

Edição Especial

Variabilidade temporal do efluxo de CO₂ do solo em ecossistema florestal na Amazônia oriental

Temporal variability of soil CO₂ efflux in a forest ecosystem in the eastern Amazon

Giselle Nerino Brito de Souza^{III} , Julie Andrews de França e Silva^{IV} ,
Carlos Alberto Dias Pinto^{II} , Alessandro Carioca de Araújo^I 

^I Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, Brasil

^{II} Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM, Brasil

^{III} Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, PA, Brasil

^{IV} Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA, Brasil

RESUMO

As emissões de gases de efeito estufa (GEE) causam o aquecimento global e contribuem com a perda de carbono dos solos. O efluxo de CO₂ do solo (E_{solo}) desempenha um papel significativo no ciclo de carbono das florestas tropicais úmidas. O objetivo do trabalho foi avaliar e quantificar o E_{solo} em um ecossistema de floresta primária em diferente escala sazonal durante dois anos na Amazônia Oriental. O E_{solo} em 2016 foi maior no período chuvoso (PC) ($5,80 \pm 0,34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em comparação ao período menos chuvoso (PMC) ($5,66 \pm 0,16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Em 2017 a média do E_{solo} foi superior no PMC ($5,52 \pm 0,34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) em comparação ao PC ($4,98 \pm 0,52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). O E_{solo} não apresentou diferença significativa entre PC e PMC no ano de 2016. O menor E_{solo} foi encontrado no PC em comparação ao PMC em 2017 e teve pouca dependência das variáveis de umidade e temperatura do solo. Sendo assim, outras variáveis precisam ser consideradas na interdependência de fatores físicos e biogeoquímicos do solo na variabilidade interanual do E_{solo} para ecossistemas de floresta.

Palavras-chave: Floresta tropical úmida; Sazonalidade; Emissão de CO₂ do solo

ABSTRACT

Greenhouse gas (GGE) emissions cause global warming and contribute to the loss of carbon from soils. Soil CO₂ efflux (E_{soil}) plays a significant role in the carbon cycle of humid tropical forests. The objective of the work was to evaluate and quantify the E_{soil} in a primary forest ecosystem at different time scales during two years in the Eastern Amazon. The E_{soil} was higher in the rainy season (RS) ($5.80 \pm 0.34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) compared to the dry season (DS) ($5.66 \pm 0.16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) in 2016. In 2017, E_{soil} averages was

higher in DS ($5.52 \pm 0.34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) compared to RS ($4.98 \pm 0.52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). E_{soil} showed no significant differences between RS and DS in 2016. The smallest E_{soil} was found in RS compared to DS in 2017 and had little dependence on soil moisture and temperature variables. Therefore, other variables need to be considered in the interdependence of physical and biogeochemical soil factors in the interannual variability of soil for forest ecosystems.

Keywords: Tropical rainforest; Seasonality; Soil CO₂ emission

1 INTRODUÇÃO

As emissões de gases do efeito estufa (GEE) causam o aquecimento global e contribuem com a perda de carbono dos solos. Estudos sobre GEE na Amazônia vêm se intensificando nas últimas décadas. Aragão *et al.* (2018) estimaram que a floresta liberou anualmente mais carbono do que retirou do ar e estocou em sua vegetação e solo. A maior parte dessas emissões resulta das atividades de mudança de uso da terra, as quais vêm contribuindo para o aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera (*Intergovernmental Panel On Climate Change*, 2014). O efluxo de CO₂ do solo (E_{solo}) é o maior componente do ciclo do carbono na biosfera, podendo constituir até cerca de 75% da respiração do ecossistema, o que mostra a grande relevância desse compartimento no que se refere a atuar como fonte ou sumidouro do carbono atmosférico (Sotta *et al.*, 2004). E_{solo} é o resultado da combinação de mecanismos de produção e transporte desse gás no interior do solo até a atmosfera. Esses mecanismos são diretamente afetados por variáveis físicas, químicas e biológicas do solo, tais como atividade microbiana, respiração de raízes, textura e estrutura do solo e conteúdo de água no solo (Bekku *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2016). Portanto, a decomposição microbiana do solo, por exemplo, apresenta uma forte influência da variabilidade temporal, tornando E_{solo} dependente também (Silva *et al.*, 2016).

