

PARTE IV

MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS E AGRICULTURA

*"O mundo não será destruído
por quem pratica o mal, mas por
quem o vigia sem fazer nada"*
Albert Einstein

MONITORAMENTO DOS FLUXOS DE GASES DO EFEITO ESTUFA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR: BALANÇOS E MODELAGEM

Oswaldo Machado Rodrigues Cabral, Helber Custódio de Freitas, Santiago Vianna Cuadra e Humberto Ribeiro da Rocha

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar no Brasil ocupa aproximadamente 16% da área agrícola e concentra-se nas Regiões Sudeste e Centro-Oeste (90%). As exportações de açúcar e o consumo de etanol representam 10% da economia agrícola do país (Soltangheisi et al., 2019). Aproximadamente 20% da produção agrícola global entre 2000 e 2018 foi de cana-de-açúcar, e o Brasil, que é o maior produtor da espécie, contribuiu com 39% da produção mundial em 2019. A rápida expansão das áreas de produção de cana-de-açúcar, as quais mais do que dobraram desde 2002, pode influenciar no uso de água, nas emissões de gases do efeito estufa, no balanço de carbono no solo, e contribuir com a mudança do clima (Zheng et al., 2022).

Em função dessas demandas, projetos de pesquisa da Embrapa Meio Ambiente e da Universidade de São Paulo foram realizados em áreas comerciais de cana-de-açúcar (com e sem queima), na Região Sudeste do Brasil (SP), com o objetivo de quantificar os fluxos de vapor de água e dos gases de efeito estufa (GEE), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e dióxido de carbono (CO_2), entre a superfície vegetada e a atmosfera. Os fluxos foram obtidos pelo método da covariância de vórtices (*eddy covariance*), utilizando-se sensores de absorção no infravermelho de caminho aberto e espectrômetro de absorção a laser de caminho fechado, ambos de resposta rápida (10 Hz). Esse método apresenta alta resolução temporal (30 minutos) e integração espacial da ordem de hectares em torno do ponto de observação. O conjunto de dados obtido foi utilizado na quantificação dos balanços de água e energia, assim como na determinação das trocas líquidas dos GEE, verificando-se ao longo do tempo se o agrossistema se comportou como fonte ou sumidouro com relação à atmosfera. Adicionalmente, modelos biogeoquímicos que simulam as trocas desses gases no sistema solo-planta-atmosfera

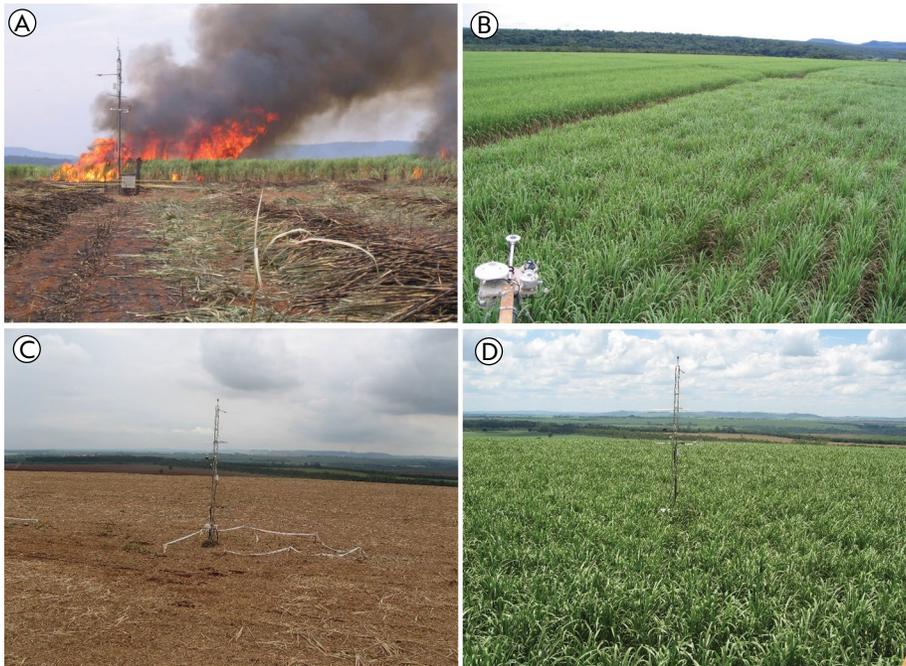
foram calibrados com as informações geradas, contribuindo para a compreensão da dinâmica dos processos envolvidos neste importante agrossistema, visando à determinação do potencial de medidas mitigadoras das mudanças climáticas e de contribuição das distintas formas de uso do solo e manejo quanto às emissões de GEE.

ÁREAS DAS PLANTAÇÕES DE CANA-DE-AÇÚCAR

A área de cana-de-açúcar com colheita após a queima da palhada (variedade SP83-2847) possuía mais de 400 ha (USR, Figuras 25.1A, 25.1B) e localizava-se no município de Luiz Antonio, SP (21°38' S, 47°47' W, 552 m altitude), onde a precipitação anual média é de (1517 ± 274) mm. O solo é Latossolo vermelho amarelo arenoso (22% argila, 74% areia e 3% silte) e apresentava a densidade média de 1500 kg m⁻³ da superfície até 2 m de profundidade. O conteúdo de água disponível (CAD), definido como a umidade do solo entre os potenciais de -0,01 e -1500 kPa, foi estimado em 136 mm para a camada de (0-1) m de solo. As observações (Cabral et al., 2012, 2013) foram realizadas durante a segunda rebrota (de 14 de abril de 2005 a 11 de maio de 2006) e a terceira rebrota (de 12 de maio de 2006 a 20 de maio de 2007), representando 393 e 374 dias de crescimento, respectivamente.

