

TROCAS DE ENERGIA E FLUXO DE CARBONO ENTRE A VEGETAÇÃO DE CAATINGA E ATMOSFERA NO NORDESTE BRASILEIRO

MARIA BETÂNIA LEAL DE OLIVEIRA¹, ALEXANDRE JOSÉ BARBOSA SANTOS²,
ANTÔNIO OCIMAR MANZI³, REGINA CÉLIA DOS SANTOS ALVALÁ⁴,
MAGALY DE FÁTIMA CORREIA⁵ e MAGNA SOELMA BESERRA DE MOURA⁶

^{1, 2, 3} INPA/LBA. Av. André Araújo, 2936, Campus II, Aleixo, CEP: 69060-001, Manaus, AM.
Fone/Fax: (0xx92) 3643-3238, E-mails: ¹ betania@inpa.gov.br, ² axsantos@inpa.gov.br, ³ manzi@inpa.gov.br;

⁴ CPTEC/INPE. Rodovia Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista, SP. E-mail: regina@cptec.inpe.br;

⁵ UFCG/DCA. Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, CEP: 58109-970, Campina Grande, PB.
Fone: (0xx83) 3310 1201. E-mail: magaly@dca.ufcg.edu.br;

⁶ CPATSA/EMBRAPA. BR 428, km 152, CP 23, Zona Rural, CEP: 56302-970, Petrolina, PE.
Fone: (0xx87) 3862 1711. E-mail: magna@cpatsa.embrapa.br.

Recebido Março 2005 - Aceito Agosto 2006

RESUMO

Neste estudo foram avaliadas as variações sazonais dos fluxos de dióxido de carbono, de vapor de água e de energia em área de caatinga nativa, no nordeste do Brasil. A taxa de evapotranspiração (LE) do sistema é muito baixa tanto na estação seca quanto na estação chuvosa devido à baixa disponibilidade de água na região, com valores próximos de zero no final da estação seca. Durante a estação seca, cerca de 60 % da energia disponível (Rn) foi utilizada para aquecer o ar (H) e LE correspondeu a 10% de Rn, em média. Durante a estação chuvosa essas taxas foram, respectivamente, 46 e 17%. Quanto ao fluxo de CO₂, o ecossistema atua como sumidouro de CO₂ no início da estação seca, quando o solo ainda contém umidade decorrente da estação chuvosa anterior, bem como na estação chuvosa. Já no final da estação seca, quando os estômatos se fecham e há uma redução significativa no folhedo em função do déficit hídrico, a taxa de fotossíntese torna-se nula e o sistema passa a atuar como fonte de CO₂.

Palavras-chave: semi-árido, evapotranspiração, covariância de vórtices turbulentos.

ABSTRACT: TROCAS DE ENERGIA E FLUXO DE CARBONO ENTRE A VEGETAÇÃO DE CAATINGA E ATMOSFERA NO NORDESTE BRASILEIRO

In this study, the seasonal variations in carbon dioxide, water vapor and energy fluxes in native area of caatinga (xeromorphic woodland), were evaluated in the northeast of Brazil. The evapotranspiration rate (LE) of the ecosystem is very low in the dry and rainy seasons due to the low availability of water in the area, with values close of zero in the end of the dry season. During the dry season, about 60% of the available energy (Rn) was used to heat up the air (H) and LE corresponded to 10% of Rn, on average. During the rainy season those rates were, respectively, 46 and 17%. With relation to the CO₂ flux, the ecosystem acts as a drain of CO₂ in the beginning of the dry season, when the soil still contains humidity because of the previous and current rainy seasons. Already in the end of the dry season, when the stomata close as a result of the water deficit, the photosynthesis rate becomes virtually zero and the system starts to act as source of CO₂.

Keywords: semi-arid, evapotranspiration, eddy covariance.

1. INTRODUÇÃO

A região nordeste tem potencial reconhecido de grande produtora de frutas tropicais, contudo eventos de seca têm inibido a expressão desse potencial, o que faz da irrigação atividade obrigatória em empreendimentos agrícolas. É uma área considerada ecologicamente devastada, devido à luta constante que o homem regional enfrenta com a natureza na tentativa de sobrevivência. O desmatamento e as queimadas ainda são práticas comuns no preparo da terra para a agropecuária que, além de destruírem a cobertura vegetal, prejudicam a manutenção de populações de fauna silvestre, a qualidade da água, e o equilíbrio do clima e do solo.

A Caatinga, que recobre a região semi-árida do Nordeste do Brasil, compreende cerca de 63% da região Nordeste, com extensão territorial de aproximadamente 800.000 km². Apesar da grande extensão, este ecossistema é proporcionalmente pouco estudado se comparado com outros ecossistemas do Brasil, embora encerre espécies vegetais de importância incontestável nas suas formações.

A formação vegetal da caatinga tem características bem definidas, com árvores baixas e arbustos que, em geral, perdem as folhas na estação seca (caducifólias) para reduzir a transpiração e a perda de água da planta, tornando a florescer no período chuvoso. O aspecto geral da caatinga na seca é de mata espinhosa. As plantas possuem adaptações ao clima tais como folhas transformadas em espinhos, cutículas altamente impermeáveis e caules suculentos. Todas essas adaptações lhes conferem um aspecto característico denominado **xeromorfismo** (do grego xeros = seco, e morphos = forma).

Esta região caracteriza-se por apresentar uma forte irregularidade climática, apresentando os valores meteorológicos mais extremos do país: a mais forte insolação, a mais baixa nebulosidade, as mais altas médias térmicas, as mais elevadas taxas de evaporação e, sobretudo, os mais baixos índices pluviométricos, em torno de 500 a 700 mm anuais, com grande variabilidade espacial e temporal. Aragão et al., (1997) verificaram que os eventos de chuva em Petrolina estão condicionados pela direção predominante do vento, o que está relacionado com a atuação de diferentes sistemas atmosféricos: meses com chuva abaixo da média decorrem da atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e meses com chuvas acima da normal estão associados com a atuação da Zona de Convergência Intertropical, Vórtices Ciclônicos de Ar Superior e Sistemas Frontais oriundos do sul do país. Contudo, o principal sistema gerador de chuvas na região é a Zona de Convergência Intertropical, cuja posição de atuação e intensidade determinam a duração e intensidade da estação chuvosa (Uvo, 1989).

