



A Caatinga Emite ou Sequestra Carbono?

Cássio Lopes de Oliveira¹, José Romualdo de Sousa Lima², Rodolfo Marcondes Silva Souza³, Antonio Celso Dantas Antonino⁴, Maria Fernanda de Albuquerque Tenório Alves⁵, Vanilson Pedro da Silva⁶, Márcio Henrique Leal Lopes⁷, Eduardo Soares de Souza⁸, Renata Cavalcante Ferreira⁷

¹ Mestre em Produção Agrícola, Pesquisador, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco. (87) 3764-5529. cassio.agronomo@yahoo.com.

² Dr. em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Professor Associado IV, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco. (87) 3764-5529. romualdo.lima@ufrpe.br (autor para correspondência).

³ Dr. em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Pesquisador Texas A&M Transportation Institute, 1111 RELIS Parkway, 77807-3135, Bryan, Texas, United States. r-souza@tti.tamu.edu

⁴ Dr. em Física do Solo, Professor Titular, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Luiz Freire, 1000, CEP 50740-540, Recife, Pernambuco. (81) 2126-7973. acda@ufpe.br.

⁵ Engenheira Agrônoma, Mestranda em Produção Agrícola, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco. (87) 3764-5529. mftenorioalves@gmail.com

⁶ Mestre em Produção Agrícola, Pesquisador, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco. (87) 3764-5529. vanilson.silva@ufape.edu.br.

⁷ Estudante de Agronomia, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Av. Bom Pastor, s/n, CEP 55292-278, Garanhuns, Pernambuco. (87) 3764-5529. mhll9785@gmail.com re.fashion.gt@gmail.com

⁸ Dr. em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Professor Associado IV, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Av. Gregório Ferraz Nogueira, S/N - José Tomé de Souza Ramos, CEP: 56909-535, Serra Talhada, Pernambuco. eduardo.ssouza@ufrpe.br

Artigo recebido em 08/11/2022 e aceito em 07/02/2023

RESUMO

Ecosistemas de regiões semiáridas, como a Caatinga, estão sendo afetados pelas mudanças climáticas globais, causando alterações na evapotranspiração (ET) e nos fluxos de CO₂. Desse modo, o trabalho objetivou quantificar os fluxos de CO₂ e ET, com o intuito de observar se a Caatinga atua como fonte ou como sumidouro de CO₂. As medidas foram realizadas numa área de Caatinga, durante um período de 13 meses, no município de São João/PE, utilizando-se a metodologia da correlação dos turbilhões, com um analisador de CO₂ e H₂O e um anemômetro sônico tridimensional. Além disso, foi medida a umidade do solo nas profundidades de 10 a 50 cm. A ET variou de 0,4 a 4,7 mm d⁻¹, com uma média de 2,33 mm d⁻¹ e total de 933 mm. A ET também seguiu as variações da precipitação pluvial, com os valores mais elevados no período úmido e os menores, no período seco, possivelmente devido à baixa capacidade de retenção de água no solo. A variação do fluxo de CO₂ na Caatinga indicou que a vegetação atuou ora como fonte e ora como sumidouro de carbono, com valores variando entre -4,89 e 6,87 μmol m⁻² s⁻¹. Entretanto, a Caatinga atuou, de maneira geral, como sumidouro de CO₂, sequestrando, em média, 4,44 t C ha⁻¹ ano⁻¹. Desse modo, pode-se concluir que, nas condições edafoclimáticas do agreste pernambucano, a Caatinga atua sequestrando CO₂ atmosférico, reforçando ainda mais a necessidade de preservação desse ecossistema.

Palavras-chave: Caatinga; evapotranspiração; carbono; umidade do solo.

Does the caatinga Emit or Sequester carbon?

ABSTRACT

Ecosystems in semi-arid regions, such as the Caatinga, are being affected by climate change, causing changes in evapotranspiration (ET) and CO₂ fluxes. Thus, the work aimed to quantify the CO₂ fluxes and ET, in order to observe whether the Caatinga acts as a source or a sink of CO₂. The measurements were carried out in an area of Caatinga, during a period of 13 months, in the municipality of São João/PE, using the methodology of eddy covariance, with a CO₂ and H₂O analyzer and a three-dimensional sonic anemometer. In addition, soil moisture was measured at depths of 10 to 50 cm. The ET ranged from 0.4 to 4.7 mm d⁻¹, with a mean of 2.3 mm d⁻¹ and a total of 933 mm. The ET also followed the variations in rainfall, with the highest values in the wet season and the lowest in the dry season, possibly due to the low water retention capacity in the soil. The variation of the CO₂ flux in the Caatinga indicated that the vegetation acted either as a source or as a sink of carbon, with values varying between -4.89 and 6.87 μmol m⁻² s⁻¹, being that the Caatinga acted, in general, as a CO₂ sink, sequestering, on average, 4.44 t C ha⁻¹ year⁻¹. Thus, it can be concluded that, in the

edaphoclimatic conditions of the Agreste of Pernambuco, the Caatinga acts by sequestering atmospheric CO₂, further reinforcing the need to preserve this ecosystem.

Key words: Caatinga; evapotranspiration; carbon; soil water content.

Introdução

Os impactos causados pelo uso inadequado do solo e emissões de gases do efeito estufa para a atmosfera, principalmente o dióxido de carbono (CO₂), vêm sendo amplamente estudados, buscando encontrar causas diretas e consequências que afetam as mudanças climáticas pelo mundo (Alves et al., 2018).

De acordo com Stella et al. (2009), são necessários estudos nos mais diversos ecossistemas e agroecossistemas mundiais para se compreender melhor o ciclo do carbono. Neste contexto, faz-se necessário quantificar a contribuição de cada um desses ecossistemas e agroecossistemas para o balanço global de carbono, pois, os ecossistemas terrestres regulam a dinâmica sazonal e a contribuição em longo prazo dos fluxos de carbono e de água entre a superfície da terra e a atmosfera (Huang et al., 2016). As trocas de CO₂ entre os ecossistemas e agroecossistemas terrestres e a atmosfera, isto é, o sequestro de carbono durante a fotossíntese e as emissões de CO₂ associadas com a respiração do solo e das plantas, têm uma flutuação sazonal e respondem a fatores bióticos e abióticos. Essas trocas têm um papel importante na variação da concentração de CO₂ atmosférico e, portanto, nas mudanças climáticas globais (Nakano and Shinoda, 2015).

Os ecossistemas de regiões áridas e semiáridas, como a Caatinga no Nordeste do Brasil, desempenham um papel importante no ciclo global do dióxido de carbono, sendo esses ecossistemas considerados em algumas épocas do ano como sumidouros de CO₂ (Machado et al., 2016; Campos et al., 2019; Mendes et al., 2020; Mendes et al., 2021; Bezerra et al., 2022; Costa et al., 2022). Por esta razão ecossistemas como a Caatinga devem estar em pauta quando o assunto é a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (Luyssaert et al., 2007).

A ET é um processo importante que é controlado pela interação de um grande número de fatores bióticos e ambientais (Wilson and Baldochi, 2000; Wever et al., 2002). Os atributos e processos do ecossistema, tais como, umidade do

solo, produtividade vegetal, balanços de água e de nutrientes são todos influenciados pela ET; por outro lado, todos esses processos influenciam a ET. Desse modo, existe um grande interesse em se estudar a ET numa variedade de ecossistemas para melhor se compreender a natureza das interações e das ligações entre ela e outros processos que ocorrem na superfície terrestre (Wever et al., 2002).