A área com cana colhida sem queima localizava-se em Pirassununga, SP (21° 57' S; 47° 20' W; altitude de 657 m), num talhão de 10,4 ha (FAYS, Figuras 25.1C, 25.1D). A região é caracterizada pela sazonalidade climática típica do bioma cerrado (da Rocha et al., 2009; Restrepo-Coupe et al., 2013; Cabral et al., 2015), com precipitação média anual de 1410 mm e temperatura média anual de 22°C. O solo Latossolo vermelho distroférico argiloso (65% argila, 21% areia e 14% silte) apresentava densidade de 1521 kg m⁻³ na camada superficial de 0,4 m e 1300 kg m⁻³ abaixo de 1m de profundidade. A CAD foi estimada em 341 mm para o primeiro metro de solo. A área foi reformada em outubro de 2015 (variedade IAC SP 95-5000). O final do primeiro ciclo (com a cana planta) teve duração de 389 dias e ocorreu no dia 303 de 2016 (29 de outubro); a colheita do segundo ciclo (soca, com duração de 304 dias) foi realizada em 30 de agosto de 2017 (dia 242) e a colheita da terceira soca ocorreu no dia 13 de novembro de 2018 (Cabral et al., 2020).

Nas duas áreas, os fluxos de H₂O e CO₂ foram obtidos por meio de um sistema de correlação de vórtices (Cabral et al., 2012, 2013, 2020) composto de anemômetro sônico tridimensional e analisador de gás infravermelho.



Fotos: Osvaldo Cabral

Figura 25.1. Plantação de cana-de açúcar na área USR: (A) na colheita com queima e corte manual; (B) durante o máximo desenvolvimento; na área da FAYS: (C) após a colheita sem a remoção da palha; e (D) durante o máximo desenvolvimento.

OS EFEITOS DA PALHADA SOBRE O SOLO NA TEMPERATURA, NO FLUXO DE CALOR NO SOLO E NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Em ambas as áreas, foram utilizados os valores médios de 30 minutos dos fluxos de calor no solo (G), das temperaturas do solo em 5 cm (T_{solo}) e do ar (T_{ar}), observados durante dois períodos de 15 dias, para caracterizar os efeitos da presença e/ou ausência da palhada sobre o solo logo após a colheita e durante o máximo desenvolvimento da cana-de-açúcar. Na USR (colheita com queima de palhada), esses períodos foram entre os dias 104 e 120 de 2005 e 359 de 2005 até dia 8 de 2006. Na FAYS, entre os dias 304 e 320 de 2016 e 33 e 48 de 2017. A Figura 25.2 apresenta os resultados calculados para os referidos períodos.

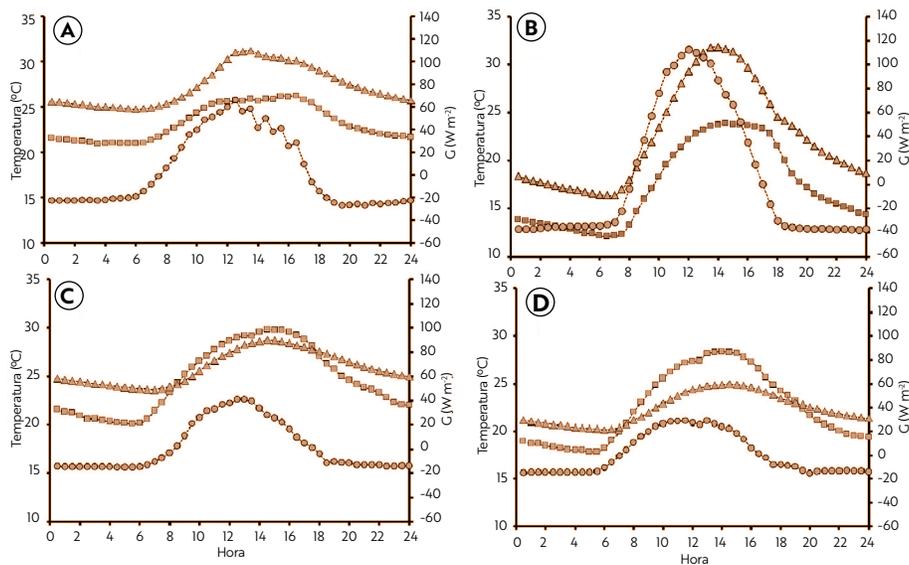


Figura 25.2. Valores médios das temperaturas do ar (Tar, quadrados) e do solo (Tsolo, triângulos), e do fluxo de calor no solo (G, círculos) observados nas plantações de cana-de-açúcar. Na área da USR: (A) após a colheita com queima; (B) durante o máximo desenvolvimento; e na área da FAYS: (C) após a colheita sem a remoção da palha; (D) durante o máximo desenvolvimento.