Compreender o papel do CO₂ na interface solo-atmosfera é essencial. Nesse sentido, para entender melhor a dinâmica do carbono em ecossistemas amazônicos, o objetivo do trabalho é avaliar e quantificar o efluxo de CO₂ do solo em um ecossistema de floresta primária em diferente escala sazonal durante dois anos, na Amazônia Oriental.

2 MATERIAL E MÉTODOS

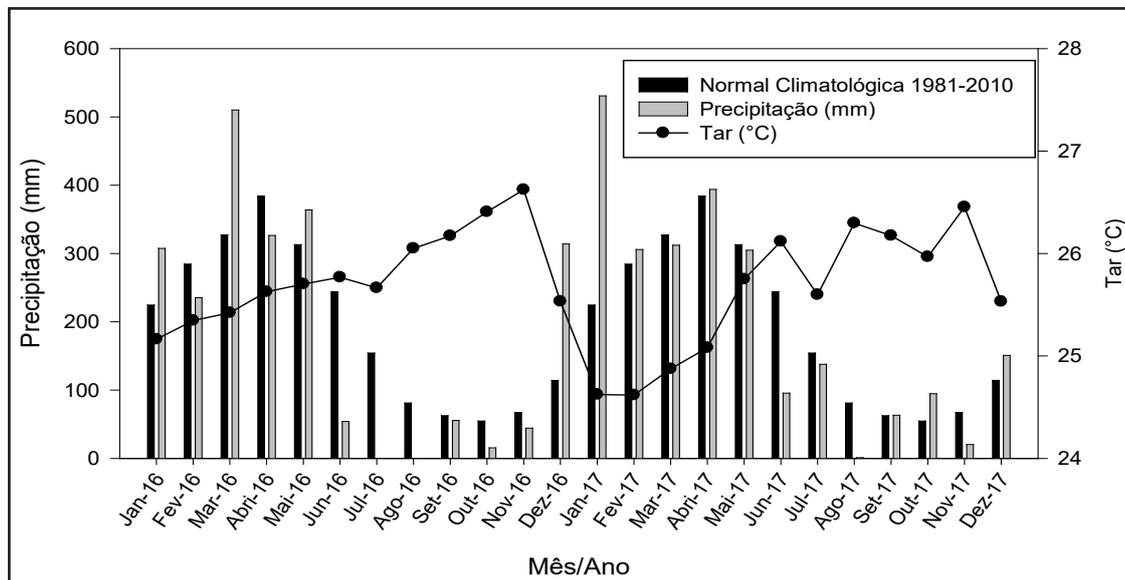
2.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado na floresta nacional (FLONA) de Caxiuanã, situada no município de Melgaço, Pará, Brasil. Essa floresta possui uma área de aproximadamente 324.060 ha, próxima da baía de Caxiuanã, entre os rios Xingu e Amazonas, e compreende aproximadamente 70% do município de Portel e 30% do município de Melgaço (Lisboa, 2009). Está situada a oeste da cidade de Belém, distante cerca de 350 km em linha reta (01°43'3,5" S, 051°27'36" O). O local de estudo foi a Estação Científica Ferreira Pena (ECFPn), que pertence ao Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG). A torre de observações micrometeorológicas que pertence ao Programa Programa de Grande Escala da Biosfera- Atmosfera na Amazônia (LBA) está instalada cerca de 2 km ao norte da ECFPn, é construída em alumínio, tem 52 m de altura, e possui seção de 2,0 m x 1,0 m.