Essa variabilidade na distribuição de água na região Nordeste do Brasil em decorrência da atuação de diferentes sistemas

sinóticos determina a distribuição de água no solo, a qual é um fator determinante para as trocas de energia e de CO₂ entre o ecossistema e a atmosfera. Dessa forma, a obtenção de dados a partir de experimentos possibilita estudar o comportamento das mais diversas variáveis que governam o clima da região, além de determinar de que forma as características da região influenciam as trocas turbulentas. O principal objetivo desse estudo é avaliar, a partir de medidas obtidas em torre micrometeorológica, as trocas turbulentas de energia e de CO₂ entre a superfície e a atmosfera acima da Caatinga e verificar a influência de alguns parâmetros meteorológicos nestas trocas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Sítio Experimental

O sítio experimental localiza-se na Embrapa Semi-Árido (CPATSA) (9°03'30,6''S; 40°19'45,1''W; 350m), município de Petrolina, no estado de Pernambuco. Essa é uma área de 600 ha de vegetação de caatinga nativa, na qual predomina uma vegetação de caráter espinhento e folhas pequenas, com árvores de aproximadamente 4,5 metros de altura pertencentes à família Leguminosae (*Mimosa tenuiflora*), sendo verificado também a presença de árvores, à distância, com alturas de até 8 metros.

A precipitação nesta região apresenta grande variabilidade espacial e temporal. Em termos de médias mensais, para um período de 30 anos de medidas obtidas por uma estação meteorológica convencional em um campo experimental dentro da área da EMBRAPA/SEMI-ÁRIDO (Figura 1), observa-se que a precipitação concentra-se nos meses de novembro a abril, o que indica claramente a existência de uma estação seca intensa e duradoura. A temperatura média mensal situa-se entre 24 e 28 °C com pequena variabilidade ao longo do ano, assim como a umidade relativa. O solo da área experimental da área de estudo é classificado como Argissolo Amarelo (PA), com baixa retenção de água e de pobre fertilidade.

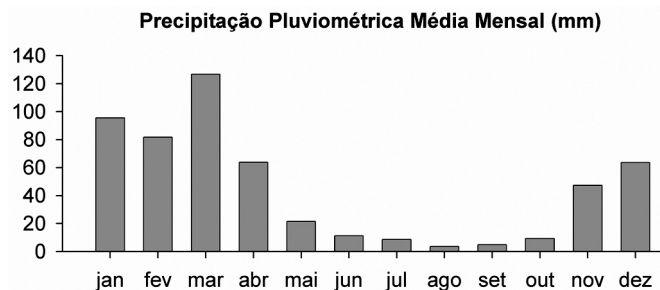


Figura 1 – Precipitação pluviométrica média mensal (mm) da Estação Agrometeorológica de Bebedouro (Petrolina-PE 09°09'S 40°22'W). Período 1975-2004.

Em junho de 2003 foi estabelecido nesta área um experimento, no escopo do Projeto CT-HIDRO, o qual é um estudo

de modelagem sobre o papel da umidade do solo na melhoria das previsões de tempo e de clima para a América do Sul, tendo como objetivo principal melhorar a representação de processos em modelos numéricos de tempo e de clima, com a finalidade de melhorar a previsão em regiões onde a umidade de solo pode ter um impacto significativo na simulação de chuva. Uma torre, com 9 metros de altura, foi montada no local do experimento para suporte de sensores eletrônicos de alta frequência, para medidas de turbulência, e instrumentos eletrônicos de baixa frequência, para medidas de diversas variáveis meteorológicas.

2.2. Instrumentos

A torre foi equipada com sensores para medidas de velocidade e direção do vento (anemômetro sônico CS8000, R.M.Young, Traverse City, Michigan, EUA), umidade e temperatura do ar (HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finlândia), precipitação pluviométrica (TB4, Hydrological Services, Edmonton, Canadá), pressão atmosférica (CS105, Vaisala), conjunto de instrumentos para medidas de radiação de onda curta (Piranômetro CM6B, Kipp & Zonen, Delft, Holanda), onda longa (pirgeômetro CG1, Kipp & Zonen), fotossinteticamente ativa (PAR Lite, Kipp & Zonen) e saldo de radiação (NR Lite, Kipp & Zonen). Perfiladores de temperatura no solo (SP01, Hukseflux, Delft, Holanda) medindo nas profundidades de 2, 5, 10, 20 e 50 cm e de umidade do solo (PR1, Delta-T, Cambridge, Reino Unido) nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 60 cm, também foram instalados. Medidas do fluxo de calor no solo a uma profundidade de 5 cm são obtidas por placas de fluxo (HFP01, Hukseflux). Os dados desses sensores são lidos a cada minuto e seus valores médios e totais a cada 10 minutos são armazenados em um coletor de dados (CR23X, Campbell Scientific, Logan, Utah, EUA).

