

CO₂ na floresta nativa de Caxiuanã - Melgaço/PA

CO₂ at the native forest of Caxiuanã – Melgaço/PA

Paulo Vinícius Caldas da Silva, paulo_v@hotmail.com
Ana Karla dos Santos Pontes, anakarlapontes@hotmail.com
Rommel Benicio Costa da Silva, rbcsilva@yahoo.com.br
Adriano Marlison Leão de Sousa, marlisoms@yahoo.com.br
Joyse Tatiane Souza dos Santos, Joysetaty@hotmail.com
Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará

Submetido em 24/03/2017

Revisado em 13/04/2017

Aprovado em 23/07/2017

Resumo: Estudos de fluxo de CO₂ na Amazônia sugerem variação sazonal na troca de energia e matéria entre seus ecossistemas e a atmosfera. Conforme evidências, o comportamento da floresta como fonte ou sumidouro de carbono é sensível à flutuação sazonal das chuvas, que por sua vez é influenciada por eventos de macroescala de nível global. Portanto, analisamos a variabilidade climática diária e horária dos fluxos de CO₂ no leste da Amazônia durante 2007 e 2008. Os padrões de comportamento do fluxo de matéria e energia foram relacionados com a sazonalidade das chuvas e com a oscilação do Índice Oceânico Niño. Os resultados foram expressos para as duas estações de cada ano. Os dados de fluxo de CO₂, H₂O e energia foram computados pelo sistema de covariância de vórtices turbulentos, que encontra-se instrumentado em uma torre de observação micrometeorológica na Flona de Caxiuanã. A taxa média de pico da produtividade líquida ecossistêmica desse ecossistema oscilou entre -22,97 e -37,33 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para os ciclos diurnos dos anos 2007 e 2008. No primeiro ano, não houve significativa variação sazonal de influxo. Por outro lado, em 2008 houve notória variabilidade sazonal na captura de CO₂ pela floresta. Tais comportamentos relacionam-se com a dinâmica do fluxo de energia e da disponibilidade de água. O saldo de produtividade líquida ecossistêmica deste local foi estimado em -8,72 t C ha⁻¹ ano⁻¹ para os anos aludidos. O período pode ter sido particularmente produtivo devido à ausência de uma forte anomalia de El Niño.

Palavras chave: Fluxo de Carbono. El Niño. La Niña. Vórtices Turbulentos.

Abstract: Studies about CO₂ flux in the Amazon suggest seasonal variation in energy and matter exchange between their ecosystems and the atmosphere. According to evidences, the forest behavior as a carbon source or sink is sensitive to seasonal fluctuation of rainfall, which in turn is influenced by macro scale events at a global level. Therefore, we analyzed the daily and hourly climatic variability of CO₂ flux in the eastern Amazon during 2007 and 2008. The behavior patterns of matter and energy fluxes were related to the seasonal rainfall and the oscillation of the Oceanic Niño Index. The results were expressed for the

two seasons of each year. The CO₂, H₂O and energy fluxes data were computed according to the Eddy Covariance technique. The instruments are placed in a micrometeorological tower at the Caxiuanã National Forest. The average rate of net ecosystem production peaks in this ecosystem ranged from -22.97 to -37.33 $\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for the diurnal cycles of 2007 and 2008. In the first year, there was no significant variation of influx. On the other hand, on 2008 there was a notorious seasonal variability in CO₂ capture by the forest. These behaviors were performed due to the dynamics of the energy flux and the water availability. The net ecosystem production budget of this site was estimated at -8.72 t C ha⁻¹ year⁻¹ during the approached period. It is noteworthy that the period may had been a productive one due to the absence of a strong El Niño anomaly.

Keywords: Carbon flux. El Niño. La Niña. Eddy Covariance.

INTRODUÇÃO

As florestas tropicais desempenham um papel importante no balanço de carbono global, cobrindo 12% da superfície terrestre do planeta e contendo cerca de 40% do carbono na biosfera terrestre (TAYLOR & LLOYD, 1992 citado por MERCADO et al., 2006, p. 70).

Estas florestas são responsáveis por aproximadamente 10% da produtividade e biomassa terrestre do mundo, e desempenham um papel importante na regulação do ciclo do carbono da terra e do clima, bem como proporcionam habitats para inúmeras espécies de plantas e animais (FOLEY et al., 2002, p. 79).

A Amazônia é a maior floresta tropical úmida do mundo com uma área total de aproximadamente 7 milhões de km², o que representa cerca de 56% das florestas tropicais da Terra (SANTOS, 2011, p. 368). A floresta está posicionada nos trópicos, onde a troca de energia entre a superfície continental e a atmosfera é bastante intensa.

Estudos anteriores baseados em inventários florestais na Bacia Amazônica mostraram a floresta tropical aqui agindo como um forte sumidouro de carbono com uma captação anual estimada de 0,42-0,65 Pg C ano⁻¹ para 1990-2007, cerca de 25% do sumidouro de carbono terrestre residual (PHILLIPS et al., 2009; PAN et al., 2011).

Através da análise da evolução histórica da dinâmica da biomassa das florestas tropicais maduras, ao longo das áreas de várzea da América do Sul, por um período de três décadas, e utilizando uma rede de 321 parcelas, Brienen et al. (2015) mostraram que o sumidouro de carbono líquido total dentro da biomassa viva intacta amazônica diminuiu em 30%, de 0,54 Pg C yr⁻¹ (intervalo de confiança de 0,45-0,63) na década de 1990 para 0,38 Pg C yr⁻¹ (intervalo de confiança de 0,28-0,49) na década de 2000, e esperam-se taxas cada vez menores para os anos seguintes.

Embora o estudo de Brienen et al. (2015) tenha confirmado que as florestas amazônicas agiram como uma rede de estocagem de biomassa durante um longo período de tempo, a equipe encontrou tendências decrescentes de acúmulo de carbono a longo prazo. Basicamente, a

produtividade primária líquida e a produtividade líquida ecossistêmica possuem tendências de aumento e decréscimo, respectivamente. Em relação aos resultados, isso é uma consequência de recentes nivelamentos dos aumentos de produtividade, combinados com um sustentado aumento a longo prazo na mortalidade de árvores.