2.2 Variáveis meteorológicas

Os dados de temperatura média mensal do ar e de precipitação acumulada foram obtidos por meio de uma torre de observações micrometeorológicas, pertencente ao programa LBA, mantida na área do experimento (Figura 1). A temperatura do ar foi obtida através de um termohigrômetro (HCS213, *Campbel Scientific Inc.*, Logan, UT, EUA), instalado 40 metros acima do solo. Os dados foram registrados por um microcontrolador eletrônico (CR1000, *Campbel Scientific Inc.*, Logan, UT, EUA) como amostras instantâneas a cada 1 minuto de intervalo de tempo, e também como médias de 30 minutos, obtidas a partir desses dados. Adicionalmente, esses dados também foram armazenados em cartões de memória, que eram coletados e descarregados mensalmente, e a precipitação diária acumulada através do pluviômetro (TB4, Campbell) instalado a 53,25 metros de altura, no topo da torre. A sazonalidade da precipitação apresenta dois períodos distintos, o período chuvoso (PC), que corresponde aos meses de janeiro a maio e dezembro, e o menos chuvoso (PMC), que corresponde aos meses de junho a novembro.

Figura 1 – Precipitação diária acumulada (mm) e temperatura média mensal do ar (°C) em área de ecossistema florestal nos anos de 2016 e 2017



Fonte: Autores

2.3 Medição do efluxo de CO₂ e temperatura do solo

O E_{solo} foi obtido, em dias distintos, durante os anos de 2016 e 2017 e calculado como a taxa de variação da concentração de CO₂ dentro do volume de controle da câmara por unidade de tempo e pela área sobre a região coberta pela câmara (Metcalf *et al.*, 2007). Na FLONA de Caxiuanã foi utilizada uma parcela permanente de 1 ha, que estava instalada próxima à torre de observações micrometeorológicas. Essa foi subdividida em quadrantes de 20 x 20 m, totalizando 25 subparcelas. As medições foram realizadas em cada uma dessas subparcelas, utilizando-se um analisador de gás por infravermelho acoplado a uma câmara dinâmica fechada (EGM-4, *PP Systems*, Amesbury, Massachusetts, EUA). Para isso, foram instalados 25 anéis de PVC (cloreto de polivinil), um em cada subparcela, com diâmetro de 100 mm e altura de 100 mm, e enterrados a uma profundidade de 70 mm, de acordo com os protocolos da rede de monitoramento global dos ecossistemas. Para medida da temperatura do solo (Ts) foi utilizado um termômetro acoplado ao EGM-4 e inserido à uma profundidade de 50 mm.

2.4 Umidade gravimétrica do solo

Para obtenção da umidade gravimétrica foram coletadas amostras compostas, com trado tipo copo a uma profundidade de 50 mm. A coleta foi realizada em torno de cada anel de PVC instalado anteriormente e logo após a medição de efluxo de CO₂ do solo. As amostras foram acondicionadas em frascos herméticos e transportadas até o Laboratório de Análises de Sistemas Sustentáveis na Embrapa Amazônia Oriental para procedimentos de secagem e pesagem. Para obtenção dos valores de massa úmida foram realizadas pesagens em balança de precisão e, em seguida, para obtenção da massa seca, todas as amostras foram colocadas em estufa durante 48 horas à temperatura de 105 °C (Empresa brasileira de pesquisa agropecuária, 1997) para, posteriormente, serem utilizadas nos cálculos da equação de umidade gravimétrica do solo, conforme a equação a seguir:

$$H_2O (\%) = \frac{(m_{úmida} - m_{seca})}{m_{seca}} * 100 \quad (1)$$

Onde:

H₂O (%) é o conteúdo de água do solo em porcentagem;

m_{úmida} é a massa de água contida no solo em gramas;

m_{seca} é a massa de solo seco em gramas.