Medidas de alta frequência das componentes do vento, temperatura do ar e concentrações de vapor de água e de CO₂ são realizadas com o sistema de covariância dos vórtices turbulentos, composto por um analisador de CO₂ e H₂O de caminho aberto (LI7500, Licor, Lincoln, Nebraska, EUA) e um anemômetro sônico tridimensional (CSAT3, Campbell), os quais encontram-se instalados no topo de um mastro acoplado na torre à uma altura de 11 metros. A distância da torre até a borda mais próxima da área de caatinga é de 1000 m, 100 vezes a altura do sistema de medidas de fluxo, o que garante com uma margem de segurança satisfatória que os fluxos medidos sejam originados apenas de áreas de caatinga, mesmo durante condições estáveis. Esses dados são lidos a cada 0,0625 segundos (16 vezes por segundo) por um coletor de dados (CR10X, Campbell) e armazenados em um computador portátil. Posteriormente esses dados foram processados para o cálculo dos fluxos de calor latente, sensível e de dióxido de carbono utilizando a

técnica da covariância dos vórtices turbulentos. Para tanto foi utilizado um programa escrito em linguagem FORTRAN (programa 'Eddyinpe'), que foi desenvolvido no Alterra, Holanda, e adaptado no CPTEC/INPE para o sistema instalado na Caatinga. O programa calcula as flutuações turbulentas em intervalos de 30 minutos, realizando uma série de correções necessárias para a estimativa dos fluxos, conforme a metodologia sugerida por Aubinet et al. (2000).

As flutuações dos valores medidos, para o cálculo das covariâncias, foram calculadas a partir de médias em blocos de 800 s, após a retirada de valores espúrios. Aplicou-se a rotação de coordenadas dos vetores de vento e correções de resposta de frequência eram feitas de acordo com o método descrito por Moore (1986) enquanto as correções das covariâncias e variâncias, devido às flutuações de umidade, foram feitas de acordo com a metodologia de Schotanus e Bruin (1983).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os totais diários de precipitação registrados no período de julho de 2004 a julho de 2005 mostram uma marcante e prolongada estação seca na região (Figura 2a), com eventos de chuva frequentes e de alta intensidade concentrados nos meses de janeiro a março. Nos demais meses, os eventos isolados de chuva resultam em totais diários que não ultrapassam 20 mm, com a permanência de até três meses sem qualquer registro de precipitação na região.

Em regiões semi-áridas o transporte de umidade para a atmosfera compreende a transpiração dos vegetais e a evaporação do solo imediatamente após a precipitação. Assim, o conteúdo de umidade do solo (Figura 2b), que resulta do efeito da chuva, é um fator determinante para as trocas de calor, de vapor e de CO₂ entre o ecossistema e a atmosfera.

A temperatura do ar apresenta valores mais baixos nos meses de junho a agosto, quando os valores médios diários são da ordem de 24°C (Figura 3a), o que está associado com a diminuição da incidência de radiação solar na região (Figura 3b), cuja média diária foi predominantemente abaixo de 300 W.m⁻². Nos meses com maior disponibilidade de energia solar na região (dezembro a fevereiro), a temperatura média diária chega a ultrapassar 30°C, o que está associado à incidência de radiação solar média diária de aproximadamente 330 W.m⁻².

3.1. Balanço de energia

A verificação do fechamento do balanço de energia indica o nível de concordância entre as medidas do saldo de radiação e dos fluxos de calor latente, sensível e no solo, as quais são realizadas por diferentes métodos. O fechamento do balanço de energia para a região estudada, no período de julho de 2004 a

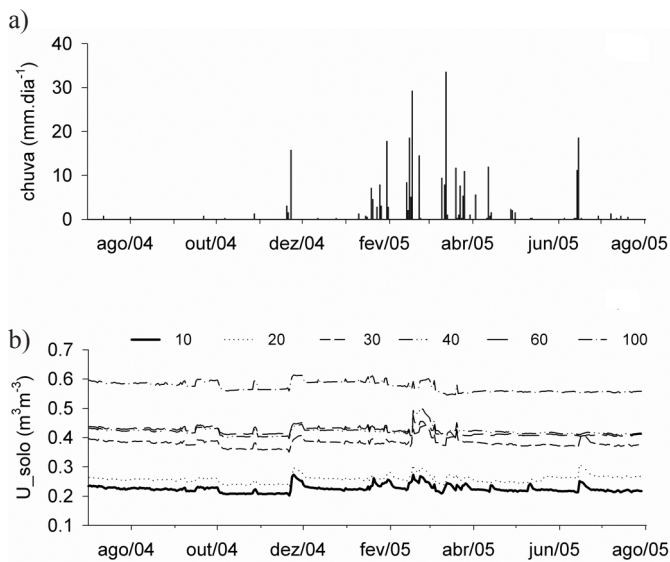


Figura 2 – (a) Totais diários de precipitação e (b) máximas diárias da umidade do solo, em campo experimental na Caatinga, Embrapa Semi-Árido / Petrolina, PE, no período de 01 de julho de 2004 a 29 de julho de 2005.

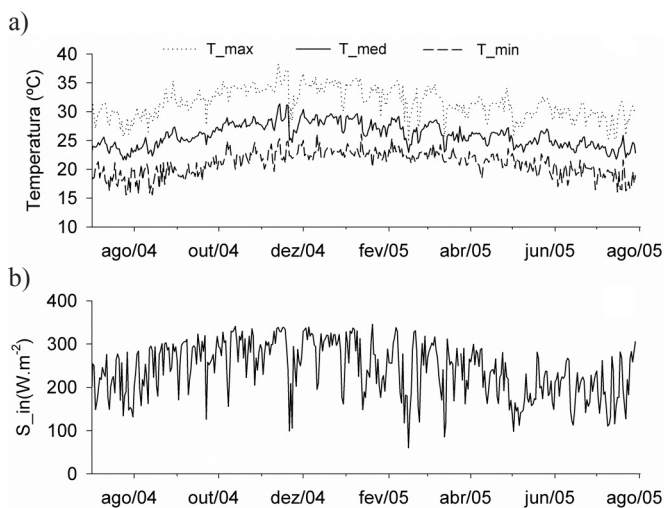


Figura 3 – (a) Médias diárias das temperaturas média, máxima e mínima do ar; (b) radiação solar incidente média diária (W.m⁻²), em campo experimental na Caatinga, Embrapa Semi-Árido / Petrolina, PE, no período de 01 de julho de 2004 a 29 de julho de 2005.

julho de 2005 (Figura 4), mostra que a soma dos fluxos de calor latente, calor sensível e de calor no solo (H+LE+G) representou, em geral, 85% do saldo de radiação ($r^2 = 0,97$). Este resultado é equivalente aos obtidos em diversos estudos em áreas de Floresta Amazônica (por exemplo, Araújo et al., 2002; Rocha et al., 2004) e em regiões semi-áridas (Veenendaal et al., 2004).