Nesse contexto, ao que tange sobre o potencial de estocagem de carbono, Carswell et al. (2002) sugere que as atenções sejam direcionadas às estimativas de troca de CO₂ durante prazos curtos – por exemplo, de 1 à 5 anos – na tentativa de reduzir a incerteza associada com as previsões atuais. Além disso, sob esta perspectiva torna-se possível a compreensão dos eventos de macroescala que influenciam no fluxo de energia na interface floresta-atmosfera da Amazônia.

No estudo realizado por Foley et al. (2002), foi examinado, através da utilização do modelo de superfície/ecossistema terrestre IBIS, como o El Niño Oscilação Sul afetou os fluxos de carbono terrestre ao longo da bacia Amazônica e do Tocantins, considerando-se a resposta da vegetação ao evento de escala macroclimática do pacífico. O período de análise de resultados foi de 45 anos, compreendidos entre 1950 e 1995.

Para obter a relação entre as condições climáticas da Amazônia e o ENSO, Foley et al. (2002) quantificaram a correlação entre os parâmetros climáticos de superfície e o Índice de Oscilação Sul (IOS). De posse dessas informações foram calculados os níveis de precipitação, temperatura do ar, produtividade primária líquida e produtividade líquida ecossistêmica para três condições: Período neutro; Período de El Niño; e, Período de La Niña. Em conclusão, durante a média de ocorrência de El Niño, há uma fonte anômala de CO₂ dos ecossistemas terrestres amazônicos. Por outro lado, durante a média de ocorrência de La Niña há um sumidouro anômalo de CO₂ para dentro dos ecossistemas terrestres amazônicos. Finalmente, durante a média de período neutro, há um sumidouro anômalo de CO₂ na porção norte da bacia amazônica e uma fonte anômala de CO₂ na porção sul da bacia, esta possivelmente relacionada ao arco do desmatamento contemporâneo.

Ao realizarem uma análise sazonal do fluxo de carbono na interface floresta-atmosfera, os resultados obtidos por Carswell et al. (2002), através da

aplicação da técnica de vórtices turbulentos (Eddy Covariance), mostram que não há diferenças entre as estações secas e chuvosas na Amazônia oriental. Entretanto, para alguns sítios experimentais encontraram-se uma absorção melhorada de CO₂ durante a estação menos chuvosa (SALESKA et al., 2003; GOULDEN et al., 2004) e em outros relataram-se uma redução da captação de CO₂ durante esta estação (MALHI et al., 1998; ARAÚJO et al., 2002; VON RANDOW et al., 2004). Sobretudo, a resposta da vegetação à eventos de escala macroclimática devem ser consideradas nas análises.

Neste contexto e de posse de dois anos de dados (2007 e 2008), avaliou-se a sazonalidade da captura ou emissão de carbono em uma floresta primária no nordeste da Amazônia. O objetivo consiste em gerar novos conhecimentos necessários à compreensão do meio ambiente amazônico, no que tange a questão central da Amazônia servir como fonte ou sumidouro de carbono para a atmosfera em uma escala sazonal.

As amostragens de trocas energéticas entre o ecossistema local e a atmosfera foram feitas através da metodologia de vórtices turbulentos, a qual funciona medindo o transporte turbulento vertical de calor, H₂O e CO₂ atmosféricos da e para superfície através do saldo, positivo ou negativo, dessas variáveis (BURBA, 2005). A metodologia encontra-se bem detalhada em Moncrieff et al. (1997). Não obstante, dados de precipitação pluviométrica e de anomalia do ENSO também foram correlacionados às outras informações, pois alterações no regime de chuvas podem ter impactos fortes sobre a produtividade primária líquida e a respiração heterotrófica (FOLEY et al., 2002, p. 79) de uma vegetação.

MATERIAL E MÉTODOS

A Floresta Nacional de Caxiuanã localiza-se a cerca de 400 km a oeste da cidade de Belém, Pará, sob as coordenadas 01° 42' 30" S, 51° 31' 45" W e altitude 60 m, no município de Melgaço – PA (SOUZA FILHO, 2002, p. 8). O sítio experimental de Caxiuanã é administrado pela Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn), que pertence ao Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG). A torre meteorológica local foi implantada como observatório de variáveis ambientais do programa Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazon (LBA).

A floresta é extensa, possuindo cerca de 33.000 hectares, dos quais grande parte encontram-se intactos. Tornou-se uma reserva nacional desde meados dos anos 1970 e é uma floresta densa de planície com uma precipitação média anual de 2500 mm, altura do dossel de 35 m, uma biomassa aérea seca de 200 m³ ha⁻¹ (LISBOA & FERRAZ, 1999 apud CARSWELL et al., 2002, p. 43).

De acordo com a classificação climática de Koppen, na Flona de caxiuanã, o clima da região é do tipo tropical quente e úmido e subtipo climático “Am” com curta estação seca entre agosto e novembro. Apesar da sazonalidade definida, há uma distribuição regular das chuvas ao longo o ano.