Após, os resultados foram transformados em umidade volumétrica, conforme a equação a seguir:

$$U_v (m^3/m^3) = (D_s * U_g * 100) \quad (2)$$

Onde:

u_v é a umidade volumétrica em m³/m³;

d_s é a densidade do solo em g cm³;

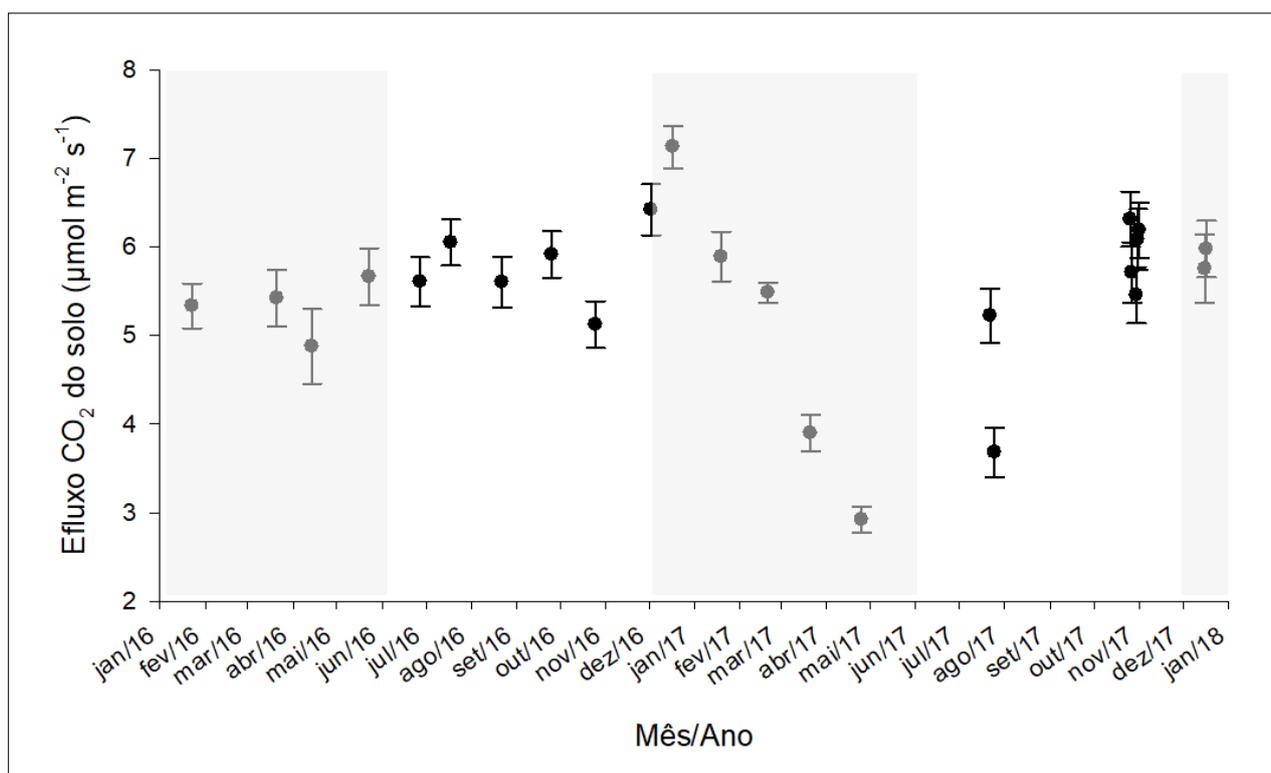
u_g é a umidade gravimétrica em %;

a densidade do solo utilizada foi de 1,13 gcm³ para a profundidade de 5 cm do solo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em 2016, E_{solo} apresentou maior média no período chuvoso (PC) em comparação ao período menos chuvoso (PMC) ($5,808 \pm 0,34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $5,660 \pm 0,16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente). Por outro lado, em 2017, a média do E_{solo} foi superior no PMC em comparação ao PC ($5,523 \pm 0,34 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $4,988 \pm 0,52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente). Não houve diferença significativa entre os períodos sazonais em 2016. No entanto, foi possível observar que houve efeito significativo para o PMC em relação ao PC em 2017.