Após a colheita, na área com queima (USR, Figura 25.2A) a temperatura máxima do solo foi, em média, aproximadamente 100°C superior à temperatura do ar, e o fluxo de calor no solo apresentou valores próximos a 120 W m^{-2} . Na área em que a colheita ocorreu sem queima (FAYS), a quantidade de massa seca (MS) de palha depositada sobre o solo foi de $16,7 \pm 1,7 \text{ ton MS ha}^{-1}$ e o padrão foi invertido (Figura 25.2C), de modo que a temperatura do ar foi maior do que a do solo em 30°C e o máximo valor de G foi aproximadamente 75% menor, atingindo 30 W m^{-2} . Durante o período de máximo desenvolvimento, as diferenças não foram significativas (Figuras 25.2B, 25.2D) devido à cobertura total do solo pelas plantas de cana-de-açúcar. Desta forma, os efeitos benéficos da manutenção total da palha, como o aumento na infiltração e armazenamento de água no solo (Ramos et al., 2016), seriam maiores no início da rebrota.

Os fluxos médios de 30 minutos do vapor de água (LE) são apresentados na Figura 25.3. Nos períodos após a colheita na USR, que apresentava o solo descoberto, os valores médios de LE foram menores até 10 horas da manhã. No período analisado na USR, entre os dias 104 e 120 de 2005, o total de precipitação foi de 63 mm. Já na FAYS, o total de precipitação foi 214 mm e ocorreu com maior frequência durante a noite

(entre os dias 304 e 320 de 2016). Portanto, apesar da camada de palha sobre o solo na FAYS, parte da precipitação foi retida e evaporada durante o período da manhã seguinte, o que explica a diferença observada nos comportamentos de LE entre 6 e 10 horas da manhã entre as duas áreas.

A evapotranspiração diária média (ET) foi calculada pela soma dos valores médios de 30 minutos de LE (Figura 25.3), multiplicados pelo calor latente de evaporação. A evapotranspiração durante os períodos de máximo desenvolvimento foi $3,0 \pm 3,4$ mm dia⁻¹ na USR, com um índice de área foliar (IAF) de $4,9$ m² m⁻², e de $4,8 \pm 3,3$ mm dia⁻¹ na FAYS, cujo IAF foi de $4,4$ m² m⁻². Entretanto, os desvios-padrão das médias de LE observadas na USR (área cinza da mesma figura) indicam que essas diferenças não foram significativas durante o intervalo inserido no período de máximo desenvolvimento.

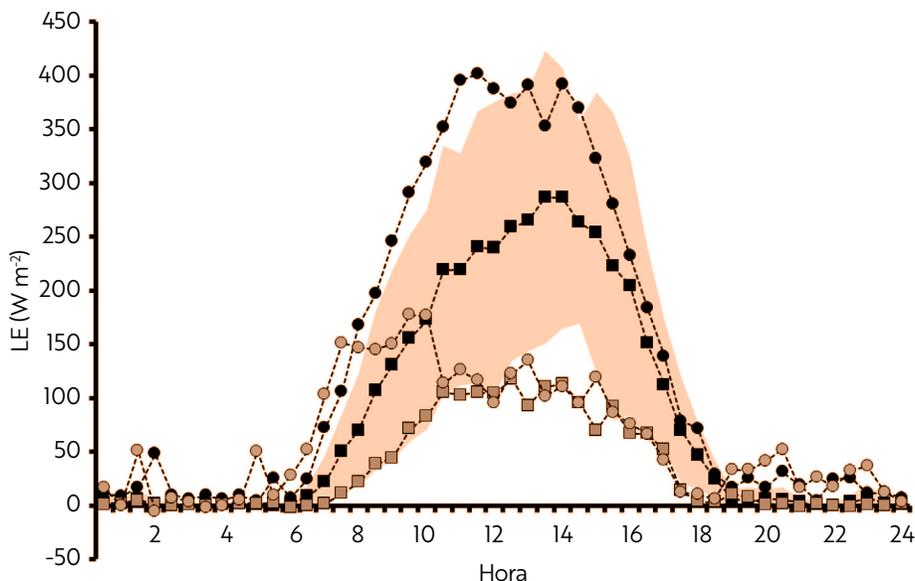


Figura 25.3. Valores médios dos fluxos de calor latente (LE) observados na USR (quadrados) e FAYS (círculos) após a colheita (marrom) e durante o crescimento máximo (pretos) da plantação de cana-de-açúcar. A área hachurada em marrom indica o desvio-padrão das médias nas medidas de LE da USR durante o período de máximo desenvolvimento.

Com base nos valores da Tabela 25.1, $66(\pm 11)\%$ da precipitação, em média, foi utilizada pela evapotranspiração (ET/P). A razão entre o peso fresco dos colmos (PFC) e a ET, que indica a eficiência da utilização de água, foi em média $0,09 \pm 0,01$ ton ha⁻¹ mm⁻¹.

Tabela 25.1. Totais acumulados da precipitação (P), da evapotranspiração (ET) e dos pesos dos colmos observados nas colheitas (PFC) para cada ciclo nas áreas de cana-de-açúcar USR e FAYS.

