Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Fluxos de CO_2, água e energia em área de renovação de canavial com cultivo de soja

Rubmara Ketzer Oliveira

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

Rubmara Ketzer Oliveira
Engenheira Agrônoma

Fluxos de CO_2, água e energia em área de renovação de canavial com um cultivo de soja

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **FELIPE GUSTAVO PILAU**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Oliveira, Rubmara Ketzer

Fluxos de CO_2, água e energia em área de renovação de canavial com um cultivo de soja / Rubmara Ketzer Oliveira - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2019.

61 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Eddy covariance 2. Manejo 3. Solo 4. Evapotranspiração 5. Dióxido de carbono 6. Pousio I. Título

DEDICATÓRIA

Dedico à minha avó Neusa.
Você sempre será meu maior
exemplo de força.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pelo amor, cuidado e sustento.

Muito obrigada aos familiares que torcem por mim nas pequenas e grandes vitórias! Obrigada pelo apoio em todos os momentos.

Meu especial obrigada às pessoas que sempre cuidaram de mim de todas as formas: minha mãe Inês, por sempre lutar; minha tia Nilva ("tia ia"), a pessoa que mais torce por mim nessa vida; minha madrinha Neca, que sempre me incentivou a ir além; minha irmã Maiara, que me deu de presente o sobrinho mais lindo dese mundo (Nícolas); e em muito especial, minha avó Neusa, que sempre vai ser a pessoa mais forte que já conheci nessa vida.

Neste período de mestrado, minha avó que tanto cuidou de todos, contou com o cuidado da minha mãe e minha "tia ia".... muito obrigada por serem fortes e me darem força nesse tempo todo! Foi difícil estar longe.

Meu muito obrigada à todos que passaram na minha vida que, de alguma forma contribuíram pra esta etapa.

Agradeço também pela oportunidade de morar na Vila da Pós Graduação da ESALQ, onde fui acolhida e tive muito companheirismo e amizade.

Aos meus amigos que acompanharam esta trajetória, deixo meu agradecimento e comprometimento em contribuir de volta no que precisarem.

Agradeço muito à professora Débora Regina Roberti e seus orientados, que sempre me receberam de braços abertos e não mediram esforços em me auxiliar à conquistar o conhecimento necessário para realização deste trabalho.

Obrigada ao meu orientador, Felipe Gustavo Pilau, pela oportunidade de realizar um sonho não só meu, mas de toda a minha família. Conte sempre comigo para o que precisar.

Agradeço a AFOCAPI / COPLACANA, por disponibilizar sua área de cultivo para realização desta pesquisa e ao projeto "Previsão Imediata de Tempestades Intensas e Entendimento dos Processos Físicos no Interior das Nuvens. O SOS-CHUVA (Sistema de Observação e Previsão de Tempo Severo)", processo Fapesp n.2015/14497-0, pelo financiamento parcial da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Rubmara Ketzer Oliveira

SUMÁRIO

RESUMO 6
ABSTRACT 7
1. INTRODUÇÃO 9
2. OBJETIVOS 11
2.1. Objetivo geral 11
2.2. Objetivos específicos 11
3. REFERENCIAL TEÓRICO 13
3.1. Trocas de energia e massa em áreas agrícolas 13
3.2. A covariância dos vórtices turbulentos 14
3.3. Trocas líquidas de CO2 e água entre a superfície e a atmosfera 15
4. MATERIAL E MÉTODOS 23
4.1. Local de estudo 23
4.2. Cobertura do solo e manejo da área 25
4.3. Instrumentação 26
4.4. Tratamento de dados dos fluxos 28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 35
5.1. Condições meteorológicas do período de estudo 35
5.2. Fluxos de massa e energia após colheita de cana-de-açúcar com solo em pousio 38
5.3. Fluxos de massa e energia em cultivo de soja durante renovação do canavial 42
5.4. Análise dos fluxos de massa e energia no período de renovação do canavial 50
5.5. Balanço de água e carbono na renovação do canavial 52
6. CONCLUSÕES 55
REFERÊNCIAS 57

RESUMO

Fluxos de CO_2, água e energia em área de renovação de canavial com um cultivo de soja

Cultivos de extensa área de produção e manejo intensivo, como a indústria canavieira, demandam maior responsabilidade em relação ao conhecimento da sua contribuição na diminuição ou aumento dos gases de efeito estufa. Dentro do manejo do sistema de produção de cana-de-açúcar existe uma etapa de renovação do canavial, período pós última colheita que antecipa a implantação de um novo cultivo de cana. O estudo tem por objetivo avaliar a contribuição do período de renovação de um canavial em relação aos fluxos de massa e energia dentro do sistema produtivo de cana-de-açúcar, considerando a inserção de um cultivo de soja após período de pousio sobre solo com cobertura de palha e sem cobertura, em um canavial localizado em Piracicaba-SP, Brasil. A obtenção dos fluxos foi realizada com o método "Eddy Covariance". Com o solo em pousio e cobertura de palha, o fluxo líquido de CO_2 (NEE) médio foi de 2,51 µmolCO_2 m^{-2} s^{-1} e evapotranspiração média do período de 0,72 mm d^{-1}. O período de pousio com solo sem cobertura teve um NEE de 3,10 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e evapotranspiração média do período de 2,04 mm d^{-1}. Com a inserção de um cultivo de soja, a área passou a apresentar um comportamento de consumo no lugar da emissão de CO_2, com um fluxo médio diário de NEE (da semeadura à maturação de colheita) de -1,47 µmolCO_2 m^{-2} s^{-1} e evapotranspiração média de 4,52 mm d^{-1}. Para o balanço energético da renovação do canavial, 84,6% da energia disponível no período de pousio sob os dois manejos de cobertura foi utilizada pelo fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível, e para o cultivo de soja esta relação foi de 73,4%. Considerando o balanço da troca líquida de CO_2 em relação às médias apresentadas, o saldo é positivo, ou seja, a renovação deste canavial foi responsável por maior emissão que consumo de CO_2, de acordo com o manejo realizado. O cultivo da soja não compensou a emissão do período em pousio, mas tem potencial de amenizar no total do período.

Palavras-chave: Eddy covariance; Manejo; Solo; Evapotranspiração; Dióxido de carbono; Pousio

ABSTRACT

Carbon dioxide, water and energy fluxes in a sugarcane renewal area with a soybean crop

Crops with extensive production areas and intensive management such as the sugar cane industry demand greater responsibility in relation to the knowledge of their contribution in the reduction or increase of greenhouse gases. Within the management of the sugar cane production system there is a stage of renewal of the cane field, a period after the last harvest that anticipates the implantation of a new sugarcane crop. The objective of this study is to evaluate the contribution of the renewal period of a sugarcane field in relation to the mass and energy flows within the sugarcane production system, considering the insertion of a soybean crop after fallow period on soil with cover of straw and without cover, in a field located in Piracicaba-SP, Brazil. Flows were obtained using the "Eddy Covariance" method. In the fallow soil with straw cover, the mean net CO_2 flux (NEE) was of 2,51 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} and average evapotranspiration of the period was 0,72 mm day^{-1}. The fallow period without cover had an mean NEE of 3,10 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} and average evapotranspiration of 2,04 mm day^{-1}. With the insertion of a soybean crop, the area presented assimilation in place of CO_2 emission, with a daily mean of NEE (from sowing to harvest maturation) of -1,47 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} and average evapotranspiration of 4,52 mm day^{-1}. For the energy balance of the sugarcane renewal, 84,6% of the available energy in the fallow period under the two cover treatments was used by the latent heat flux and sensible heat flux. For soybean cultivation this relation was 73,4%. Considering the balance of the net CO_2 exchange in relation to the averages presented, the balance is positive, that is, the renovation of this sugarcane field was responsible for higher emissions than CO_2 assimilation, according to the management implemented. The soybean crop did not compensate for the fallow period, but it has the potential to reduce the total balance.

Keywords: Eddy covariance; Management; Soil; Evapotranspiration; Carbon dioxide; Fallow

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), com mais de 40% da produção total (FAO, 2018a). Na safra 2016/2017 a área plantada no país atingiu mais de 10 milhões de hectares, com uma produção de mais de 700 milhões de toneladas, sendo mais da metade da área plantada e da produção provenientes do estado de São Paulo (IBGE, 2018).

A agroindústria canavieira é um dos sistemas mais tradicionais e importantes no Brasil. É um sistema de cultivo com atividades de alta intensidade de manejo e várias etapas e processos deste o plantio do canavial até a produção final. Exige um grande investimento financeiro e também tecnológico de alto nível, tem grande importância no cenário econômico mundial e necessita de uma compreensão abrangente das características de cada etapa do processo produtivo e sua interação com o ambiente em que está inserido.

Dentro do manejo de um sistema canavieiro, existe um período de mudança na área de cultivo. Após sucessivos anos de produção, em média cinco, ocorre a renovação do canavial, principalmente devido à queda de rendimento ao longo dos anos. A renovação envolve um período de pousio da área, em que o solo fica sem cultivo de cana por um ano, permitindo diferentes manejos da área, assim como a inserção de um cultivo agrícola de ciclo curto que promova melhoria nas características do solo e seja uma alternativa econômica para o setor (SELESTRINO et al., 2014 & SANTOS, 2010). A renovação é uma prática muito realizada nos canaviais brasileiros e, de acordo com dados da CONAB (2018), todo o ano, em média, 10% das áreas de cultivo de cana-de-açúcar estão em renovação no Brasil.

Segundo levantamento de safra (CONAB, 2018), a soja (*Glycine max*) vem ocupando progressivamente áreas em renovação de canavial em sistema de rotação de culturas no estado de São Paulo, tornando-se parte importante no ciclo de produção canavieira. Com seu alto valor agregado e eficiência de produção, é um atrativo aos agricultores (PAVÃO et al., 2015). Segundo o IBGE (2018), na safra de 2017 a soja atingiu uma produção superior a 3 milhões de toneladas no estado com mais de 900 mil hectares plantados.

Durante este período de transição entre o final do ciclo produtivo do canavial e início de implantação de outro na área, o manejo do solo e a cultura intercalar, podem modificar intensamente os balanços de massa e energia, principalmente CO_2 e água (MOITINHO, et al. 2013; LA SCALA JR, 2006; REICOSKY, 1997).

A agricultura é o setor que mais enfrenta desafios em relação às mudanças climáticas devido às crescentes demandas da população mundial a cada ano. O gás carbônico (CO_2) é um gás de efeito estufa (GEE) e existe uma tendência de aumento das suas emissões no mundo em todos os setores ligados às atividades humanas (FAO, 2016).

O manejo empregado no solo possui influência na alteração dos fluxos de CO_2 no ambiente, com potencial de impulsionar sua emissão ou capturá-lo da atmosfera pela sua absorção. Assim

também, o regime hídrico possui uma grande influência sobre o fluxo de CO_2, podendo instigar ou inibir o mesmo levando em conta a relação água/aeração do solo (LINN & DORAN, 1984). É de se esperar que, em cultivos de demasiada importância que envolvem grandes áreas e manejo intensificado como o de cana-de-açúcar, o estudo do fluxo de CO_2 auxilie gerando informação da contribuição do sistema agrícola para diminuição ou aumento da emissão deste GEE.

Medidas realizadas com o método Eddy Covariance (EC), possibilitam a quantificação da troca de energia, água e CO_2 em diferentes ambientes, possibilitando o conhecimento da contribuição dos fluxos na produção agrícola e a relação com o ambiente. As plantas são responsáveis pela assimilação do CO_2 da atmosfera e sua emissão se dá pela atividade microbiana no solo e respiração de raízes (LUNDEGÅRDH, 1927).

A renovação do canavial é uma etapa importante de manejo do sistema de cultivo devido às diferentes possibilidades de interações entre o ambiente em que está inserido e a condução do manejo na área. A avaliação dos fluxos de CO_2 e água, assim como a interação com o ambiente em diferentes situações de manejo, possui grande importância quanto a contribuição do período de renovação de um canavial no balanço de carbono e utilização de água e energia do sistema produtivo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a contribuição do período de renovação de um canavial em relação aos fluxos de massa e energia dentro do sistema produtivo de cana-de-açúcar, considerando a inserção de um cultivo de soja após período de pousio.

2.2. Objetivos específicos

Analisar as relações dos componentes do balanço de energia ao longo do tempo e em diferentes coberturas de solo.

Quantificar as trocas de CO_2 e água em função da cobertura do solo e condições meteorológicas.

Caracterizar o sistema de manejo em relação ao balanço de carbono, balanço de energia e uso de água.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Trocas de energia e massa em áreas agrícolas

A camada limite atmosférica (CLA), foi definida por Stull (1998) como uma parte da troposfera que é diretamente influenciada pela superfície da terra, que em uma escala de tempo de uma hora ou menos, interage com os forçamentos da superfície, que são forças de fricção, evaporação, transpiração, transferência de calor, emissão de poluentes e as modificações de fluxos induzidas pelo terreno.

O balanço de energia entre a superfície e a atmosfera é dado pela energia disponível (saldo de radiação, Rn), definido a partir dos balanços das radiações de ondas curtas (Sw) e ondas curtas (Lw):

$$Rn = (Sw \downarrow \ -Sw \uparrow) + (Lw \downarrow \ -Lw \uparrow) \tag{3.1}$$

sendo Sw↓ a radiação solar incidente, Sw↑ a radiação solar refletida, Lw↓ a radiação de onda longa emitida pela atmosfera para a superfície e Lw↑ a radiação de onda longa emitida pela superfície.

Em sua forma simplificada, a energia líquida (Rn), é particionada entre os processos de aquecimento do solo (fluxo de calor do solo, G), aquecimento do ar (fluxo de calor sensível, Hs) e para a mudança do estado da água (Fluxo de calor latente, LE). Sendo representado o balanço de energia por:

$$Rn = LE + Hs + G \tag{3.2}$$

O balanço de energia (Equação 3.2), tal como definido, desconsidera aportes energéticos advectivos e o armazenamento de calor, por representarem uma fração muito pequena do Rn.

Essencialmente, a diferença entre a energia que entra na superfície e a energia que sai da superfície, representada pelo balanço de energia, representa a energia utilizada pelo sistema.

Em condições de superfícies úmidas, grande parte da energia disponível é utilizada como calor latente (evapotranspiração). Já em superfícies secas, os processos de aquecimento do solo e do ar são predominantes no balanço energético (PEREIRA et al., 2002).

A radiação solar aquece a superfície da terra e, consequentemente, a superfície aquece a camada de ar mais próxima do solo. Esta camada aquecida próxima à superfície sobe para estratos mais elevados da atmosfera, enquanto o ar frio desce mais denso para a superfície. Durante o dia, as forçantes térmicas e mecânicas são as responsáveis por gerar turbulência. O aquecimento da superfície gera as forçantes térmicas e o cisalhamento do vento pelo atrito com a superfície gera as forçantes mecânicas. Durante a noite, ocorre a inversão térmica pelo resfriamento da superfície. Esta camada é caracterizada por maior estabilidade atmosférica, suprimindo a turbulência e ampliando a extensão da CLA.

Os deslocamentos de massa, calor e momentum ocorrem pelo transporte turbulento, que são as flutuações instantâneas de diferentes escalares em movimentos circulares e irregulares em forma de

redemoinhos ou vórtices (*eddies*, em inglês), caracterizados pela instabilidade e movimentos de deformações e sobreposições destes redemoinhos (SOUZA et al., 2011).

3.2. A covariância dos vórtices turbulentos

A técnica de covariância dos vórtices turbulentos (EC, do inglês, *Eddy covarince*) (AUBINET et al., 2012) é usada para observações das trocas de massa e energia entre a superfície e a atmosfera. O método EC fornece medições diretas de fluxos turbulentos verticais como os fluxos de calor latente e sensível, o fluxo de CO_2 e fluxo de momentum. É uma metodologia complexa que utiliza da combinação de anemômetros sônicos e analisadores de gás como instrumentação para obter medidas de alta frequência, com possibilidade de aquisição de dados de fluxos que representam extensas áreas de estudo de forma contínua.

