam-se médias horárias do saldo de radiação ( $R_n$ ), radiação solar incidente ( $R_g$ ), fluxos turbulentos de calor sensível (H) e calor latente (LE) e das variáveis climáticas de temperatura (T) e umidade específica do ar (q), para um período de 10 dias representativos da estação chuvosa (de 4 a 14 de abril de 1993) e da estação seca (de 16 a 26 de julho de 1993). Estas foram completadas com análises globais dos mesmos, visando a mostrar as alterações ocorridas durante a transição entre o final do período chuvosa e início da estação seca em Ji-Paraná, uma vez que a partição de energia é bem diferente entre os sítios

experimentais. Para tanto, analisaram-se os valores médios diários entre 4 de abril e 26 de julho de 1993.

## 2.1 Cálculo do Armazenamento de energia na biomassa

Em área de pastagem, o termo de armazenamento de calor no ar é pequeno e pode ser desprezado no cálculo da energia disponível. Entretanto, na área de floresta, a energia armazenada pela biomassa (B) é importante nos horários de transição: após o nascer-do-sol e pôr-do-sol e após os eventos de precipitação (Fisch, 1996).

Para o cálculo da energia armazenada na biomassa, utilizou-se a formulação proposta por Moore e Fisch (1986), determinada a partir de medidas de umidade e de temperatura do ar e da biomassa em área de floresta de terra firme na Amazônia (Reserva Ducke), a saber:

$$B = S_t + S_q + S_b = 16,7\delta t + 28,0\delta q + 12,6\delta t^* \quad (2.1)$$

no qual  $S_t$  e  $S_q$  são as energias armazenadas no ar pelas variações horárias da temperatura ( $\delta t$ ) e umidade específica ( $\delta q$ ) do ar. A energia armazenada pelos troncos das árvores é representada por  $S_b$  e estimada em função da variação horária da temperatura do ar adiantada em uma hora ( $\delta t^*$ ).

## 2.2 Climatologia da região de Ji-Paraná (RO)

A climatologia da região de Ji-Paraná mostra uma forte sazonalidade na distribuição da precipitação, com o período chuvoso (novembro-abril) apresentando totais mensais acima de 200  $\text{mm}\cdot\text{mês}^{-1}$ . A estação seca estende-se de maio a outubro, com um período intenso de seca entre junho-agosto, com total mensal menor que 20  $\text{mm}\cdot\text{mês}^{-1}$ . A temperatura do ar, para o mesmo período, mostra também uma forte sazonalidade, sendo o mês mais quente o mês de outubro, com temperatura média de 25,6  $^\circ\text{C}$ . O mês mais frio é julho, com temperatura média de 22,7  $^\circ\text{C}$ . A Figura 2 mostra a distribuição climatológica de precipitação (a) e temperatura (b) de Ji-Paraná-RO para o período de 1982-1996, extraída de Ferreira da Costa et al. (1998).

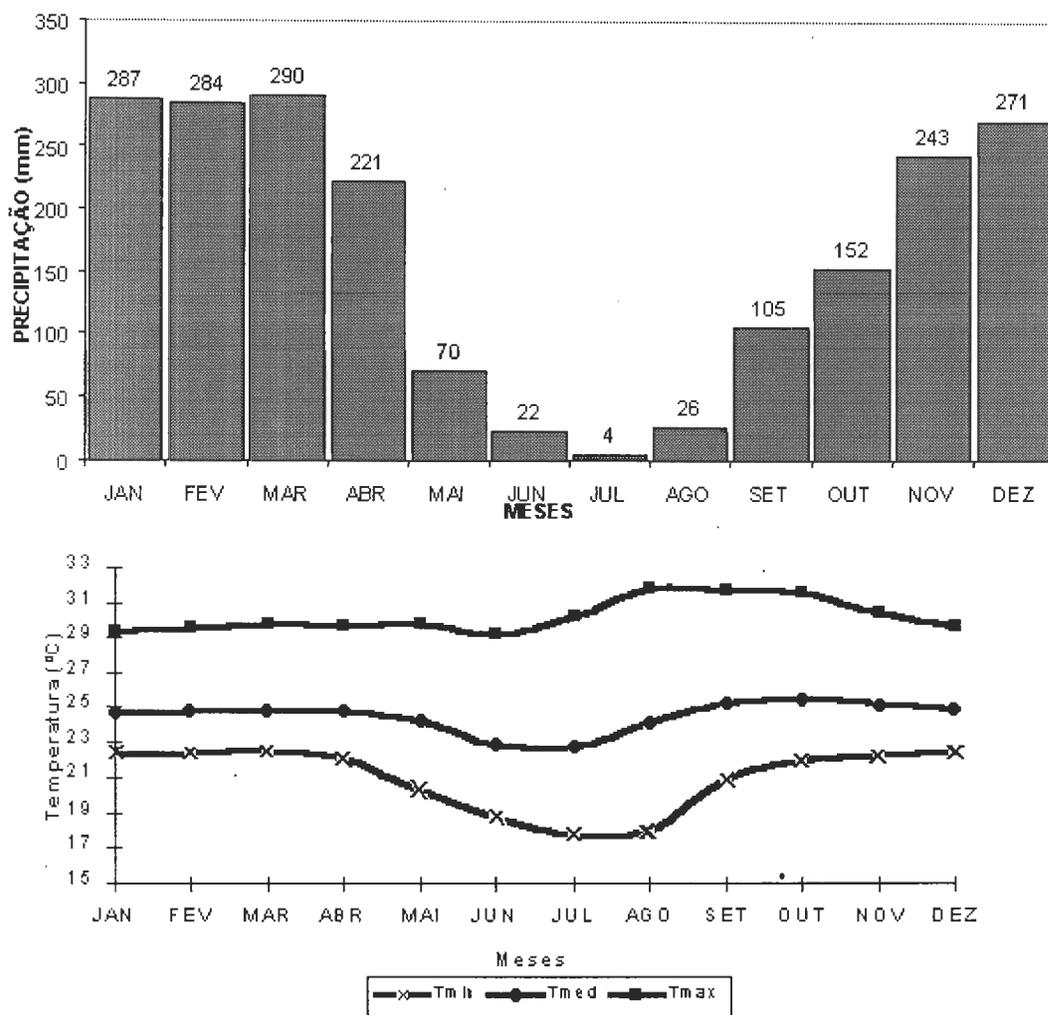


Figura 2 - Climatologia da Precipitação (a) e Temperatura do ar (b) para a região de Ji-Paraná (RO), para o período de 1982 a 1996. FONTE: Ferreira da Costa et al. (1998, p. 3).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Análise global