Os dados utilizados nesse estudo foram obtidos através de uma estação meteorológica automática, instalada em uma torre de observação micrometeorológica, de 52 metros de altura. A precipitação (mm) (PRP) foi obtida por um pluviógrafo do tipo basculante (TB3/TB4, Hydrological Services, Sydney, Austrália). A temperatura do ar (°C) (Tar) foi obtida através de um termo higrômetro de alta precisão (HMP45C, Campbell Scientific, North Logan, UT, EUA). Os dados de CO₂ e H₂O (µmol.m⁻².s⁻¹) em tempo real foram obtidos a partir da sonda de um sistema aberto de trocas gasosas (LICOR-7500, Li-Cor, Lincoln, NE, USA) que funciona em conjunto com um anemômetro sônico (WindMaster 3D Sonic Anemometer, Gill Instruments, Lymington, UK), o qual registra a velocidade do vento nas três componentes u, v e w (m/s). Este conjunto compõe-se de um analisador infravermelho de gases que mede e registra a densidade de CO₂ e vapor d’água *in situ* utilizando, a técnica de covariância dos vórtices turbulentos, sendo um sistema não dispersivo de alta velocidade e precisão. Estas informações foram utilizadas para determinar os fluxos e a concentração de CO₂ e H₂O no nível do ecossistema. Posteriormente, os dados foram armazenados em um dispositivo de aquisição (iPAQ H2210, Hewlett-Packard, Palo Alto, CA, EUA).

O sistema de vórtices turbulentos pode ser entendido como uma técnica que funciona medindo o transporte turbulento vertical de calor, H₂O e CO₂ atmosféricos da e para superfície através do saldo dessas variáveis registrados por um sistema de alta frequência de amostragem (20Hz) (BURBA, 2005). As

bases desse procedimento técnico encontram-se bem descritas em Moncrieff et al. (1997).

A referida estação situa-se a cerca de 2 km a norte da estação de campo ECFPn. Visando minimizar distorções nas amostragens ocasionadas pela rugosidade da superfície na direção predominante do vento, os sensores foram colocados 4 metros acima do sistema (CARSWELL et al., 2002, p. 43). A amostragem de CO₂, H₂O e da energia entre a floresta e a atmosfera é realizada a cada trinta segundos. Subsequentemente, a cada trinta minutos uma média é calculada para cada variável amostrada. Para os dados de chuva, as médias de meia hora são realizadas sobre dados amostrais de dez minutos.

Os valores de produtividade líquida ecossistêmica foram estimados a partir de dados de CO₂ em tempo real de acordo com a seguinte expressão:

$$NEE = \overline{w'c'} + \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h \overline{c(z)} dz \quad (1)$$

o primeiro termo do lado direito é a covariância entre as flutuações verticais da velocidade do vento (w_0) e as flutuações na concentração do escalar (c_0 , CO₂). O segundo termo é a taxa de variação no armazenamento do dossel, onde z é a altura acima da superfície do solo, h é a altura de medição do fluxo, t é o tempo e a barra denota uma média de tempo (BALDOCCHI et al., 1988; HUTYRA et al., 2007, p.3).

Os valores de Índice Oceânico Niño (ION) foram obtidos do Centro de Previsão Climática (CPC) dos Estados Unidos da América. Este índice é calculado pela média móvel de três meses da temperatura anômala da superfície do mar em uma área do centro-leste do Oceano Pacífico equatorial, a qual é chamada de região Niño-3,4 (isto é, 5° S para 5° N, 170° W para 120° W). A média móvel é calculada de modo a isolar melhor a variabilidade intimamente relacionada com o fenômeno ENSO (CLIMATE PREDICTION CENTER, 2000).

O Índice Oceânico Niño (ION) tornou-se o padrão da Administração Oceânica e Atmosférica Nacional dos Estados Unidos (do inglês National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA) para identificar eventos de El Niño (aquecimento) e La Niña (resfriamento) no Pacífico tropical.

Fenômenos de aquecimento ou resfriamento são definidos como cinco meses consecutivos acima de $0,5^{\circ}$ ou abaixo de $-0,5^{\circ}$ de anomalia. Posteriormente, os eventos são estratificados em fracos (de $0,5^{\circ}$ à $1,0^{\circ}$), moderados (de $1,0^{\circ}$ à $1,5^{\circ}$) e ($> 1,5^{\circ}$) fortes, em relação à anomalia de temperatura da superfície do mar (TSM) (CLIMATE PREDICTION CENTER, 2000).

Após o processamento e validação de todas as informações adquiridas, estimaram-se, para o período de Janeiro de 2007 à Dezembro de 2008, o ciclo diurno sazonal e a média diária para os fluxos de CO_2 , calor latente, calor sensível e temperatura do ar. Bem como, computou-se a média mensal de precipitação.

Subsequentemente, relacionaram-se as informações obtidas em campo com as informações do ION de modo a reportar e analisar o comportamento da Flona de Caxiuanã considerando as mudanças de temperatura no Oceano Pacífico. Posteriormente, indicaram-se os períodos em que a floresta agiu como emissor ou sumidouro de carbono de acordo com os valores de média diária de fluxo de CO_2 durante o período e seu ciclo diurno para as duas estações do ano. Finalmente, calcularam-se os valores cumulativos de produtividade líquida ecossistêmica para os dois anos.

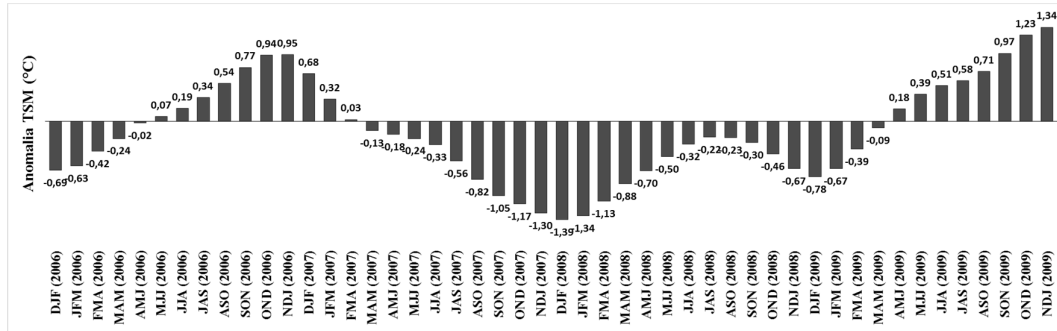
DISCUSSÃO

De acordo com o Índice Oceânico Niño, nota-se que o período de estudo caracteriza-se majoritariamente pela presença de um evento de La Niña, apesar de iniciar com a presença de uma anomalia fraca de El Niño. No entanto, de fevereiro até o final do mês de julho, a anomalia se comporta de forma neutra. Posteriormente, no mês de agosto percebe-se a presença de uma fraca anomalia de La Niña. Finalmente, em outubro a anomalia atinge o valor de $-1,05$, configurando o evento à uma escala moderada de resfriamento do pacífico até o final deste ano.