O fluxo (*F*) é a transferência de uma quantidade por unidade de área e por unidade de tempo. O fluxo de um escalar "x" pode ser definido pela média temporal do produto entre ele a componente vertical do vento (*w*):

$$F_x = \overline{wx} \tag{3.3}$$

O fluxo escalar vertical líquido é a diferença entre os movimentos dos redemoinhos ascendentes e descendentes e seus constituintes (o que carregam). Para descrever estes movimentos, é utilizada a decomposição de Reynolds, que divide a medida instantânea (x) em uma parte flutuante, x' (turbulência) e uma parte média, $\bar{x}$ (estável), sendo:

$$x = \bar{x} + x' \tag{3.4}$$

Sendo assim, a equação 3.3 fica:

$$F_x = \overline{(\bar{w} + w')(\bar{x} + x')}\ . \tag{3.5}$$

Considerando a realização das operações da equação 3.5 e seguindo o desenvolvimento das equações mostrado por Aubinet et al. (2012), o fluxo turbulento, pela técnica EC, se dá por:

$$F_x = \overline{w'x'} \tag{3.6}$$

Seguindo o princípio da equação 3.6, os fluxos de calor latente (LE), calor sensível (Hs) e CO_2 são calculados, respectivamente como:

$$LE = \rho\lambda\overline{w'q'}\ , \tag{3.7}$$

$$Hs = \rho S_h\overline{w'T'}\ , \tag{3.8}$$

$$F_{CO2} = \rho\overline{w'C'}\ , \tag{3.9}$$

em que: "λ" é o calor latente de evaporação, "ρ" é a densidade do ar seco, "q'" é a umidade específica do ar, S_h é o calor específico do ar em pressão constante, T' é a temperatura sônica e "C'" é a concentração de CO_2.

Os dados de fluxos obtidos pelo método *Eddy Covariance* não alcançam a igualdade da equação 3.2, não sendo possível realizar o "fechamento" do balanço de energia devido ao resíduo

gerado pelas medições de seus componentes principais (WILSON et al., 2002), pois a energia dos processos radiativos é maior do que a energia utilizada em processos turbulentos. O resíduo (Res) é:

$$Res = Rn - G - Hs - LE \ . \tag{3.10}$$

O ajuste do balanço de energia pode ser realizado pela distribuição do resíduo proporcionalmente para o Hs e LE pela razão de Bowen (β) (BOWEN, 1926), assumindo-se uma condição de similaridade entre os fluxos (equação 3.11). O não fechamento do balanço de energia pelo método Eddy Covariance não está relacionado a um problema dos equipamentos de medições, mas possui uma forte relação com a heterogeneidade do terreno influenciando na turbulência e o armazenamento de energia pela vegetação (FOKEN et al., 2012).

$$\beta = \frac{H}{LE} \tag{3.11}$$

Sendo definidos LE^* e Hs^* após a distribuição de energia como:

$$LE^* = \frac{(Rn-G)}{(1+\beta)} \tag{3.12}$$

$$Hs^* = \frac{\beta(Rn-G)}{(1+\beta)} \tag{3.13}$$

Após o fechamento do balanço de energia pelo método Razão de Bowen, a média diária do fluxo de calor latente (LE), em W m^{-2}, pode ser convertida para evapotranspiração, em mm d^{-1}, através da multiplicação pelo fator de conversão 0,0353.

3.3. Trocas líquidas de CO_2 e água entre a superfície e a atmosfera

A transferência de vapor d'água do solo para a atmosfera é fortemente influenciada por características de solo e da demanda atmosférica. A análise do fluxo de calor latente (LE) permite acompanhar o comportamento deste transporte de vapor em um solo ao longo do tempo, mesmo com diferentes características de cobertura.

A evaporação da água de uma superfície (E) é um processo físico que, essencialmente, consiste na transformação da água em um estado líquido para o estado gasoso, ou seja, é o processo que determina a troca de vapor de água entre a superfície e a atmosfera. Em um sistema vegetado, ocorre uma contínua interação entre o solo, a planta e a atmosfera, por meio da absorção de água pelas raízes das plantas, transporte dentro da planta e liberação em forma de vapor d'água pela transpiração (T) das plantas. Quando combinadas, as duas formas de transferências de água no sistema solo-planta-atmosfera formam a evapotranspiração (ET) (ALLEN et al., 1998 & PENMAN, 1948).

A evapotranspiração a partir de uma superfície de referência sem déficit hídrico é denominada de evapotranspiração de referência (ETo), a qual é influenciada exclusivamente por parâmetros aerodinâmicos, termodinâmicos e fisiológicos, podendo ser calculada por meio modelos que utilizem variáveis meteorológicas como dados de entrada. O modelo recomendado pela FAO 56

(ALLEN et al, 1998) para a estimativa da ETo é a equação de Penman-Montheith (PENMAN, 1956 & MONTEITH, 1965), dada por:

$$ETo = \frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\ (1 + 0{,}34\ u_2)} \tag{3.14}$$

sendo: *ETo* a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); *Rn* o saldo de radiação (MJ m^{-2} d^{-1}); *G* o fluxo de calor do solo (MJ m^{-2} d^{-1}); *T* a temperatura do ar a 2 metros de altura (ºC); u_2 a velocidade do vento a 2 metros de altura (m s^{-1}); e_s a pressão de vapor de saturação (kPa); e_a a pressão parcial de vapor (kPa); Δ a declividade da curva de pressão saturante de vapor (kPa $ºC^{-1}$); e γ o coeficiente psicrométrico (kPa $ºC^{-1}$). Em Allen et al. (1998), são encontradas as equações padronizadas para o cálculo dos parâmetros da equação anterior.

Por definição, a ETo seria a quantidade de água que tem potencial de ser utilizada por uma superfície coberta por vegetação rasteira em pleno vigor, possivelmente um gramado com altura de 8 a 15 cm, sem existência de restrição hídrica e ampla área de bordadura, sendo assim a representação de um potencial evaporativo do local com as condições meteorológicas vigentes.

A evapotranspiração de uma cultura sob condições consideradas "padrão", é denominada ETc, que é a evapotranspiração de um cultivo com ótimo estado nutricional, livre de doenças, com grande área de cultivo, com condições ótimas de disponibilidade de água no solo e em plena produção sob estas condições climáticas. A ETc é dada pela relação da ETo com um coeficiente de cultura (Kc) que insere as características para diferentes tipos de cultura, além da cultura de referência, que muda ao longo do ciclo de crescimento. A evapotranspiração com condições semelhantes à ETc, mas com existência ou não de restrição hídrica é denominada ETr (Allen et al., 1998).

O fluxo líquido de CO_2 (NEE, em inglês: *Net Ecossystem Exchange*), pode ser particionado em Produção Primária Bruta (GPP, em inglês: *Gross Primary Production*), que representa a fotossíntese, ou seja, a absorção de CO_2 pelo ecossistema, e a Respiração do Ecossistema (R_{eco}). A R_{eco} contempla a respiração vegetal e de microorganismos do solo, permitindo a avaliação temporal do processo predominante e sua influência no balanço de carbono (LASSLOP et. al., 2010).

$$NEE = GPP + R_{eco} \tag{3.15}$$

Geralmente as mudanças no fluxo médio diário de CO_2 são influenciadas pelo teor de água no solo, estádio de desenvolvimento da planta e disponibilidade de energia. As alterações sazonais, decorrem principalmente a partir de variações da umidade do solo e do manejo empregado (PRUEGER et al., 2004). Durante o ciclo de um cultivo, o NEE é influenciado pela predominância da R_{eco} ou do GPP, variando do início do ciclo (com menor assimilação de CO_2 em relação ao consumo) e atingindo o máximo de consumo geralmente junto ao período de maior vigor da planta, em que GPP supera a R_{eco} (ŞAYLAN et al., 2011). As raízes das plantas podem contribuir com um incremento de até 30% no fluxo de CO_2 pela R_{eco} (LUNDEGÅRDH,1927).

3.3.1. Solo em pousio

Os fluxos de CO_2 e água possuem variação conforme a cobertura de solo. Áreas pós-colheita de cana-de-açúcar com remoção da palha residual apresentam maior vulnerabilidade em relação a emissão de CO_2 em comparação aos solos mantidos com cobertura de palha. Em seu estudo, Moitinho et al. (2013), destacaram que o aumento do teor de água no solo resultou no incremento da atividade microbiana (representada pelo aumento da emissão de CO_2). Para La Scala Jr. (2006), o aumento da temperatura e do teor de água do solo pode influenciar no aumento das emissões de CO_2, independente da cobertura. A emissão de CO_2 pelo solo, ocorre principalmente devido à decomposição microbiana do material vegetal, seguido pela respiração das raízes (LUNDEGÅRDH, 1927). O estudo realizado por Chamizo et al. (2017) aponta que uma maior temperatura do solo no período noturno (+4,9 ºC em um solo descoberto em relação a um solo com cobertura vegetal) pode ter influência no incremento da respiração do ecossistema pela estimulação da atividade microbiana.

A colheita mecanizada (também denominada de "colheita verde") em substituição da queima do canavial, resulta na deposição de resíduos culturais sobre o solo em cada ano de colheita, formando uma camada protetora sobre o solo, podendo chegar a 30 Mg ha^{-1} de palha sobre o solo pós-colheita (TRIVELIN et al., 1996). Com a renovação do canavial, a palha residual pode ser retirada ou incorporada, alterando assim a superfície do solo e promovendo mudanças em suas características. Vasconcelos et al. (2018), afirmam que a manutenção da palha de cana-de-açúcar na superfície do solo aumentou as taxas de respiração, assim como manteve a umidade do solo dentro da interface solo-palha por maior período de tempo em relação ao solo sem cobertura.

O conteúdo de água no solo pode inibir a emissão de CO_2 caso o percentual de poros com água for superior a 60% da sua capacidade de armazenamento pois, o deslocamento do ar dos poros resulta na inibição da atividade aeróbica dos microorganismos do solo (LINN & DORAN, 1984).

Em relação à evaporação, de acordo com o trabalho de Peres et al. (2010), um solo coberto com palha residual de cana (1,5 kg m^{-2}) apresentou menor perda de água do solo por evaporação, com 0,21 mm d^{-1}, em relação ao solo descoberto, com 0,45 mm d^{-1}. O solo sem cobertura apresentou uma diferença superior à 50% na perda de água por evaporação, em comparação ao solo coberto com palha residual de cana-de-açúcar, sendo ressaltada a importância da manutenção da palha em solo pós-colheita de cana-de-açúcar na conservação da água armazenada nas camadas superficiais dos solos agrícolas. Segundo Wuest (2017), o solo coberto com resíduo vegetal obtém maior conservação do armazenamento de água.

Em seu experimento, Van Donk et al. (2010) avaliaram medidas realizadas por dois anos em solo sem cobertura e solo com cobertura de material vegetal, apontando uma maior conservação da água armazenada no solo coberto com resíduo, que influenciou em um aumento de 13% de produtividade no primeiro ano de estudo e 9% no segundo ano, em comparação ao solo descoberto.

Um experimento com colunas de solo e chuva controlada, foi conduzido no trabalho de Coppens et al. (2006), em condições de solo coberto com resíduo vegetal de uma oleaginosa a uma densidade de 7,4 ton ha^{-1} e sem cobertura. Neste caso, o resíduo sobre a superfície do solo reduziu em 47-59% a perda de água do solo.

3.3.2. Cultura da Soja

A soja é um cultivo de ciclo curto, muito utilizada em sistemas de rotação por apresentar adaptabilidade à diferentes condições de solo e clima, possui maior exigência hídrica nas fases iniciais de germinação e emergência (para o correto estabelecimento do cultivo) e nas fases de máximo desenvolvimento, que são as de floração e enchimento de grãos. A exigência hídrica da soja vai aumentando conforme o seu desenvolvimento, chegando ao máximo e diminuindo drasticamente conforme a maturação da planta (FAO, 2018a; MONTEIRO, 2009).

Na Tabela 1, estão alguns dos trabalhos que quantificam o consumo de água pela soja em diferentes localidades e manejos com a utilização do método Eddy Covariance. Os valores médios de evapotranspiração para os ciclos de cultivo de soja analisados variam de 2,64 a 5,2 mm d^{-1}, sendo o menor valor médio obtido no trabalho de Wang et al. (2018), realizado em diferentes locais dos EUA, resultando de uma média multi-anual, podendo ser destacada a precipitação média e número de dias de ciclo muito elevados em comparação aos outros estudos apresentados. Os maiores valores de evapotranspiração foram encontrados por Anapalli et al. (2018), com experimento realizado em Mississippi, nos EUA. O estudo apresenta diferentes metodologias de obtenção da evapotranspiração e sua variação de acordo com o método nas mesmas condições meteorológicas e de manejo. A evapotranspiração média dos estudos apresentados na Tabela 1 é de 3,8 mm d^{-1}.

Na Tabela 2 são encontrados trabalhos que quantificam e caracterizam o fluxo de CO_2 em cultivos de soja em diferentes locais e manejos com a utilização do método Eddy Covariance. Com a notável variabilidade dos fluxos acumulados, médios e máximos de NEE e GPP apresentados pelos diferentes estudos da Tabela 2, percebe-se que o fluxo de CO_2 varia conforme as diferenças de local, variedade de cultivo, condições climáticas, tipos de solo, manejo da área e duração do ciclo. Em relação aos demais, o estudo realizado por Şaylan et al. (2011) é o que apresenta menores valores de fluxo líquido acumulado (NEE) do ciclo, podendo ser devido às condições elevadas de umidade e temperatura do ar, precipitação, irrigação e conteúdo de água no solo, que incentivam a respiração do ecossistema e diminuem o GPP.

De acordo com estes estudos, a distribuição do GPP ao longo do ciclo de cultivo é muito ligada às variações do índice de área foliar (IAF) da soja, geralmente coincidindo os períodos de máximo desenvolvimento da planta com os períodos de maiores picos de GPP. O início de

estabelecimento da planta e maturação final que antecipa a colheita são caracterizados por poderem apresentar maiores fluxos de emissão de CO_2 em relação ao consumo.

Em São Paulo, um canavial tem o potencial de assimilar um total de 1964 (±44) g C m^{-2} em um ciclo de cultivo com boa distribuição hídrica e 960 (±64) g C m^{-2} em um outro ciclo de cultivo com restrição hídrica (CABRAL et al., 2013), com evapotranspiração total de 829 mm e 685 mm, respectivamente (CABRAL et al., 2012). Em relação aos valores apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, um canavial é responsável por um aior consumo hídrico e de CO_2 durante o ciclo em comparação com um cultivo de soja.

Tabela 1. Avaliação da evapotranspiração do cultivo de soja encontradas na literatura. Valores de precipiração e irrigação acumuladas durante o ciclo são representadas pelas letras P e I, respectivamente. O método Eddy Covariance é representado pela sigla EC.

Local	Ano	ET ciclo (mm d^{-1})	Precipitação/Irrigação acumulados (mm)	Número de dias analisados	Método/Condição	Fonte
Nebraska, EUA	2002	3,36	474 (I)	141	EC - Soja irrigada	SUYKER & VERMA, 2009.
		3,08	441 (P)	143	EC- Soja sequeiro	
	2004	3,09	430 (I)	139	EC- Soja irrigada	
		3,18	420 (P)	132	EC- Soja sequeiro	
Cruz Alta, Brasil	2009	3,2	410,8 (P)	128	EC- Soja sequeiro	MOREIRA et al., 2015.
Mississippi, EUA	2016	4,4	525 (P) + 90 (I)	133	EC- Soja irrigada	ANAPALLI et al., 2018.
		5,2			Resíduo balanço de energia - Soja irrigada	
		4,7			EC corrigido com método razão de Bowen - Soja irrigada	
		5,1			EC corrigido com método calor latente - Soja irrigada	
Illinois e Minnesota, EUA*	2002 a 2011	2.64	935 (P)	168	EC- Soja sequeiro	WANG et al., 2018.