Figura 2 – Efluxo de CO₂ do solo (valores médios de um dia de coleta; n=25) em ecossistema de floresta nos anos de 2016 e 2017. A área destacada em tom de cinza denota o período chuvoso de cada ano. O fundo branco indica o período menos chuvoso de cada ano

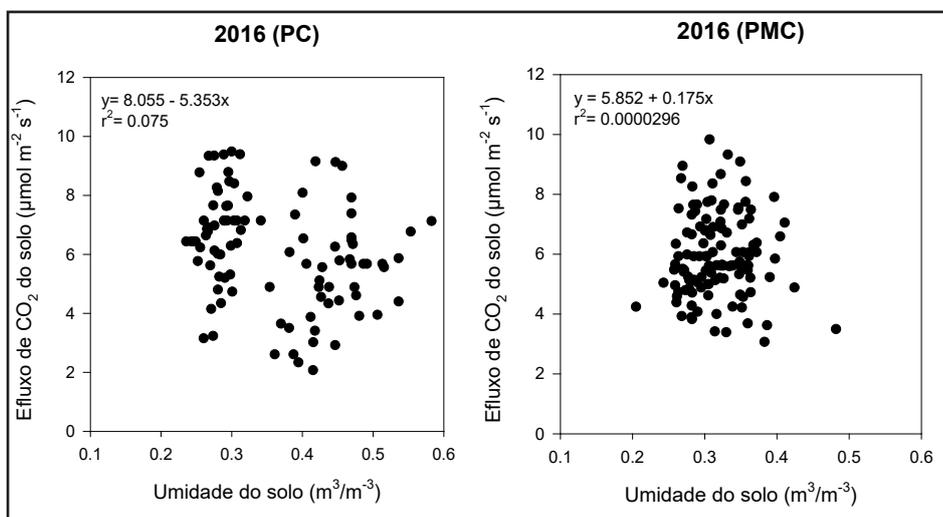


Fonte: Autores

Geralmente, em solos da Amazônia, maior E_{solo} acontece quando os eventos de chuva são predominantes, devido ao aumento da atividade microbiana, que eleva a produção do gás no solo (Davidson *et al.*, 2000; Chambers *et al.*, 2004). Entretanto, neste estudo, E_{solo}