No início do ano de 2008, a anomalia atinge seu valor máximo para o período de análise ($-1,39$), reduzindo-se gradativamente até o mês de Junho, período em que configura-se como La Niña fraca. Nos meses subsequentes, até

o final de novembro, a anomalia assume valores neutros. Finalmente, em dezembro nota-se a presença de uma fraca anomalia de La Niña novamente (Gráfico 1).

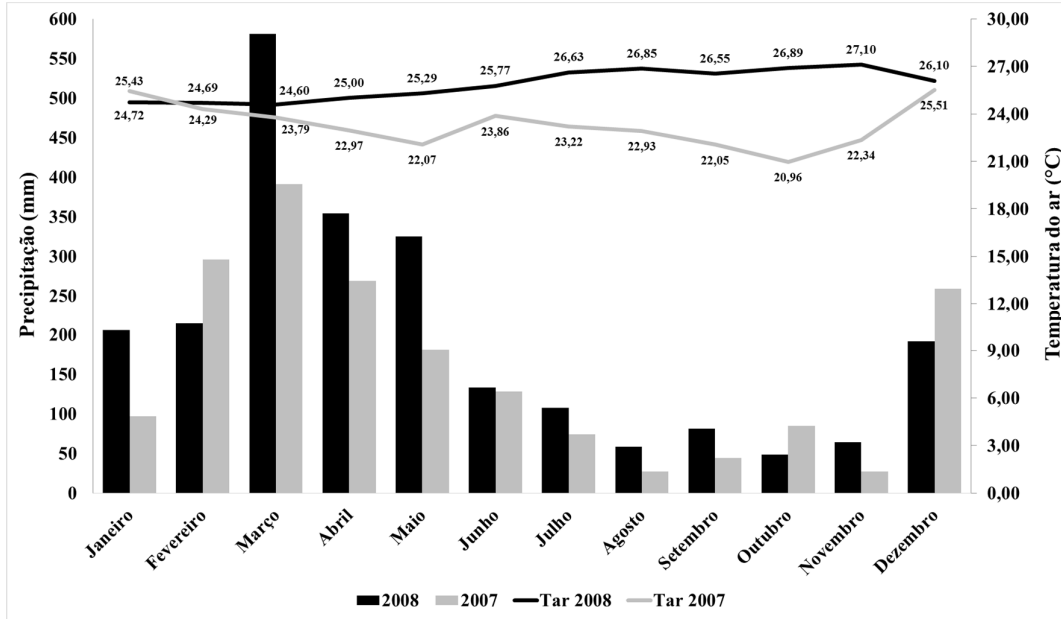
Gráfico 1. Variabilidade interanual do Índice Oceânico Niño (ION) para os meses de 2006 à 2009.



Fonte: Climate Prediction Center, 2000.

A pluviometria da região comprova dois períodos bem distintos, o período chuvoso e o menos chuvoso, os quais englobam os meses de dezembro à julho e de agosto à novembro, respectivamente. Durante o ano de 2007, os meses com maior e menor precipitação identificados foram em Março (391,15 mm) e Novembro (26,92 mm), com médias mensais de 211,09 mm e 45,96 mm nas estações chuvosa e seca, na devida ordem. Semelhantemente, ao longo do ano de 2008, os níveis de maior e menor precipitação registrados foram em Março (581,13 mm) e Outubro (48,51 mm), com médias mensais de 264,03 mm e 63,11 mm nas estações chuvosa e seca, correspondentemente (Gráfico 2).

Gráfico 2. Cumulativo mensal de precipitação (mm).



Fonte: Arquivo próprio. Os dados foram coletados a uma altura de 53 m na torre meteorológica de Caxiuanã durante os anos 2007 e 2008.

A fotossíntese é quase inteiramente regida pela resposta das plantas à luz, temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, podendo variar em pequenas escalas espaciais e temporais dependendo da cobertura de nuvens e microclima (MIRANDA et al., 2005).

Portanto, o transporte de CO₂, a partir das plantas até a atmosfera e vice-versa depende da respiração da própria vegetação, que por sua vez é influenciada pela performance do conjunto de variáveis previamente aludidas.

Segundo Chapin et al (2002), a fotossíntese é o processo pelo qual a maioria do carbono e da energia química entram em ecossistemas e seus controles mais próximos sobre uma única folha são a disponibilidade de reagentes, tais como a energia luminosa e CO₂; temperatura, a qual rege as taxas de reação; e a disponibilidade de nitrogênio, o qual é necessário para produzir as enzimas fotossintéticas.

Os estômatos são via de entrada e saída de CO₂ e água, na forma de vapor, do interior da planta para o exterior da folha. Para a planta absorver CO₂ do meio externo, ela abre seus estômatos. Nesse processo, há a perda de água pela planta. Quando a planta diminui esta perda de água, há a consequente diminuição da realização de fotossíntese (KUMAGAI et al., 2004).

A produtividade primária bruta (PPB), a produtividade primária líquida (PPL) e a produtividade líquida ecossistêmica (PLE) se referem à quantidade total de carbono fixado no processo de fotossíntese subtraindo-se a fotorrespiração e à quantidade de carbono fixado menos as perdas de carbono por respiração autotrófica e ao saldo entre a PPL menos a liberação de carbono por respiração heterotrófica, respectivamente (KIRSCHBAUM, ET AL., 2001).