* Valores médios para os diferentes locais e diferentes anos.

Tabela 2. Análises de fluxo de CO_2 em cultivos de soja com método Eddy Covariance encontradas na literatura. Os fluxos são representados por: N – fluxo líquido (NEE); G – produção primária bruta (GPP); 1 – valor máximo da média diária (µmolCO_2 m^{-2} s^{-1}); 2 – média do ciclo (µmolCO_2 m^{-2} s^{-1}); 3- acumulado do ciclo (g CO_2 m^{-2}). Valores de precipiração e irrigação acumuladas durante o ciclo são representadas pelas letras P e I, respectivamente.

Local	Ano	Fluxo	Precipitação/Irrigação acumulados (mm)	Número de dias analisados	Manejo	Fonte
Oklahoma, EUA	2016	−23,18 (N1) -2873,61 (G3)	240 (P)	112	Soja sequeiro	WAGLE et al., 2017
Mississippi, EUA		−34,78 (N1) -4495,75 (G3)	491 (I)	91	Soja irrigada	
Buenos Aires, Argentina	2011	-932 (N3)	*	182	Soja sequeiro	LEWCZUK et al., 2017
	2012	-807 (N3)		154	Soja sequeiro	
Nebraska, EUA	2002 a 2006	-3284,65 (G3) -13,90 (G1)	*	142	Soja sequeiro (média de 3 safras)	SUYKER & VERMA, 2010.
		-3655,32 (G3) -14,87 (G1)	*	142	Soja irrigada (média de 3 safras)	
Illinois e Minnesota, EUA	2011	-5,03 (G2)	935 (P)	168	Soja (média de diferentes locais e manejos)	WANG et al., 2018.
Tottori, Japão	2005	-341 (N3) -1170 (G3)	720,5 (P) + 325,5 (I)	126	Soja irrigada	ŞAYLAN et al., 2011.

* Locais sem informações de precipitação acumulada para o período, mas com indicação de chuva abaixo do esperado para os períodos analisados.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Local de estudo

O trabalho foi realizado em uma área comercial de produção de cana-de-açúcar em Piracicaba, São Paulo em latitude -22°46'9.04" S e longitude -47°34'47.10” O, com altitude de 626 m acima do nível do mar (Figura 1). Uma parcela de 3,7 ha foi delimitada para o experimento, dentro dos 320 hectares da área total. A área possui colheita mecanizada de cana-de-açúcar desde 1998. O clima de Piracicaba é caracterizado por Cwa (Clima subtropical, com verão quente), apresentando um inverno seco e verão chuvoso (PEEL et al., 2007). A média histórica (1927 a 2017) da precipitação acumulada anual é de 1290 mm e a temperatura média anual é de 21,7 ºC. O solo do local é um Latossolo que apresenta textura muito argilosa com teores de 61% argila, 14% silte e 25% areia, com densidade do solo de 1,29; 1,44; 1,51; e 1,33 g cm^{-3} nas camadas de 0,05; 0,15; 0,25; e 0,35 m de profundidade, respectivamente.

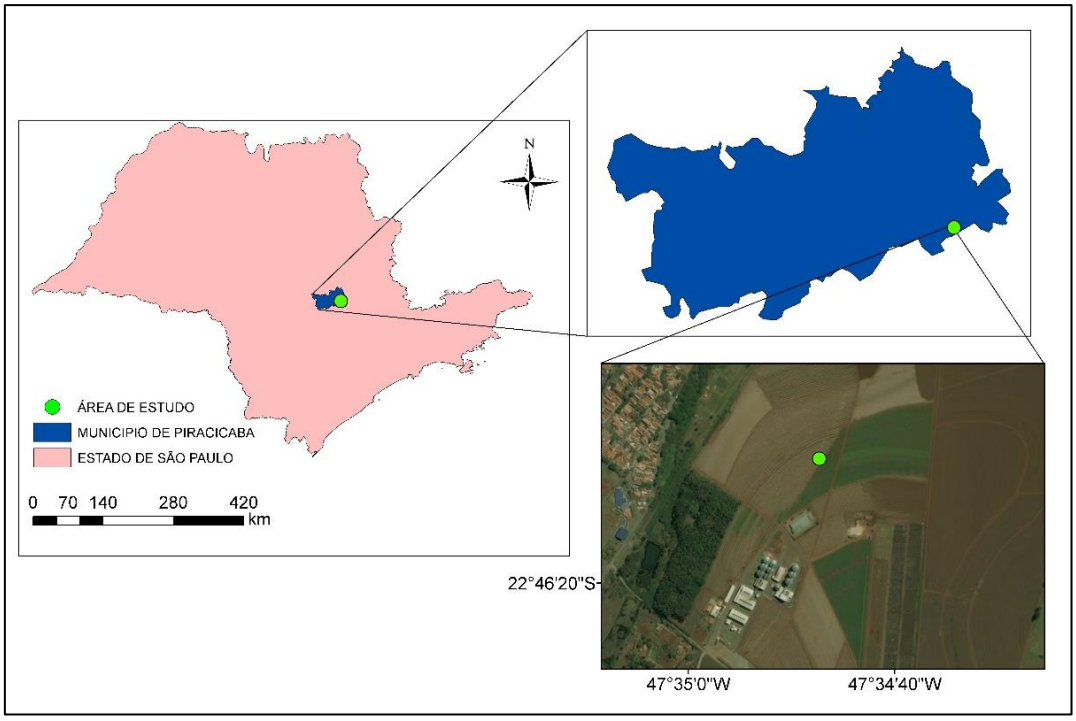

Figura 1. Localização da área de estudo em Piracicaba, SP. Fonte: Autora.

O período de obtenção dos dados foi de junho de 2017 a março de 2018, apresentando variação da temperatura e precipitação conforme esperado para a cidade de Piracicaba (Figura 2). Com exceção dos meses de janeiro e agosto, a precipitação no período de estudo foi abaixo da média para o local, sendo os meses de fevereiro e setembro responsáveis pelas menores médias em relação à média

histórica (1917-2017). A temperatura média do local de estudo também ficou próxima à média histórica de Piracicaba.

Durante o período de medições, com a instrumentação de fluxo a 5,0 e 2,54 m de altura, a direção predominante do vento foi leste e a velocidade média do vento foi 2,58 m s^{-1} para o primeiro período e 1,54 m s^{-1} para o segundo (Figura 3).

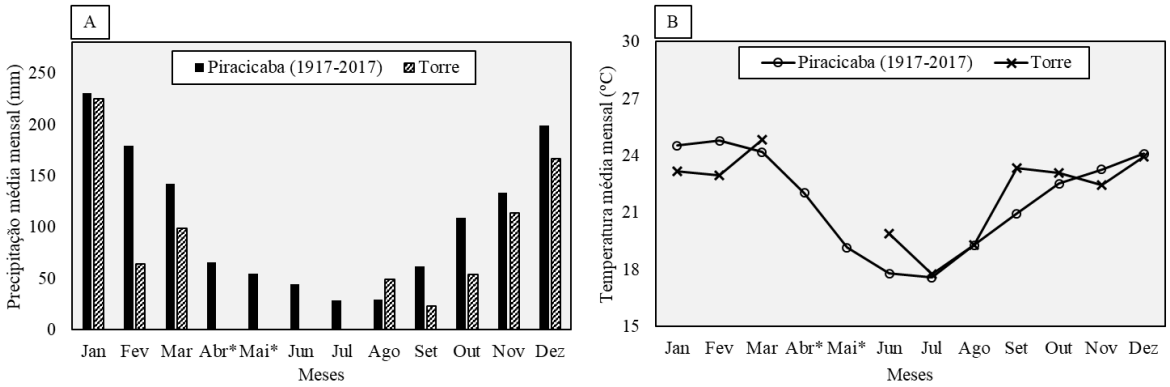

Figura 2. Médias mensais de (A) precipitação acumulada e (B) temperatura do local de estudo (Torre) no período analisado e do município de Piracicaba, de acordo com a média histórica de 1917 a 2017. Os meses de abril e maio (*) não apresentam dados de medida e no final do mês de junho e no mês de julho não ocorreu precipitação pluvial.

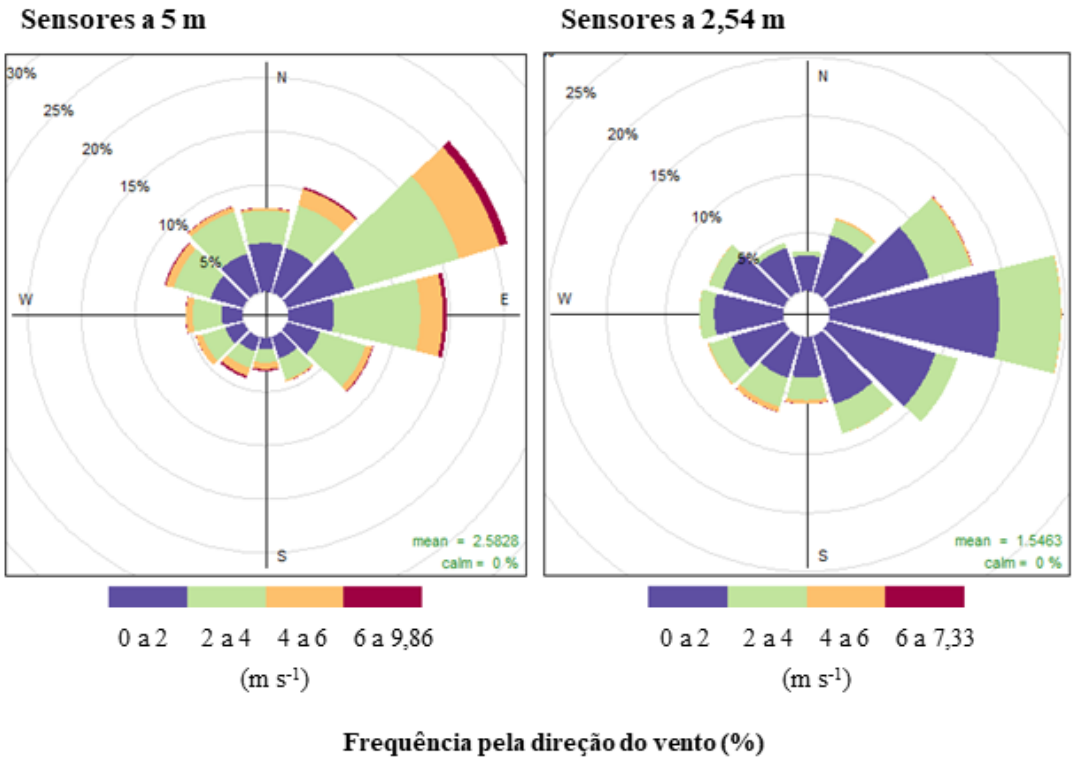

Figura 3. Frequência de direção e velocidade do vento média para o período de estudos em duas alturas dos sensores.

4.2. Cobertura do solo e manejo da área

Após cinco anos produtivos, a última colheita mecanizada do canavial foi realizada em 26/06/2017. Após a colheita, a área entrou em processo de preparo do solo para a renovação do canavial, com eliminação da soqueira. Após o preparo, o solo ficou em pousio com a palha residual dos cinco anos de cultivo do canavial, com uma altura de 15 cm cobrindo completamente o solo por 64 dias, sendo esse período classificado como *Cp*. No dia 01/09/2017, o solo foi revolvido e a palhada foi incorporada ao solo, que passou a ficar descoberto por 84 dias, sendo denominado de período *Sp*. Em 24/11/2017 foi realizada a semeadura da soja, cultivar Syngenta 13610 IPRO, com espaçamento de 0,5 m de semeadura e uma densidade de 27 plantas por m^{-2}. O período de análise do cultivo da soja, denominado *Soja*, compreendeu 120 dias, da data de semeadura até o dia 23/03/2018, em que atingiu o ponto de colheita.

Para soja, foram coletadas semanalmente todas as plantas em 1 metro linear da área de cultivo para análises biométricas. Todas as medidas foram destrutivas e, em cada amostragem foi coletado o índice de área foliar (IAF), com a retirada de todas as folhas das plantas e digitalização em scanner com processamento pelo software Quant (VALE et al., 2001).

O período total do experimento compreendeu de 29/06/2017 a 23/03/2018, com 268 dias de duração que integram o processo de renovação do canavial de estudo (Figura 4).

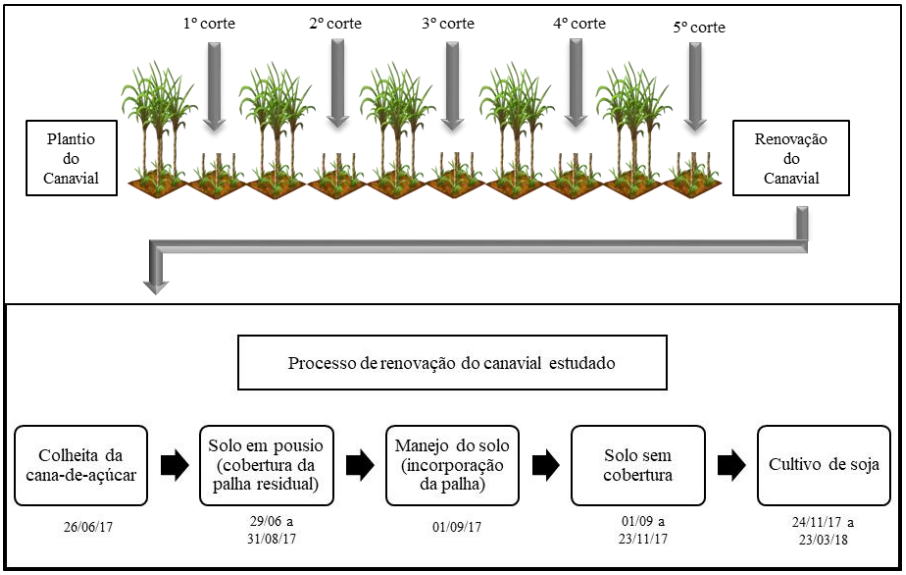

Figura 4. Esquema de manejo do canavial de estudo e etapas de renovação com as diferentes datas de ocorrência e cobertura do solo.

O ciclo de cultivo da soja foi dividido em 4 fases de desenvolvimento, de acordo com a fenologia e índice de área foliar do ciclo de cultivo (Tabela 3). A primeira fase foi classificada como *inicial*, que decorreu entre os dias 24/11/2017 a 25/12/17, compreendendo a maior parte do período vegetativo. A segunda fase foi denominada de *crescimento*, com duração do dia 26/12/17 ao dia

19/01/18, que envolveu o período de brotação das plantas (final do período vegetativo), até o período reprodutivo R3, com início do desenvolvimento das vagens. A terceira fase foi nomeada de *máximo desenvolvimento*, que durou do dia 20/01/18 ao dia 25/02/18, decorrendo entre as fases reprodutivas R3 a R6. A última fase foi denominada como *senescência*, com duração entre os dias 26/02/18 ao dia 23/03/18, que envolveu o final da fase R6 até a fase R9, caracterizada pela perda de folhas e maturação dos grãos.

Tabela 3. Dados observados de fenologia (CÂMARA, 2006) e índice de área foliar (IAF), da soja no período de estudo.