Ciclos Dias	P mm	ET mm	PFC ton ha ⁻¹	ET/P	PFC/ET ton ha ⁻¹ mm ⁻¹
USR					
393	1194	829	83 ± 6	0,69	0,10
374	1353	685	62 ± 4	0,51	0,09
FAYS					
367	1566	1148	99 ± 17	0,73	0,09
303	1466	855	82 ± 15	0,58	0,10
439	1261	959	78 ± 14	0,76	0,08

O conteúdo de água disponível (CAD) no primeiro metro do solo arenoso na USR foi estimado em 136 mm, inferior à ET média de 757 mm. Considerando a precipitação média (P) de 1274 mm, então houve um excedente de água infiltrada no solo ($Exc = P - ET$) de 516 mm, correspondendo a cerca de 40% da precipitação que foi direcionada para a recarga de água no solo. Para o solo argiloso da FAYS, o CAD foi estimado em 341 mm, também inferior à ET média de 987 mm. Em termos médios, de maneira análoga à USR, houve recarga de 444 mm de água no solo, pois a precipitação média foi de 1431 mm. Em ambos os casos, a recarga de água seria suficiente para repor o armazenamento do primeiro metro de solo, considerando ausência de escoamentos superficiais.

BALANÇOS DE CO₂

O balanço de CO₂ em plantios agrícolas depende da fixação pela vegetação (produtividade primária) e da respiração das plantas e solo. O balanço entre esses dois termos corresponde ao saldo das trocas de CO₂ do sistema ($NEE - Net Ecosystem Exchange$), cujo sinal indica se o sistema é uma fonte (NEE positivo) ou um sumidouro (NEE negativo) em relação à atmosfera. Dessa forma, os processos que potencialmente podem aumentar o sequestro ou emissão de carbono no solo são diretamente dependentes das práticas de manejo adotadas. Mesmo em cultivos voltados para a bioenergia, observa-se o aumento nas emissões de CO₂ caso os manejos do solo e cultura não sejam adequados. Embora se suponha que o balanço de carbono esteja em equilíbrio nos agrossistemas, tal simplificação do ciclo produtivo pode produzir resultados bem distintos da realidade.

Na FAYS, os valores médios de 30 minutos do balanço de CO₂ (NEE) nos períodos após a colheita (Figura 25.4) foram positivos, indicando que a respiração foi maior

do que a assimilação. Neste caso, a assimilação pode ser considerada como nula. Entretanto, na USR, os valores médios de NEE pós-colheita foram negativos durante o dia, provavelmente em decorrência da colheita manual e da ausência da palhada com relação à colheita mecânica (como na FAYS), o que favoreceu a rebrota mais rápida e a consequente assimilação de CO_2 . Durante os períodos de máximo desenvolvimento, os valores de NEE foram similares, atingindo $-37 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ em média.

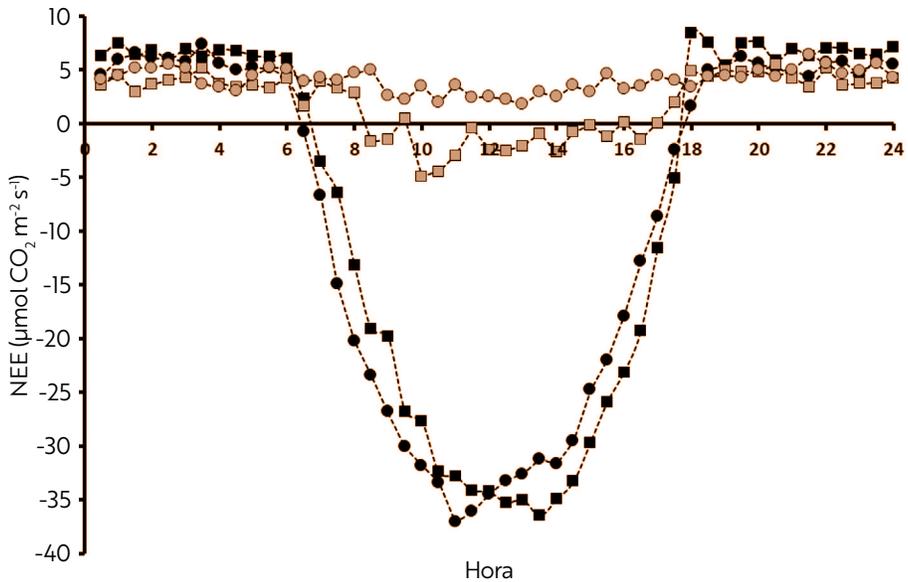


Figura 25.4. Valores médios dos fluxos de CO_2 (NEE) observados na USR (quadrados) e FAYS (círculos) após a colheita (marrom) e durante o crescimento máximo (pretos) da plantação de cana-de-açúcar.

Os totais dos balanços de CO_2 (NEE), assimilação bruta (GPP) e respiração do solo e planta (RE) são apresentados na Tabela 25.2. Na USR, os decréscimos de NEE e GPP observados no segundo ciclo ocorreram devido à limitação hídrica durante a rebrota, apesar da maior quantidade de chuva registrada durante o ciclo (Tabela 25.1). Na FAYS, a maior assimilação observada no primeiro ciclo deveu-se ao estabelecimento da nova plantação (cana planta) e sistema radicular.

Tabela 25.2. Totais acumulados dos balanços de CO₂ (NEE), da assimilação bruta (GPP) e de respiração do solo e planta (RE), em cada ciclo da plantação de cana-de-açúcar (± incertezas).