A série temporal do saldo de radiação ( $R_n$ ), radiação solar global incidente ( $R_g$ ), fluxo de calor sensível (H) e calor latente (LE) para a área de floresta e de pastagem, durante o período de estudo (4-4 a 26-7-93), estão ilustradas nas Figuras 3a e 3b. A radiação solar incidente na floresta e na pastagem apresenta-se bastante variável na época final da estação chuvosa (abril-maio) com valores variando entre 250 e 1000  $Wm^{-2}$ . Estes valores de 1000  $Wm^{-2}$  são devidos aos altos fluxos de radiação solar direta, intensificados pela reflexão de  $R_g$  pela nebulosidade esparsa. Essa variabilidade dia-a-dia diminui à medida que se aproxima do início da estação seca (junho-julho), exceto quando há ocorrência de

friagens. Nestas situações de eventos de friagens, ocorrem quedas bruscas da radiação solar incidente, devido à presença de nebulosidade decorrente da penetração de frente fria (Fisch, 1996). No entanto, essas reduções de  $R_g$ , nos dias específicos de friagens, ocorrem em ambos os sítios experimentais, mostrando que o fenômeno meteorológico é de escala sinótica. Este comportamento difere das reduções observadas durante o período chuvoso, que estão relacionadas a diferente distribuição espacial de nebulosidade e de chuvas em uma escala espacial pequena. No final do período de estudo, ambos os sítios apresentaram valores máximos muito próximos (800  $Wm^{-2}$ ), o que se justifica pela pouca ocorrência de precipitação e ausência de nebulosidade. Os demais componentes do balanço de energia ( $R_n$ , H, LE) acompanham o comportamento da radiação solar incidente ao longo da série.

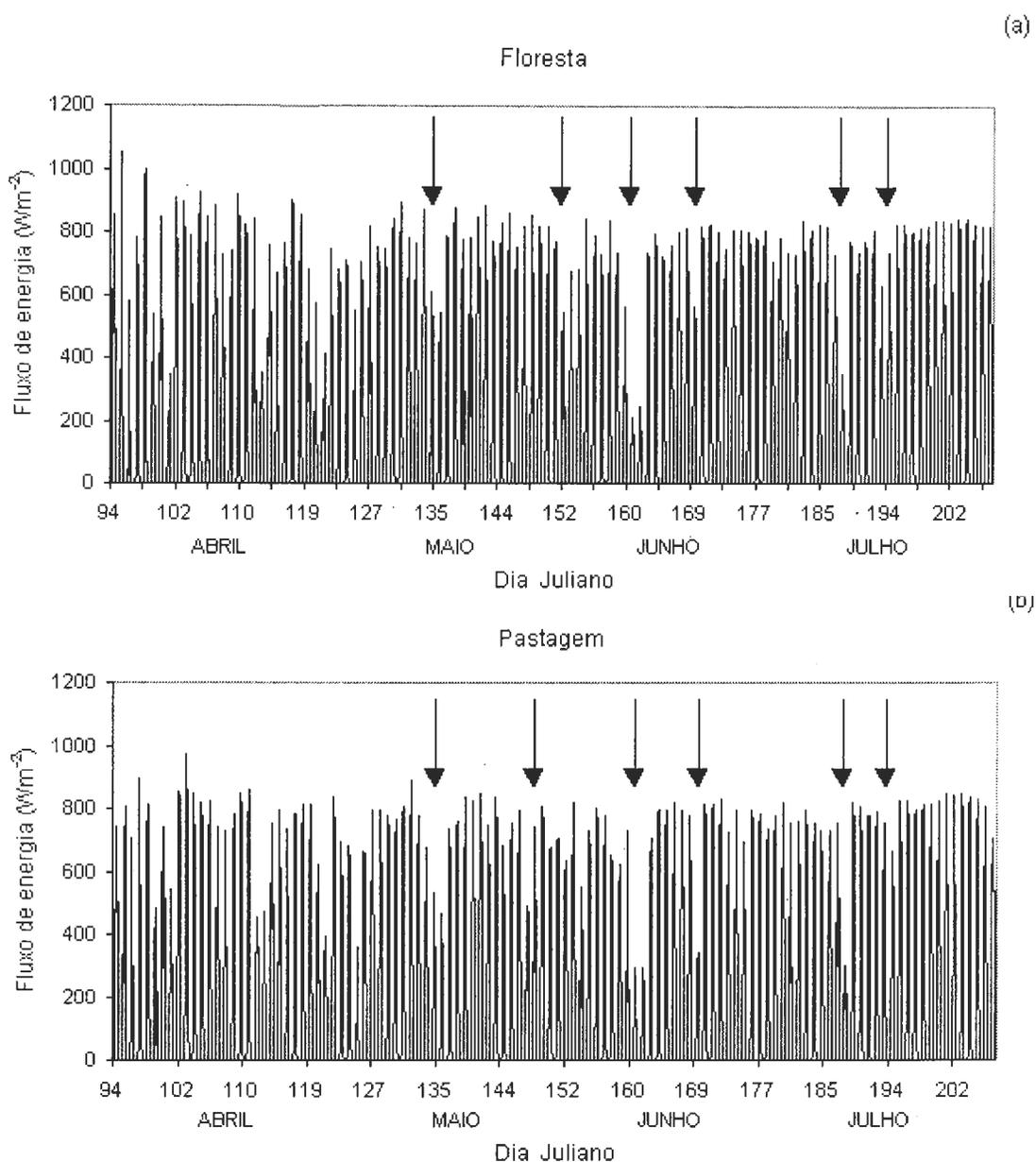


Figura 3 - Variação temporal da radiação solar global na Floresta (a) e na Pastagem(b), com setas indicativas dos eventos de friagens

As temperaturas do ar, em ambos os sítios, apresentaram valores máximos em torno de 31°C e mínimos de 22°C na área de floresta e 21°C na área de pastagem (Figuras 4a e 4b). Algumas variações bruscas foram registradas devido à entrada de friagens na região (6 casos identificados durante o período analisado). No final do período, as temperaturas máximas apresentaram-se próximas de 32°C em ambos os sítios, sendo que, em alguns dias, na área de pastagem, observaram-se valores acima desse limiar. Na floresta, as temperaturas mínimas

registradas ficaram entre 17 e 19°C e na pastagem entre 15 e 16°C (excetuando os casos de friagens). Estes valores maiores das temperaturas mínimas na floresta são devidos ao efeito liberador/moderador do termo de armazenamento de energia da biomassa, ou seja, durante a noite, a liberação de energia pela biomassa da floresta age no sentido de manter o balanço radiativo noturno e não permite um resfriamento acentuado da superfície (Fisch, 1996).