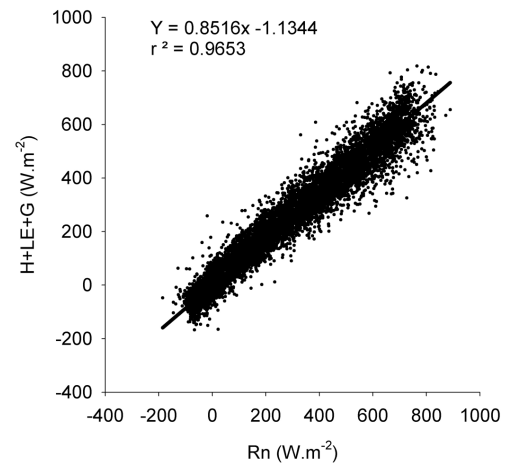


Figura 4 – Fechamento do balanço de energia em campo experimental na Caatinga, Embrapa Semi-Árido / Petrolina, PE, no período de julho de 2004 a julho de 2005.

O não fechamento do balanço de energia em regiões áridas é atribuído, dentre outros fatores, ao intenso gradiente de temperatura nas partes superiores do solo devido à alta insolação, resultando em um considerável armazenamento de calor (S) na camada acima do sensor (Veenendaal et al., 2004). Assumindo que a capacidade térmica do solo da região de estudo é $1,28 \text{ MJ.m}^{-3}.\text{°C}^{-1}$ (solo arenoso seco) e dado que durante os meses de máxima insolação a variação máxima de temperatura foi de $4,6 \text{ °C}$, o armazenamento de calor na camada de 2 a 5 cm foi da ordem de 100 W.m^{-2} . Ao acrescentar esse termo na equação do balanço de energia observou-se que a soma H+LE+G+S passou a representar 94% do saldo de radiação ($r^2 = 0,96$). Isto indica que os fluxos H e LE, medidos pelo método da covariância dos vórtices turbulentos, correspondem bem com as outras componentes do balanço obtidas por outros métodos.

A variação sazonal do saldo de radiação acompanha a variação sazonal da radiação solar incidente mostrada anteriormente. Menores valores podem ser observados em julho, cujas médias diárias não ultrapassam 150 W.m^{-2} , chegando a atingir valores pouco acima de 200 W.m^{-2} em fevereiro.

Em regiões sob condições limitadas de água (semi-áridas), a maior parte da energia disponível (Rn) é liberada na forma de calor sensível, como pode ser visto na Figura 5. Observa-se um aumento gradativo da fração de Rn utilizada para aquecer o ar (H/Rn), que inicialmente era cerca de 0,5 e passou a apresentar valores superiores a 0,8 à medida que se estabeleceu realmente a estação seca na região e, assim, as trocas de energia entre a superfície e a atmosfera tornaram-se estáveis (Figura 5a). No caso da fração de Rn utilizada para os processos evapotranspirativos (LE/Rn), tem-se uma diminuição ao longo da estação seca, quando os valores decrescem de 0,3 para aproximadamente zero (Figura 5b), visto que praticamente não há transpiração do estrato arbóreo/ arbustivo, o qual compõe

a quase totalidade da cobertura vegetal da área. Este padrão é fortemente alterado após eventos de precipitação, como aconteceram nos dias 20, 21 e 23 de novembro, cuja precipitação foi equivalente a 20 mm. Imediatamente após esta chuva, observou-se um aumento de LE/Rn em virtude provavelmente da evaporação da água retida no solo, causando uma diminuição de H/Rn. À medida que o solo vai secando, menos energia vai sendo liberada na forma de evaporação e, assim, têm-se aumento de H/Rn e diminuição de LE/Rn. Esta situação se repete após as chuvas registradas a partir da segunda quinzena de janeiro, quando inicia a estação chuvosa na região. Dessa forma, como as chuvas passam a ser freqüentes, há uma variação intensa em H e LE de um dia para outro, que vai depender da água retida no solo, diminuindo H e aumentando LE, com relação aos valores observados na estação seca.

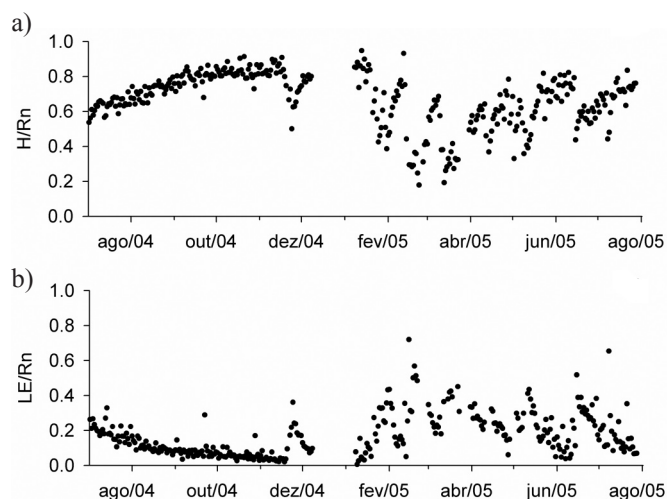


Figura 5 – Variação sazonal das razões H/Rn (a) e LE/Rn (b), em campo experimental na Caatinga, Embrapa Semi-Árido / Petrolina, PE, no período de julho de 2004 a julho de 2005.