Fase de desenvolvimento		Data	IAF (m^{-2} m^{-2})
Vegetativa	-	19/dez/17	0,34
	-	28/dez/17	2,07
Reprodutiva	R_1	05/jan/18	3,05
	R_2	11/jan/18	5,95
	R_3	18/jan/18	5,66
	R_3	24/jan/18	5,47
	R_4	02/fev/18	5,70
	R_5	07/fev/18	6,92
	R_5	16/fev/18	5,22
	R_5	21/fev/18	4,85
	R_6	28/fev/18	5,09
	R_8	14/mar/18	0,62
Maturidade de colheita	R_9	21/mar/18	-

4.3. Instrumentação

Para medição das variáveis meteorológicas e fluxos de massa e energia, foi instalada no interior da parcela de estudo uma torre de fluxo (Figura 5) com raio mínimo de 53 metros de distância dos limites mais próximos, atingindo um raio máximo de 230 metros de distância do limite máximo da área. O sistema de coleta de dados pelo método Eddy Covariance (EC) é composto por um analisador de gás de caminho aberto modelo EC150, que obteve a densidade absoluta de dióxido de carbono e vapor d'água, sendo integrado a um anemômetro sônico modelo CSAT3 que mediu a velocidade do vento em três dimensões (X, Y e Z) e a um barômetro (medição da pressão barométrica) e sensor de temperatura sônica, todos da Campbell Sci.

Uma interface eletrônica EC100 (Campbell Sci.) realizou a sincronização de dados do sistema de medição de fluxo, estando conectada a um "datalogger" modelo CR3000 (Campbell Sci.), responsável pelo armazenamento dos dados em uma taxa de 10 Hz. Os sensores de fluxo foram

instalados a uma altura de 5 metros do início do estudo até dia 11/12/2017, quando foram abaixados para 2,54 metros de altura acima da superfície do solo.

Além dos equipamentos de medição em alta frequência, foram amostrados a cada cinco segundos, integrados para um minuto e armazenados no datalogger, os dados de: (a) pressão atmosférica (PTB100, Vaisala), temperatura e umidade do ar (HMP45C, Campbell Sci.) a 2 metros acima do solo; (b) velocidade e direção do vento, realizadas por um anemômetro (5106, RM Young) a uma altura de 10 metros acima do solo; (c) as componentes do saldo de radiação, por um saldo-radiômetro modelo CNR4 (Kipp & Zonen) a 5,8 metros acima do solo; (d) a precipitação foi medida por um pluviômetro modelo TB4 (Hydrological Services America) a 3 metros do solo; (e) a umidade do solo, medida nas profundidades de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,60; e 1,0 m, com uma sonda de umidade do solo modelo PR1/6 (Delta-T Devices); (f) a temperatura do solo, medida nas profundidades 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; e 0,50 m com termômetros de solo modelo Temp108 (Campbell Sci.); (g) o fluxo de calor do solo (G) foi medido por duas placas de fluxo modelo HFP01 (Hukseflux), sendo o valor de fluxo resultante da média dos valores mensurados pelas placas.

Dados históricos de temperatura e precipitação para a cidade de Piracicaba foram obtidos por meio da série de dados climatológicos do campus Luiz de Queiroz, departamento de Engenharia de Biossistemas Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" Universidade de São Paulo.

Figura 5. Torre de fluxo instalada na área de estudo com os sensores de fluxo e de elementos meteorológicos.

4.4. Tratamento de dados dos fluxos

A determinação dos fluxos de CO_2, calor latente (LE) e sensível (Hs), foi realizada no datalogger via programação inserida de acordo com as metodologias de cálculo propostas por Aubinet et al. (2012) e apresentadas no item 3.2. Os fluxos foram integrados em 30 minutos e armazenados com os dados brutos das medidas de alta frequência. De acordo com a programação no datalogger, foram corrigidas as incertezas decorrentes na concentração de CO_2 devido às mudanças na densidade do ar que podem ser causadas pelas variações de temperatura e vapor d'água, proposta por Webb et al. (1980) e a rotação de coordenadas dupla (WILCZAK et al., 2001).

Fora do datalogger, os dados de fluxos passaram por um novo processo de controle de qualidade de acordo com Mauder & Foken (2006), sendo retirados os dados de baixa qualidade, como medidas fora de alcance, dados com problemas de continuidade e dados em que ocorreu precipitação pluvial na meia hora de ocorrência e 30 minutos após a chuva.

Para a realização do controle de qualidade nos fluxos e eliminação dos dados espúrios foi realizada uma "limpeza de dados" de acordo com as orientações apresentadas por Foken et al. (2012). Foram retirados os valores de fluxos superiores a 20 $\mu mol CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$, 700 W m^{-2} e 600 W m^{-2} e inferiores a -68 $\mu mol CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$, -10 W m^{-2} e -50 W m^{-2} para NEE, LE e Hs, respectivamente.

A filtragem de dados (item 4.4.2) foi realizada com auxílio do laboratório de micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

4.4.1. Footprint

O *footprint* é uma relação matemática que associa a distribuição espacial das fontes de fluxo e o grau de intensidade dos mesmos, sendo essencialmente uma estimativa da área de origem correspondente a cada fluxo medido.

Os dados coletados brutos de alta frequência (sem correções ou calibração) foram inseridos no software EddyPro (LI-COR) para estimativa da área contra o vento que contribuiu para a obtenção dos fluxos medidos. A estimativa dos parâmetros que compõem o *footprint* é fornecida por três modelos diferentes (HSIEH et al., 2000; KORMANN & MEIXNER, 2001; KLJUN et al., 2004), sendo escolhido como padrão para cálculo o modelo de Kormann & Meixner (2001), resultando em um conjunto de distâncias que expressam o footprint, ou seja, a área de "visão" dos instrumentos. Estas distâncias foram divididas em: distância máxima (distância de pico) do anemômetro na direção em que a maior contribuição individual relativa ao fluxo se origina; e pelas distâncias de deslocamento, em que a área entre o anemômetro e o deslocamento fornece até 1, 10, 30, 50, 70 e 90% do fluxo total.

Para a realização da filtragem de dados que estejam dentro do footprint, a área de estudo foi dividida em 17 setores circulares que cobriram aproximadamente 93% da área total avaliada. Cada setor circular possui dois raios de mesma medida (que correspondem a distância máxima de

contribuição do fluxo, ou seja, a distância de pico) e um ângulo correspondente, de 0 a 360 graus, formando um polígono que abrange a área de estudo (Figura 6-A). Cada medida de fluxo de 30 minutos, foi relacionada à sua direção do vento correspondente e à distância de pico, que foi comparada ao raio do setor circular. Os dados que possuíssem distância de pico (maior contribuição da medida de 30 minutos do fluxo) maior que o raio do setor circular correspondente ao ângulo da direção do vento, foram descartados pois não estavam dentro da área de estudo (Figura 6-B).

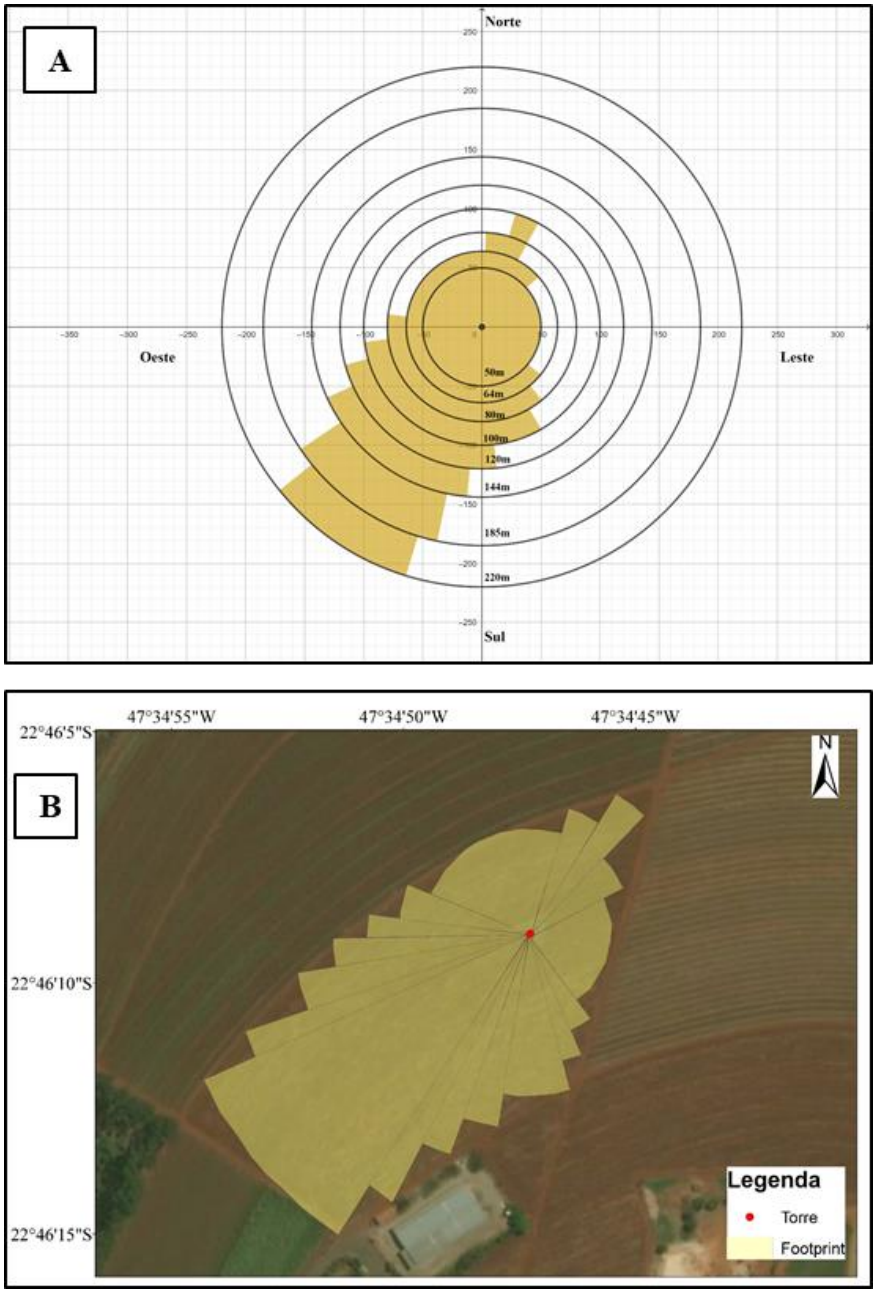

Figura 6. Divisão da área de estudo em setores circulares com diferentes raios e angulações, formando um polígono para avaliação do footprint (A) e footprint dentro da área de estudo (B).

4.4.2. Correções de estabilidade (u*), partição de fluxos e preenchimento de falhas

A ferramenta "*REddyProcWeb online tool*" (WUTZLER et al., 2018), permite a filtragem dos fluxos pela velocidade de fricção (*u**, ou *Ustar*), o preenchimento dos "gaps" de dados faltantes e, para o CO_2, a partição dos fluxos.

O limiar *Ustar* é estimado pelo *Teste do Ponto Móvel* de acordo com Papale et al. (2006), e a filtragem é realizada devido às condições mais estáveis no período noturno, em que ocorre menor turbulência, resultando em uma subestimação do fluxo noturno, portanto a necessidade de correção. Os limiares de velocidade de fricção (*Ustar*) foram de 0,132 m s^{-1} do início dos dados até dia 31/nov/2017 e do dia 01/dez/2017 até o final das medições foi usado o valor de 0,175 m s^{-1}.

Após a realização do controle de qualidade dos dados, aplicação dos filtros de estabilidade atmosférica e filtragem pelo *footprint*, são apresentados na Tabela 3, os percentuais da quantidade de dados removidos após a realização de todas estas etapas.

Tabela 4. Resultado das remoções de dados pelo controle de qualidade realizado nos fluxos em cada etapa.

Etapa de correção ou filtragem	Fluxos (percentual de dados removidos)		
	NEE	LE	Hs
Falhas iniciais (sem dado coletado antes do tratamento)	2,11%		
Dados fora dos limites máximos, mínimos e dados irreais	11,89%	6,20%	0,56%
Filtro de chuva	5,18%	2,29%	4,52%
Dados fora do *Footprint*	19,04%	17,53%	18,11%
Filtro *Ustar*	14,95%	-	-
Total de dados descartados	53,17%	28,13%	25,31%

Sendo: NEE - fluxo líquido de CO_2, LE – fluxo de calor latente e Hs – fluxo de calor sensível.

O descarte de dados de fluxos está dentro do apontado por Papale et al. (2006) como o normal, este percentual podendo chegar a 60%. Os fluxos que mais sofrem descarte de dados são os de NEE, pois muitos dados são retirados devido às condições de estabilidade atmosférica noturna. A maior fonte de descarte de dados é a filtragem pelo *footprint*, sendo descartados os dados com probabilidade de virem de fora da área de estudo, não representando o manejo avaliado.

Na Figura 7, podem ser observados os dados em escala de 30 minutos, mostrando que em todas as condições de cobertura do solo, existe diferença de descarte dos dados nas situações de ambiente seco ou úmido e dados no período noturno sofrem mais descarte do que os dados diurnos.

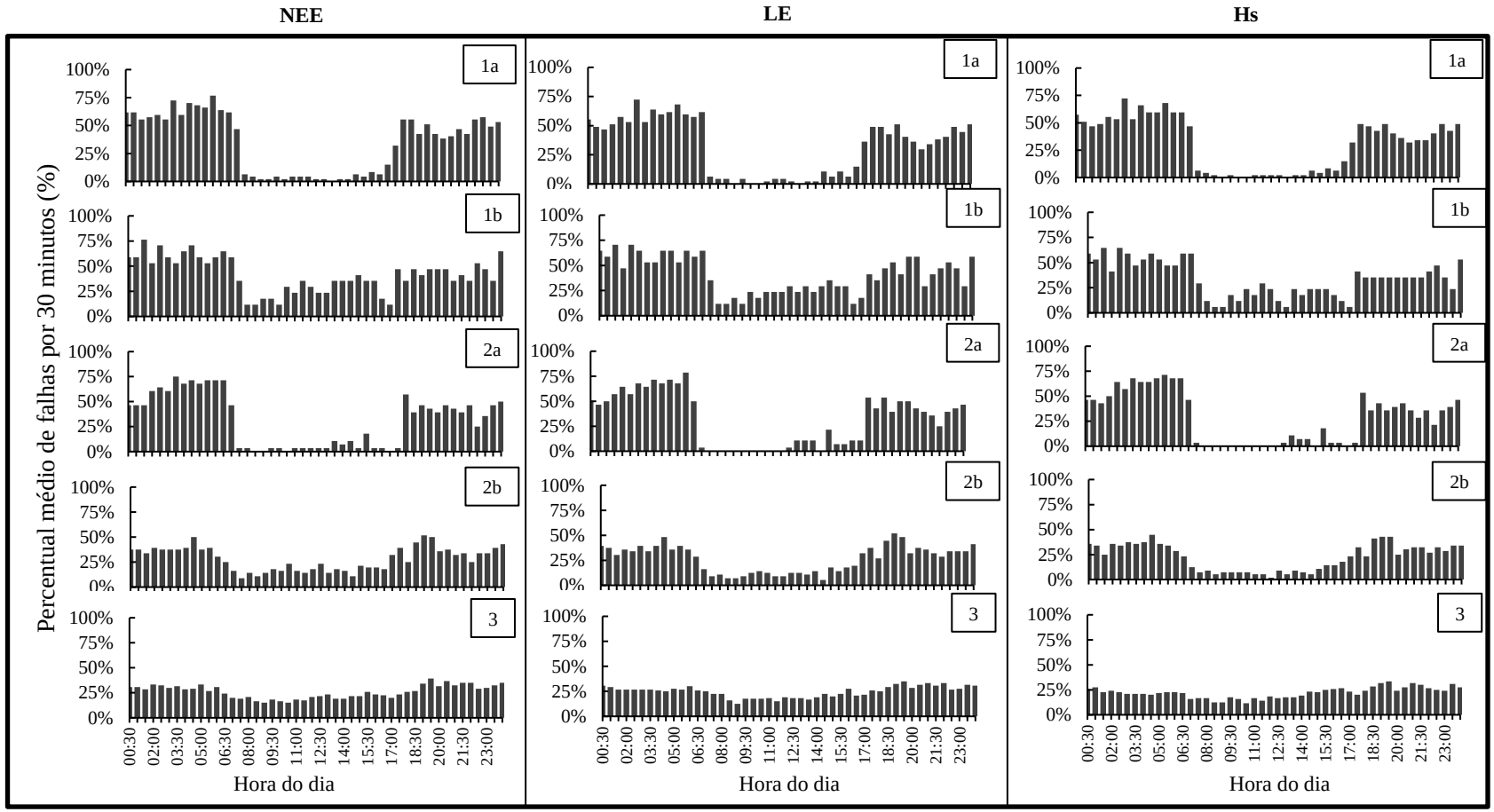

Figura 7. Percentual de falhas por meia hora dos fluxos de CO_2 (NEE), calor latente (LE) e calor sensível (Hs) para as condições de cobertura do solo e condição de ambiente seco ou úmido (1– solo coberto com palha, a-sem chuvas, b-com chuvas; 2 – solo sem cobertura, a-sem chuvas, b-com chuvas; e 3 – solo com cultivo de soja).