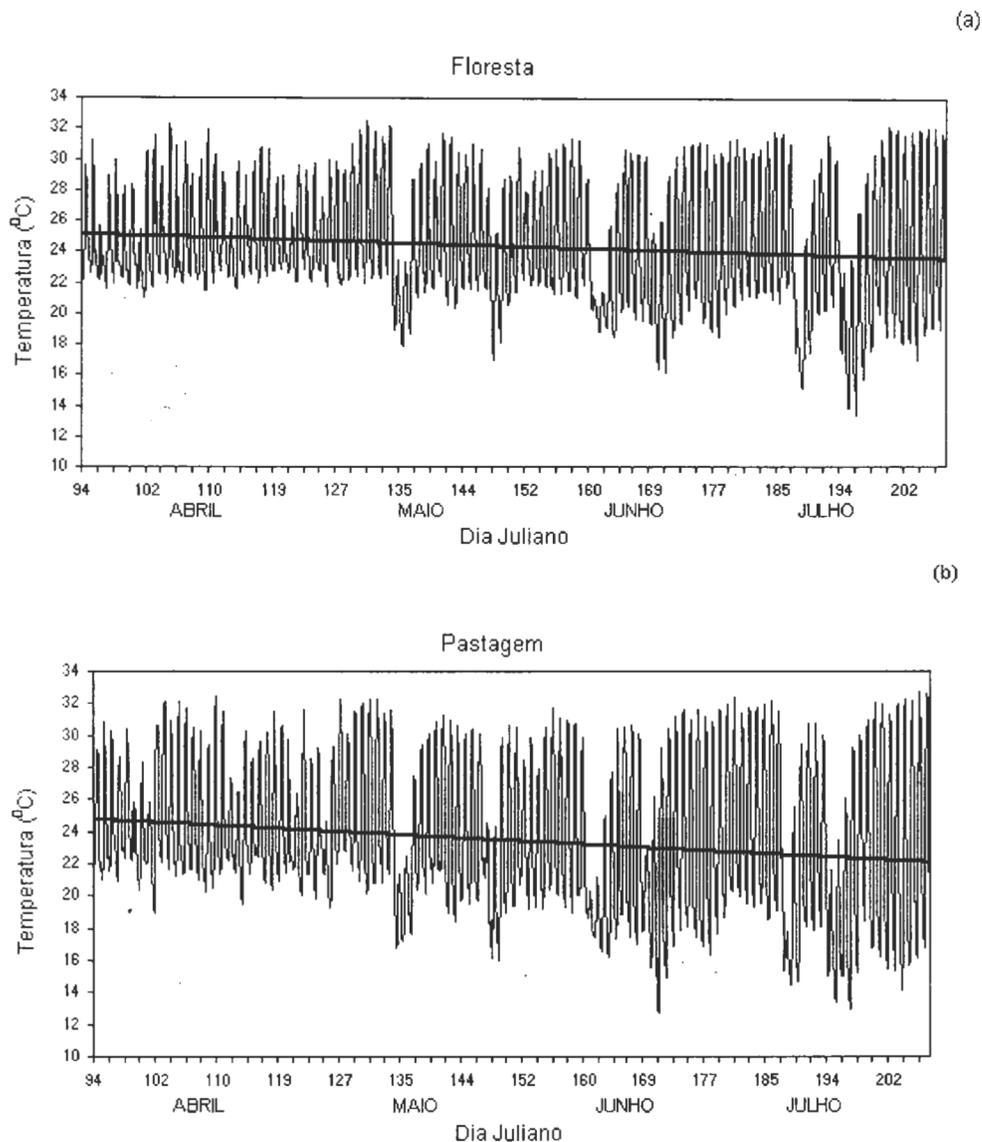


Fig. 4 - Variação temporal da temperatura do ar na Floresta (a) e na pastagem (b)

É interessante notar que as temperaturas mínimas diminuíram ao longo do tempo (Figura 4), o que pode ser justificado pelo fato de a região de Ji-Paraná situar-se a  $10^{\circ}\text{S}$  e, portanto, sujeita a uma menor incidência de radiação solar no período, uma vez que o sol se encontra iluminando mais intensamente o Hemisfério Norte. Outro ponto interessante observado é o aumento da amplitude térmica do período chuvoso para o seco.

A variação temporal da umidade específica diária acompanhou o comportamento da temperatura do ar, em ambos os sítios (Figuras 5a e 5b). No início do período de estudo, os maiores valores de umidade específica ocorreram na floresta, superando  $20 \text{ g kg}^{-1}$ , e os menores ocorreram na pastagem, chegando a  $14 \text{ g kg}^{-1}$ . É

interessante notar que, antes da entrada de friagem do dia 135 (15 de maio de 1993), o valor médio diário da umidade em ambos é aproximadamente constante com valores médios em torno de  $18 \text{ g kg}^{-1}$  na floresta e de  $17 \text{ g kg}^{-1}$  na pastagem. Após a friagem, o ciclo diário volta ao seu padrão característico, porém com seus valores médios abaixo daqueles do início do período. Isto se repete a cada evento de friagem, alterando significativamente o ciclo diário da umidade específica e provocando seu decréscimo ao longo do tempo. Estas diminuições estão associadas ao final da estação chuvosa e também às penetrações mais frequentes de massas de ar polar secas.