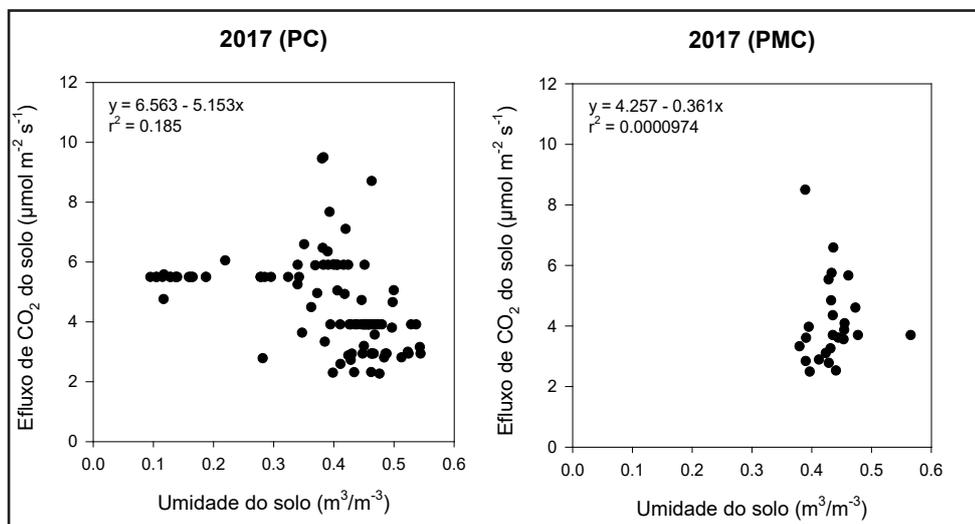
apresentou menor valor no PC em comparação ao PMC em 2017, especificamente nas coletas dos meses de março e abril. Os dias que antecederam as medições de E_{solo} foram de chuvas constantes, o que pode ter levado à saturação do solo e à diminuição da oxigenação, modificando, assim, a difusividade de gases dentro do solo, o que dificulta o E_{solo} quando a umidade é alta (Sotta *et al.*, 2004; Sotta *et al.*, 2006; Wood *et al.*, 2013). Davidson *et al.* (2004) mostraram que no período chuvoso há um aumento no efluxo de CO_2 , mas logo há um declínio em virtude de solos constantemente úmidos no período mais chuvoso. Zanchi *et al.* (2012), ao testarem o efeito de chuva no E_{solo} em floresta tropical úmida, avaliaram que chuvas acima de 12 mm e umidade do solo de $0.39 \text{ m}^3/\text{m}^3$ podem apresentar um aumento instantâneo do E_{solo} e, cerca de 2 horas depois, ocorrer um declínio. Após evento de chuva, a água vai percolando no solo através dos poros, reduzindo o E_{solo} com até 18 horas após a chuva. Com chuvas acima de 22 mm, é possível verificar menor E_{solo} , pois, com os poros preenchidos por água, cria-se uma barreira para as trocas gasosas na superfície solo-atmosfera. Adicionalmente, a baixa disponibilidade de O_2 no solo pode limitar a respiração aeróbica, diminuindo os efluxos de CO_2 do solo (Wood *et al.*, 2013).

Figura 3 – Efluxo de CO_2 do solo e a umidade do solo (U_s) durante o período chuvoso e o menos chuvoso de 2016



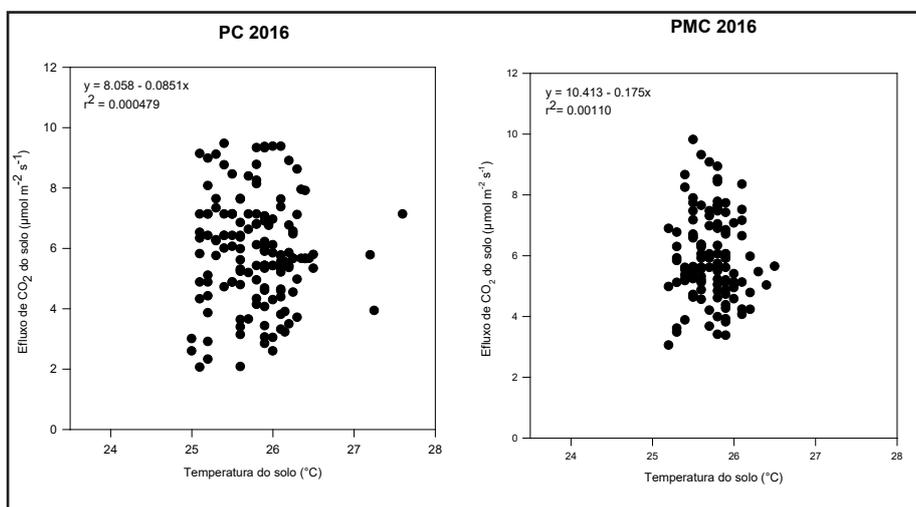
Fonte: Autores

Figura 4 – Efluxo de CO₂ do solo e a umidade do solo (Us) durante o período chuvoso e o menos chuvoso de 2017



Fonte: Autores

Figura 5 – Efluxo de CO₂ do solo e a temperatura do solo (Ts) durante o período chuvoso (à esquerda) e menos chuvoso (à direita) de 2016