Durante a noite existe maior descarte de dados, principalmente devido às condições de maior estabilidade de vento (menor velocidade de fricção), sendo predominante a filtragem de dados pelo limiar *u**. Durante o dia, com maior instabilidade atmosférica e condições mais favoráveis à obtenção dos fluxos, a perda de dados é menor em relação ao período noturno. O descarte de dados nos períodos sem ocorrência de chuva se dá, predominantemente, pelo *footprint*, com descarte dos dados fora da área de medidas. Nos períodos com chuva, os dados são descartados devido às falhas nas medições e não confiabilidade dos dados de fluxo, aumentando a ocorrência de dados fora dos limites reais de medidas. Com uma distribuição equilibrada dos descartes de dados em cada etapa de filtragem devido às condições mais favoráveis para obtenção dos fluxos (maior instabilidade atmosférica, chuvas frequentes de pouca duração e dados dentro da área de medida), o período com cultivo de soja não alcançou maiores variações entre o descarte de dados ao longo do dia.

Como visto na equação 3.15, o fluxo líquido de CO_2 (NEE), que é obtido pelo método Eddy Covariance, pode ser particionado entre a respiração do ecossistema (R_{eco}), que representa as emissões de CO_2 e o consumo de CO_2 pela fotossíntese (GPP).

Como no período noturno não ocorre a fotossíntese, compreende-se que não ocorre GPP, portanto:

$$NEE = R_{eco} \ . \tag{4.1}$$

Ao utilizar da metodologia proposta por Reichstein et al. (2005) para partição do NEE em GPP e R_{eco}, os algoritmos de partição de fluxo incluíram apenas os dados originais (de 30 minutos, com filtragem, mas sem preenchimento de falhas), sendo considerados dados noturnos os que correspondiam aos valores inferiores à 20 W m^{-2} de Qg e comparados aos horários de nascer e pôr-do-sol do local de medida. Foi realizada uma verificação em períodos consecutivos de tempo com mais de seis dados disponíveis em intervalo de temperatura superior a 5ºC, sendo realizadas regressões entre R_{eco} e temperatura com bons resultados.

Com o modelo de regressão de Lloyd & Taylor, (1994), foi possível ajustar a dispersão da relação entre R_{eco} e T_{ar}:

$$R_{eco} = R_{ref} \ . exp\left\{E_0 \left(\frac{1}{T_{ref}-T_0} - \frac{1}{T-T_0}\right)\right\} . \tag{4.2}$$

A R_{ref} é a taxa de respiração a uma temperatura de referência dada por T_0 (-46,02ºC), E_0 é um parâmetro de energia de ativação estimado para todo o período, seguindo as condições anteriores, T_{ref} é a temperatura de referência (definida para 15ºC) e T é a temperatura do ar. Após a calibração dos valores de R_{eco} para o período noturno, foram calculados os valores para o período diurno.

Portanto, na partição do fluxo líquido de CO_2 (NEE), a R_{eco} no período noturno foi dada pela equação 4.1, no período diurno foi a estimada pelo método de Reichstein et al. (2005), o GPP no período noturno (Qg < 20 W m^{-2}) é igual a zero e no período diurno foi dado por:

$$GPP = NEE - R_{eco} \ . \tag{4.3}$$

Por convenção, foi considerada como positiva a R_{eco} por representar emissão e o GPP sendo representado com sinal negativo por representar consumo.

O preenchimento de falhas foi realizado conforme a proposta de Reichstein et al. (2005), sendo necessário devido aos defeitos de instrumentação que interrompem o fluxo contínuo de dados e por condições micrometeorológicas desfavoráveis. O preenchimento considera a relação dos fluxos com variáveis meteorológicas de temperatura do ar (T_{ar}), déficit de pressão de vapor (VPD) e radiação solar global (Qg), em uma janela de tempo (Δt) de "n" dias em relação aos dados com falhas. A rotina de preenchimento parte de três princípios básicos, sendo o primeiro em que o dado de fluxo é ausente, mas os dados meteorológicos existem, portanto, o mesmo é substituído por um valor médio, dentro de uma janela de tempo inicial de até 7 dias, com condições meteorológicas similares, com variação menor do que 50 W m^{-2} de Qg, 2,5ºC em T_{ar} e 5,0 hPa de VPD, não ocorrendo estas condições existe um aumento da janela de tempo para até 14 dias. O segundo é similar ao primeiro, sendo definido apenas ao Qg dentro de uma janela de tempo de até 7 dias. O terceiro é a substituição do valor ausente de fluxo pelo valor médio ao mesmo período do dia, sendo uma interpolação linear dos dados disponíveis nas horas próximas.

Após essas etapas, se os valores não foram preenchidos nas condições iniciais, o procedimento é repetido com maiores janelas de tempo para o devido preenchimento de falhas.

Os dados de fluxo de CO_2 são obtidos com a unidade de µmol m^{-2} s^{-1}, para cada média de 30 minutos. Para a conversão para unidade de g m^{-2} s^{-1}, o dado foi dividido por 10^6 e multiplicado por 44. Para obtenção da informação em relação ao carbono, ou seja, obter o dado na unidade de g C m^{-2} s^{-1}, o registro de fluxo de CO_2 foi dividido por 3,67.

4.4.3. Cálculo da evapotranspiração e classificação da condição hídrica do solo

A evapotranspiração do cultivo de soja (ETc) foi determinada a partir da ETo, que foi calculada de acordo com a equação 3.14 e o coeficiente de cultivo (Kc), que foi determinado conforme a metodologia proposta por Martorano (2007), que considera o desenvolvimento da soja ao longo do ciclo de cultivo:

$$Kc = -0{,}0001(DAE)^2 + 0{,}0168\,(DAE) + 0{,}4269. \qquad (4.4)$$

Sendo que, DAE significa "dias após a emergência da planta".

A partir da equação 3.12, o valor de LE* (W m^{-2}) foi multiplicado por 0,0353, para obter a ETr (mm d^{-1}) do período de estudo.

De acordo com o teor de água do solo e ocorrência de precipitação, cada período de diferentes manejos de cobertura foi classificado em duas condições: *seco* e *úmido*. A partir da média diária dos valores medidos de umidade do solo nas camadas de 0,1, 0,2, 0,3 e 0,4 m de profundidade, o valor da capacidade de campo (CC) foi de 0,385 cm^{-3} cm^{-3}, representando 90% do valor máximo de

umidade medido na escala horária, não sendo o valor máximo por este representar o solo saturado. O ponto de murcha permanente (PMP), foi de 0,316 cm^{-3} cm^{-3}, que foi o valor mínimo obtido na escala horária.

A condição do período com solo *seco* foi classificada de acordo com um mínimo de 7 dias contínuos sem precipitação pluvial e com umidade do solo abaixo de 90% da CC. Na condição de período com solo *úmido*, dias com a ocorrência de chuva e um intervalo de até 5 dias sem chuvas com umidade do solo mantendo-se acima de 90% da CC (Figura 8).

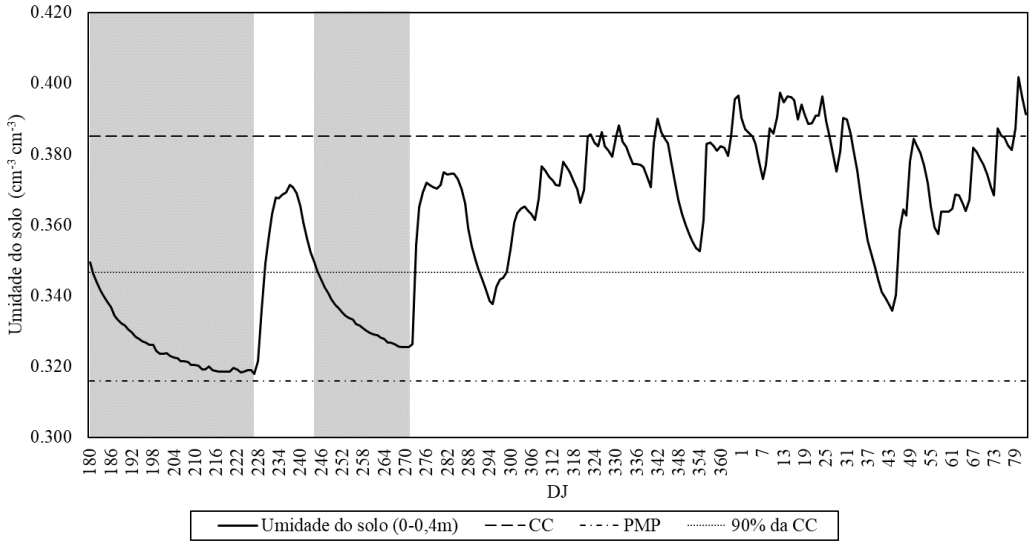

Figura 8. Média diária umidade do solo na camada de 0-0,4m de profundidade em relação a umidade do solo na capacidade de campo (CC), no ponto de murcha permanente (PMP) e a umidade que representa 90% da umidade do solo na capacidade de campo. As regiões hachuradas em cinza representam os períodos classificados como *seco* e as regiões em branco são os períodos classificados como *úmido*. As datas estão em Dias Julianos (DJ).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Condições meteorológicas do período de estudo

O período do experimento, iniciado em 29/06/2017 após a colheita da cana-de-açúcar e concluído em 23/03/2018 com o final do cultivo da soja, compreendeu as estações de inverno, primavera e verão. O período total de renovação do canavial deste estudo foi dividido de acordo com o manejo realizado de cobertura do solo e a condição hídrica, classificada de acordo com o item 4.4.3, visto anteriormente, e cada período ocorreu de forma sucessiva na mesma área (Tabela 5).

Tabela 5. Divisão das etapas de renovação do canavial em estudo, com a condição do solo em cada período e respectiva média de umidade do solo e estação do ano de ocorrência de cada etapa.

Período de medida[1]	Condição do solo	Período[2]	Umidade do solo (cm^{-3} cm^{-3})	Estação do ano
Cp	Seco	180 a 226	0,326	Inverno
	Úmido	227 a 243	0,357	Inverno
Sp	Seco	244 a 271	0,333	Final de inverno - Primavera
	Úmido	272 a 327	0,365	Primavera
Soja	Úmido	328 a 82	0,376	Final de primavera - Verão

1 - Cp – Solo em pousio coberto com palha; Sp – Solo em pousio sem cobertura; e Soja – Cultivo da Soja.
2 - Número correspondente ao dia juliano de cada ano, sendo 180 a 365 correspondentes ao ano de 2017 e 1 a 82 referindo-se ao ano de 2018.

A radiação global (Qg) decorreu ao longo do período de renovação de forma crescente (Figura 9-A), principalmente devido às mudanças de estação do ano, com menor média no inverno e aumentando de acordo com a transição para primavera e verão. Para o período com solo em pousio e cobertura de palha (*Cp*), a disponibilidade média de radiação solar global foi de 14,8 (±4,6) MJ m^{-2} d^{-1}. Para o período em pousio e solo descoberto (*Sp*), a média foi de 20,4(±6) MJ m^{-2} d^{-1} e no período com cultivo da soja (*Soja*), foi de 21 (±5,8) MJ m^{-2} d^{-1}.

A temperatura média do ar (Figura 9-B) seguiu a tendência da disponibilidade de radiação solar (Qg), aumentando conforme a transição das estações do ano. Em relação aos períodos de cobertura do solo analisados, as médias de *Cp*, *Sp* e *Soja* foram de, respectivamente, 18,6(±2,5), 22,9(±2,3) e 23,6(±1,5) ºC. O déficit de pressão de vapor (VPD), para os períodos *Cp*, *Sp* e *Soja*, obteve médias de 0,9(±0,4), 1,2(±0,6) e 0,7(±0,3) kPa (Figura 9-B).

A temperatura superficial do solo (0 a 0,2m) no período *Cp* foi, em média, 18,8ºC, já no período *Sp*, aumentou para 25,7ºC e no período *Soja*, a média ficou em 25,6ºC (Figura 9-C).

Na fase de solo coberto com palha (*Cp*), ao longo dos 49 dias de avaliação, a chuva acumulada foi de 49,5 mm, distribuída em seis dias. Na etapa de solo descoberto (*Sp*), foram 17 dias chuvosos, com 164,8 mm ao longo dos 84 dias do período. Durante o período *Soja*, com 120 dias totais, ocorreram 66 dias chuvosos com um total acumulado de 582,4 mm. A distribuição de chuvas foi concentrada em poucos dias nos períodos *Cp* e *Sp*, sendo possível distinguir dois períodos característicos como seco e úmido (Tabela 5) conforme classificação de acordo com o teor de água da camada de 0,4m de profundidade no solo (item 4.4.3). Já a ocorrência de precipitação no período *Soja* obteve maior distribuição temporal sendo aqui considerado apenas de solo em condição *úmido*, pois em nenhuma fase do ciclo do cultivo, o solo atingiu menos que 90% da capacidade de campo por um período maior a 5 dias. A umidade do solo aumentou com a ocorrência da precipitação pluvial, com uma umidade média de 86% da CC nos períodos classificados como *seco* e 94% da CC nos períodos classificados como *úmido* com solo em pousio. Com cultivo de soja, a umidade média diária do solo obteve uma média de 98% em relação à CC, que representa um período em que o solo esteve próximo à capacidade de campo em todo tempo (Figura 9-D).