Assim, são necessárias pesquisas para quantificar a ET e os fluxos de CO₂, com o intuito de saber se a Caatinga, bioma típico da região semiárida brasileira, está atuando como fonte (emitindo) ou como sumidouro (sequestrando) de carbono atmosférico. Desse modo, esse trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade sazonal da ET e dos fluxos de CO₂ em área de Caatinga no Semiárido pernambucano.

Material e métodos

Localização e Caracterização da Área Experimental

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda Riacho do Papagaio (8° 48' 33" S, 36° 24' 24" O e 705 m de altitude), no município de São João, bacia hidrográfica do Rio Mundaú, e as medidas foram efetuadas numa área de 04 ha de Caatinga. De acordo com Borges Júnior et al. (2012), o clima da região é tropical chuvoso, com verão seco, sendo as médias anuais de temperatura e umidade relativa do ar de 21,1°C e 82,5%, respectivamente. A precipitação pluvial, de acordo com dados da APAC é de 772 mm anuais (APAC, 2022), sendo os meses mais chuvosos maio, junho, julho e agosto.

A área de Caatinga segue relativamente preservada durante décadas (mais de 50 anos), sem resquícios severos de exploração (Barros et al., 2019).

O solo da área é classificado como Neossolo Regolítico eutrófico típico (Santos et al., 2012), cujas características físicas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Granulometria (areia, silte e argila) e classificação textural do Neossolo Regolítico nas áreas de Caatinga e de pastagem na fazenda Riacho do Papagaio em São João – PE. Fonte: Brito et al. (2020)

Caatinga	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação textural
0-20 cm	84,5	13,2	2,3	Areia franca
20-40 cm	80,0	14,1	5,9	Areia franca
40-60 cm	77,1	15,4	7,5	Franco-arenosa

Período de estudo, instrumentação, coleta e processamento dos dados

A pesquisa foi realizada de abril de 2019 a abril de 2020 e considerou dois subperíodos: a estação úmida (de junho a agosto de 2019) e a estação seca (de setembro a dezembro de 2019). Foram realizadas medidas micrometeorológicas numa torre de 07 metros de altura instalada no centro da área de Caatinga.

A torre foi equipada com sensores para medir a direção e velocidade do vento (modelo 034, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA), umidade relativa e temperatura do ar (modelo HMP45C, Vaisala, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA), saldo de radiação (Rn) (NRLITE, Kipp & Zonen, Delft, Holanda) e a precipitação pluvial, com um pluviômetro basculante (modelo TB4-L, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA). O fluxo de calor no solo (G) foi medido utilizando uma placa de fluxo de calor (modelo HFT3, REBS, Seattle, WA, EUA), a qual foi inserida 5 cm abaixo da superfície do solo. Também foram instalados sensores de temperatura do solo (modelo 108 L, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA) nas profundidades de 10, 20, 30 e 40 cm, e sensores tipo TDR (modelo CS616, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA), para as medidas da umidade volumétrica do solo nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm. As medições de todos os sensores foram registradas e armazenadas num sistema de aquisição de dados (modelo CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA) a cada 30 s. Os valores médios/totais foram calculados e armazenados a cada 1800s.

A torre também foi equipada com um sistema de medição de eddy covariance (correlação dos turbilhões), composto por um anemômetro sônico tridimensional e um analisador de gás infravermelho (modelo LI7500-DS, LICOR Biosciences, Lincoln, NE, EUA), ambos conectados a um sistema Smartflux (LICOR Biosciences, Lincoln, NE, EUA), responsável por processar e armazenar as leituras a uma taxa de 10,0 HZ.

Para realização dos cálculos dos fluxos de CO₂, água e energia (ET), utilizou-se o software Eddypro versão 7.0.6, que calcula as flutuações

turbulentas em intervalos de 30 minutos, fazendo uma série de correções necessárias para a estimativa dos fluxos, conforme a metodologia de Aubinet et al. (2000). Dentre as correções foi aplicada a rotação de coordenadas dos vetores de vento e correções de resposta de frequência de acordo com o método descrito por Moore (1986). As correções das covariâncias e variâncias, devido às flutuações de umidade, foram realizadas de acordo com a metodologia de Schotanus et al. (1983).

Os fluxos de calor sensível (H), de calor latente (LE) e de CO₂ foram determinados pelas equações (1), (2) e (3), respectivamente:

$$H = \rho C_p \overline{w'T} \quad (1)$$

Onde:

H = fluxo de calor sensível (W m⁻²)

p = densidade do ar seco (kg m⁻³)

C_p = calor específico do ar à pressão constante (J kg⁻¹ K⁻¹)

w' = variação de componente vertical da velocidade do vento em relação a sua média

T' = componente turbulenta da temperatura do ar (K)

$$LE = \rho L_v \overline{w'q} \quad (2)$$

Onde:

LE = fluxo de calor latente (W m⁻²)

L_v = calor latente de vaporização (J kg⁻¹)

q' = componente turbulenta da umidade específica do ar (kg kg⁻¹)

$$F_c = \overline{P_w P_c} \quad (3)$$

Onde:

F_c = fluxo de CO₂ (μmol m⁻² s⁻¹)

p_c' = variação da densidade do escalar c em relação a sua média

A ET foi obtida pela relação entre LE e o calor latente de vaporização, considerado como constante ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$).

Tratamento dos dados e preenchimento de falhas

Após o processamento no programa Eddypro, os dados dos fluxos turbulentos e das variáveis meteorológicas foram tratados com auxílio do software “R” (R Core Team, 2020), onde foram aplicados filtros com objetivo de remover outliers que ocorrem devido a eventos estocásticos, como relâmpagos, vento, chuvas, além do mau funcionamento dos sensores.

Além disso, problemas no fornecimento de energia (painel solar e bateria) provocaram perdas adicionais nos dados, principalmente no período noturno, gerando lacunas no conjunto de dados. Assim, as lacunas de dados foram preenchidas utilizando o método descrito por Reichstein et al. (2005). Para o preenchimento dos dados, o pacote REddyProc faz covariação dos fluxos com as variáveis meteorológicas e autocorrelação temporal dos fluxos (Reichstein et al., 2005).

Resultados e discussão

Variáveis meteorológicas e do solo

A variação temporal da precipitação pluvial, do armazenamento de água no solo (Armz), do déficit de pressão de vapor (DPV), da temperatura do ar (Tar) e umidade relativa (Rh) para o período de abril de 2019 a abril de 2020 é apresentada na Figura 1.

A precipitação pluvial (Figura 1a) apresentou comportamento típico para a região, sendo o período com mais eventos de precipitação os meses de junho a agosto, caracterizando assim o período úmido. Já o período mais seco, ou seja, com menor incidência de eventos de precipitação esteve entre os meses de setembro a dezembro. Durante o período de abril a dezembro de 2019 ocorreu um total de 488 mm de precipitação pluvial, sendo 30% menor que a normal climatológica, que é de 693 mm para o mesmo período (APAC, 2022). Para o período de janeiro a abril de 2020 o total precipitado foi 419 mm, o que significa um aumento de 43% com relação a normal climatológica. Contudo, desse total precipitado em 2020, 189 mm ocorreram em apenas três dias, confirmando o padrão das chuvas de regiões semiáridas, ou seja, chuvas com

volumes relativamente grandes, em curto espaço de tempo, como observado por Silva et al. (2017).