Como pode ser visto, diferentes condições de precipitação e de umidade do solo ocasionam alteração das componentes do balanço de energia. Com o objetivo de verificar a partição da energia disponível na superfície durante as estações seca e chuvosa na região, foram selecionados os meses de julho e de outubro de 2004, como representativos respectivamente do início e do final da estação seca, e março de 2005 representando

a estação chuvosa na região. Observa-se uma diferença nas frações de Rn utilizadas para aquecer o ar (H) e para processos evaporativos (LE) nos três períodos (Figuras 6a, 6c, 6e). Os coeficientes dos ajustes lineares entre H, LE e Rn, para os três meses analisados, são mostrados na Tabela 1. Um melhor ajuste pode ser verificado entre as curvas de H e Rn, com H representando 55, 66 e 42 % de Rn, respectivamente, para os três períodos. Já a fração de Rn utilizada para LE decresceu de 12 para cerca de 5 %, à medida que se estabelece a estação seca, e atingiu 21% na estação chuvosa.

O comportamento diurno dos fluxos de energia na superfície pode ser melhor verificado analisando-se dias típicos sobre diferentes condições de umidade do solo. Para esse propósito, três dias foram selecionados: um representando o início da estação seca (12 de julho de 2004), outro representativo da real estação seca (13 de outubro de 2004) e o terceiro referente à estação chuvosa na região (03 de março de 2005).

Em termos do curso diário médio dos componentes do balanço de energia observou-se, no início da estação seca (Figura 6b), que o Rn atingiu 603 W.m⁻², com H e LE máximos sendo, respectivamente, iguais a 347 e 111 W.m⁻² e o fluxo de calor no solo atingindo 88 W.m⁻². No final da estação seca (Figura 6d), Rn, H e G superaram 724, 485 e 116 W.m⁻², respectivamente, enquanto que o fluxo de calor latente máximo foi de apenas 85 W.m⁻². Já na estação chuvosa (Figura 6f), com aumento da evapotranspiração, LE chegou a apresentar valores superiores a 205 W.m⁻², enquanto que o fluxo de calor sensível máximo reduziu para 453 W.m⁻². O fluxo de calor no solo máximo foi de 77 W.m⁻², enquanto o saldo de radiação máximo não ultrapassou 830 W.m⁻². Observa-se que a taxa de evapotranspiração da vegetação é sempre inferior ao fluxo de calor sensível em função da disponibilidade de água na região, enquanto o fluxo de calor no solo é superior ao fluxo de calor latente durante toda a estação seca, indicando que o armazenamento de calor no solo é uma importante componente do balanço de energia.

À noite, o balanço de radiação é negativo em resposta à perda relativamente grande de radiação de onda longa devido ao céu claro e a umidade do ar ser baixa. Esse resfriamento radiativo da superfície é balanceado pela perda de energia a partir do solo, o qual resfria durante a noite. O fluxo de calor sensível é aproximadamente zero porque os ventos são fracos

Tabela 1. Parâmetros da equação de ajuste linear ($y = ax + b$) para os fluxos de calor latente e sensível em função do saldo de radiação, para os meses julho e outubro de 2004 e março de 2005.

Períodos	aH	aLE	BH	bLE	r ² H	r ² LE
julho/04	0,553	0,118	7,366	8,078	0,964	0,706
outubro/04	0,655	0,051	23,254	0,812	0,968	0,461
março/05	0,425	0,205	3,716	16,481	0,876	0,678

e o ar frio próximo à superfície é mais denso do que o ar mais quente acima. Assim, a alta estabilidade vertical associada com a inversão de temperatura noturna suprime a troca turbulenta de energia. Após o nascer do sol o resfriamento da superfície diminui rapidamente e o aquecimento radiativo líquido diurno é balanceado pelo armazenamento de calor no solo.

3.2. Fluxo de CO₂

Como indicativos das taxas líquidas de fotossíntese e respiração sobre superfícies vegetadas, considera-se que valores positivos de fluxo de CO₂ indicam fluxos de carbono da vegetação para a atmosfera, oriundos de processos respiratórios, e valores negativos indicam fluxos de carbono da atmosfera para a vegetação, devido à atividade fotossintética.

Em termos do fluxo médio diário de CO₂ (Figura 7) têm-se que, de julho até o início do mês de agosto, o fluxo de CO₂ médio diário foi da ordem de $-0,5 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, o que indica que a taxa de absorção de CO₂ pela vegetação (fotossíntese) supera a liberação de CO₂ (respiração de plantas +

solo), porém com taxas muito baixas. No final da estação seca, a taxa de liberação de CO₂ torna-se nula, em decorrência do fechamento dos estômatos e perda das folhas devido ao déficit hídrico. Contudo, o ecossistema atua exclusivamente como fonte de CO₂, com a taxa de respiração apresentando valores até pouco maiores que $1,0 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. No final de novembro, valores mais elevados podem ser visualizados, quando a taxa de respiração atinge cerca de $5,0 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, em função da liberação do CO₂ retido no solo bem como pela atividade microbiana, após eventos de precipitação. De janeiro até final de fevereiro, mesmo tendo começado a estação chuvosa na região, o ecossistema ainda atua predominantemente como fonte de CO₂. Esta situação se inverte no período seguinte até a primeira quinzena de abril, quando a taxa de absorção de CO₂ pela fotossíntese supera a taxa de liberação de CO₂ pela respiração, com o fluxo de CO₂ médio diário sendo de até $-4,2 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Nos meses seguintes, esses valores oscilam entre $-1,0$ e $1,0 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, predominantemente, com o ecossistema ora atuando como fonte ora como sumidouro, porém com taxas muito baixas.