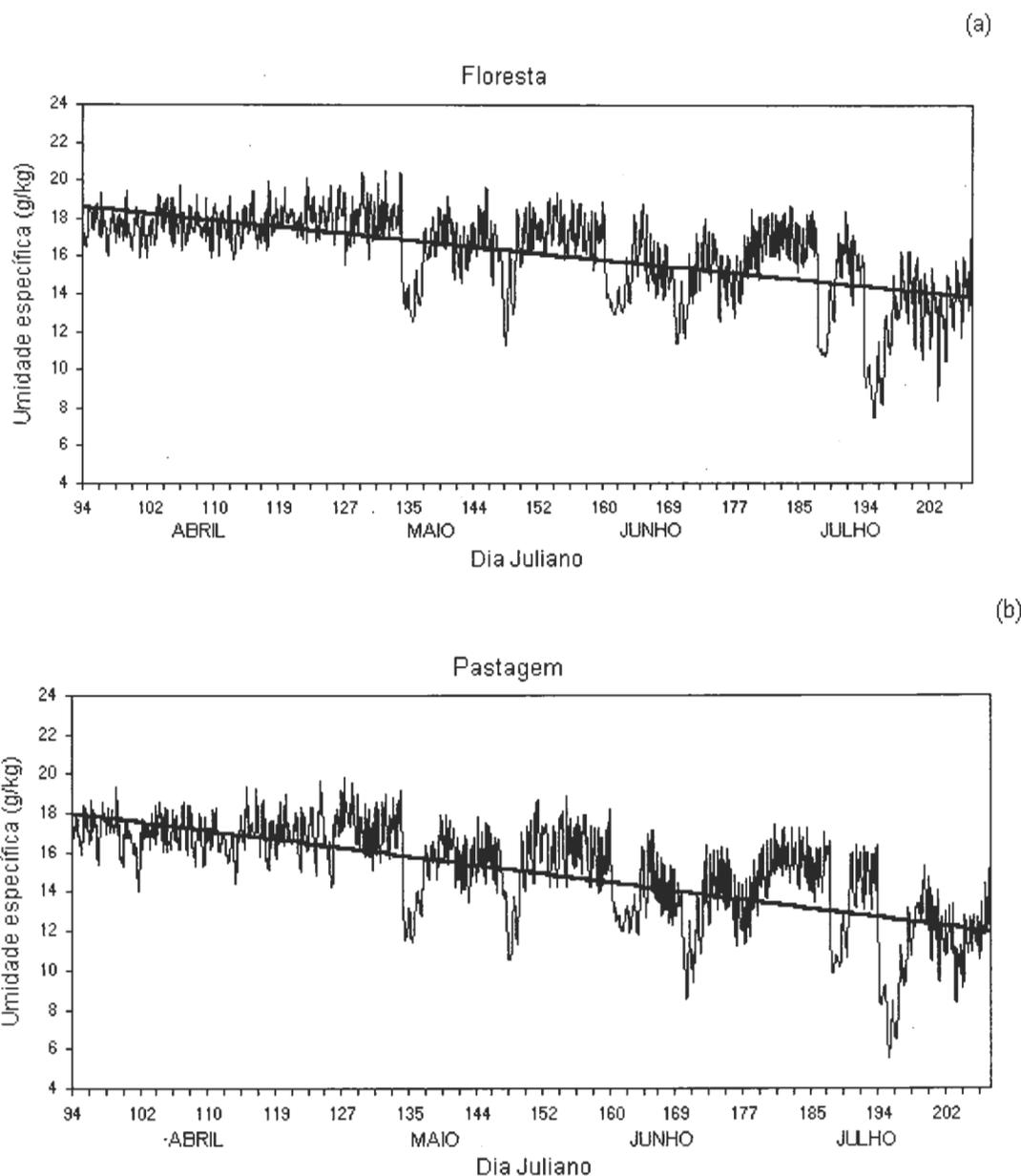


Figura 5 - Variação temporal da umidade específica do ar na Floresta(a) e Pastagem (b)

### 3.2 Período chuvoso

As Figuras 6a e 6b apresentam a variação média horária das componentes do balanço de energia durante o período chuvoso. Neste período, o total de precipitação acumulada foi de 68,1 mm na floresta e de 94,4 mm na pastagem. Nota-se que os valores máximos de radiação solar incidente ocorrem às 12 HL na área de floresta e às 11 HL na pastagem, com valores superiores a  $650 \text{ Wm}^{-2}$ . Esta defasagem no horário médio de ocorrência de intensidade máxima da radiação solar

incidente pode estar associada a uma maior quantidade de nebulosidade no período da manhã na floresta do que a pastagem. No período da tarde, aumenta a nebulosidade na área de pastagem, ocasionando uma queda brusca na radiação solar incidente entre 11 e 14 HL. Esta variação brusca ocorre a partir de 14 HL na floresta devido também à presença de nebulosidade e ocorrência de precipitação. É importante ressaltar que as quantidades de chuvas são indicadores do total de água precipitada, e não sugere que chova mais na pastagem do que na floresta (Ferreira da Costa et al., 1998).

O saldo de radiação atinge valores superiores a  $470 \text{ Wm}^{-2}$  em ambos os sítios, acompanhando as variações da radiação solar incidente. Este mesmo comportamento também ocorre com os fluxos de calor latente, chegando a valores em torno de  $340 \text{ Wm}^{-2}$ , e calor sensível com cerca de  $110 \text{ Wm}^{-2}$ , nos dois sítios experimentais. A energia armazenada pela biomassa (Moore e Fisch, 1986) possui uma contribuição significativa nas primeiras horas da manhã (entre 8 e 10 HL): nestes horários, atinge valores de até  $56 \text{ Wm}^{-2}$ . Na área de floresta, o fluxo de calor latente é superior ao saldo de radiação entre 15 e 18 HL, o que sugere que a energia disponível acima do dossel é utilizada para evaporação da água das chuvas nestes horários.

A variação média horária da temperatura do ar (Figura 6c) de ambos os sítios apresenta ciclos diários bem definidos, com as máximas temperaturas ocorrendo durante a tarde (entre 12 e 13 HL) e mínimas durante o início da manhã (entre 6 e 7 HL). A temperatura média do ar do período esteve em torno  $24,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  na pastagem e  $24,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  na floresta. Em média, a temperatura máxima foi de  $28,5^{\circ}\text{C}$  e a mínima de  $21,5^{\circ}\text{C}$  na pastagem, enquanto, na floresta, os valores correspondentes foram de  $28,2^{\circ}\text{C}$  e  $21,9^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Comparando-se as amplitudes médias diárias, observou-se que a amplitude térmica na pastagem foi de  $8,1^{\circ}\text{C}$ , ao passo que, na floresta, este valor foi de  $7,0^{\circ}\text{C}$ . Isto ocorre, pois a floresta possui uma biomassa que influi na regulação do aquecimento e do resfriamento da atmosfera. Segundo Bastable et al. (1993), a grande disponibilidade de água no solo na pastagem, durante este período, possibilita à vegetação transpirar livremente, devolvendo a maior parte de energia disponível na forma de calor latente. Isto resulta em temperaturas mais baixas em relação às da época seca, e similares às observadas na floresta.

No ciclo diário da temperatura de ambos os sítios, é observada uma taxa de elevação média com o tempo no período da manhã (entre 6 e 12 HL) menor no sítio de floresta ( $1,0^{\circ}\text{C.h}^{-1}$ ) do que no de pastagem ( $1,2^{\circ}\text{C.h}^{-1}$ ). Isto ocorre porque a maior devolução de energia para atmosfera, na forma de calor sensível, ocorre na

pastagem. No período da tarde, observa-se um decréscimo nos valores da temperatura do ar na floresta a partir das 13 HL e, na pastagem, a partir das 15 HL. Este comportamento da temperatura do ar na floresta pode ser relacionado à alta concentração de precipitação observada (50%) entre 13 e 18 HL, conforme citado por Ferreira da Costa et al. (1998).