Quanto ao armazenamento de água no solo, observou-se que os valores para todas as profundidades seguiram uma relação diretamente proporcional aos eventos e volumes precipitados, ou seja, os valores máximos de armazenamento ocorreram após os maiores eventos de precipitação e, por outro lado, os valores mínimos ocorreram durante o período seco na região, durante os meses de setembro a dezembro. O armazenamento total na camada de 0-60 cm variou durante de 15 a 57 mm, tendo como valor médio 24 mm, resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2017) em área de Caatinga, com um valor médio variando de 17,3 a 70,4 mm, e uma média de 24,9 mm. Em outra pesquisa observou-se um valor médio de 18,0 mm para área de Caatinga na mesma região (Brito et al., 2020) o que torna evidente o fato da alta variabilidade do regime pluviométrico na região de estudo.

O déficit de pressão de vapor (DPV) (Figura 1b) acompanhou as variações da temperatura do ar (Tar) (Figura 1c), com os maiores valores durante a estação mais seca e os menores valores durante o período mais úmido, sendo que o mesmo apresentou magnitude entre 0,01 a 1,42 kPa. Esses resultados estão de acordo com Silva et al. (2017) que encontraram DPV variando de 0,5 a 2,8 kPa, com média de 1,5 kPa, numa área de Caatinga em Serra Talhada. Os baixos valores de DPV estão diretamente relacionados com a diminuição da temperatura do ar e aumento da umidade relativa (UR), situação que ocorre no período mais úmido, por outro lado com a diminuição da UR (Figura 1d) observou-se um aumento do DPV assim como da Tar. A Tar variou de 18 a 27°C tendo como valor médio 23°C, sendo que esse valor é semelhante ao observado por Oliveira et al. (2006), numa área de Caatinga em Petrolina, os quais observaram temperaturas média na Caatinga da ordem de 24°C. Alves (2015) avaliando a variação temporal da Tar em Caatinga no período de outubro de 2013 a outubro de 2014, na mesma área de estudo desta pesquisa, encontrou que a temperatura média do ar variou de 18 a 30°C, com valor médio de 23°C, corroborando os dados de nossa pesquisa.

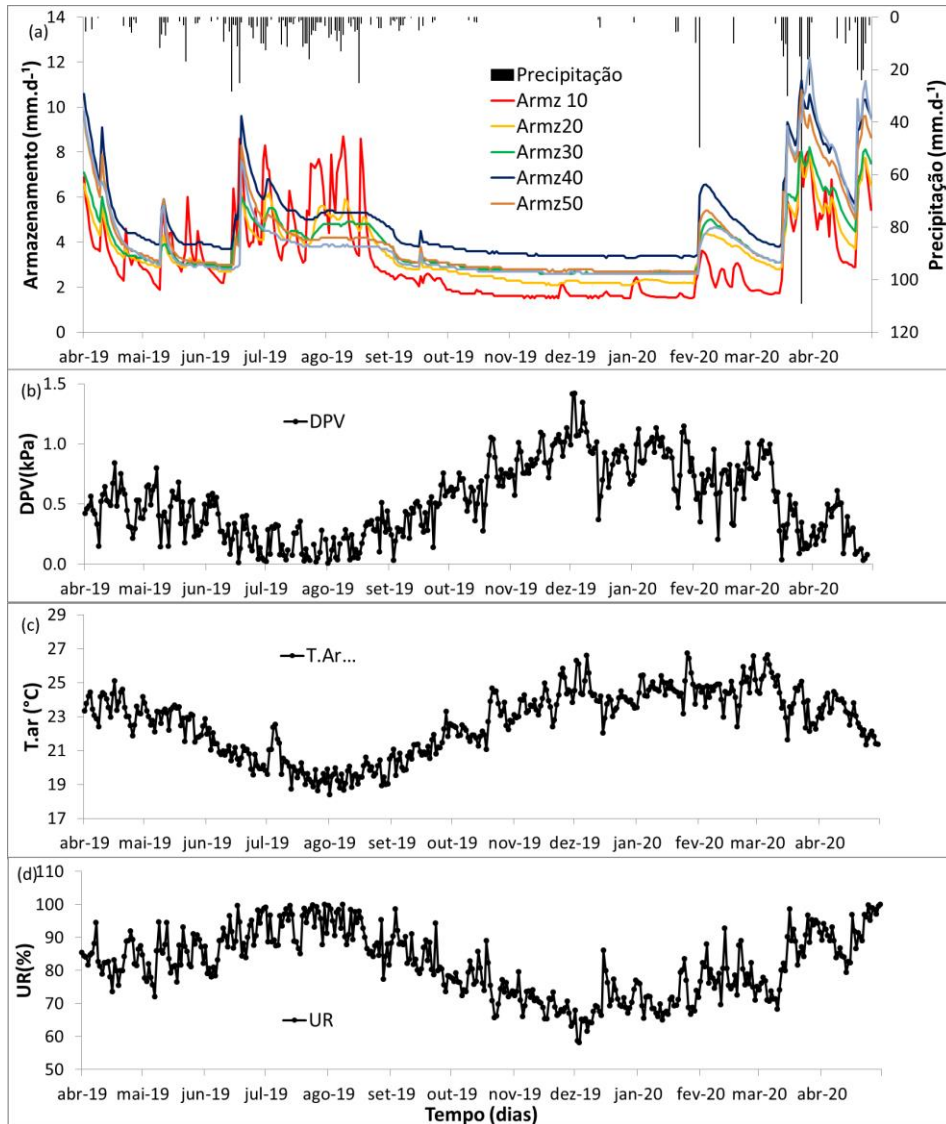


Figura 1. Precipitação pluvial e armazenamento de água no solo (Armz) nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm (a); déficit de pressão de vapor (DPV) (b); temperatura do ar (Tar) (c) e umidade relativa (UR) (d), na área de Caatinga em São João-PE, no período de 01/04/2019 a 30/04/2020.

Fechamento do balanço de energia

A Figura 2 apresenta o fechamento do balanço de energia na Caatinga para os períodos úmido (a) e seco (b).

A verificação do fechamento do balanço de energia indica o nível de concordância entre as medidas do saldo de radiação (R_n) e dos fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G), as quais são realizadas por diferentes métodos.

O fechamento do balanço de energia da Caatinga foi avaliado por meio do método dos coeficientes de regressão linear dos mínimos quadrados, confrontando a diferença entre o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo ($R_n - G$) com a soma do fluxo de calor sensível e latente ($H + LE$). O fechamento ideal do balanço de energia por este método é representado por uma interceptação de zero e uma inclinação de 1 (Wilson et al., 2002).