Ciclos Dias	NEE gCO ₂ m ⁻²	GPP gCO ₂ m ⁻²	RE gCO ₂ m ⁻²
USR			
1 – 393	-7201 ± 161	13244 ± 169	6043 ± 51
2 – 374	-3520 ± 235	9970 ± 304	6450 ± 194
FAYS			
1 – 367	-7345 ± 124	13657 ± 410	6312 ± 189
2 – 303	-4747 ± 119	11144 ± 334	6397 ± 192
3 – 439	-4475 ± 134	13516 ± 405	9041 ± 271

BALANÇOS DE ÓXIDO NITROSO (N₂O) E METANO (CH₄) NA PLANTAÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Os fluxos de N₂O e CH₄ foram medidos na FAYS durante o segundo ciclo da plantação. A razão de mistura dos gases traço (CH₄ e N₂O) foi obtida por meio de um espectrômetro de absorção a laser QCLAS (*Quantum Cascade Laser Absorption Spectrometer*, QCL-76-D, Aerodyne Research Inc., Billerica, MA, USA), equipado com um sistema de resfriamento (cooler, ThermoCube, USA) para a manutenção da temperatura do laser estável. O espectrômetro foi instalado num container metálico (2 x 2 x 2,3 m), que recebeu isolamento térmica interna e um ar condicionado (18000 BTU, Split-Inverter).

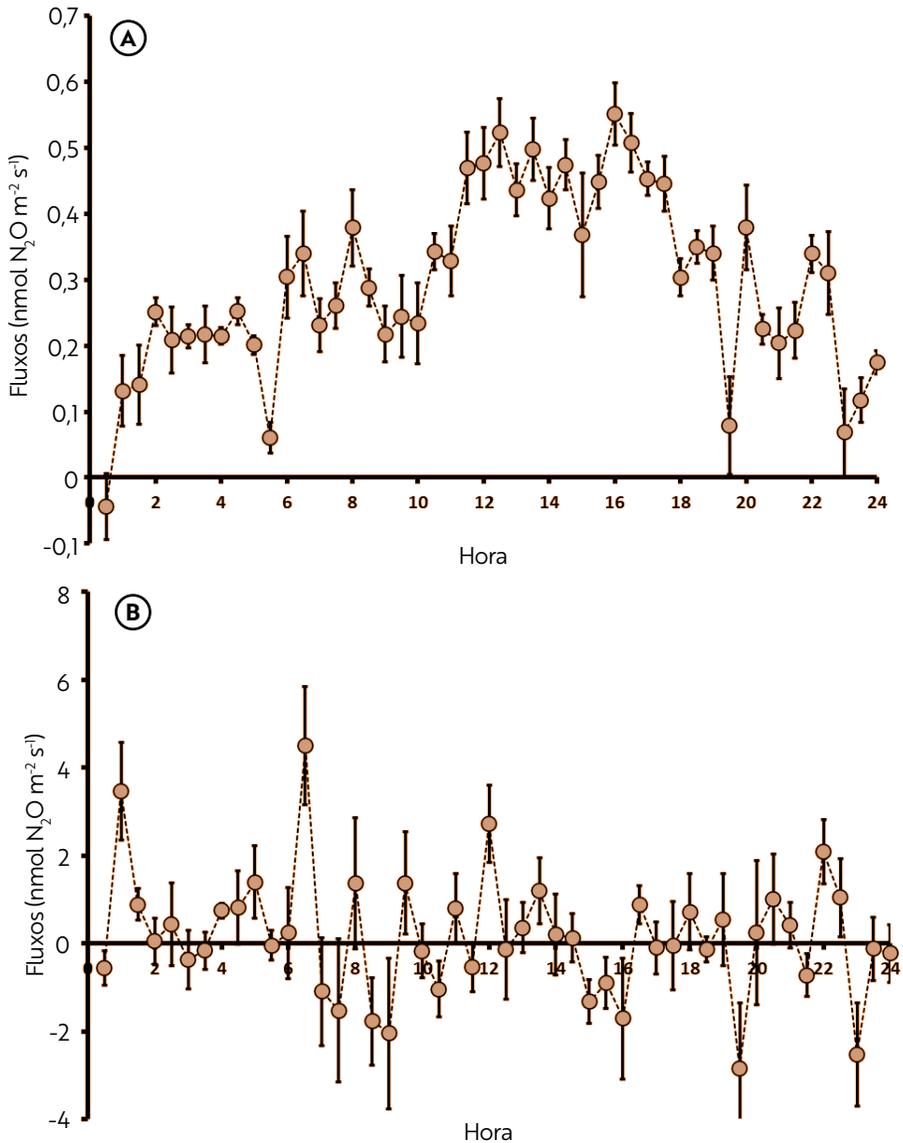


Figura 25.5. (A) Valores médios (30 min) dos fluxos de N₂O observados na plantação de cana-de-açúcar da FAYS após a fertilização de nitrogênio (entre os dias 314 e 328 de 2016); (B) valores médios dos fluxos de CH₄ observados na FAYS entre os dias 1 e 15 de 2017. Barras verticais indicam o erro-padrão das médias (n=15).