A Figura 6d ilustra a variação média horária da umidade específica do ar. Os valores na floresta são sempre maiores do que na pastagem. A umidade específica atinge índices mais elevados durante a noite (entre 18 e 22 HL); com valores superiores a  $18,0 \text{ gkg}^{-1}$  na floresta e valores mínimos no início da manhã (entre 06 e 07 HL) de  $16,2 \text{ gkg}^{-1}$  na pastagem. A umidade específica média diária no período chuvoso foi de  $17,5 \text{ gkg}^{-1}$  na floresta e  $17,0 \text{ gkg}^{-1}$  na pastagem. Estes valores são resultados de uma maior presença de vapor de água no ar, associado a uma maior precipitação neste período, em ambos os sítios.

A variação diurna da razão de Bowen nas áreas de floresta e de pastagem, calculada a partir da razão entre o valor médio do fluxo de calor sensível e do fluxo de calor latente, está ilustrada na Figura 6e. Na evolução diurna da razão de Bowen, o sítio de pastagem apresenta um comportamento quase constante (0,3 a 0,4) ao longo do dia, com pequenas oscilações pela manhã. Porém o sítio de floresta mostra um comportamento diferente: elevando-se no início da manhã até atingir seu máximo valor às 12 HL (0,33) para, em seguida, decrescer até o final da tarde. Na pastagem, este decréscimo ocorre a partir das 16 HL. Como foi verificado na partição dos fluxos, a floresta e a pastagem utilizam uma maior quantidade de energia para evaporar e uma pequena quantidade desta para aquecer o ar. Isto pode estar associado à alta disponibilidade de água no solo para evapotranspiração. Estes resultados concordam com os apresentados por Shuttleworth et al. (1984), os quais encontraram valores de  $\beta$  próximo a 0,4 e os de Sá et al. (1988), que obtiveram o valor médio de 0,36 das 9 às 14 HL, ambos para a área de floresta da Reserva Ducke, Manaus, durante dias sem precipitação.

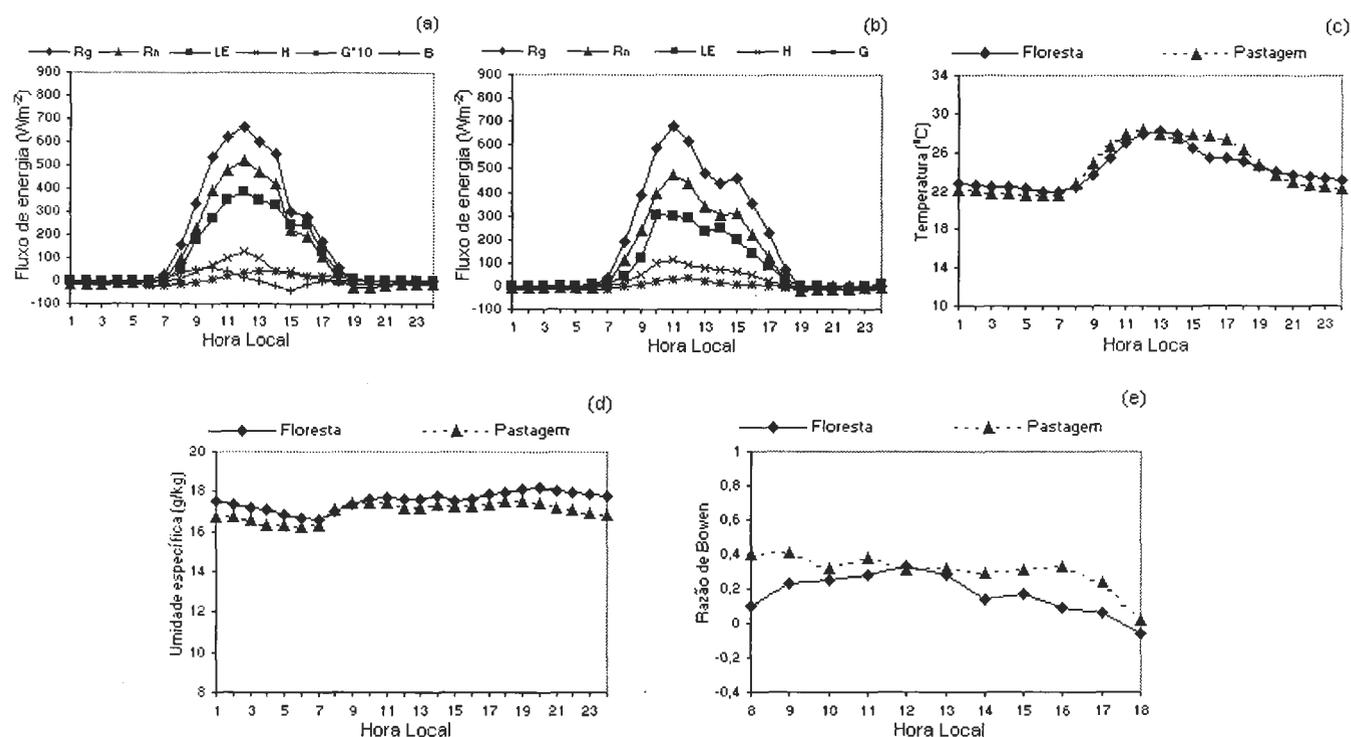


Figura 6 - Variação média horária dos componentes do balanço de energia na Floresta (a, c) e Pastagem (b, d) e da temperatura (c) e da umidade específica do ar (d) e razão de Bowen (e) durante o período chuvoso

### 3.3 Período seco

As Figuras 7a e 7b mostram a variação média horária dos componentes do balanço de energia durante o período seco. Neste período, não houve registro de precipitação. Nota-se que os valores máximos de radiação solar global incidente ocorrem às 13 HL em ambos os sítios experimentais, sendo que o valor máximo da floresta ( $827 Wm^{-2}$ ) é superior ao da pastagem ( $730 Wm^{-2}$ ). Esta diferença pode estar associada a uma quantidade maior de aerossóis presente na área de pastagem e regiões vizinhas provenientes de queimadas, muito comuns nesta época do ano (Fisch, 1996, e Feitosa et al., 1998). Neste mesmo horário, o saldo de radiação também é máximo na floresta ( $589 Wm^{-2}$ ) e na pastagem ( $455 Wm^{-2}$ ), acompanhados dos fluxos de calor latente e sensível, apresentando máximos de  $397 Wm^{-2}$  e  $150 Wm^{-2}$  na floresta e de  $253 Wm^{-2}$  e  $241 Wm^{-2}$  na pastagem, respectivamente. A energia armazenada na biomassa apresenta uma contribuição significativa nas primeiras horas da manhã (entre 7 e 9 HL), atingindo valores de até  $93 Wm^{-2}$ .