Na Figura 2a, com os dados dos componentes do balanço de energia ainda não corrigidos, observou-se uma inclinação de 0,5647 com $R^2 = 0,7376$. O não fechamento do balanço de energia em regiões semiáridas e áridas tem sido atribuído a vários fatores, como: (1) o fato de não levar em consideração outros sumidouros de energia, como por exemplo, a energia bioquímica utilizada na fotossíntese e a variação no armazenamento de calor na vegetação (Wilson et al., 2002; Li et al., 2006) e (2) gradiente de temperatura nas camadas superiores do solo que promovem dentre outros fatores o armazenamento de calor nas camadas acima do sensor (Li et al., 2006).

Alves (2015) ao realizar o fechamento do balanço de energia em área de Caatinga obtiveram resultados semelhantes, tendo obtido inclinação de 0,48 e R^2 de 0,889. Frequentemente, erros no fechamento do balanço de energia entre 10 e 30% têm sido relatados na literatura (Wilson et al., 2002). Estes mesmos autores analisaram o fechamento do balanço de energia pelo método eddy covariance em 22 localidades, com períodos de observações de 1 a 4 anos, e observaram

desigualdades no fechamento do balanço de energia, que variaram de 15 a 30%, com média de 20%.

Teixeira et al. (2008), ao analisar o fechamento do balanço de energia em escala diária, em área de Caatinga, encontraram erro de 10%, enquanto Oliveira et al. (2006) obtiveram erro igual a 15%, como uso de dados horários. De maneira geral constatou-se nesse trabalho uma boa correlação entre os valores de fluxos medidos pelo sistema eddy covariance (LE+H) e os medidos pelos sensores micrometeorológicos (Rn-G). Em estudo realizado numa área de Caatinga no Rio Grande do Norte, foi observado que o fechamento do balanço de energia neste bioma foi satisfatório com valores predominantes acima de 70% (Campos et al., 2019).

Na Figura 2b, cujos dados de LE e H foram obtidos através de estimativas utilizando a razão de Bowen, observa-se o fechamento completo do balanço de energia, que é um resultado esperado, já que ao aplicar-se a metodologia da razão de Bowen o fechamento é automaticamente forçado.

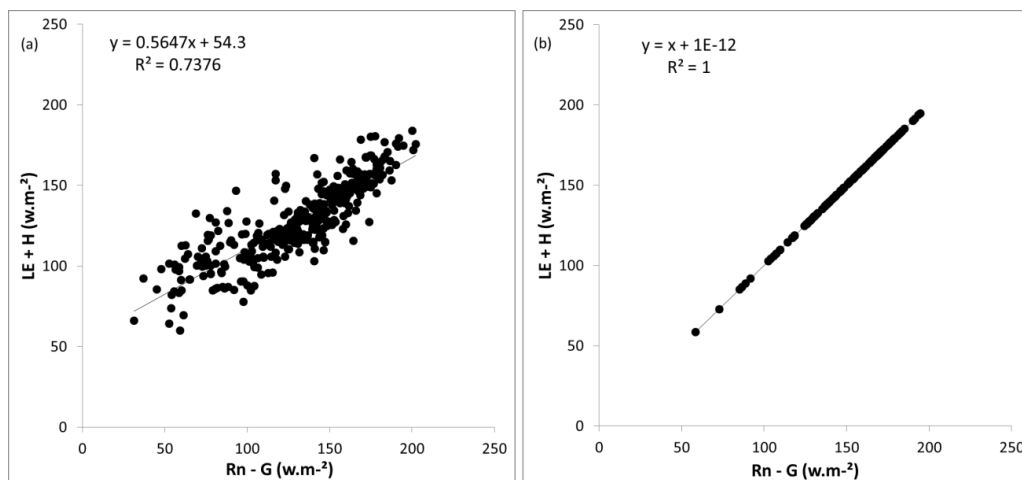


Figura 2. Fechamento do balanço de energia, na escala diária, na área de Caatinga em São João-PE, com dados não corrigidos (a) e com dados corrigidos pela razão de Bowen (b).

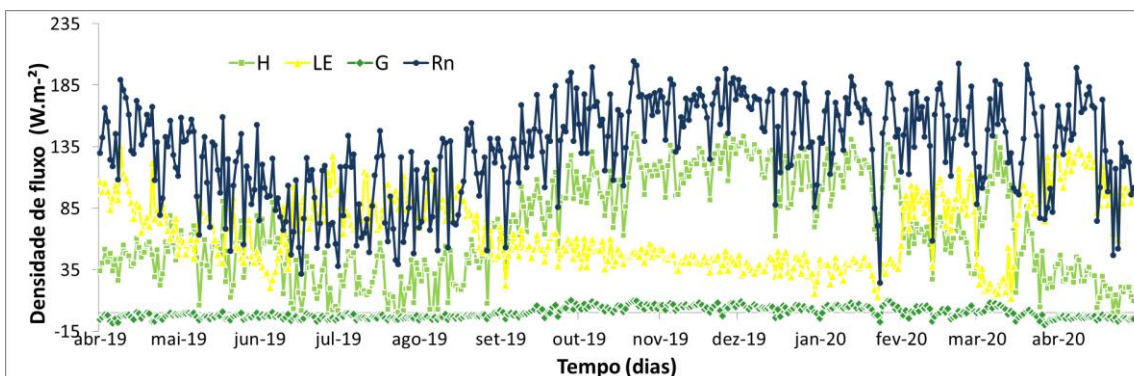


Figura 3. Variação sazonal dos fluxos de energia em área de Caatinga no período de 01/04/2019 a 30/04/2020, em São João-PE.

Componentes do balanço de energia e evapotranspiração

A variação diária dos componentes do balanço de energia, quer seja do saldo de radiação (Rn) e dos fluxos de calor latente (LE), de calor sensível (H) e de calor no solo (G), é apresentada na Figura 3.

Observa-se que durante o período de avaliação (abril de 2019 a abril de 2020), o Rn se apresentou de maneira bastante variável, apresentando as menores médias durante os meses de maio a agosto, que representa a estação úmida e trata-se de um dos períodos com vários dias de alta nebulosidade e eventos pluviométricos. Por outro lado, os maiores valores de Rn ocorreram de outubro a janeiro, coincidindo assim com a estação seca onde, por se tratar de uma estação com menor ocorrência de precipitação, a nebulosidade é menor, dessa forma como esperado uma maior parcela da radiação chega a superfície (Figura 3). Ressalta-se que nas regiões semiáridas a nebulosidade é baixa e as chuvas ocorrem em pequenos intervalos de tempo com alta intensidade (Silva, 2015).

A média diária do Rn variou de 23,91 a 204,34 $W m^{-2}$, sendo que outros autores, como Alves (2015), que avaliou o Rn na mesma área de nossa pesquisa, observou valores médios de Rn de maior magnitude tendo relatado valores entre 46,23 a 349,39 $W m^{-2}$. A diferença entre os dados observados por Alves (2015) e os observados no nosso trabalho pode estar associada ao fato de nossa pesquisa ter sido realizada num ano de maior ocorrência de eventos de precipitação e um maior período úmido, o que faz com que parte da radiação seja retida pelas nuvens, diminuindo assim o Rn. Em estudo realizado noutra área de Caatinga, em

Serra Negra do Norte-RN, Santos et al., 2020 relataram que menores valores de Rn geralmente ocorrem de abril a julho (outono e inverno), período com maior cobertura de nuvens e menor disponibilidade de energia para trocas de calor e água.