A condutância estomática regula a entrada de CO₂ nos estômatos e, portanto, norteia a realização de fotossíntese (Araújo & Demicinis 2009). Por ser dependente da variação de humidade do solo, é uma variável que explica a variação temporal da evapotranspiração (Chapin, 2002). Desta forma, pode-se presumir que a entrada de CO₂ na folha através dos estômatos é limitada pelas consequências da diminuição do potencial hídrico (Pereira, 2013). Isto é, para haver assimilação de carbono, é necessário haver evapotranspiração, que por sua vez é dependente da variável de entrada de água do balanço hídrico.

A entrada de energia química líquida dentro de um ecossistema (PPC) necessita primeiramente da fixação de carbono pela fotossíntese realizada pelas plantas. Por convenção, densidades de fluxo de CO₂ negativas indicam ganho de massa pela cultura por parte da superfície (BALDOCCHI, 2003; 2008). Comumente, a captura de carbono ocorre durante o período diurno, no qual o CO₂ atmosférico é absorvido pela vegetação e as reações fotoquímicas começam a ocorrer de maneira mais intensa. A partir do pôr-do-sol, os valores tornam-se positivos.

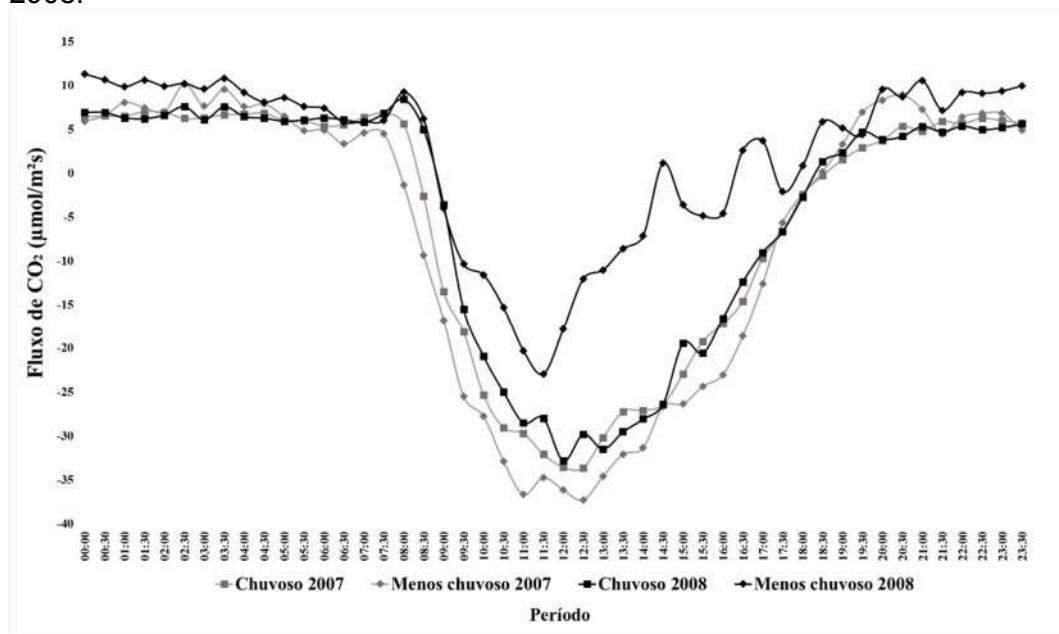
Tal comportamento é decorrente de dois fatores, primeiro pela liberação de CO₂ pelo processo de fotossíntese das plantas e

segundo pela interrupção do consumo de CO_2 , que é decorrente da ausência de irradiância solar (Leal *et al.* 2006).

Por conseguinte, um ecossistema pode ser caracterizado como sumidouro ou fonte de CO_2 da e para a atmosfera dependendo dos valores de sequestro e perda de carbono por fotossíntese e respiração.

Os valores médios horários de fluxo de CO_2 para as duas estações dos anos 2007 e 2008 (Gráfico 3) indicam ocorrer um sumidouro significativo de carbono pela vegetação ao longo do dia durante as estações chuvosas e menos chuvosas de 2007 e 2008. Os picos diurnos de influxo foram de $-33,66$ e $-32,87$ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para as estações chuvosas de 2007 e 2008, respectivamente. Para as estações menos chuvosas, foram atingidos valores mínimos de $-37,33$ e $-22,97$ $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante o ano 2007 e 2008, nesta ordem.

Gráfico 3. Ciclo diurno do fluxo de CO_2 para as duas estações dos anos 2007 e 2008.



Fonte: Arquivo próprio.

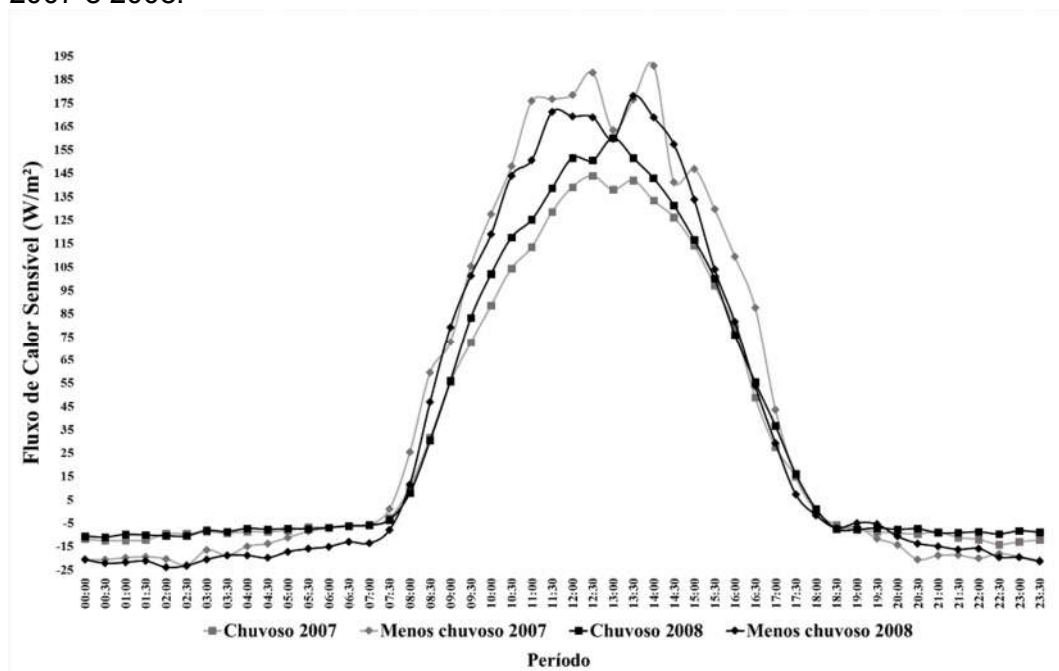
O fluxo de calor sensível (H) é controlado pela fina camada dos elementos (folhas, caules e solo), troca de calor, bem como pelo gradiente de temperatura entre esses elementos e da atmosfera. Este gradiente de temperatura entre as massas de ar imediatamente acima da superfície e perto da superfície ocasiona turbulência convectiva.