Os valores médios de 30 minutos dos fluxos de N_2O (Figura 25.5A), observados após a adubação com fertilizante líquido (80 kg N ha^{-1} , no dia 314 em 2016), variaram em torno de $0,4 \text{ nmol } N_2O \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e indicaram o efeito do aumento da temperatura e umidade do solo na emissão deste gás. Já os fluxos médios de CH_4 (Figura 25.5B) não apresentaram um padrão claro, alternando-se entre valores positivos e negativos. Aparentemente, o aumento da emissão ocorreu quando a umidade do solo decrescia, e não quando estava próxima da saturação (condição anaeróbica).

Os valores acumulados ao longo do segundo ciclo (303 dias) da plantação de cana-de-açúcar (Tabela 25.3) indicaram que o sistema solo-planta atuou como fonte dos gases CH_4 e N_2O , embora eles tenham sido inferiores a 1% quando comparados com os balanços de CO_2 (NEE na Tabela 25.2). Dessa forma, apesar da contribuição positiva (fonte) de 1% de N_2O e CH_4 , em equivalência ao CO_2 , o agrossistema comportou-se como sumidouro de carbono (valores negativos de NEE).

Tabela 25.3. Totais acumulados dos balanços de N_2O e CH_4 ao longo do segundo ciclo da plantação de cana-de-açúcar FAYS (\pm representam as incertezas).

Período	N_2O	CH_4
305/2016-242/2017	$\text{g } N_2O \text{ CO}_2 \text{ eq. m}^{-2}$	$\text{g } CH_4 \text{ CO}_2 \text{ eq. m}^{-2}$
303 dias	$56,0 \pm 1,2$	$8,6 \pm 1,5$

Modelagem

Nos últimos anos tem havido um esforço crescente para representar explicitamente culturas agrícolas nos modelos biogeoquímicos dos ecossistemas terrestres, os *Agro-Land Surface Models* (Agro-LSMs) (Cuadra et al., 2012). O uso potencial dos Agro-LSMs na simulação da produtividade agrícola, dos impactos do uso da terra e do manejo das culturas nos recursos ambientais, como emissões e absorção de GEE, tem almejado a inclusão de diferentes agroecossistemas. Esses modelos utilizam representações biofísicas do sistema solo-planta-atmosfera, tais como as trocas de energia, água e momento entre o solo, a vegetação e a atmosfera; a fisiologia do dossel (fotossíntese, condutância estomática e respiração); balanço terrestre do carbono (produção primária líquida, respiração do solo, decomposição da matéria orgânica); fenologia de culturas agrícolas (emergência foliar e crescimento vegetativo, reprodutivo e senescência); transporte de soluto (i.e., dissolução do nitrogênio inorgânico fertilizado); e opções de manejo (aplicação de fertilizante, cultivo do solo, datas de plantio e colheita). Distintas abordagens têm sido usadas para incorporar diferentes tipos de culturas dentro dos Agro-LSMs – com tipos de culturas agrícolas variando de uma única variedade genérica de cultura à inclusão explícita de várias classes de culturas.

Com isso, a inerente flexibilidade de tais modelos tem levado à sua aplicação bem-sucedida em diferentes escalas, como: local, regional e global.

A modelagem biofísica tem sido utilizada na simulação dos fluxos ao longo dos ciclos de crescimento, com base nos horários observados de radiação solar global, precipitação, temperatura e umidade do ar, além das informações sobre o solo para a definição das funções hídricas. Para a cana-de-açúcar, o modelo Agro-IBIS foi calibrado com os fluxos obtidos na UR por Cuadra et al. (2012). Em continuidade, as simulações obtidas com a sua mais recente versão, o ECOSMOS (Benezoli et al., 2021), foram comparadas com os dados coletados na FAYS.

A evapotranspiração foi coerentemente simulada pelo modelo (Figura 25.6A). A principal divergência entre o modelo e os dados da realidade ocorre após a colheita, quando o modelo superestima o fluxo de calor latente. Esses desvios provavelmente estão associados ao fato de que, no modelo, a palhada tem impacto apenas no balanço de carbono, não influenciando o albedo da superfície e a resistência à troca de calor e vapor d'água entre o solo e a atmosfera. O fluxo de calor latente (LE) foi superestimado em $0,5 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$, equivalente a $0,2 \text{ mm dia}^{-1}$ de evapotranspiração (o fluxo de calor latente médio observado foi igual a $7,43 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$, equivalente a $3,03 \text{ mm dia}^{-1}$). A soma de ET simulado foi 951 mm, ou 11% acima do total, ao ser comparado com o segundo ciclo produtivo apresentado na Tabela 25.1. Os balanços de CO_2 simulados são comparados aos observados na Figura 25.6B. O modelo foi capaz de reproduzir adequadamente os fluxos de CO_2 e o total de NEE simulado ($-4920 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$), ou seja, 3% superior ao valor da Tabela 25.2.