Em relação ao G, observa-se que durante todo o período de estudo o mesmo variou de -10,14 a 10,09 a $W m^{-2}$ (Figura 3), no entanto observou-se que os maiores valores e também as maiores variações no G ocorreram a partir do mês de setembro até o final de março, ou seja, durante a estação seca do ano de 2019 e início da estação úmida de 2020. Esses maiores valores do G estão de acordo com o esperado, pois, durante a estação seca maior parte da radiação atinge a superfície do solo, em virtude do dossel da Caatinga está menos fechado em função da queda das folhas durante esse período, fazendo com que o G seja maior, conforme explicitado por Santos et al. (2012). Esses autores observaram que o G apresentou os maiores valores durante o período seco, quando há mais radiação solar incidente na superfície, a vegetação está seca (em senescência) e a superfície do solo fica exposta.

Em relação aos fluxos LE e H, observa-se que os mesmos seguiram as variações da precipitação pluvial e do armazenamento de água no solo, uma vez que os maiores valores de LE foram observados na estação úmida e os menores na estação seca, com o inverso ocorrendo com o H (Figura 3). Os valores de LE variaram de 10,4 a 135,5 $W m^{-2}$, com valor médio de 66,2 $W m^{-2}$. Já os valores de H variaram de 0,4 a 145,4 $W m^{-2}$, com média de 68,6 $W m^{-2}$. Alves (2015), avaliando o LE e o H na mesma área de Caatinga de nossa pesquisa, encontrou que o LE variou de 7,7 a 130,6

797

$W m^{-2}$ e o H variou de 5,8 a 174,6 $W m^{-2}$, corroborando os dados dessa pesquisa. Em outras áreas de Caatinga em climas mais secos, como o de Serra Talhada, Silva et al. (2017) encontraram que o LE variou de 63,4 a 132,2 $W m^{-2}$, com os valores de H sendo bem superiores aos de LE, devido aos baixos valores de umidade do solo que ocorreram.

Borges et al. (2020), em pesquisa realizada numa área de Caatinga densa na cidade de Campina Grande-PB, observaram valores de LE variando entre 0,4 a 135 $W m^{-2}$ e um valor médio de 30 $W m^{-2}$. Esse valor médio mais baixo que o observado na nossa pesquisa pode estar associado ao fato da área de Caatinga estudada por esses autores estar numa região de clima mais seco. Oliveira et al. (2006), em trabalho realizado numa Caatinga em Petrolina-PE, observam uma variação de H e LE durante a estação seca na ordem de 347 e 111 $W m^{-2}$ a 485 a 85 $W m^{-2}$; já na estação chuvosa, com aumento da evapotranspiração, esses autores observaram que o LE chegou a apresentar valores superiores a 205 $W m^{-2}$, enquanto que o H máximo reduziu para 453 $W m^{-2}$.

Todas essas pesquisas mostraram que a variação dos fluxos de energia em áreas de Caatinga está associada com a disponibilidade hídrica. Desse modo, na Figura 4 é apresentada a variação média horária dos componentes do balanço de energia nos períodos úmidos e secos.

Analisando-se a variação horária do LE e H nos períodos seco e úmido, observa-se que os mesmos apresentaram comportamento distintos, sendo que no período úmido ocorreram maiores valores do LE (Figura 4b), com seus menores valores ocorrendo no período seco (Figura 4a). Em relação ao H, observa-se que o mesmo apresentou seus valores mais elevados, sempre superior ao LE, no período seco (Figura 4a). Observa-se, ainda, que durante o período úmido (Figura 4b) o LE foi superior ao H. Isto ocorreu devido ao fato de que durante o período úmido ocorrem os maiores eventos de precipitação pluviométrica e assim maiores valores de umidade do solo, conforme visto na Figura 1. A partição desses fluxos é influenciada pelo status hídrico do solo, onde, nos períodos de maior disponibilidade hídrica a maior parte do R_n é convertida em LE, ou seja, no processo de evapotranspiração.

Verificou-se, ainda, que no período seco ocorreu o inverso do observado no período úmido, onde o H foi superior ao LE. Uma das características das regiões semiáridas são os

períodos curtos de chuva, resultando em valores de H superior a LE (Teixeira et al., 2008; Souza et al., 2015). A maior utilização do R_n para o H em ecossistemas naturais tem sido um comportamento bastante evidenciado em regiões áridas e semiáridas, que ocorre em decorrência da redução na disponibilidade hídrica ocasionada pelos baixos volumes pluviais nesses locais em determinadas épocas do ano (Teixeira et al., 2008; Silva et al., 2017). A baixa oferta de umidade em consequência do período seco da região é um forte fator ao não desenvolvimento da não vegetação, consequentemente diminui a atividade fotossintética, com isso uma maior quantidade de energia fica disponível para ser convertida em H (Lima et al., 2017; Silva et al., 2017; Bezerra et al., 2022; Zitouna-Chebbi et al., 2023).

A variação diária da evapotranspiração (ET) na área de estudo, além da precipitação pluvial, durante o período de 01/04/2019 a 30/04/2020 é apresentada na Figura 5.

A ET apresentou os maiores valores (acima de 4,0 $mm d^{-1}$) nos meses de abril e junho de 2019 e abril de 2020, com o máximo de 4,7 $mm d^{-1}$ no dia 09 de abril de 2020, que ocorreu durante o início da temporada de chuvas. Esse maior valor observado ocorreu aproximadamente 10 dias após o maior volume de precipitação observado durante o estudo, ou seja, quando havia uma considerável quantidade de água armazenada no solo, conforme observado na Figura 1a.

No período mais seco, de setembro a dezembro de 2019 bem como no mês de março de 2020 após um período de estiagem de 20 dias, ocorreram os menores valores de ET, atingindo o mínimo de 0,4 $mm d^{-1}$. Este comportamento pode ser explicado pelos processos naturais das espécies do bioma, uma vez que durante períodos de estiagem, as espécies da Caatinga promovem a queda das folhas, para diminuir a perda de água para o ambiente, dessa maneira a transpiração diminui. Além disso, com a menor umidade do solo, também ocorre um declínio na evaporação, que diminui os valores de ET. Os baixos valores de ET durante o período seco estão principalmente relacionados com o baixo volume de água armazenado no solo (Souza et al., 2015; Silva et al., 2017; Bezerra et al., 2022).