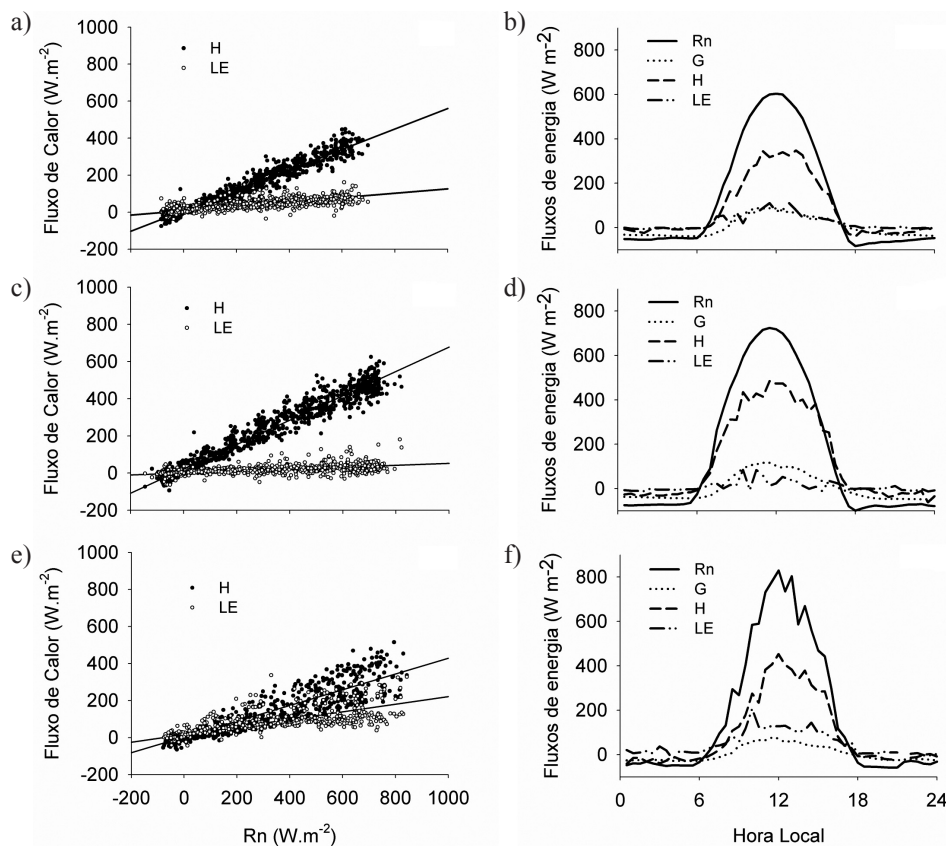


Figura 6 – Fluxos de calor sensível e latente em função de Rn para os meses: (a) julho/04; (c) outubro/04; (e) março/05, respectivamente. Ciclos diários dos componentes do balanço de energia para os dias: (b) 12 de julho de 04; (d) 13 de outubro de 04; (f) 03 de março de 05, respectivamente.

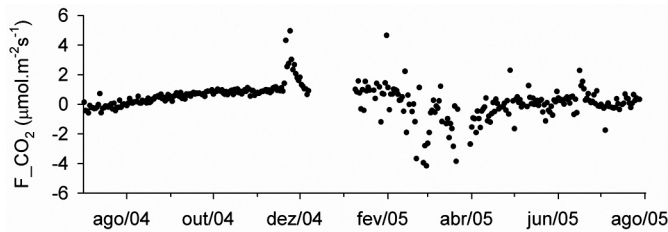


Figura 7 – Variação sazonal da taxa média diária de CO₂, em campo experimental na Caatinga, Embrapa Semi-Árido / Petrolina, PE, no período de julho de 2004 a julho de 2005.

Os ciclos diurnos do fluxo de CO₂ medidos na caatinga durante os meses de julho e outubro de 2004, que representam respectivamente o início e o final da estação seca; e os meses de janeiro e março de 2005, que representam, respectivamente, o início e final da estação chuvosa, são mostrados nas Figuras 8 e 9. No início da estação seca (Figura 8a), em julho de 2004, a taxa de fluxo médio varia de 0,2 a 1,2 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ durante a noite (respiração). Durante o dia, o fluxo médio de CO₂ foi no máximo $-2,3 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, tendo sido registradas taxas de até $-5 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. No caso do período mais seco (Figura 8b), representado por outubro de 2004, o fluxo de CO₂ médio diário apresentou, claramente, apenas valores positivos, o que indica

que a fotossíntese foi minimizada nesse período devido à queda das folhas das árvores e arbustos e conseqüente diminuição da atividade metabólica do ecossistema. Em janeiro (Figura 9a), quando se iniciam as chuvas, a taxa média máxima de fotossíntese é da ordem de $-2,1 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, enquanto durante a noite essa taxa atinge $3 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. À medida que as chuvas vão se tornando freqüentes, determinando a estação chuvosa na região, a taxa de fotossíntese apresenta valores consideráveis, que chegam a ser da ordem de $-30 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, com os valores médios em torno de $-9 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Figura 9b).

Nos períodos analisados pode-se observar que a taxa fotossintética máxima é atingida por volta das 9 horas da manhã, quando o déficit de pressão de vapor (VPD) passa a ter aumento gradativo (Figuras 8a, 8b, 9a e 9b), o que resultaria no fechamento dos estômatos. Para os quatro períodos, o VPD máximo foi atingido por volta das 15:30 horas local, com valores médios de 24 hPa no início da estação seca, 38 hPa no final da estação seca, 31 hPa no início da estação chuvosa e 24 hPa no final da estação chuvosa. Isso explica a taxa de fotossíntese quase nula na região durante o mês de outubro (final da estação seca), enquanto que na estação chuvosa o valor médio do déficit de pressão de vapor foi da mesma ordem do início da estação seca.