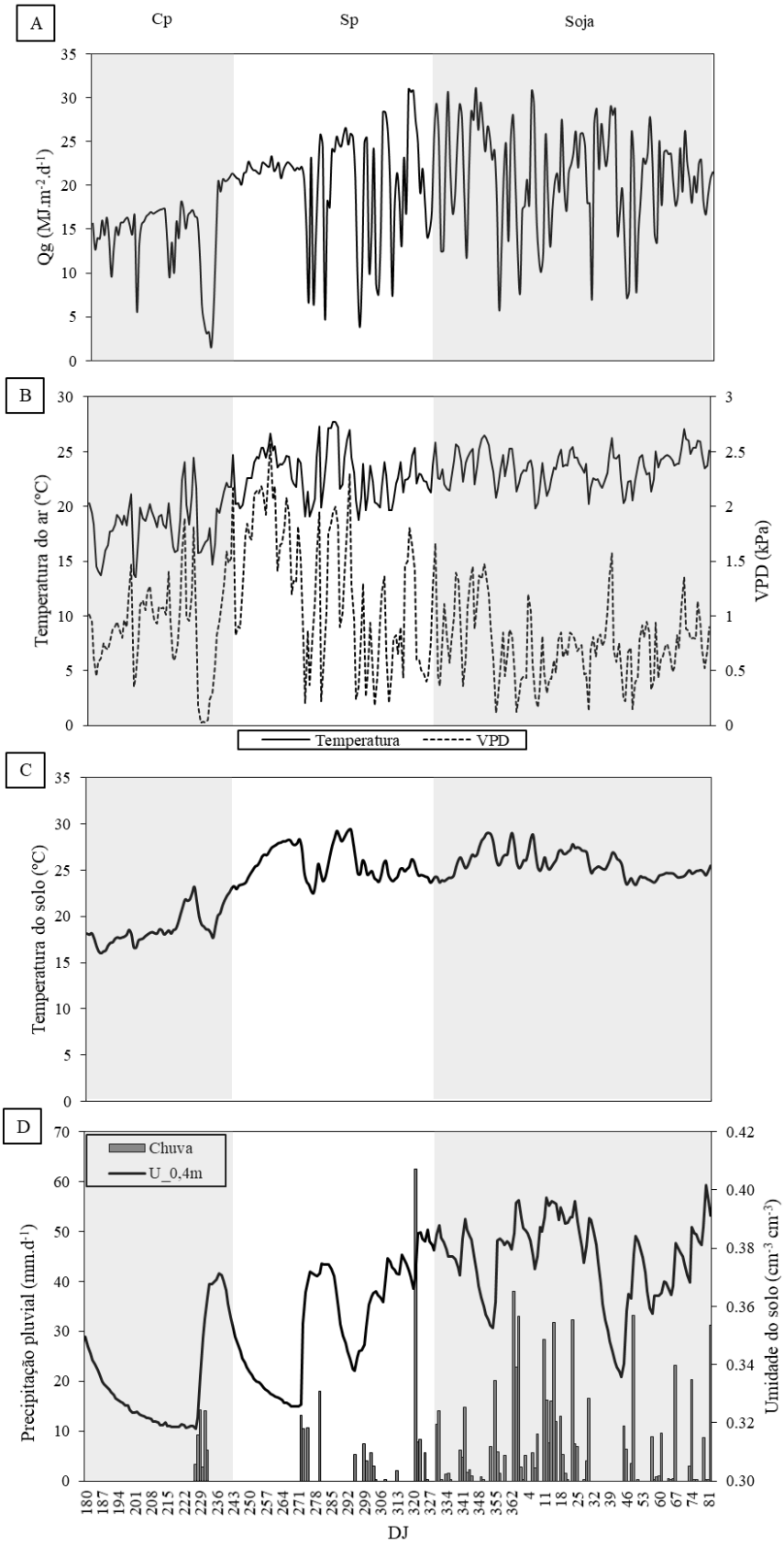

Figura 9. Média diária da (A) Radiação solar global (Qg), (B) Temperatura e Déficit de Pressão de Vapor (VPD), (C) da Temperatura do solo na camada de 0-0,2 m (Ts), e (D) acumulado diário da precipitação e umidade média do solo na camada de 0-0,4 m de profundidade (U_0,4m). O período de estudo foi divido em solo coberto com palha (Cp), região hachurada em cinza a esquerda; solo sem cobertura (Sp), região não hachurada; e Cultivo de Soja (Soja), região hachurada em cinza a direita. As datas estão em Dias Julianos (DJ).

5.2. Fluxos de massa e energia após colheita de cana-de-açúcar com solo em pousio

5.2.1. Fluxo de CO_2

O solo em pousio apresentou uma média de troca líquida (NEE) diária de CO_2 de 1,87(±0,54) µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} com solo sob cobertura de palha (*Cp*) na condição *seco*. Sob a mesma cobertura, o solo da área em renovação na condição *úmido* obteve uma média de NEE diário de 4,27(±1,59) µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. Com solo sem cobertura (*Sp*), após a incorporação da palha, a média diária de NEE na condição de solo *seco* foi de 1,99 (±0,64) µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, posteriormente, na condição de solo *úmido*, o período com solo sem cobertura obteve uma média diária de NEE de 3,66 (±2,08) µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}.

O período *Cp* em condição *seco* obteve uma média diária máxima de 3,31 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e mínimo de 1,07 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} para NEE. Na condição *úmido*, alcançou o máximo de 6,97 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e mínimo de 1,79 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}.

No período *Sp* na condição de solo *seco*, o NEE máximo, considerando a média diária, foi de 3,47 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e o mínimo de 0,82 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. Para a condição de solo *úmido*, obteve NEE máximo de 6,80 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e o mínimo de 1,85 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}.

Para os dois casos de solo coberto com palha e solo sem cobertura e com a palha incorporada, houve o aumento do fluxo líquido de CO_2 em relação à condição hídrica do solo. Este aumento está relacionado a uma maior emissão de CO_2 na condição dos períodos úmidos comparados aos períodos secos do solo em pousio (Figura 10).

Na condição *úmido, o* período *Cp* possui maior média da troca líquida de CO_2 (NEE) em relação ao período *Sp*, estando relacionado ao estudo realizado por Tavares et al. (2016), em que foi ressaltado que o depósito de resíduo cultural de cana-de-açúcar sobre o solo estimula a atividade microbiana, consequentemente o aumento do fluxo líquido de CO_2 (NEE).

Com ocorrência de pluviosidade, os fluxos podem sofrer alterações devido ao aumento da umidade do solo, passando a incentivar a atividade microbiana, incrementando a respiração do ecossistema (WALDO et al., 2016). No solo em pousio com palha em cobertura o NEE, que representa a respiração do ecossistema, varia conforme condições ambientais de temperatura e umidade, que podem incentivar a atividade microbiana de decomposição do material orgânico e inserção de C no sistema. O solo com cobertura possui maior estabilidade de temperatura e umidade, promove uma maior manutenção da matéria orgânca e proteção à erosão, fatores que estimulam a atividade e a diversidade microbiana do solo, consequentemente aumentando a ciclagem de nutrientes (CHAMIZO et al., 2017 & CARDOSO et al., 2013).

Considerando todo o período *Cp*, o NEE médio diário foi de 2,51 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e o período *Sp* obteve a média diária de 3,10 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. Como observado por Moitinho et al.

(2013), a retirada dos resíduos de cana-de-açúcar da superfície do solo e incorporação em profundidade, resulta em maior aeração do solo, aumento da temperatura do solo, diminuição da umidade do solo (por facilitar a perda de água armazenada) e melhor acesso dos microorganismos do solo ao material orgânico para decomposição, o que pode ser relacionado com a maior emissão do período *Sp*.

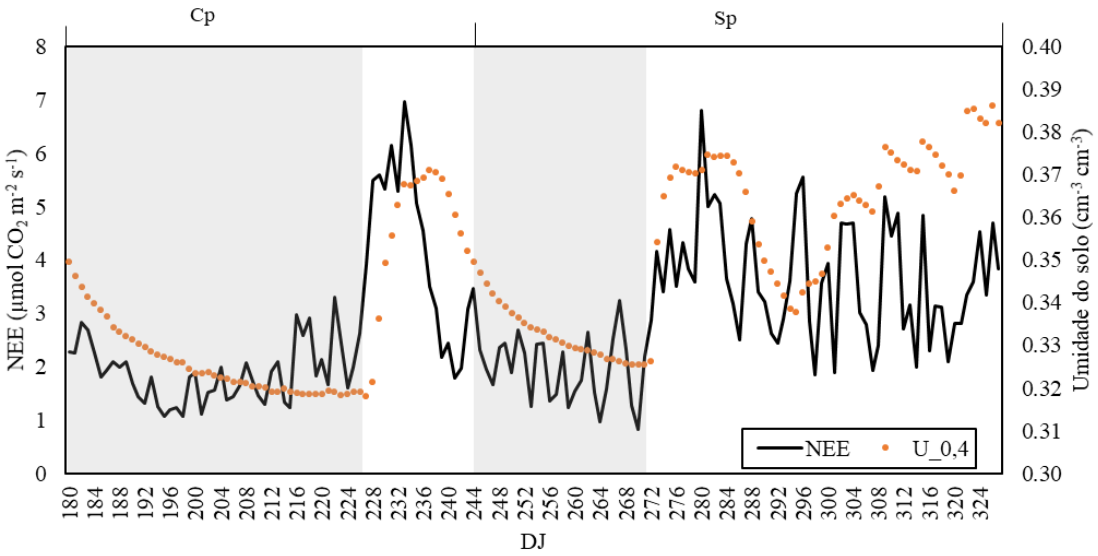

Figura 10. Média diária do fluxo líquido de CO_2 (NEE) no período de pousio da renovação do canavial e umidade média do solo na camada de 0-0,4 m de profundidade (U_0,4m). As regiões hachuradas em cinza representam as etapas classificadas como *seco* e as regiões em branco são as etapas classificadas como *úmido*. Os dias estão representados como Jias Juliano (DJ).

5.2.2. Fluxos de energia e água

As médias diárias do período *Cp* foram de 79, 3, 48 e 19 W m^{-2} para Rn, G, Hs e LE, respectivamente. No período *Sp*, as médias foram de 138, 7, 62 e 48 W m^{-2} para Rn, G, Hs e LE, respectivamente.

As médias de 30 minutos dos componentes do balanço de energia (Rn, LE, Hs e G) ao longo de um dia médio nos períodos *Cp* e *Sp* de acordo com a condição hídrica do solo (*seco* ou *úmido*), são apresentadas na Figura 11, com os valores máximos ocorrendo em torno das 12h. No período *Cp* em condição *seco*, o máximo do saldo de radiação (Rn) foi de 431 W m^{-2}, para o fluxo de calor latente (LE) foi de 48 W m^{-2}, para o fluxo de calor sensível (Hs) foi 233 W m^{-2} e para o fluxo de calor no solo (G) foi de 44 W m^{-2}. Na condição *úmido* do período *Cp*, os máximos para Rn, LE, Hs e G foram, respectivamente, 404, 101, 236 e 63 W m^{-2}. No período *Sp* e consição de solo *seco*, os máximos foram de 609, 62, 315 e 117 W m^{-2} para Rn, LE, Hs e G, respectivamente. Na condição de solo *úmido* deste período, os máximos alcançaram para Rn, LE, Hs e G, os valores de 597, 168, 187 e 90 W m^{-2}.

O período *Sp*, com maior disponibilidade de radiação solar global (Figura 9-A), possui maior energia disponível (Rn) em relação ao período *Cp*, sendo esta diferença também consequência da maior reflectância da palha em comparação ao período de solo sem cobertura.

Na condição de solo *seco* para os dois períodos (*Cp* e *Sp*), a maior parte da energia disponível (Rn), foi distribuída para o aquecimento do ar, pelo fluxo de calor sensível (Hs). Já na condição *úmido*, a partição da energia disponível (Rn) foi distribuída entre Hs e LE. No período *Cp*, os 49,5 mm de chuva que ocorreram não foram o suficiente para alterar a característica do balanço energético, com uma diferença de 57% de LE para Hs. No período *Sp*, com os 164,8 mm de chuva que ocorreram, houve uma alteração maior no balanço energético, com os fluxos de LE e Hs aproximando-se e a difereça entre LE e Hs diminuindo para 10%.

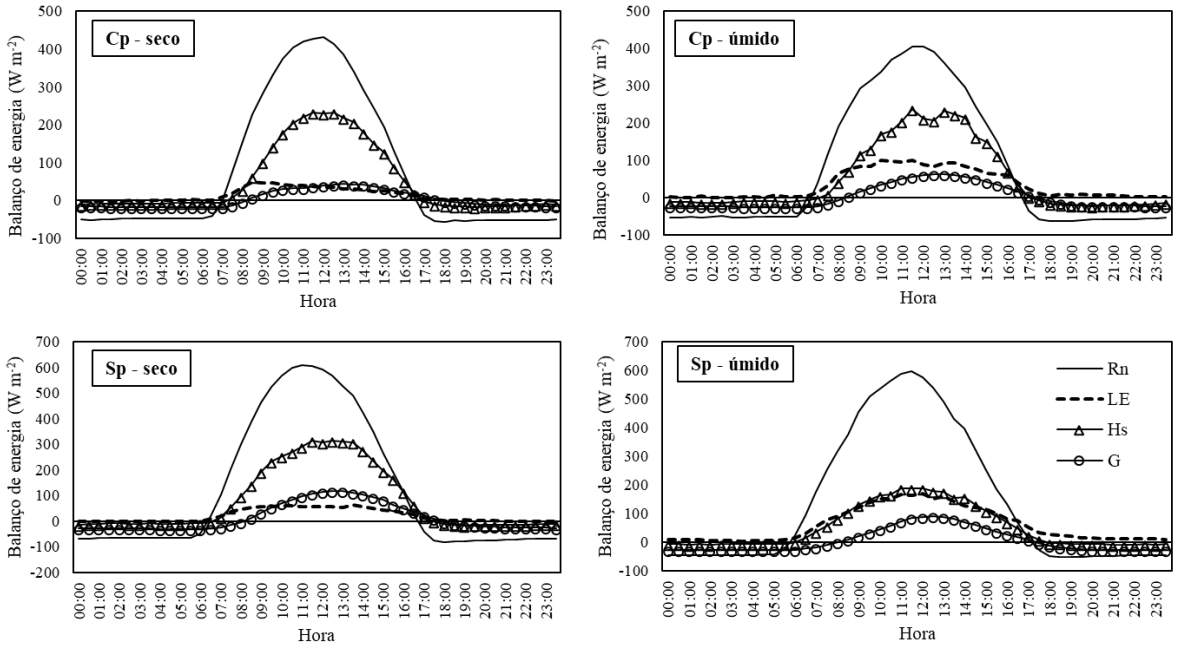

Figura 11. Variação média de 30 minutos da partição do balanço de energia para o período Cp e condições de solo seco e úmido e para o período Sp com condições de solo seco e úmido, sendo Rn o saldo de radiação, LE o fluxo de calor latente, Hs o fluxo de calor sensível e G o fluxo de calor no solo.

A relação da energia utilizada para aquecimento do ar e evaporação da água (Hs+LE) em relação ao termo Rn-G foi de 82% para os períodos *Cp* e *Sp* (Figura 12). Individualmente, o período *Cp* apresenta uma relação de 83% entre a partição de energia, já o período *Sp*, de 72%.

Após o fechamento do balanço de energia pelo método Razão de Bowen (abordado no ítem 3.2), a média diária do fluxo de calor latente (LE), em W m^{-2}, foi convertida para evapotranspiração, em mm d^{-1}, pela multiplicação da média diária pelo fator de conversão 0,0353.

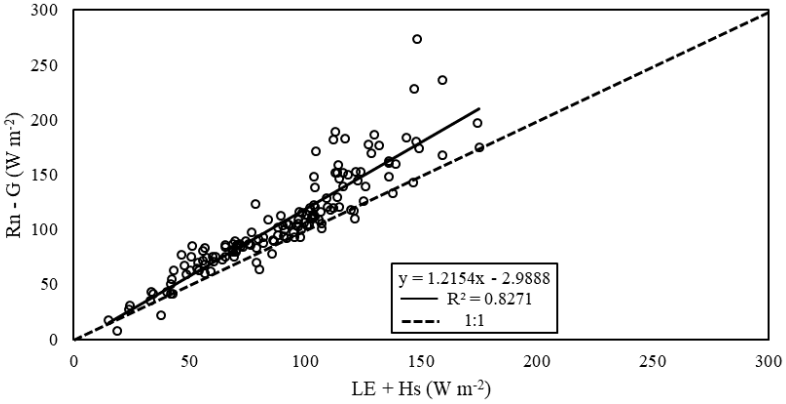

Figura 12. Fechamento do balanço de energia para o período com solo em pousio (solo com cobertura de palha, Cp e solo sem cobertura, Sp).