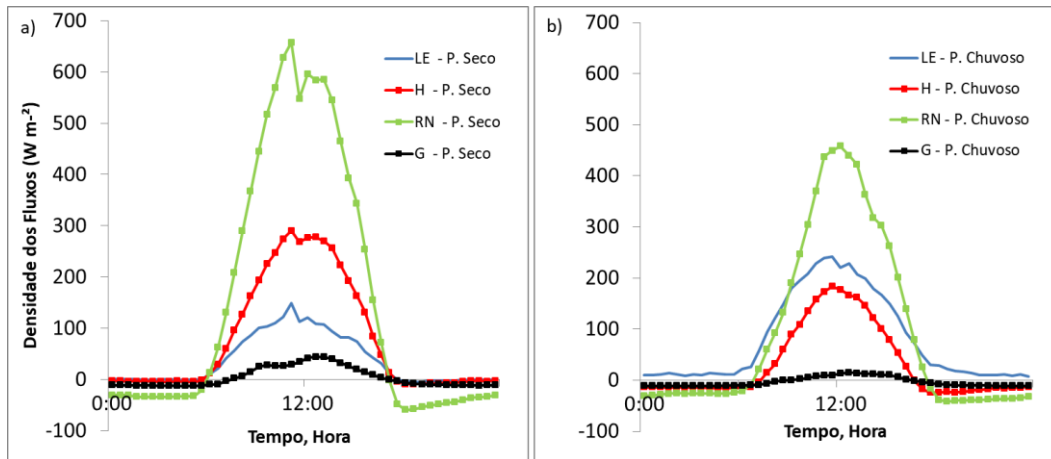


Figura 4. Variação média horária dos componentes do balanço de energia em área de Caatinga, em São João-PE, durante o período seco (a) e úmido (b).

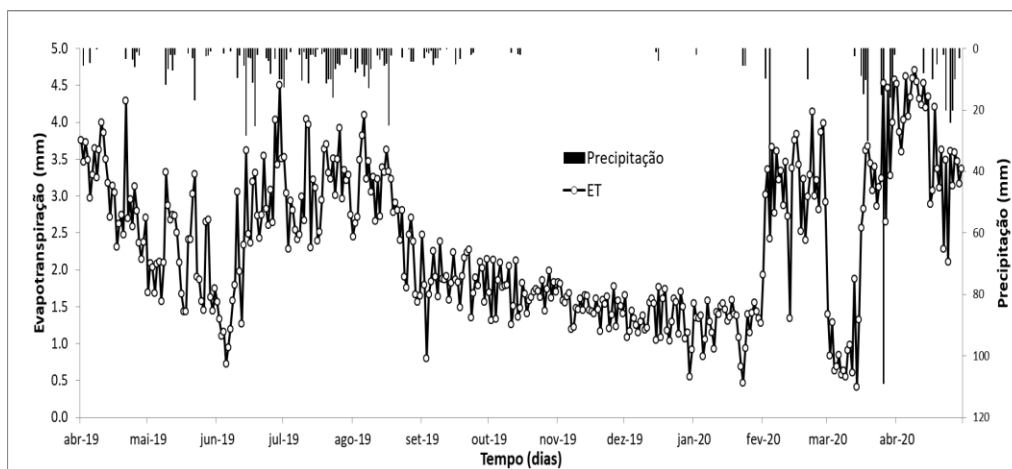


Figura 5. Variação diária da evapotranspiração (ET) em área de Caatinga em São João-PE e da precipitação pluvial, durante o período de 01/04/2019 a 30/04/2020.

A ET média foi $2,3 \text{ mm d}^{-1}$, estando dentro do intervalo de valores encontrados, os quais podem variar de $0,2$ a $2,7 \text{ mm d}^{-1}$ (Lima et al., 2017; Silva et al., 2017; Campos et al., 2019; Marques et al., 2020), dependendo das condições de umidade do solo.

Fluxos de CO_2

A variabilidade média diária dos fluxos de CO_2 e o acumulado diário da precipitação pluvial durante o período de estudo (abril de 2019 a abril de 2020) é apresentada na Figura 6.

De acordo com Oliveira et al. (2006), como indicativo das taxas líquidas dos processos de respiração e fotossíntese de uma vegetação, considera-se que valores positivos dos fluxos de CO_2 representam emissões de carbono para atmosfera durante o processo respiratório, e os

valores negativos indicam fluxos de carbono da atmosfera para a vegetação, devido ao processo fotossintético, ou seja, sequestro de carbono.

Pode-se observar que a variação do fluxo de CO_2 na Caatinga indica que a vegetação atua hora como fonte e hora como sumidouro de carbono. As taxas médias durante todo o período de estudo variaram entre $-4,89$ e $6,87 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. É possível observar também que a média diária do fluxo de carbono esteve abaixo de zero na maioria dos dias estudados, tendo em média uma taxa de sequestro de $-1,08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, indicando dessa maneira que apesar dos valores positivos a Caatinga atua em geral como sumidouro de CO_2 atmosférico. Dessa forma é possível afirmar que durante o período de estudo, ou seja, de abril de 2019 a abril de 2020 a Caatinga retirou da

atmosfera um valor aproximado de $444 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 2).

Observa-se também que, durante o período mais úmido, os valores estiveram em sua grande maioria negativos, indicando assim um longo período de fixação de CO_2 . Este resultado é o esperado, pois, é durante o período mais úmido quando a Caatinga apresenta as maiores taxas de

fotossíntese, em função da maior disponibilidade hídrica do solo, além disso, as árvores, arbustos e a floresta de maneira geral se encontram com mais folhas fazendo com que a quantidade de CO_2 fixado supere o CO_2 que a mesma emite no seu processo de respiração.

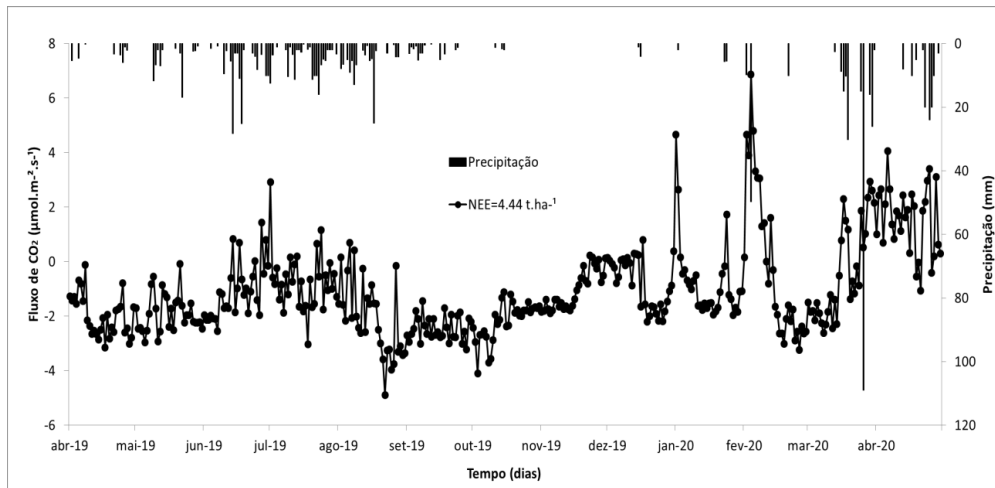


Figura 6. Variação diária dos fluxos de CO_2 e da precipitação pluvial em área de Caatinga em São João-PE, durante o período de abril de 2019 a abril de 2020

Alves (2015) em seu trabalho na mesma área deste estudo, encontrou resultados semelhantes ao dessa pesquisa, com os fluxos de CO_2 variando de $-5,33$ a $6,26 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e em média geral $-1,07 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ quantificando assim um sequestro médio de carbono em torno de $405 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 2). Silva et al. (2017) em pesquisa realizada numa área de Caatinga na cidade de Serra Talhada-PE, observaram valores também semelhantes ao deste trabalho. De acordo com esses autores, os fluxos de CO_2 variaram entre $-5,9$ a $4,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, tendo como valor médio de $-0,99 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, o que indica que naquela região a Caatinga também atua como sumidouro de CO_2 retirando da atmosfera em média $282 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 2).