Desta forma, o aquecimento do ar na superfície pelo fluxo de calor sensível aumenta a quantidade de vapor de água que o ar pode manter e ocasiona o movimento convectivo do ar húmido para longe das superfícies de evaporação (Chapin, 2002).

Na medida em que o ar se torna muito seco, as plantas diminuem sua condutância estomática. Assim, a taxa de fotossíntese decai.

Os valores médios horários de fluxo de calor sensível para as duas estações dos anos 2007 e 2008 (Gráfico 4) indicam que, havendo-se uma menor disponibilidade hídrica, a atuação do calor sensível é maior. Os picos diurnos de calor sensível foram de 143,87 e 160,03 $W m^{-2}$ para as estações chuvosas de 2007 e 2008, respectivamente. Para as estações secas, foram atingidos valores máximos de 190,93 e 177,95 $W m^{-2}$ durante o ano 2007 e 2008, nesta ordem.

Gráfico 4. Ciclo diurno do fluxo de calor sensível para as duas estações dos anos 2007 e 2008.



Fonte: Arquivo próprio.

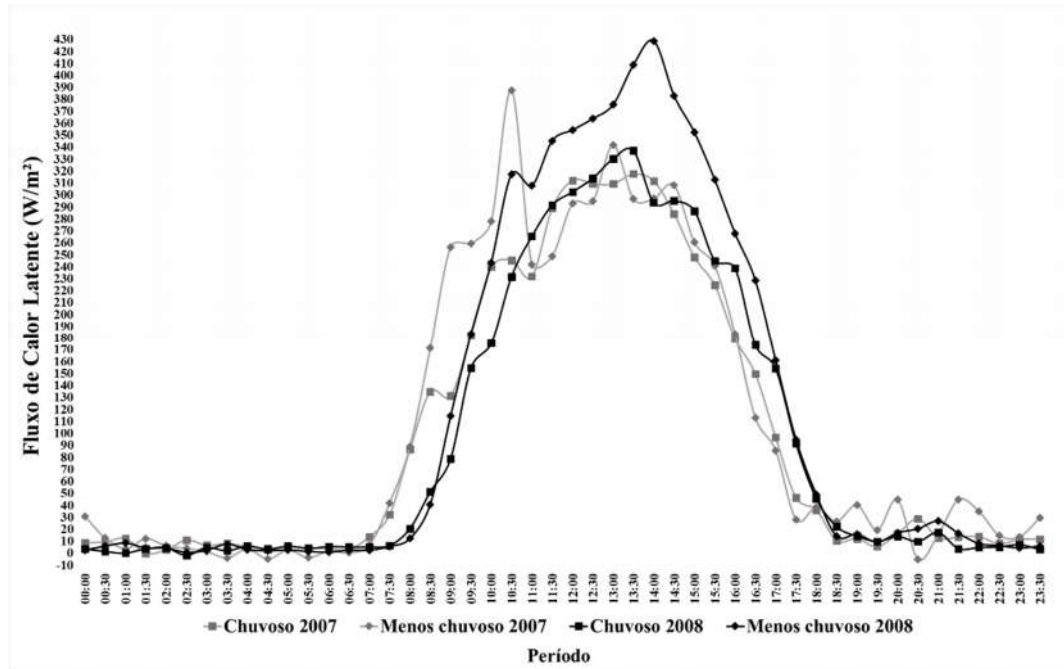
O fluxo de calor latente (LE) é composto de transpiração, a qual é controlada pela condutância entre o mesofilo foliar e as camadas das folhas, do déficit de pressão de vapor d'água e a

evaporação, que, por sua vez, é controlada pela umidade do solo e a camada de serapilheira (SANCHES et al., 2009).

O consumo de calor por evaporação da água refrigera a superfície, reduzindo assim o diferencial de temperatura entre a superfície e o ar que dirige o fluxo de calor sensível (Chapin, 2002). A concentração de vapor d'água no ar favorece a condutância estomática. Subsequentemente, há um aumento de influxo de CO₂ na folha. Sendo assim, é importante frisar que ambos os processos regulam o gradiente de pressão de vapor que controla a evapotranspiração.