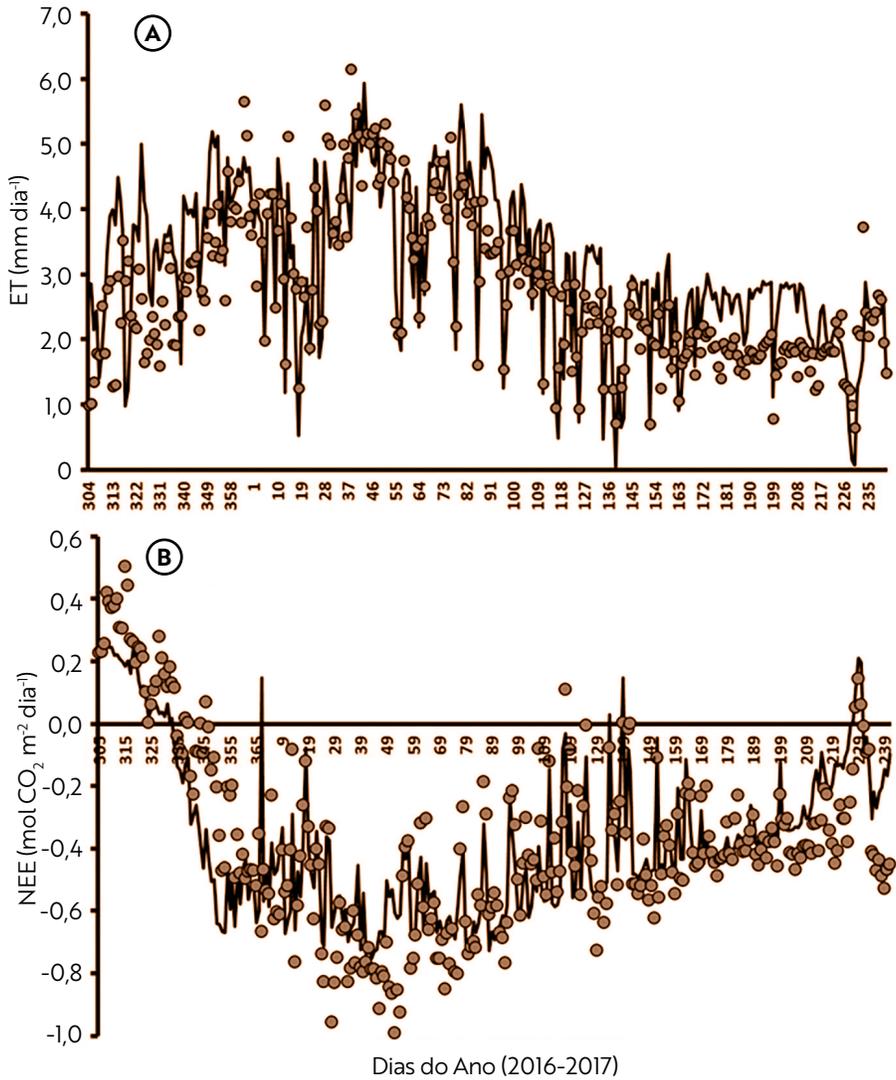


Figura 25.6. Séries temporais de (A) evapotranspiração (ET) e (B) balanços de CO₂ (NEE), tanto as observadas (círculos) quanto as simuladas (linhas), todas relacionadas ao segundo ciclo da plantação de cana-de-açúcar da FAYS.

Embora ainda haja divergências com os dados concretos, os modelos de crescimento de culturas agrícolas têm sido amplamente utilizados como ferramentas para avaliação da produtividade e como auxílio do acompanhamento das safras agrícolas. Apesar de esses modelos estarem sendo constantemente aperfeiçoados, ainda não incluem alguns processos (simplificações) e utilizam outros tantos por meio de parametrizações genéricas (Cuadra et al., 2021).

Em outra abordagem, Xin et al. (2020) utilizaram o modelo de fotossíntese da vegetação (VPM) – baseado no conceito da eficiência do uso da radiação –, calibrado com dados observados na área da USR e índices de vegetação das imagens dos sensores MODIS (satélites Aqua e Terra), para o acompanhamento da fenologia. A assimilação bruta da plantaç o de cana-de-aç car na USR foi estimada ao longo de 9 anos (entre 2000 e 2008), indicando a variabilidade do clima e o potencial quanto ao sequestro de carbono pela plantaç o ao longo do tempo.

Os modelos tamb m t m sido utilizados para a compreens o das respostas da vegeta o aos cen rios futuros promovidos pelas altera es do clima. Para a cana-de-aç car, o modelo hidrodin mico do ecossistema terrestre (SPA), ap s a calibra o baseada nos dados da USR, foi utilizado por Flack-Prain et al. (2021) na simula o de seis diferentes cen rios de mudanç s clim ticas entre os anos de 2015 e 2100. Os autores concluíram que haveria redu o da produtividade em S o Paulo por conta do alto estresse hídrico que aumentaria a sensibilidade da cultura   temperatura, contrastando com outros estudos de modelagem que indicaram possível efeito positivo do aumento das temperaturas na produ o da cana-de-aç car.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A observa o dos fluxos na escala da planta o propicia a estimativa dos balanços de  gua e CO₂, possibilitando a caracteriza o do agroecossistema como fonte ou sumidouro em rela o   atmosfera. Al m disso, a base de dados gerada pelas medi es de campo permite a avalia o comparativa com os resultados dos modelos que representam os ecossistemas agr colas analisados, contribuindo para a determina o dos efeitos das altera es na cobertura e uso do solo, no manejo das culturas e no desenvolvimento de cen rios relacionados a mudanç s clim ticas.