Oliveira et al. (2006), em pesquisa realizada com Caatinga na cidade de Petrolina, observaram uma variação média diária de fluxos de CO_2 de $-4,2$ a $5,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Esses autores observaram que, durante o final da estação seca, a Caatinga apresentou taxa de fotossíntese quase nula, atuando exclusivamente como fonte de CO_2 para a atmosfera; esse fato está associado a

menores taxas de precipitação e consequentemente menor disponibilidade hídrica na região.

Apesar de se tratar do mesmo bioma, o comportamento dos fluxos de CO_2 na Caatinga se mostram distintos quando comparados de região para região, todavia, de maneira geral a Caatinga atua como sumidouro de CO_2 na maioria do tempo e espaço, de modo que o volume do gás retirado da atmosfera pode ser maior ou menor principalmente em função da disponibilidade hídrica de cada região. Por exemplo, Mendes et al. (2020) mediram os fluxos de CO_2 numa Caatinga em Serra Negra do Norte-RN e encontraram que a mesma sequestrou de 145 a $169 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 2), o que representa cerca de 33% do CO_2 sequestrado pela Caatinga desse estudo. Contudo a precipitação total anual de Serra Negra do Norte variou de 466 a 513 mm , sendo bem inferior ao da nossa pesquisa (907 mm), mostrando que a disponibilidade hídrica é um fator primordial no maior ou menor sequestro de carbono pela Caatinga. Entretanto, ressalta-se que, apesar das diferentes condições edafoclimáticas, a Caatinga atuou sequestrando CO_2 atmosférico, com os valores mais elevados na região do Agreste Meridional de Pernambuco.

Tabela 2. Fluxos de CO₂ para Caatinga e ecossistemas de regiões semiáridas.

Tipo de ecossistema	Local	Período	Fluxo de CO ₂ (g C m ⁻² ano ⁻¹)	Precipitação anual (mm)	Fonte
Caatinga	São João-PE	Abril 2019 a Abril 2020	-444	907	Esta pesquisa
Caatinga	São João-PE	2014	-405	758	Alves (2015)
Caatinga	Serra Talhada-PE	Março 2014 a Março 2015	- 282	430	Silva et al. (2017)
Caatinga	Serra Negra do Norte-RN	2014 2015	- 169 -145	513 466	Mendes et al. (2020)
Floresta Tropical Seca	Sonora, México	2016 2017 2018	-180,9 -294,5 -207,9	733 579 856	Rojas-Robles et al. (2020)
Savana (Muga)	Austrália	2010	-258	565	Eamus et al. (2013)

Conclusões

Nesse estudo, objetivou-se avaliar a variabilidade sazonal dos fluxos de água, de energia e de carbono em área de Caatinga no Semiárido Pernambucano, utilizando medidas de campo e instrumentação da correlação dos vórtices turbulentos.

Em relação aos fluxos de energia, no período seco, a maior parte do saldo de radiação é utilizada para o aquecimento do ar, ou seja, calor sensível, já no período de maior disponibilidade hídrica, maior parte da energia é utilizada no processo de calor latente (evapotranspiração).

Os fluxos de CO₂ apresentaram variação sazonal em função da umidade do solo, sendo que durante o período desse estudo, a área de Caatinga atuou como sumidouro de carbono atmosférico, removendo aproximadamente 4,4 t C ha⁻¹ ano⁻¹ (440 g C m⁻² ano⁻¹). Entretanto, maiores estudos ainda são necessários para avaliar como e por quanto tempo esse carbono é alocado no ecossistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE, processo IBPG-0195-5.01/19), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES – Código de Financiamento 001), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processos 313493/2020-0, 465764/2014-2) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Observatório Nacional da Dinâmica da Água e de Carbono no Bioma Caatinga (INCT-ONDACBC). Os autores também agradecem ao proprietário da fazenda Riacho do Papagaio (Prof. Antonio de Pádua Montenegro, *in memoriam*), pela cessão da área experimental.

Referências

Alves, A.R., Medeiros, A.N., Andrade, A.P., Frighetto, R.T.S., Silva, M.J.S., 2018. A Caatinga e a oportunidade de mitigação das emissões de gases de efeito estufa pela atividade pastoril. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* 11, 639-661.

- <http://dx.doi.org/10.17765/2176-9168.2018v11n2p639-661>
- Alves, E.M., 2015. Fluxos de energia, vapor d'água e CO₂ entre a vegetação e a atmosfera no agreste meridional de Pernambuco. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima, 2022. Moniotamento pluviométrico. Disponível: <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monit-oramento-pluvio.php>. Acesso: 05 out. 2022.
- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, U., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A.S., Martin, P.H., Berbigier, P., Bernhofer, C., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grunwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Versala, T., 2000. Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The Euroflux Methodology. *Advances in Ecological Research* 30, 113-175. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60018-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60018-5)
- Barros, J.A., Medeiros, E.V., Costa, D.P., Duda, G.P., Lima, J.R.S., Santos, U.J., Antonino, A.C.D., Hammecker, C., 2019. Human disturbance affects enzyme activity, microbial biomass and organic carbon in tropical dry sub-humid pasture and forest soils. *Archives of Agronomy and Soil Science* 65, 1-15. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1622095>
- Bezerra, B.G., Silva, C.M.S., Mendes, K., Mutti, P., Fernandes, L.S., Marques, T.V., Silva, C.L.C., Campos, S., Vieira, M.M.L., Urbano, S.A., Difante, G.S.; Ferreira, R.R., Silva, D.T.C., Costa, G.B., Oliveira, P.E.S., Oliveira, C.P., Gonçalves, W.A., Lúcio, P.S., 2022. CO₂ exchanges and evapotranspiration of a grazed pasture under tropical climate conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* 323, 109088. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109088>
- Borges Júnior, J.C.F., Anjos, R.T., Silva, T.J.A., Lima, J.R.S., Andrade, C.L.T., 2012. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16, 380-390. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000400008>
- Borges, C.K., Santos, C.A.C., Carneiro, R.G., Silva, L.L., Oliveira, G., Mariano, D.M., Silva, M.T., Silva, B.B., Bezerra, B.G., Perez-Marin, A.M., Medeiros, S.S., 2020. Seasonal variation of surface radiation and energy balances over two contrasting areas of the seasonally dry tropical forest (Caatinga) in the Brazilian semi-arid. *Environmental Monitoring and Assessment* 192, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08484-y>
- Brito, T.R.C., Lima, J.R.S., Oliveira, C.L., Souza, R., Antonino, A.C.D., Medeiros, E.V., Souza, E.S., Alves, E.M., 2020. Mudanças no Uso da Terra e Efeito nos Componentes do Balanço Hídrico no Agreste Pernambucano. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 870-886. <http://dx.doi.org/10.26848/rbfg.v13.2.p870-886>
- Campos, S., Mendes, K.R., Silva, L.L., Mutti, P.R., Medeiros, S.S., Amorim, L.B., Santos, C.A.C., Perez-Marin, A.M., Ramos, T.M., Marques, T.V., Lucio, P.S., Costa, G.B., Silva, C.M.S., Bezerra, B.G., 2019. Closure and partitioning of the energy balance in a preserved area of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 271, 398-412. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.018>
- Costa, G.B., Mendes, K.R., Viana, L.B., Almeida, G.V.; Mutti, P.R., Silva, C.M.S., Bezerra, B.G., Marques, T.V., Ferreira, R.R., Oliveira, C.P., Gonçalves, W.A., Oliveira, P.E., Campos, S., Andrade, M.U.G., Antonino, A.C.D., Menezes, R.S.C., 2022. Seasonal Ecosystem Productivity in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga) Using Flux Tower Measurements and Remote Sensing Data. *Remote Sensing* 14, 3955. <https://doi.org/10.3390/rs14163955>
- Eamus, D., Cleverly, J., Boulain, N., Grant, N., Faux, R., Villalobos-Vega, R., 2013. Carbon and water fluxes in an arid-zone Acacia savanna woodland: an analyses of seasonal patterns and responses to rainfall events. *Agricultural and Forest Meteorology* 182-183, 225-238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.020>
- Huang, M., Piao, S., Zeng, Z., Peng, S., Ciai, P., Cheng, L.I., Mao, J., Poulter, B., Shi, X., Yao, Y., Yang, H., Wang, Y., 2016. Seasonal