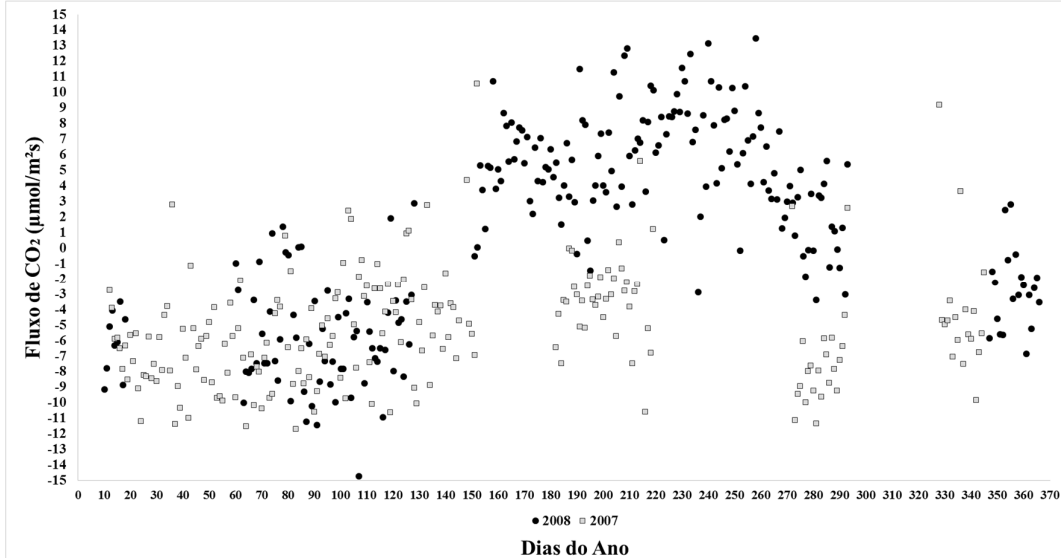
Para o fluxo de calor latente, observa-se que foram atingidos maiores valores médios horários durante a estação menos chuvosa de 2008 (Gráfico 4), a qual sofreu estresse hídrico e obteve altos valores médios diários de calor sensível também. Desta forma, presume-se que a diminuição de influxo médio diário de CO₂ pela vegetação nesta temporada fora ocasionada pela consequente diminuição da condutância estomática. Os picos diurnos de calor latente foram de 317,44 e 336,80 W m⁻² para as estações chuvosas de 2007 e 2008, respectivamente. Para as estações menos chuvosas, foram atingidos valores máximos de 387,34 e 428,67 W m⁻² durante o ano 2007 e 2008, nesta ordem.

Gráfico 5. Ciclo diurno do fluxo de calor latente para as duas estações dos anos 2007 e 2008.



Fonte: Arquivo próprio.

Os dados diários de fluxo de CO_2 do ano de 2007 mostram que não houve significativa variação de influxo entre a estação chuvosa e seca deste ano. Primeiramente, isso aconteceu devido às falhas na captura de dados em períodos da temporada menos chuvosa que seriam de suposta emissão de carbono. Além disso, não houve estresse hídrico na estação menos chuvosa devido à atuação do evento de macroescala La Niña, o qual levou ao fornecimento de chuvas durante este período. Por conseguinte, houve disponibilidade de água durante o ano todo, o que resultou no influxo de CO_2 nas duas estações do ano (Gráfico 6) totalizando uma taxa de $-11,32 \text{ t C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de produtividade líquida ecossistêmica. Este comportamento também pôde ser observado por Carswell et al. (2002), cujo período de estudo também esteve sujeito à atuação do La Niña, resultando na identificação de uma baixa variabilidade sazonal na captura de CO_2 pela floresta.

Gráfico 6. Variabilidade diária do fluxo de CO₂ durante os anos de 2007 e 2008.

Fonte: Arquivo próprio. Após certificação dos dados, calculados a partir de dados observados na torre micrometeorológica da Flona de Caxiuanã.

Por outro lado, os dados diários de fluxo de CO₂ do ano de 2008 apresentam uma notória variabilidade sazonal na captura de CO₂ pela floresta durante este ano (Gráfico 6). Isso também pode estar relacionado às falhas na captura de dados em períodos da temporada chuvosa, que, por sua vez, seriam de suposta assimilação de carbono.

Adicionalmente, no ano de 2008 o acumulado de chuva foi maior que em 2007. Ainda que a estação menos chuvosa desse ano estivesse sob condições neutras de anomalia, as altas ocorrências de chuva indicam que não houve irradiância solar suficiente na vegetação para que neste ano houvesse uma melhor captura de carbono em relação ao ano anterior. Levando aos registros de efluxo neste período. Sendo contabilizada uma taxa de 2,6 t C ha⁻¹ ano⁻¹ de produtividade líquida ecossistêmica. Os comportamentos são similares aos reportados no trabalho de Foley et al. (2002), no qual nas estações secas dos anos neutros analisados observaram-se saldos positivos no balanço de carbono sobre a bacia amazônica e do tocantins.

Desta forma, a taxa de CO₂ absorvido pelo ecossistema durante o período analisado foi de -8,72 t C ha⁻¹ ano⁻¹, desconsiderando-se “data gaps”.

CONCLUSÃO

Os dados diários de fluxo de CO₂ e cumulativos de produtividade líquida ecossistêmica mostram que a Flona de Caixuanã agiu como um forte sumidouro e significativo emissor de carbono nos anos de 2007 e 2008, respectivamente. Conclui-se que a sazonalidade de chuvas é uma forte reguladora desses comportamentos previamente aludidos, pois norteia fortemente o balanço hídrico e energético. Bem como, o comportamento da anomalia do ENSO pode predizer o comportamento de sumidouro ou emissor das florestas Amazônicas se considerada sua memória meteorológica. Entretanto, faz-se necessária a análise da disponibilidade de água na floresta através da quantificação das chuvas. Afinal, o fenômeno ENSO molda, parcialmente, a variabilidade climática nos trópicos.