A Figura 7c mostra a variação média horária da temperatura do ar para as áreas de floresta e de

pastagem. Nota-se, que em ambos os sítios, apresentam-se ciclos diários bem definidos, com temperaturas máximas ocorrendo durante a tarde (entre 14 e 16 HL) e mínimas durante o início da manhã (entre 06 e 07 HL). No entanto, a temperatura do ar começa a elevar-se rapidamente no sítio de pastagem a partir de 8 HL, a uma taxa média de  $1,9^{\circ}C \cdot h^{-1}$  até atingir seu máximo valor às 15 HL ( $31,7^{\circ}C$ ), passando a decrescer até o final do dia. Na floresta, este comportamento ocorre a uma taxa média de  $1,8^{\circ}C \cdot h^{-1}$  no início do dia, também atingindo seu máximo valor às 15 HL ( $31,6^{\circ}C$ ). Durante a noite, a temperatura do ar é maior na floresta do que na pastagem. Isto ocorre em função de as florestas exercerem um importante papel no armazenamento de energia na biomassa, cuja capacidade térmica elevada, conforme citado por Bastable et al. (1993), evita a perda excessiva de energia armazenada. A temperatura mínima média na pastagem foi de  $16,2^{\circ}C$ , enquanto na floresta foi de  $18,4^{\circ}C$ .

Comparando-se as amplitudes médias diárias da temperatura do ar, observou-se que a amplitude na pastagem foi de  $15,8^{\circ}C$  e na floresta  $13,5^{\circ}C$ . A temperatura média do período registrado ficou em torno de  $23,3^{\circ}C$  na pastagem e  $24,4^{\circ}C$  na floresta. Segundo

Wright et al. (1992), a baixa rugosidade aerodinâmica nos sítios de pastagem conduz a uma menor eficiência na transferência turbulenta e permite o desenvolvimento de uma forte inversão térmica durante a noite e camadas superficiais superadiabáticas durante o dia. O aumento da amplitude térmica é presumidamente devido à redução na evaporação na área de pastagem e conseqüente aumento do aquecimento do ar durante os períodos secos.

A Figura 7d ilustra a variação média horária da umidade específica do ar. A diferença entre a floresta e a pastagem é notada ao longo do ciclo diário, com os maiores índices ocorrendo na floresta e os menores na pastagem. Em média, a umidade específica da floresta foi de  $1,7 \text{ gkg}^{-1}$  maior que a da pastagem. Esta diferença pode estar relacionada ao fato de a floresta possuir um sistema radicular que consegue captar água das camadas mais profundas do solo e, portanto, continua a evaporar a uma taxa próxima da potencial. A umidade específica na floresta atinge um valor máximo pela manhã de  $14,0 \text{ gkg}^{-1}$  (9 HL) e outro máximo à noite (22 HL) de  $15,5 \text{ gkg}^{-1}$ , o valor mínimo foi registrado à tarde, com cerca de  $11,6 \text{ gkg}^{-1}$  (16 HL). Do mesmo modo que na floresta, observa-se na pastagem um máximo valor pela manhã e outro à noite de  $13,3 \text{ gkg}^{-1}$  e mínimo à tarde com  $10,9 \text{ gkg}^{-1}$ . O aumento de umidade específica entre 6 e 9 HL pode ser devido à evaporação do orvalho na pastagem e de nevoeiro na floresta e, à noite, em função da saturação

do ar decorrente da diminuição da velocidade do vento e do decréscimo de temperatura, em ambos os sítios.

A umidade específica média diária no período seco para o sítio de floresta foi de  $13,6 \text{ gkg}^{-1}$ , com uma amplitude média de  $4,4 \text{ gkg}^{-1}$  e, para a pastagem, de  $11,9 \text{ gkg}^{-1}$  com amplitude média de  $3,3 \text{ gkg}^{-1}$ . Resultados semelhantes foram obtidos por Culf et al. (1996) para os mesmos sítios, cujos valores médios para a estação seca encontram-se no intervalo de 11,9 a  $17,2 \text{ gkg}^{-1}$ .

A variação média horária da razão de Bowen é apresentada na Figura 7e para as áreas de floresta e de pastagem. Na evolução diurna, observa-se o aumento da razão de Bowen pela manhã, em ambos os sítios, com valor máximo ocorrendo inicialmente na área de pastagem às 12 HL (0,96) e, na floresta, no período da tarde às 14 HL (0,43). Tais valores acompanham o comportamento do fluxo de calor sensível, que atinge seus máximos nestes mesmos horários para, em seguida, decrescer até o final da tarde. É interessante notar que a razão de Bowen aumenta mais rapidamente na área de pastagem do que na área de floresta, pela manhã. Isto ocorre devido ao aumento substancial do fluxo de calor sensível, em função do rápido aquecimento superficial na pastagem. Deste modo, a devolução de energia para atmosfera na pastagem é realizada de modo similar entre H e LE, uma vez que, nesta época do ano, é comum haver pouca disponibilidade de água armazenada no solo.