- responses of terrestrial ecosystem water-use efficiency to climate change. *Global Change Biology* 22, 2165–2177. <https://doi.org/10.1111/gcb.13180>
- Li, S.-G., Eugster, W., Asanuma, J., Kotani, A., Davaa, G., Oyunbaatar, D., Sugita, M., 2006. Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorology* 137, 89–106. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.03.010>
- Lima, J.R.S., Oliveira, C.L., Barbosa, A.C., Antonino, A.C.D., Souza, E.S., 2017. Variação sazonal dos fluxos de energia e evapotranspiração em caatinga no agreste Pernambucano. *Agrometeoros* 25, p.113-120. <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v25i1.26272>
- Luyssaert, S., Inglima, I., Jung, M., et al., 2007. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology* 13, 2509-2537. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01439.x>
- Machado, C.B., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Souza, E.S., Souza, R.M.S., Alves, E.M., 2016. Daily and seasonal patterns of CO₂ fluxes and evapotranspiration in maize-grass intercropping. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 20, p.777-782. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n9p777-782>
- Marques, T.V., Mendes, K., Mutti, P., Medeiros, S., Silva, L., Perez-Marin, A.M., Campos, S., Lúcio, P.S., Lima, K., Reis, J., Ramos, T.M., Silva, D.F., Oliveira, C.P., Costa, G.B., Antonino, A.C.D., Menezes, R.S.C., Silva, C.M.S., Bezerra, B.G. Environmental and biophysical controls of evapotranspiration from Seasonally Dry Tropical Forests (Caatinga) in the Brazilian Semiarid. *Agricultural and Forest Meteorology* 287, 107957. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107957>
- Mendes, K.R., Campos, S., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Ramos, T.M., Marques, T.V., Reis, J.S., Vieira, M.M.L., Silva, A.C.N., Marques, A.M.S., Silva, D.T.C., Silva, D.F., Oliveira, C.P., Gonçalves, W.A., Costa, G.B., Pompelli, M.F., Marenco, R.A., Antonino, A.C.D., Menezes, R.S.C., Bezerra, B.G., Silva, C.M.S., 2021. Assessment of SITE for CO₂ and Energy Fluxes Simulations in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga Ecosystem). *Forests* 12, 86. <https://doi.org/10.3390/f12010086>
- Mendes, K.R., Campos, S., Silva, L.L., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Medeiros, S.S., Perez-Marin, A.M., Marques, T.V., Ramos, T.M., Vieira, T.M., Vieira, M.M.L., Oliveira, C.P., Gonçalves, W.A., Costa, G.B., Antonino, A.C.D., Menezes, R.S.C., Bezerra, B.G., Silva, C.M.S., 2020. Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Scientific Reports* 10, 1-16. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w>
- Moore, C.J., 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary Layer Meteorology* 37, 17–35. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00122754>
- Nakano, T., Shinoda, M., 2015. Modeling gross primary production and ecosystem respiration in a semiarid grassland of Mongolia. *Soil Science and Plant Nutrition* 61, 106–115. <https://doi.org/10.1080/00380768.2014.966043>
- Oliveira, M.B.L., Santos, A.J.B., Manzi, A.O., Alvalá, R.C.S., Correia, M.F., Moura, M.S.B., 2006. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de Caatinga e atmosfera no Nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21, 378-386, 2006.
- R Core Team., 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Reichstein, M., Falge, E.; Baldocchi, D., et al., 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology* 11, 1424-1439. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>
- Rojas-Robles, N.E., Garatuza-Payán, J., Álvarez-Yépez, J.C., Sánchez-Mejía, Z.M., Vargas, R., Yépez, E.A., 2020. Environmental Controls on Carbon and Water Fluxes in an Old-Growth Tropical Dry Forest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 125, e2020JG005666. <https://doi.org/10.1029/2020JG005666>
- Santos, C.A.C., Mariano, D.A., Nascimento, F.C.A., Dantas, F.R.C., Oliveira, G., Silva, M.T., Silva, L.L., Silva, B.B., Bezerra, B.G.,

- Safa, B., Medeiros, S.S., Neale, C.M.U., 2020. Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 85, 101982. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101982>
- Santos, J.C.B., Souza Júnior, V.S., Corrêa, M.M., Ribeiro, M.R., Almeida, M.C., Borges, L.E.P., 2012. Caracterização de Neossolos Regolíticos da Região Semiárida do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36, 683-695. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300001>
- Schotanus, P., Nieuwstadt, F.T.M., Bruin, H.A.R., 1983. Temperature measurements with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. *Boundary-Layer Meteorology* 26, 81-93. <https://doi.org/10.1007/BF00164332>
- Silva, P.F., Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Souza, R., Souza, E.S., Silva, J.R.I., Alves, E.M., 2017. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. *Journal of Arid Environments* 147, 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>
- Souza, L.S.B., Moura, M.S.B., Sedyama, G.C., Silva, T.G.F., 2015. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração, na Caatinga em condições de seca intensa. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 50, 627-636. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000800001>
- Stella, P., Lamaud, E., Brunet, Y., Bonnefond, J.-M., Loustau, D., Irvine, M., 2009. Simultaneous measurements of CO₂ and water exchanges over three agroecosystems in South-West France. *Biogeosciences* 6, 2957-2971. <https://bg.copernicus.org/articles/6/2957/2009/>
- Teixeira, A.H.C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, M.D., Moura, M.S.B., Bos, M.G., 2008. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology* 362, 110-127. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.08.011>
- Wever, L.A., Flanagan, L.B., Carlson, P.J., 2002. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance, and surface conductance in northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology* 112, 31-49. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00041-2)
- Wilson, K.B., Baldocchi, D.D., 2000. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. *Agricultural and Forest Meteorology* 100, 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00088-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00088-X)
- Zitouna-Chebbi, R., Jacob, F., Prévot, L., Marc Voltz, M., 2023. Documenting evapotranspiration and surface energy fluxes over rainfed annual crops within a Mediterranean hilly Agrosystem. *Agricultural Water Management* 277, 108117. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108117>