No solo em pousio, o período *Cp*, com 64 dias, obeve a evapotranspiração média de 0,72 mm d^{-1} e o período *Sp*, com sua duração de 84 dias, alcançou a evapotranspiração média de 2,04 mm d^{-1}. Ao serem considerados individualmente os períodos *Cp* e *Sp* (Tabela 6), independente das condições *seco* e *úmido* de cada período, quando o solo estava sem cobertura (período *Sp*), ocorreu uma maior evapotranspiração em relação ao período *Cp*, devido a maior disponibilidade de radiação solar (Figura 9-A), em combinação com a remoção da palha da superfície do solo e aumento da superfície de solo exposto, facilitando a perda de umidade.

O estudo realizado por Peres et al. (2010) em Araras (SP), com área pós-colheita de cana-de-açúcar e análise da perda de umidade do solo sob cobertura de palha e sem cobertura de palha indicou que a manutenção da palha de cana-de-açúcar como cobertura, diminui a perda de água pelo solo. Em condições de umidade do solo semelhantes a condição de solo *seco* dos períodos *Cp* e *Sp* analisados, o estudo obteve para a área com palha recobrindo o solo, uma evaporação média de 0,21 mm d^{-1}, enquanto que, para solo sem cobertura, a evaporação foi de 0,45 mm d^{-1}, menores em relação às obtidas neste estudo.

Tabela 6. Evapotranspiração no período de pousio da área com solo coberto de palha de cana-de-açúcar (Cp) e solo descoberto (Sp), nas condições de solo seco e úmido.

Etapa	Condição hídrica	Evapotranspiração (mm d^{-1})		
		Média	Máx.	Mín.
Cp	Solo seco	0,58(±0,12)	0,88	0,35
	Solo úmido	1,14(±0,61)	2,83	0,29
Sp	Solo seco	0,83(±0,33)	1,90	0,40
	Solo úmido	2,68(±1,02)	5,03	0,73

5.3. Fluxos de massa e energia em cultivo de soja durante renovação do canavial

5.3.1. Fluxo de CO_2

As médias horárias dos dados de fluxo de GPP, R_{eco} e NEE para o cultivo da soja nas suas fases de desenvolvimento (*inicial, crescimento, máximo desenvolvimento* e *senescência*), formando um "dia médio", são apresentadas na Figura 13. A tendência horária do GPP ao longo do dia médio durante o ciclo de cultivo da soja acompanha a transição do desenvolvimento da cultura ao longo das fases, com o valor mínimo (neste caso, representando o máximo de consumo) para a fase *inicial* do cultivo no valor de –13,72 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. A fase de *crescimento* apresentou o valor mínimo para GPP de -30,84 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. A fase de *máximo desenvolvimento*, obteve o mínimo de -39,76 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, atingindo o máximo de consumo. Já na fase de *senescência*, o valor mínimo para GPP foi de -21,89 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. A assimilação de CO_2 para fotossíntese (GPP) tem seu máximo potencial em torno do meio-dia.

As médias horárias de R_{eco} (Figura 13) do cultivo da soja ao longo de um dia médio, não apresentam o mesmo comportamento que o GPP ao longo do ciclo de cultivo, pois possui menor variação ao longo do dia e possui maior influência das condições ambientais. A fase *inicial* do cultivo possui R_{eco} máxima de 7,03 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. A fase de *crescimento* possui máxima de 9,01 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. A fase de *máximo desenvolvimento* possui o valor máximo para R_{eco} de 11,64 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. A fase *senescência* possui máxima de 9,34 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. Como as condições ambientais são semelhantes ao longo do ciclo de cultivo (Figura 9), é possível que o aumento da R_{eco} até o período de *máximo desenvolvimento* e sua diminuição no período de *senescência*, seja relacionado ao desenvolvimento radicular da planta, pois a participação das raízes das plantas na respiração do ecossistema, pode incrementar a emissão de CO_2 em 30% (LUNDEGÅRDH, 1927).

As médias horárias do fluxo líquido de CO_2 (NEE) no dia médio, demonstram qual processo, de fotossíntese ou respiração do ecossistema, predomina ao decorrer do dia (Figura 13). Como no período noturno não ocorre fotossíntese, as maiores alterações do fluxo líquido de CO_2 são durante o dia, com a média horária mínima de NEE para a fase inicial de -6,99 µmol m^{-2} s^{-1}, na fase de *crescimento* a mínima foi de -22,12 µmol m^{-2} s^{-1}, a mínima horária na fase de *máximo desenvolvimento* foi de -28,51 e para a fase de *senescência*, a mínima para NEE foi de -12,77 µmol m^{-2} s^{-1}. Os resultados obtidos permitem destacar a variação dos fluxos ao longo do dia, com o período em torno das 12h, que possui maior disponibilidade de radiação, responsável pela maior assimilação de CO_2 durante todas as fases de desenvolvimento do cultivo. Ao longo do ciclo de cultivo da soja, o GPP, R_{eco} e NEE foram alterados conforme a fase de desenvolvimento.

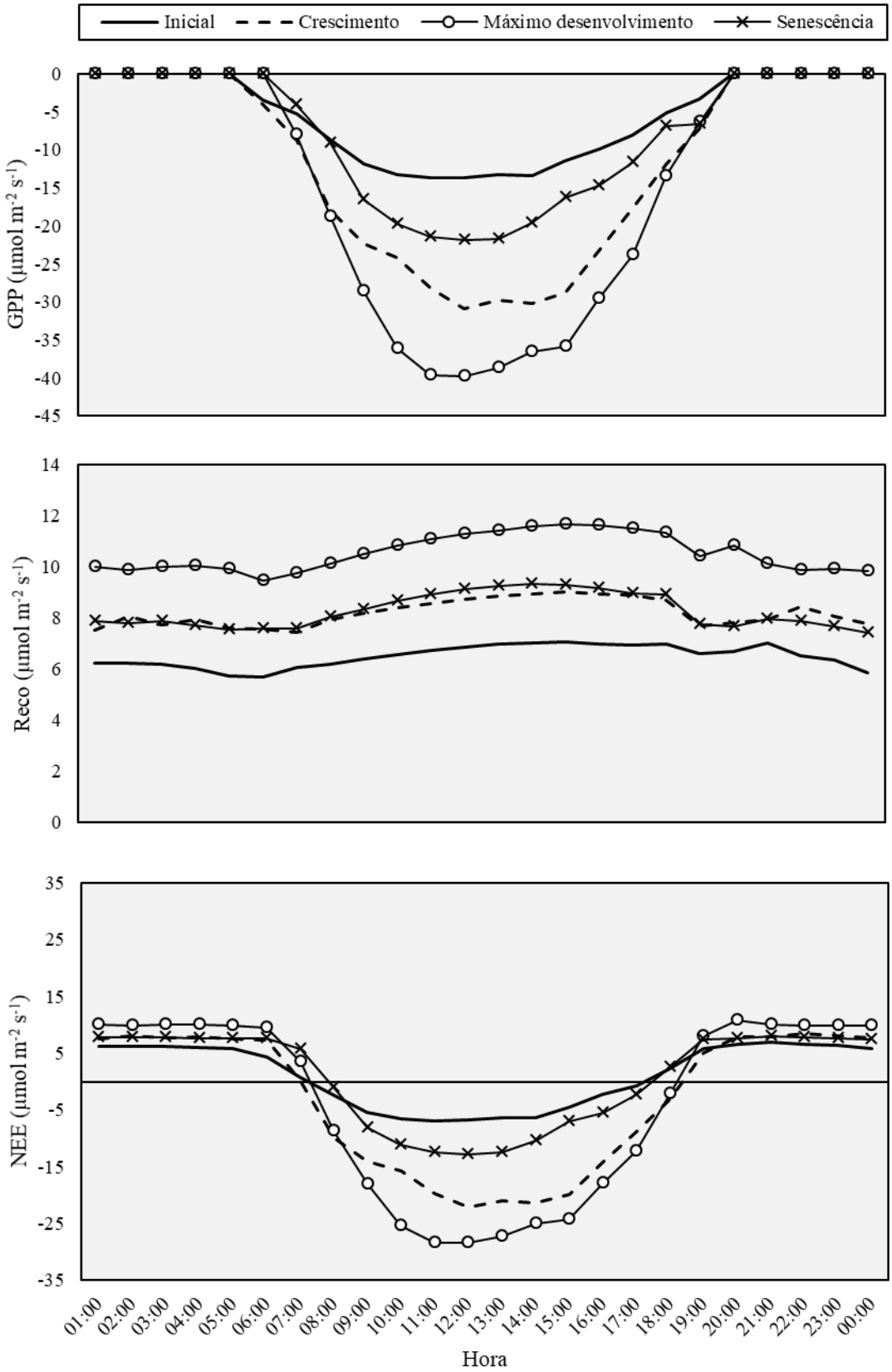

Figura 13. Variação média horária do fluxo líquido de CO_2 (NEE), do consumo de CO_2 pela fotossíntese (GPP) e da respiração do ecossistema (Reco).

Na partição do fluxo líquido de CO_2 (NEE) em GPP e R_{eco} durante o ciclo de cultivo de soja, o processo de assimilação de CO_2, representado pelo GPP, predomina sobre a emissão de CO_2 pelo ambiente, principalmente na fase *crescimento* e *máximo desenvolvimento*, dos dias 32 a 93 após a semeadura (Figura 14). No início da fase *inicial* e final da fase *senescência*, a emissão de CO_2 é maior que o consumo, pois no estabelecimento das plantas na área, o consumo para fotossíntese ainda é baixo e ao final do ciclo, a planta começa a perder as folhas e iniciar o processo de mauração.

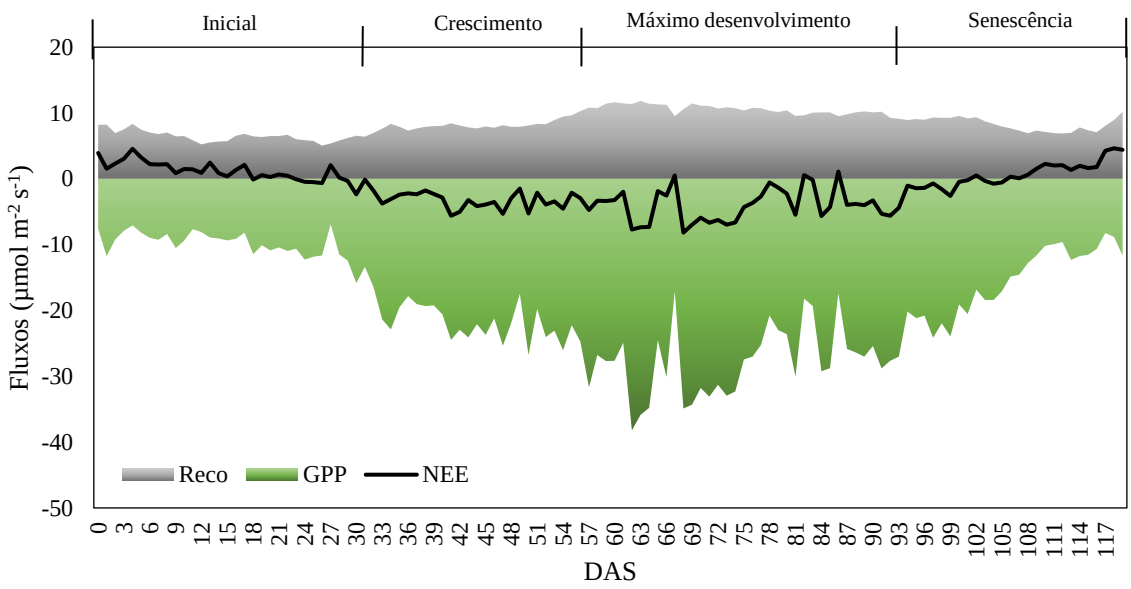

Figura 14. Variação média diária do fluxo líquido de CO_2 (NEE), do consumo de CO_2 pela fotossíntese (GPP) e da respiração do ecossistema (Reco) ao longo do ciclo de cultivo de soja e relação com as fases de desenvolvimento. O ciclo de cultivo foi representado por dias após a semeadura (DAS).

O crescimento da planta e produção de matéria seca, depende da assimilação e alocação do CO_2, que passa a ter maior assimilação conforme a planta se desenvolve e o aumenta o IAF, com posterior diminuição com a *senescência*, quando ocorre a translocação do material incorporado para os grãos, diminuindo a assimilação pelo encerramento de produção vegetativa e dedicação da energia para a maturação dos grãos, até o ponto de colheita (SUYKER & VERMA, 2010). Na fase de *máximo desenvolvimento*, com IAF chegando próximo a 7,0, ocorreram os valores máximos de GPP, atingindo -38,21 µmol m^{-2} s^{-1} (Figura 15) A relação entre os valores médios de GPP em cada ponto amostrado de IAF é de 78% (Figura 16).

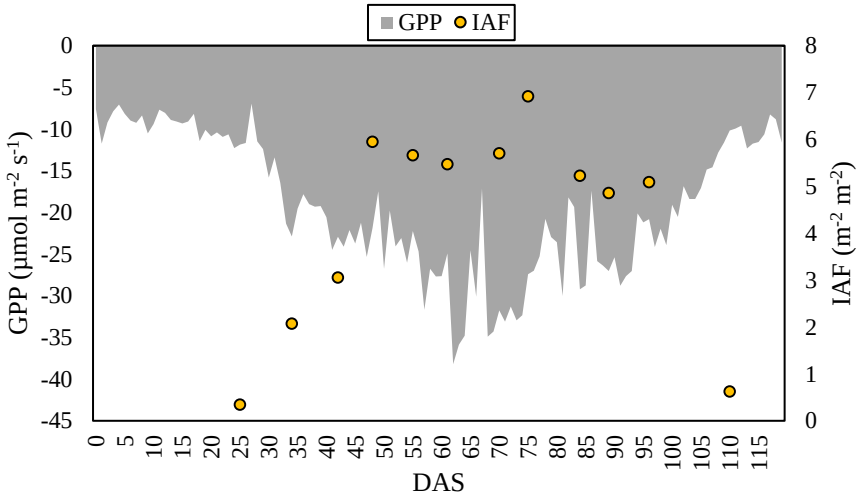

Figura 15. Variação da produção primária bruta (GPP) média diária e índice de área foliar (IAF) ao longo do ciclo de cultivo de soja, sendo representado por dias após a semeadura (DAS).

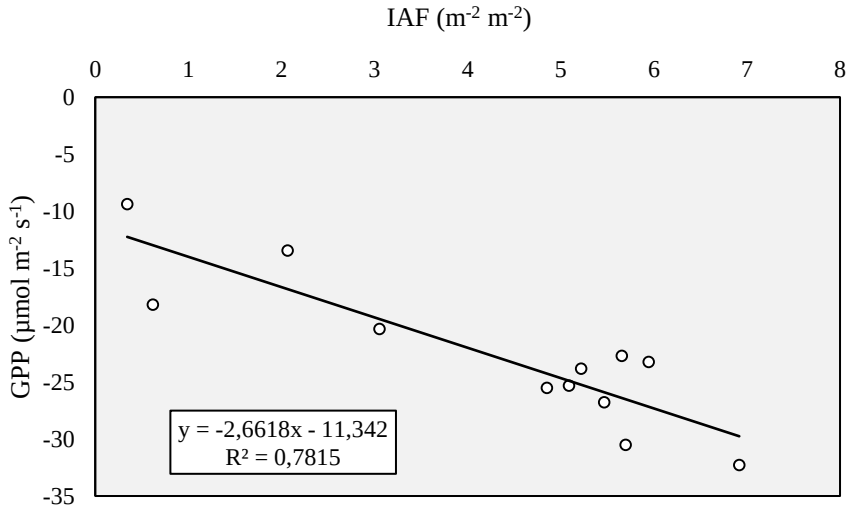

Figura 16. Relação entre a produção primária bruta (GPP) média até o período de amostragem do índice de área foliar (IAF).