REFERÊNCIAS

- BENEZOLI, V.H., IMBUZEIRO, H.M.A., CUADRA, S.V., COLMANETTI, M.A.A., de ARAÚJO, A.C., STIEGLER, C., MOTOIKE, S.Y. Modeling oil palm crop for Brazilian climate conditions. *Agricultural Systems*, v. 190, article 103130, 2021.
- CABRAL, O.M.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H.; LIGO, M.A.; TATSCH, J.D.; FREITAS, H.C.; BRASÍLIO, E. Water use in a sugarcane plantation. *Global Change Biology. Bioenergy*, v. 4, n. 5, p. 555-565, 2012.
- CABRAL, O.M.; ROCHA, H.R.; GASH, J.H.; LIGO, M.A.; RAMOS, N.P.; PACKER, A.P.; BATISTA, E.R. Fluxes of CO₂ above a sugarcane plantation in Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 182-183, p. 54-66, 2013.
- CABRAL, O.M.R., da ROCHA, H.R., GASH, J.H., FREITAS, H.C., LIGO, M.A.V. Water and energy fluxes from a woodland savanna (cerrado) in southeast Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 4, part. B, p. 22-40, 2015.
- CABRAL, O.M.R., FREITAS, H.C., CUADRA, S.V., de ANDRADE, C.A., RAMOS, N.P., GRUTZMACHER, P., GALDOS, M., PACKER, A.P.C., da ROCHA, H.R., ROSSI, P. The sustainability of a sugarcane plantation in Brazil assessed by the eddy covariance fluxes of greenhouse gases. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 282-283, article 107864, 2020.
- CUADRA, S. V., COSTA, M. H., KUCHARIK, C. J., da ROCHA, H. R., TATSCH, J. D., INMAN-BAMBER, G., da ROCHA, R. P., LEITE, C. C., CABRAL, O. M. R. A biophysical model of sugarcane growth. *Global Change Biology. Bioenergy*, v. 4, n. 1, p. 36-48, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01105.x>.
- CUADRA, S.V., KIMBALL, B.A., BOOTE, K.J., SUYKER, A.E., PICKERING, N. Energy balance in the DSSAT-CSM-CROPGRO model. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 297, article 108241, 2021.
- FLACK-PRAIN, S., SHI, L., ZHU, P., da ROCHA, H.R., CABRAL, O., HU, S., WILLIAMS, M. The impact of climate change and climate extremes on sugarcane production. *Global Change Biology. Bioenergy*, v. 13, n. 3, p. 408-424, 2021.
- RAMOS, N.P., YAMAGUCHI, C.S., Pires, A.M.M., ROSSETTO, R., POSSENTI, R.A., PACKER, A.P., CABRAL, O.M.R., de Andrade, C.A., Decomposição de palha de cana-de-açúcar recolhida em diferentes níveis após a colheita mecânica. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, n. 9, p. 1492-1500, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900048>.
- RESTREPO-COUBE, N., da ROCHA, H.R., HUTYRA, L.R., de ARAUJO, A.C., BORMA, L.S., CHRISTOFFERSEN, B., CABRAL, O.M.R., de CAMARGO, P.B., CARDOSO, F.L., da COSTA, A.C.L., FITZJARRALD, D.R., GOULDEN, M.L., KRUIJT, B., MAIA, J.M.F., MALHI, Y.S., MANZI, A.O., MILLER, S.D., NOBRE, A.D., von RANDOW, C., AREU SÁ, L.D., SAKAI, R.K., TOTA, J., WOFYSY, S.C., ZANCHI, F.B., SALESKA, S.R. What drives the seasonality of photosynthesis across the Amazon basin? A cross-site analysis of eddy flux tower measurements from the Brasil flux network. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 182-183, p. 128-144, Dec. 2013.
- ROCHA, H. R.; MANZI, A. O.; CABRAL, O. M. R.; MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; SALESKA, S. R.; RESTREPO-COUBE, N.; WOFYSY, S. C.; BORMA, L. S.; ARTAXO, P.; VOURLITIS, G.; NOGUEIRA, J. S.; CARDOSO, F. L.; NOBRE, A. D.; KRUIJT, B.; FREITAS, H. C.; von RANDOW, C.; AGUIAR,

R. G.; MAIA, J. F. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. **Journal Geophysical Research: Biogeoscience**, v. 114, n. G1, article G00B12, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JG000640>.

SOLTANGHEISI, A., WITHERS, P.J.A., PAVINATO, P.S., CHERUBIN, M.R., ROSSETTO, R., DO CARMO, J.B., DA ROCHA, G.C., MARTINELLI, L.A. Improving phosphorus sustainability of sugarcane production in Brazil. **Global Change Biology. Bioenergy**, v. 11, n. 12, p. 1444-1455, 2019.

XIN, F., XIAO, X., CABRAL, O.M.R., WHITE, Jr., P.M., GUO, H., MA, J., LI, B., ZHAO, B. Understanding the Land Surface Phenology and Gross Primary Production of Sugarcane Plantations by Eddy Flux Measurements, MODIS Images, and Data-Driven Models. **Remote Sensing**, v. 12, n. 14, article 2186, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12142186>.

ZHENG, Y., LUCIANO, A.C.S., DONG, J., YUAN, W. High-resolution map of sugarcane cultivation in Brazil using a phenology-based method. **Earth System Science Data**, v. 14, n. 4, p. 2065-2080, 2022.