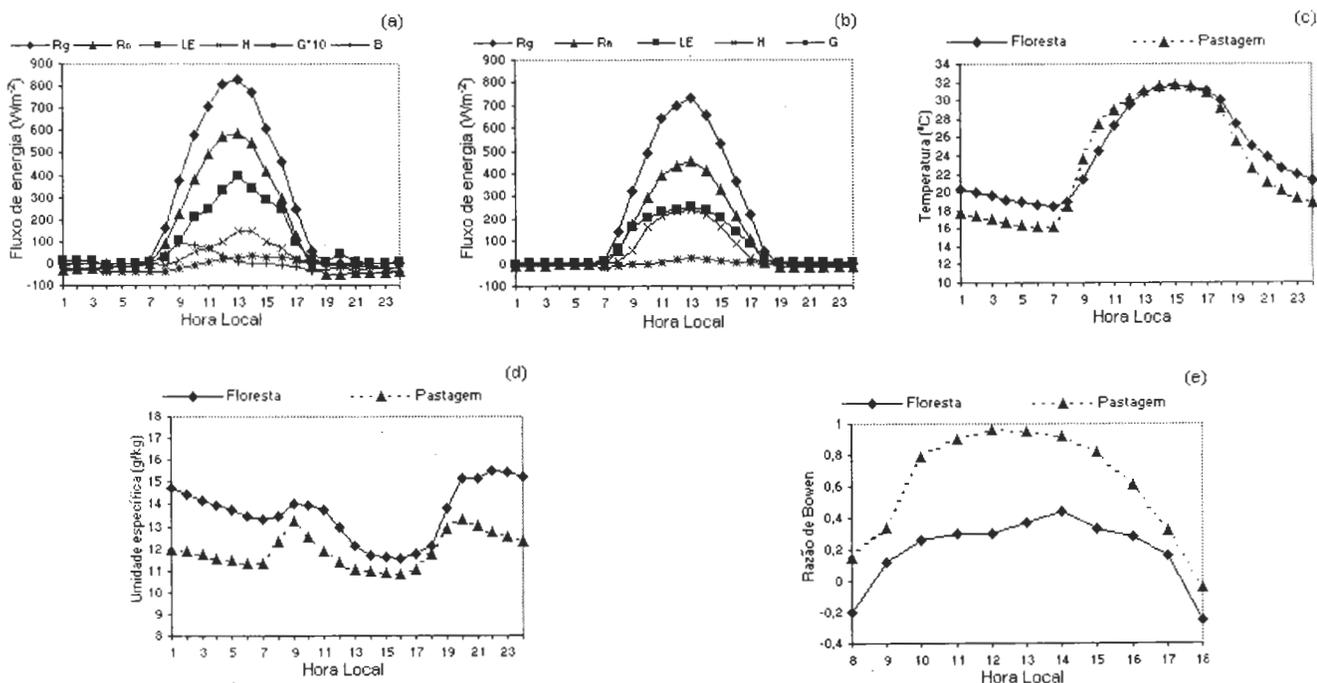


Figura 7 - Variação média horária dos componentes do balanço de energia na Floresta (a) e Pastagem (b) e da temperatura (c) e da umidade específica do ar (d) e da razão de Bowen (e) durante o período seco.

### 3.3 Comparação: chuvoso x seco

A seguir, será realizada uma comparação da partição energia entre as áreas de floresta e pastagem para os períodos chuvoso e seco. Em ambas as áreas, ocorreu um aumento na quantidade de radiação solar incidente do período chuvoso para o período seco, devido à diminuição da cobertura de nuvens. Esta diferença, que, no caso da floresta, variou de 31% (de 15,5 MJm<sup>-2</sup> para 20,3 MJm<sup>-2</sup>) e, na pastagem, foi de 19% (de 16,3 MJm<sup>-2</sup> para 19,4 MJm<sup>-2</sup>), provocou diferentes partições de energia nas áreas de floresta e de pastagem. Para a floresta, houve um aumento no saldo de radiação (23% correspondente 2,7 MJm<sup>-2</sup>) que foi balanceado por um aumento no fluxo de calor sensível (25% equivalente a 0,5 MJm<sup>-2</sup>), uma diminuição no fluxo de calor conduzido ao solo de 0,05 MJm<sup>-2</sup> e um decréscimo no fluxo de calor latente (9,7%, correspondente a 0,9 MJm<sup>-2</sup>). Na área de pastagem, houve um pequeno aumento no saldo de radiação (9%, representando 1,0 MJm<sup>-2</sup>), um aumento no fluxo de calor sensível maior do que o dobro do computado no período chuvoso (122%, equivalente a 2,8 MJm<sup>-2</sup>), um aumento significativo no fluxo conduzido ao

solo (de 0,1 MJm<sup>-2</sup> para 0,8 MJm<sup>-2</sup>) e um decréscimo no fluxo de calor latente (7%, correspondente a 0,5 MJm<sup>-2</sup>). A razão de Bowen média apresentou um aumento na área de floresta de 0,21 durante o período chuvoso para 0,30 no período seco, ao passo que na área de pastagem, este aumento foi praticamente duplicado de 0,32 para 0,76. A temperatura média do ar foi quase constante entre o período chuvoso e o seco (de 24,3°C para 24,4°C) na floresta, enquanto, na pastagem, houve uma diminuição de 24,4°C para 23,3°C, devido às temperaturas mínimas serem mais baixas durante a estação seca, uma vez que o Sol aquece mais o Hemisfério Norte nesta época do ano. A umidade específica média teve uma variação significativa em ambos os sítios: ocorreu uma diminuição de 17,5 gkg<sup>-1</sup> para 13,6 gkg<sup>-1</sup> na floresta e de 17,0 gkg<sup>-1</sup> para 11,9 gkg<sup>-1</sup> na pastagem, entre os períodos chuvoso e seco.

Na Tabela 1, são apresentados resumos dos principais resultados relacionados à partição de energia e elementos climáticos médios nas áreas de floresta (F) e pastagem (P) durante os períodos chuvoso (C) e seco (S).

Tabela 1 – Valores médios diários do fluxo de radiação solar global ( $R_g$ ), saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor conduzido ao solo (G), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), armazenamento de energia na biomassa (B), razão de Bowen (b), temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e umidade específica (q), durante o período chuvoso (4-14/04/93) e seco (16-26/07/93) para a floresta (F) e pastagem (P)

		$R_g$	$R_n$	G	H	LE	B	$\beta$	Ta	q
		MJm <sup>-2</sup>						-	°C	gkg <sup>-1</sup>
F	C	15,5	11,7	0,07	2,0	9,3	0,4	0,21	24,3	17,5
	S	20,3	14,4	0,02	2,5	8,4	1,0	0,30	24,4	13,6
P	C	16,3	11,1	0,1	2,3	7,2	-	0,32	24,4	17,0
	S	19,4	12,1	0,8	5,1	6,7	-	0,76	23,3	11,9

### 4. Resultados

Estes resultados indicam que, durante o período chuvoso, a devolução de energia para a atmosfera é realizada predominantemente pelo fluxo de calor latente, cuja fração do saldo de radiação ( $LE/R_n$ ) utilizada foi 0,82 na floresta e 0,67 da pastagem. Uma pequena parte do saldo de radiação é utilizada para o aquecimento da atmosfera, o correspondente a  $H/R_n$  de 0,17 na floresta e 0,21 na pastagem. Durante a época seca, a devolução de energia para a atmosfera é ainda realizada predominantemente pelo fluxo de calor latente no sítio

de floresta, cuja fração  $LE/R_n$  foi de 0,62, sendo que uma menor parte do saldo é utilizada para o aquecimento da atmosfera ( $H/R_n=0,18$ ). Porém, na pastagem, essa devolução de energia ocorre de modo equitativo pelos fluxos de calor latente e sensível, cujas frações do saldo de radiação foram de  $LE/R_n$  de 0,58 e  $H/R_n$  foi de 0,45. Com isso, verifica-se, na partição dos fluxos, que a floresta utiliza uma maior quantidade de energia para evaporar e uma pequena quantidade para aquecer o ar em ambos os períodos estudados; enquanto, na pastagem, a transferência de energia para a atmosfera ocorre equitativamente pelos fluxos de calor latente e sensível

no período seco e, predominantemente, pelo fluxo de calor latente durante o período chuvoso.