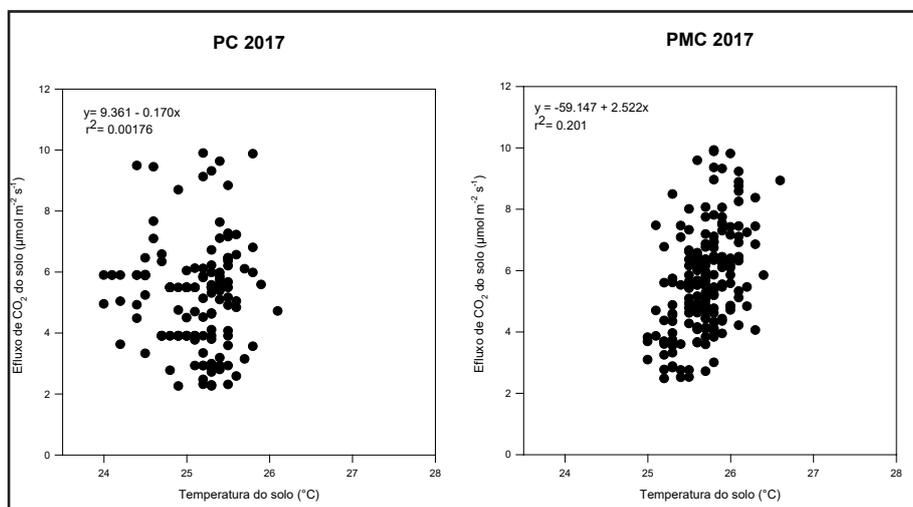


Fonte: Autores

Com relação à temperatura do solo (T_{solo}), para o PC de 2016, observou-se um comportamento atípico com valores maiores que o esperado, o que pode ser uma resposta para chuvas menos intensas nesse ano. Enquanto que, em 2017, a T_{solo} foi, em geral, menor em relação ao ano anterior. Isso pode estar relacionado com

o evento climático extremo de *El Niño* Oscilação Sul 2015/2016 (ENOS 2015/2016), que foi percebido até o final do PC de 2016 na Amazônia. As alterações que ocorrem nos eventos de chuva, ocasionados pelo ENOS, podem ter consequência nas variáveis do solo e seus efeitos podem ser prolongados (Levine *et al.*, 2019). Nesse sentido, T_{solo} pode ser uma variável determinante para E_{solo} , principalmente nos períodos menos chuvosos (Tóta *et al.*, 2012).

Figura 6 – Efluxo de CO_2 do solo e a temperatura do solo (T_s) durante o período chuvoso (à esquerda) e menos chuvoso (à direita) de 2017



Fonte: Autores

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

E_{solo} não apresentou diferença significativa entre PC e PMC no ano de 2016. Menores E_{solo} foram encontrados no PC em comparação ao PMC em 2017 e houve pouca dependência das variáveis de umidade e temperatura do solo. Sendo assim, outras variáveis precisam ser consideradas na interdependência de fatores físicos e biogeoquímicos do solo na variabilidade interanual do E_{solo} para ecossistemas de floresta.

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA) e à EMBRAPA Amazônia Oriental pelo suporte técnico, ao projeto aprovado no Edital nº 68/2013, 458037/2013-3, Ação transversal- MCTI/CNPq/FNDCT/LBA pelo suporte financeiro e bolsa DTI-B, ao Museu Paraense Emílio Goeldi/Estação Científica Ferreira Pena pela logística de viagens.

REFERÊNCIAS

ARAGÃO, L. E. O. C. *et al.* 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions, **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1–12, 2018.

BEKKU, Y. S. *et al.* Effect of warming on the temperature dependence of soil respiration rate in arctic, temperate and tropical soils, **Applied Soil Ecology**, v. 22, n. 3, p. 205–210, 2003.