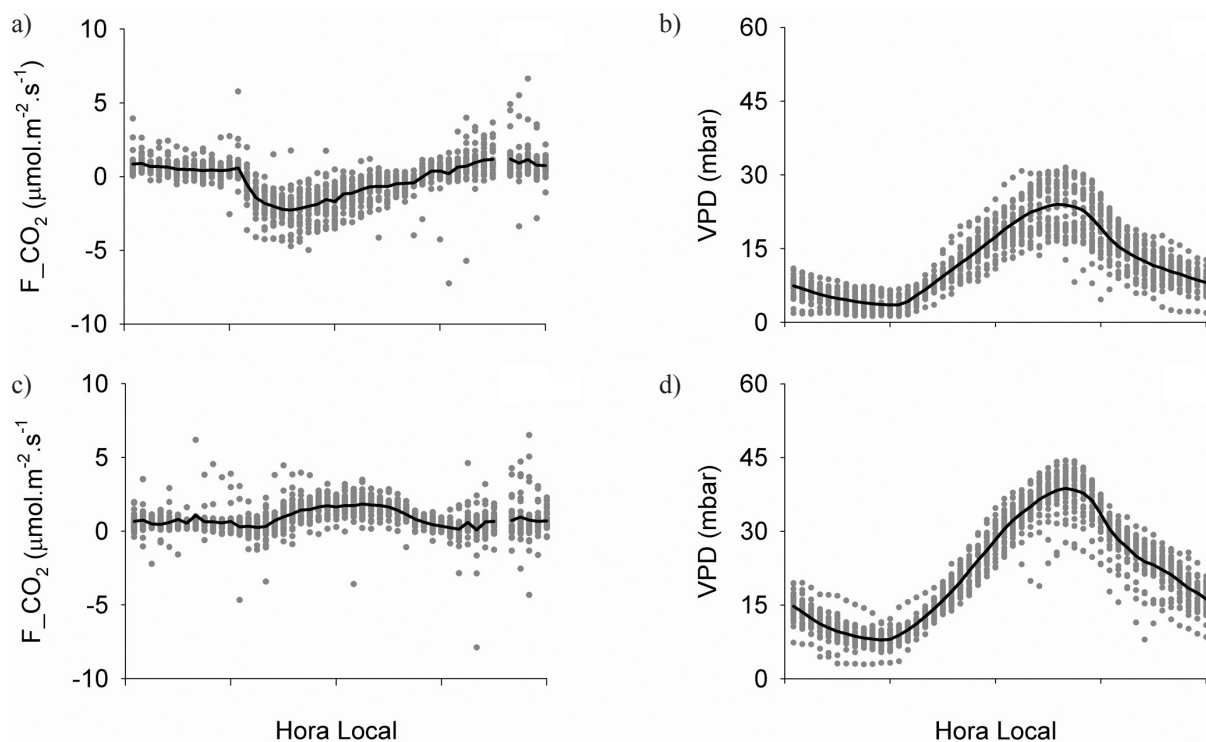


Figura 8 – Curso diário do fluxo líquido de CO₂ (esquerda) e do déficit de pressão de vapor (direita) para os meses: (a) e (b) julho de 2004; (c) e (d) outubro de 2004.

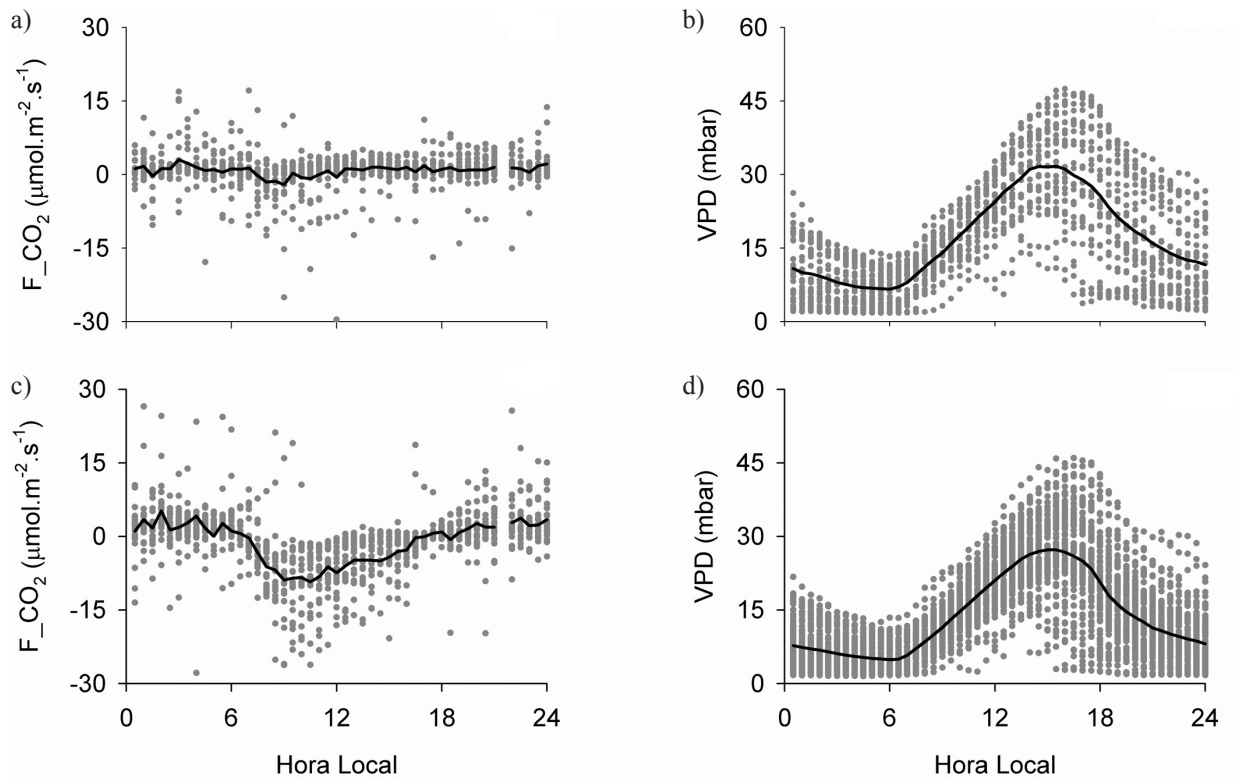


Figura 9 – Curso diário do fluxo líquido de CO₂ (esquerda) e do déficit de pressão de vapor (direita) para os meses: (a) e (b) janeiro de 2005; (c) e (d) março de 2005.