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo desse trabalho foi analisar a variabilidade dos fluxos de radiação e de outras grandezas microclimáticas em áreas de floresta e de pastagem na Amazônia. Estudaram-se também os casos de partição de energia no período de transição entre o final da estação chuvosa para e meio da estação seca.

De um modo geral, o início do período de estudo (estação chuvosa) caracterizou-se por uma alta variabilidade do fluxo de radiação solar incidente devido à ocorrência de precipitação e/ou nebulosidade; por temperaturas máximas em torno de 31°C e por umidade específica do ar acima de 20 gkg<sup>-1</sup> na floresta e de até 14 gkg<sup>-1</sup> na pastagem. Já ao final do período (estação seca), observam-se pouca variabilidade da radiação solar incidente, maiores amplitudes térmicas, valores mais baixos de umidade específica do ar e um número reduzido de eventos de precipitações em ambos os sítios.

Na análise da partição de energia, verificou-se que a floresta utiliza uma maior quantidade de energia para evaporar e uma pequena quantidade para aquecer o ar em ambos os períodos estudados; enquanto, na pastagem, a transferência de energia para a atmosfera ocorre equitativamente pelos fluxos de calor latente e sensível no período seco e, predominantemente, pelo fluxo de calor latente durante o período chuvoso.

Portanto, pode-se concluir, a partir dos resultados apresentados, que a substituição de área de floresta tropical por pastagem na Amazônia implica diferentes contribuições, em termos de balanço de energia e nos elementos microclimáticos, para a atmosfera, os quais devem ser considerados em estudos que tratem dos impactos do desmatamento em larga escala nos climas regional e global.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os colegas brasileiros e britânicos envolvidos no Projeto ABRACOS (Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study), em especial a Ivan R. Wright (Institute of Hydrology), por seu esforço na coleta dos dados de fluxos de energia. José Alexandre da Costa Galvão agradece à CAPES pela bolsa de Mestrado no INPE (1996-97) e Gilberto Fisch agradece ao CNPq (300564/96-1) por suportar financeiramente esta pesquisa.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASTABLE, H. G., SHUTTLEWORTH, W. J., DALLAROSA, FISCH, G., NOBRE, C. A. Observation of climate, albedo and surface radiation over cleared and undisturbed Amazonian forest. *Int. J. Climatol.*, v.13, n.7, p. 783-96, 1993.
- CULF, A., ESTEVES, J. L., MARQUES FILHO, A. O., ROCHA, H. R. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture Amazonia. In: GASH, J. H., NOBRE, C. A., ROBERTS, J. M., VICTORIA, R. L. (Ed.) **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. p. 175-91.
- FEITOSA, J. R. P., FERREIRA DA COSTA, R., FISCH, G., SOUZA, S. S., NOBRE, C. A. Radiação solar global em áreas de floresta e pastagem na Amazônia. *Rev. Bras. Agrometeorol.*, v.6, n.1, p.1-7, 1998.
- FERREIRA DA COSTA, R., FEITOSA, J. R. P., FISCH, G., SOUZA, S. S., NOBRE, C. A. Variabilidade diária da precipitação em regiões de floresta e de pastagem na Amazônia. *Acta Amazonica*, v. 28, n. 4, p. 395-408, 1998.
- FISCH, G. **Camada Limite Amazônica**: aspectos observacionais e de modelagem. São José dos Campos, 1996. 171p. Tese (Doutrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (INPE 6123/TDI 584).
- GASH, J. H., NOBRE, C. A., ROBERTS, J. M., VICTORIA, R. L. **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: John Wiley, 1996. p. 1-14.
- INSTITUTE OF HYDROLOGY (IH). **Amazônia, florestas, pastagens e o clima**: resultados do Projeto ABRACOS. Oxford, 1994. 18 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Serviço de previsão do tempo do CPTEC/INPE**: Experimento LBA (RBLE). Disponível em: <<http://cptec.inpe.br/lba/prelba/rble2.jpg>>. Acesso em: mar. 1997.
- MOORE, C. J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary Layer Meteorol.*,

v. 37, p. 17-35, 1986.

MOORE, C. J., FISCH, G. Estimating heat storage terms in Amazonian tropical forest. **Agric. For. Meteorol.**, v. 1-3, n. 38, p. 147-69, 1986.

SÁ, L. D. A., VISWADNADHAN, Y., MANZI, A. O. Energy flux partitioning over the Amazon forest. **Theor. Appl. Climatol.**, v. 39, n. 1, p. 1-16, 1988.

SHUTTLEWORTH, W. J., GASH, J. H. C., LLOYD, C. R., MOORE, C. J., ROBERTS, J., MARQUES, A. O., FISCH, G., SILVA, V. P., RIBEIRO, M. N. G., MOLION, L. C. B., SÁ, L. D. A., NOBRE, J. C. A., CABRAL, O. M. R., PATEL, S. R., MORAES, J. C. Eddy correlation measurements of energy partition for Amazonian forest. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 110, n. 466, p. 1143-62, 1984.

SHUTTLEWORTH, W. J., GASH, J. H. C., LLOYD, C. R., MCNEIL, D. D., MOORE, C. J., WALLACE, J. S. An integrated micrometeorological system for

evaporation measurements. **Agric. For. Meteorol.**, v. 43, n. 3-4, p. 295-317, 1988.

SHUTTLEWORTH, W. J., GASH, J. H. C., ROBERTS, J. M., NOBRE, C. A., MOLION, L. C. B., RIBEIRO, M. G. Post-deforestation Amazonian climate: Anglo-Brazilian research to improve predictions. **J. Hydrol.**, v. 129, n. 71-85, 1991.

VISWANADHAM, Y., MOLION, L. C. B., MANZI, A. O., SÁ, L. D. A., SILVA FILHO, V. P., ANDRÉ, R. G. B., NOGUEIRA, J. L. M., SANTOS, R. C. Micrometeorological measurements in Amazon forest during GTE/ABLE 2A Mission. **J. Geophys. Res.**, v. 95, n. D9, p. 13669-82, 1990.

WRIGTH, I. R., GASH, J. H. C., ROCHA, H. R., SHUTTLEWORTH, W. J., NOBRE, C. A., MAITELLI, G. T. M., ZAMPARONI, C. A. G. P., CARVALHO, P. R. A. Dry season micrometeorology of Central Amazonian ranchland. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 118, n. 508, p. 1083-99, 1992.