CHAMBERS, J. Q. *et al.* Respiration from a tropical forest ecosystem: Partitioning of sources and low carbon use efficiency, **Ecological Applications**, v. 14, n. 4 SUPPL., p. 72–88, 2004.

DAVIDSON, E. A. *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia, **Biogeochemistry**, v. 48, n. 1, p. 53–69, 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de métodos de análise de solo** / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Climate change 2014: synthesis report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151, 2014.

LEVINE, P. A. *et al.* Soil moisture variability intensifies and prolongs eastern Amazon temperature and carbon cycle response to El Niño-Southern Oscillation, **Journal of Climate**, v. 32, n. 4, p. 1273–1292, 2019.

LISBOA, P. L. B. Caxiuanã: desafios para a conservação de uma Floresta Nacional na Amazônia. Belém: **MPEG**, 2009.

METCALFE, D. B. *et al.* Factors controlling spatio-temporal variation in carbon dioxide efflux from surface litter, roots, and soil organic matter at four rain forest sites in the eastern Amazon, **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 112, n. 4, p. 1–9, 2007.

SILVA, C. M.; VASCONCELOS, S. S.; OLIVEIRA JUNIOR, M. M.; C. J. C.; O. R.; SILVA JUNIOR, A. C.; CASTELLANI, D. C. Variação temporal do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. **Revista Acta Amazônica**, v.46, p.1-12, 2016.

SOTTA, E. D.; MEIR, P.; MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; HODNETT, M.; GRACE, J. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in the central Amazon. **Global Change Biology**, v.10, n.5, p.610-617, 2004.

SOTTA, E. D. *et al*, Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuanã, Brazil, **Forest Ecology and Management**, v. 237, n. 1–3, p. 57–64, 2006.

TÓTA, J.; ROY, D.; SILVA DIAS, M. A. F. da, Exchange of Carbon Between the Atmosphere and the Tropical Amazon Rainforest, **Tropical Forests**, 2012.

ZANCHI, F. B. *et al*. Soil CO₂ efflux in central Amazonia: environmental and methodological effects, **Acta Amazonica**, v. 42, n. 2, p. 173–184, 2012.

WOOD, T. E.; DETTO, M.; SILVER, W. L. Sensitivity of soil respiration to variability in soil moisture and temperature in a humid tropical forest, **PLoS ONE**, v. 8, n. 12, 2013.

Contribuições de Autoria

1 – Giselle Nerino Brito de Souza

Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, Mestre em Ciências ambientais pela Universidade Federal do Pará – UFPA

<https://orcid.org/0009-0003-1865-9081> • gisellenerino@gmail.com

Contribuição: Escrita – rascunho original

2 – Julie Andrews de França e Silva

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Doutora em Ciências Florestais pela Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

<https://orcid.org/0000-0003-1041-2677> • julieandrewsfranca@gmail.com

Contribuição: Escrita – rascunho original

3 – Carlos Alberto Dias Pinto

Museu Paraense Emílio Goeldi, Mestre em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia pela Universidade Federal do Pará – UFPA

<https://orcid.org/0000-0003-0721-7336> • carlosdias87@gmail.com

Contribuição: Escrita – rascunho original

4 – Alessandro Carioca de Araújo

Embroa Amazônia Oriental, Doutorado em Ciências Geoambientais pela Vrije University Amsterdam

<https://orcid.org/0000-0002-7361-5087> • alessandro.araujo@gmail.com

Contribuição: Escrita – rascunho original

Como citar este artigo

SOUZA, G. N. B. de; SILVA, J. A. de F. e; PINTO, C. A. D.; ARAÚJO, A. C. de. Variabilidade temporal do efluxo de CO₂ do solo em ecossistema florestal na Amazônia oriental, **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 45, n. esp. 2, e82194, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X82194>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/82194>. Acesso em: dia mês abreviado ano.