A curva de resposta à luz da taxa de assimilação líquida de CO₂ (Figura 10) indica que no mês de março (representativo da estação chuvosa na região), a taxa líquida máxima de assimilação de CO₂ foi de $-13,34 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, quando é feito o ajuste de curva utilizando-se o modelo de hipérbole retangular. O rendimento quântico calculado pelo ajuste dos dados ao modelo de hipérbole retangular foi de 0,0295 (Tabela 2). Este valor corresponde ao número de moles de CO₂ fixados por moles de fótons em baixos níveis de irradiância. Isto significa que, no início da estação seca, são necessários cerca de 34 fótons ($1 / 0.0295$) para o ecossistema fixar uma molécula de CO₂. Este rendimento quântico é semelhante aos valores encontrados, por exemplo, para savana semi-árida na África meridional, que podem variar de 0,023 a 0,030 (Scanlon e Albertson, 2004). A taxa de respiração do ecossistema estimado pelo ajuste ao modelo de hipérbole retangular foi de apenas $3,87 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

No período seco, não houve relação entre taxa líquida de fotossíntese e fluxo de fótons fotossintéticos, visto que embora tivesse uma quantidade de luz incidente, o fluxo líquido de CO₂ estava limitado pelo fechamento dos estômatos, e apresentou apenas valores positivos indicando respiração nesse período.

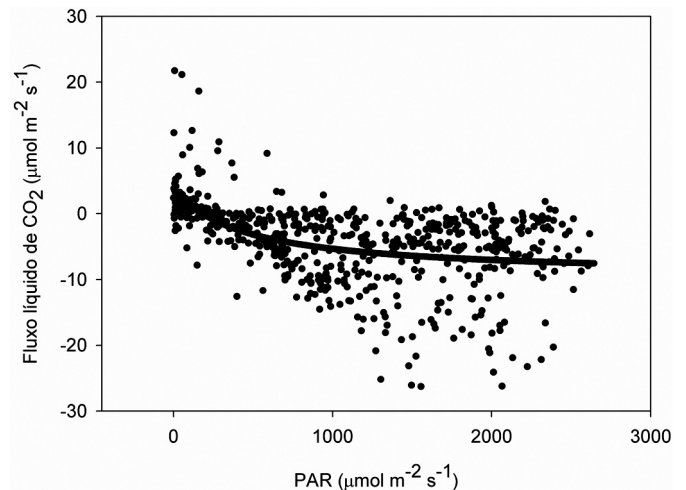


Figura 10 – Curva de resposta à luz do fluxo líquido de CO₂ para o mês de março de 2005. Os coeficientes do ajuste não linear são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Coeficientes de ajuste para a curva de resposta à luz do fluxo líquido de CO₂ para março de 2005.

Hipérbole retangular	
Coeficientes do ajuste	$N_E = \frac{\alpha \cdot I \cdot N_{E_{\max}}}{-N_{E_{\max}} + \alpha \cdot I} + R$
$N_{E_{\max}}$	-13,34 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
α	0,0295
R	3,87

Onde:

$N_{E_{\max}}$ – Taxa máxima de fluxo líquido de CO₂

α – Rendimento quântico em baixos níveis de irradiância

R – Taxa de respiração

4. CONCLUSÕES

Este artigo reporta um dos poucos estudos realizados em área de caatinga, utilizando medidas contínuas dos termos do balanço de energia. Foram avaliados os dados de grandezas meteorológicas relevantes para o balanço de energia nas estações seca e úmida, bem como fluxos de CO₂, em área de caatinga nativa no Nordeste do Brasil. Os resultados apontam baixos valores de fluxo de calor latente, tanto na estação seca quanto na chuvosa, com a vegetação respondendo notavelmente às condições ambientes, o que pode ser verificado pelo comportamento do fluxo de CO₂.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os membros do Projeto “Um Estudo de Modelagem Sobre o Papel da Umidade do Solo na Melhoria da Previsão de Tempo e Clima Para a América do Sul”, Convênio FINEP n.º 23.01.0704.00, executado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), pela manutenção do sítio experimental e disponibilização dos dados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAGÃO, M.R.S.; CORREIA, M.F.; SOBRAL, Z.R. Vento à superfície e chuva em anos contrastantes no submédio São Francisco. *Boletim Climatológico, Presidente Prudente, SP*, ano 2, v. 3, p. 213-217, 1997.
- ARAUJO, A.C. et al. **Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site.** *Journal of Geophysical Research*, v.107 (D20), p. LBA - 58: 1-20, 2002.
- AUBINET, M. et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, v. 30, p. 113-175, 2000.
- MOORE, C.J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary- Layer Meteorology*, v. 37, p. 17-35, 1986.
- ROCHA, H.R. et al. **Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia.** *Ecological Application*, v. 14, p. S22-S32, 2004.
- SCANLON, T. M.; ALBERTSON, J. D. Canopy scale measurements of CO₂ and water vapor exchange along a precipitation gradient in southern Africa. *Global Change Biology*, v. 10, p. 329-341, 2004.
- SCHOTANUS, P.; NIEUWSTADT, F. T. M.; De BRUIN, H.A.R. Temperature measurements with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 26, p. 81-93, 1983.
- UVO, C.R.B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro.** 1989. 82 f. Dissertação de Mestrado em Meteorologia - INPE, São Paulo, 1989.
- VEENENDAAL, E.M.; KOLLE, O.; LLOYD, J. Seasonal variation in energy fluxes and carbon dioxide exchange for a broad-leaved semi-arid savanna (Mopane woodland) in Southern Africa. *Global Change Biology*, v. 10, p. 318-328, 2004.