Não foi possível calcular a evapotranspiração durante esses anos devido à baixa quantidade de dados de calor latente. Além disso, reconhece-se que o trabalho necessita determinar, matematicamente, o quanto a variável chuva regula a taxa de influxo ou efluxo de carbono para os períodos que mais contenham dados dos dois anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao suporte logístico do programa científico LBA (sigla em inglês para The Large Scale Biosphere Atmosphere in Amazonia Program), a Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) pelo laboratório cedido para a análise dos dados utilizados neste trabalho e pelo suporte financeiro através da bolsa de pesquisa concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, A. C., et al. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rain forest: The Manaus LBA site. *Journal of Geophysical Research*. v. 107, no. d20, p. 58(1-20), out. 2002. doi:10.1029/2001JD000676. Acesso em: 30 maio 2017.
- BALDOCCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems; past, present and future. *Global Change Biology*. v.9, p. 479-492, nov. 2003. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-2486.2003.00629.x/epdf>>. Acesso em: 30 maio 2017.
- BALDOCCHI, D. D. Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*. v. 56, no. 15, p. 1-26, 2008. doi: 0067-1924/08/010001. Acesso em: 30 maio 2017.
- BRIENEN, R. J., et al. Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*. v. 519, p. 344-348, mar. 2015. doi:10.1038/nature14283. Acesso em: 30 maio 2017.
- BURBA, G. **Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications**. Nebraska: LI-COR Biosciences, 2005. ISBN 978-0-615-76827-4. Acesso em: 30 maio 2017.
- BOTTA, A.; FOLEY, J. A. Effects of climate variability and disturbances on the Amazonian terrestrial ecosystems dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*. v. 16, no. 4, p. 18(1-11), 2002. doi:10.1029/2000GB001338. Acesso em: 30 maio 2017.
- CARSWELL, F. E., et al. Seasonality in CO₂ and H₂O flux at an eastern Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research*. v. 107, no d20, p. 43(1-16), 2002. doi:10.1029/2000JD000284. Acesso em: 30 maio 2017.
- CHAPIN, F. S.; PAMELA, A. M.; HAROLD, A. M. **Principles of terrestrial ecosystem ecology**. New York: Springer-Verlag New York, Inc., 2002. ISBN 0-387-95443-0. Acesso em: 30 maio 2017.
- COHEN, J. C. P.; SILVA DIAS, M. A. F.; NOBRE, C. A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. *American Meteorological Society*. v. 123, p. (3163-3174), abr. 1995. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0493%281995%29123%3C3163%3AECAWAS%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 30 maio 2017.
- CORREIA, F. W. S., et al. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. *Ciência e Cultura*, v. 59, n. 3, p. 39-43, 2007. Disponível em: <<http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v59n3/a16v59n3.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2017.
- Climate Prediction Center, Oceanic Niño Index. Disponível em: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml>. Acesso em: 30 maio 2017.

FOLEY, A. J.; BOTTA, A.; COE, T.M. El Niño-Southern Oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia. *Global Biochemical Cycles*. v. 16, no. 4, p. 79(1-20), 2002. doi:10.1029/2002GB001872. Acesso em: 30 maio 2017.

GOULDEN, M. L., et al. Diel and seasonal patterns of tropical forest CO₂ exchange. *Ecological Applications*. v. 14, no. 4, p. S42-S54, 2004. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1890/02-6008/pdf>>. Acesso em: 30 maio 2017.

HUTYRA, L. R., et al. Seasonal controls on the exchange of carbon and water in an Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research*. v. 112, p. 1-16, 2007. doi:10.1029/2006JG00365. Acesso em: 30 maio 2017.

KIRSCHBAUM, M.U.F; MUELLER, R. Net Ecosystem Exchange. In: WORKSHOP PROCEEDINGS, 2001. **Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting**. Disponível em: <https://www.kirschbaum.id.au/NEE_Workshop_Proceedings.pdf>. Acesso em: 30 maio 2017.

KUMAGAI, T., et al. Transpiration, canopy conductance and the decoupling coefficient of a lowland mixed dipterocarp forest in Sarawak, Borneo: dry spell effects. *Journal of Hydrology*. v. 287, p. 237-251, out. 2004. doi:10.1016/j.jhydrol.2003.10.002. Acesso em: 30 maio 2017.

MALHI, Y., et al. Carbon dioxide transfer over a central Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research*. v. 103, no. d24, p. 31(593–618), dez. 1998. doi:10.1029/98JD02647. Acesso em: 30 maio 2017.

MIRANDA, J. E., et al. Seasonal variation in the leaf gas Exchange of tropical forest trees in the rain forest savanna transition of the southern Amazon Basin. *Journal of Tropical Ecology*. v. 21, p. 451-460, 2005. doi:10.1017/S0266467405002427. Acesso em: 30 maio 2017.

MERCADO, L. et al. Modelling Amazonian forest eddy covariance data: a comparison of big leaf versus sun/shade models for the C-14 tower at Manaus I. Canopy photosynthesis. *Acta Amazonica*. v. 36, no. 1, p. 69–82, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/aa/v36n1/v36n1a09.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2017.

MONCRIEFF, J. B., et al. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*. v. 188-189, p. 589-611, fev. 1997. doi:10.1016/S0022-169496031940. Acesso em: 30 maio 2017.

PAN, Y., et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*. v. 333, p. 988–993, ago. 2001. doi:10.1126/science.1201609. Acesso em: 30 maio 2017.

PHILLIPS, O.L., et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*. v. 323, p. 1344–1347, mar. 2009. Disponível em: <<http://chave.ups-tlse.fr/chave/phillips-science09.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2017.

SALESKA, S. R., et al. Carbon in Amazon forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. *Science*. v. 302, p. 1554–1557, out. 2003. Disponível em: <http://people.bu.edu/lrhutyra/saleska_et_al_2003.pdf>. Acesso em: 30 maio 2017.

SANCHES, L., et al. Dinâmica sazonal da produção e decomposição de serapilheira em floresta tropical de transição. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 13, n. 2, p. 183-189, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n2/v13n02a12.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2017.

SOUZA FILHO, J. D. C. **Variação sazonal dos componentes do balanço de radiação e energia sobre a floresta de Caxiuanã**. Minas Gerais: Universidade de Viçosa, 2002. 139 p.

TIAN, H., et al. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. *Nature*. v. 396, p. 664-667, dez. 1998. Disponível em: <<https://www.nature.com/nature/journal/v396/n6712/pdf/396664a0.pdf>>. Acesso em: 30 maio 2017.

VON RANDOW, C., et al. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*. v. 78, p. 5-26, 2004.