A fase *inicial* teve duração de 32 dias, a fase de *crescimento* durou 25 dias, a fase de *máximo desenvolvimento* decorreu em 37 dias e a fase de *senescência* durou 26 dias. A média diária de GPP, R_{eco} e NEE das fases de desenvolvimento do cultivo da soja é apresentada na Tabela 7. A média de todo o período de cultivo da soja para GPP foi de -19,11 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, para R_{eco} foi de 8,47 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e para NEE foi -1,47 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}. A média do ciclo de cultivo de soja para NEE está muito semelhante às médias de -1,35 e -1,38 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} para NEE obtidas por Lewczuk et al. (2017), para as safras de 2011 e 2012 na argentina com a metodologia de Eddy Covariance em soja de sequeiro, como descrito na Tabela 2.

Tabela 7. Média diária das fases do cultivo de soja para o fluxo líquido de CO_2 (NEE), o consumo de CO_2 pela fotossíntese (GPP) e a respiração do ecossistema (Reco) ao longo do ciclo de cultivo de soja.

Fase	GPP		
	Média	Máx.	Mín.
	µmol m^{-2} s^{-1}		
Inicial	-9,96(±1,97)	-6,95	-15,80
Crescimento	-21,84(±2,71)	-16,45	-26,75
Máximo desenvolvimento	-27,78(±5,10)	-17,10	-38,21
Senescência	-15,42(±4,89)	-8,25	-24,14

Fase	Reco		
	Média	Máx.	Mín.
	µmol m^{-2} s^{-1}		
Inicial	6,49(±0,82)	8,33	5,04
Crescimento	8,19(±0,72)	10,31	7,00
Máximo desenvolvimento	10,54(±0,70)	11,85	9,13
Senescência	8,25(±1,00)	10,20	6,87

Fase	NEE		
	Média	Máx.	Mín.
	µmol m^{-2} s^{-1}		
Inicial	1,15(±1,45)	4,53	-2,36
Crescimento	-3,28(±1,18)	-1,47	-5,60
Máximo desenvolvimento	-4,04(±2,45)	1,10	-8,17
Senescência	0,71(±1,86)	4,64	-2,58

5.3.2. Fluxos de energia e água

As médias diárias da fase *inicial* foram de 166, -3, 48 e 72 W m^{-2} para Rn, G, Hs e LE, respectivamente. Na fase *crescimento*, as médias foram de 148, 4, 8 e 95 W m^{-2} para Rn, G, Hs e LE, respectivamente. No *máximo desenvolvimento*, as médias foram de 151, 5, -5 e 120 W m^{-2} para Rn, G, Hs e LE, respectivamente. Ao final do ciclo, na fase *senescência*, as médias foram de 148, 1, 21 e 84 W m^{-2} para Rn, G, Hs e LE, respectivamente.

As médias de 30 minutos dos componentes do balanço de energia (Rn, LE, Hs e G) ao longo de um dia médio nas fases de desenvolvimento do cultivo da soja, são apresentadas na Figura 17, com os valores máximos ocorrendo em torno do meio-dia. Na fase *inicial*, o valor máximo do saldo de radiação (Rn) foi de 624 W m^{-2}, para o fluxo de calor latente (LE) foi de 189 W m^{-2}, para o fluxo de calor sensível (Hs) foi 167 W m^{-2} e para o fluxo de calor no solo (G) foi de 25 W m^{-2}. Na fase de *crescimento*, os máximos para Rn, LE, Hs e G foram, respectivamente, 580, 282, 47 e 84 W m^{-2}. Na fase de máximo desenvolvimento, os máximos foram de 586, 357, 47 e 80 W m^{-2} para Rn, LE, Hs e G, respectivamente. Na fase de *senescência*, os máximos alcançaram para Rn, LE, Hs e G, os valores de 658, 251, 109 e 41 W m^{-2}.

Na fase *inicial*, a energia disponível (Rn) é distribuída entre LE e Hs, devido ao pequeno porte das plantas e menor IAF, ainda não atuando fortemente no LE. Já nos períodos de *crescimento* e *máximo desenvolvimento*, com aumento do IAF, a diferença entre LE e Hs fica em 83 e 87%, respectivamente. No período de *senescência*, com a diminuição do IAF, ocorre a queda da relação entre LE e Hs para 57% de diferença. A relação da média diária para todo o período de cultivo da soja entre LE/Rn foi de 61% neste estudo.

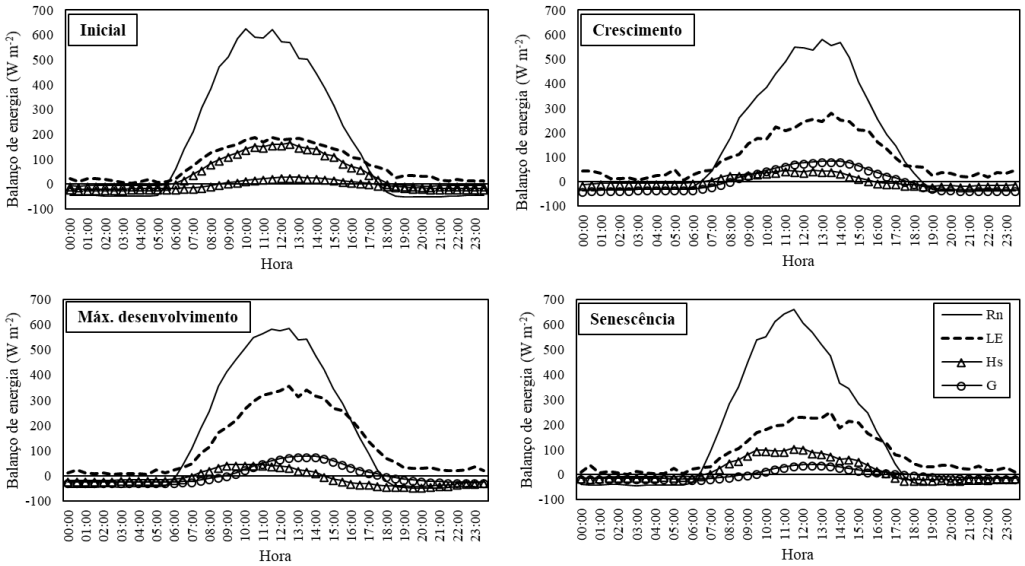

Figura 17. Balanço de energia para o cultivo de soja nas fases de desenvolvimento.

A relação da energia utilizada para aquecimento do ar e evaporação da água (Hs+LE) em relação ao termo Rn-G foi de 64% para o período de cultivo de soja (Figura 18). Separadamente analisadas, as fases *inicial*, *crescimento*, *máximo desenvolvimento* e *senescência* possuem, respectivamente, um percentual de 74, 62, 71 e 39%.

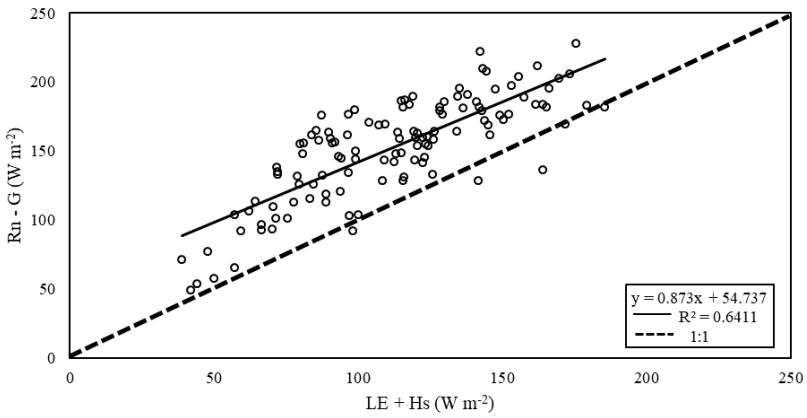

Figura 18. Fechamento do balanço de energia para o período de cultivo de soja.

Na Tabela 8, observa-se que o período de *máximo desenvolvimento* foi responsável pelo maior consumo hídrico e, juntamente com o período de *crescimento*, supera os valores médios de evapotranspiração de referência (ETo). Ao longo dos 120 dias de ciclo de cultivo da soja, ocorreu uma precipitação acumulada de 582,4 mm, com boa distribuição temporal, com média de 4,85 mm d^{-1}, mantendo a umidade do solo sempre alta, acima ou muito próxima a 90% da capacidade de campo do solo na camada de 0-0,4 m (confirme condição estabelecida como período *úmido*, segundo item 4.4.3). Nestas condições favoráveis, a cultura alcançou evapotranspiração muito próxima ao potencial durante as fases de desenvolvimento (Tabela 8), estando relacionada ao consumo de CO_2 para a fotossíntese (Figura 19).

A evapotranspiração média do ciclo diário total de cultivo da soja foi de 4,52 mm d^{-1}, semelhantes aos valores obtidos por Anapalli et al. (2018) para soja irrigada e superior aos outros estudos na Tabela 1.

Tabela 8. Descrição da evapotranspiração do cultivo da soja (ETr) obtida pelo método Eddy Covariance, da evapotranspiração de referência (ETo) estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO_56*) e da precipitação acumulada nas fases de desenvolvimento.

Fase	Evapotranspiração (ETr) Média	Máx.	Mín.	ETo (PM) Média	Precipitação Acumulada
		mm d^{-1}			mm
Inicial	3,60(±0,94)	5,83	1,68	5,95	99,82
Crescimento	4,71(±1,23)	7,44	2,42	4,39	249,94
Máximo desenvolvimento	5,38(±1,45)	7,45	2,08	4,89	123,44
Senescência	4,20(±1,00)	6,48	2,57	5,13	109,22

* ALLEN et al. (1998).

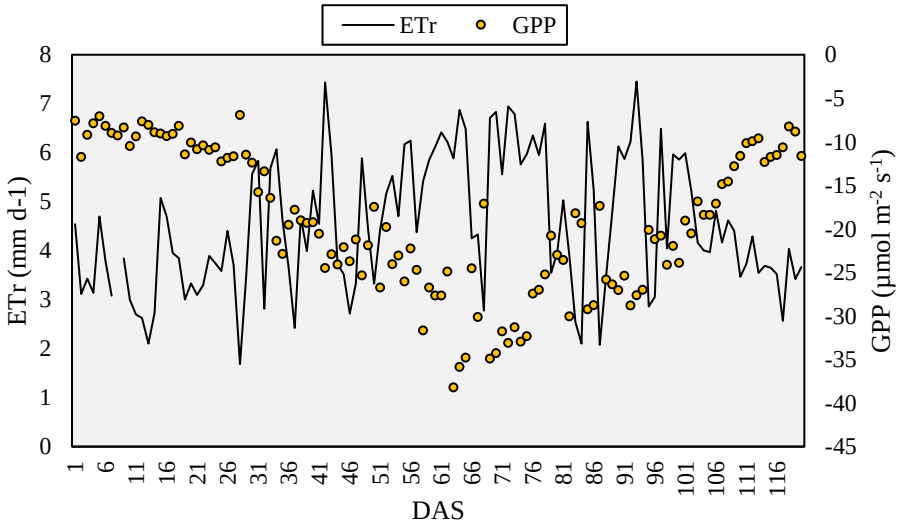

Figura 19. Média diária da assimilação de CO_2 pela soja (GPP) e da evapotranspiração do cultivo da soja (ETr) durante o ciclo de cultivo, representado pelos dias após a semeadura (DAS).

Para análise da relação ETr/ETo do cultivo da soja, foi incluída uma nova fase para divisão do ciclo. A fase inicial, teve duração de 22 dias, com início no dia 24/11/2018 (semeadura), a fase de crescimento teve início no dia 16/12/2018 duração de 22 dias, a fase de máximo desenvolvimento, com início em 07/01/2018, teve duração de 43 dias, a fase de senescência iniciou em 19/02/2018 e teve duração de 15 dias e a fase de ponto de colheita, teve início no dia 06/03/2018, com duração de 18 dias.

Para a relação ETr/ETo em cada fase do ciclo de cultivo da soja (Figura 20), foi observada uma semelhança aos valores de coeficiente de cultura (Kc) indicados para o cultivo da soja pela FAO (Tabela 9). Com a aplicação da equação 4.4 para estimativa de valores de Kc para soja, foram obtidos os valores de ETc (ETo x Kc) e comparados à ETr obtida pelo método Eddy Covariance no local de estudo com o cultivo da soja (Figura 21), podendo ser observada uma similaridade entre os valores ao longo do ciclo.

Tabela 9. Relação média da evapotranspiração real do cultivo da soja na área de estudo (ETr) e evapotranspiração de referência (ETo) nas fases de desenvolvimento do cultivo e valores estimados de coeficiente de cultura (Kc) pela FAO*.

FASE	DAS	Relação ETr/ETo	Kc FAO
Inicial	0 a 21	0.60	**03-0.4** (20 a 25 dias)
Crescimento	22 a 43	0.97	**0.7-0. 8** (25 a 35 dias)
Pleno desenvolvimento	44 a 86	1.13	**1.0-1.15** (45 a 65 dias)
Senescência	87 a 101	1.02	**0.7-0.8** (20 a 30 dias)
Ponto de colheita	102 a 119	0.76	**0.4-0.5**

*FAO, 2018b.

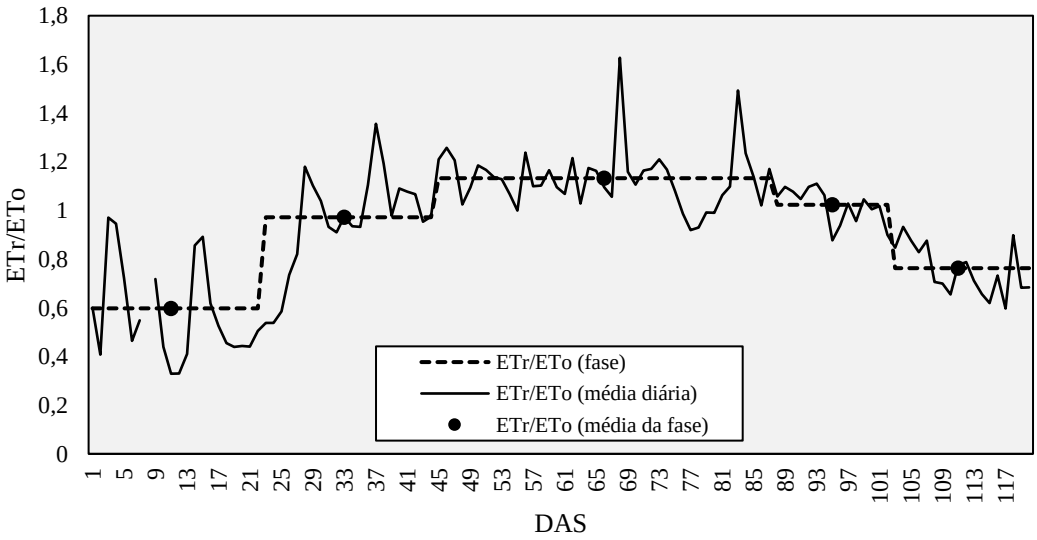

Figura 20. Relação ETr/ETo ao longo do ciclo de cultivo da soja.

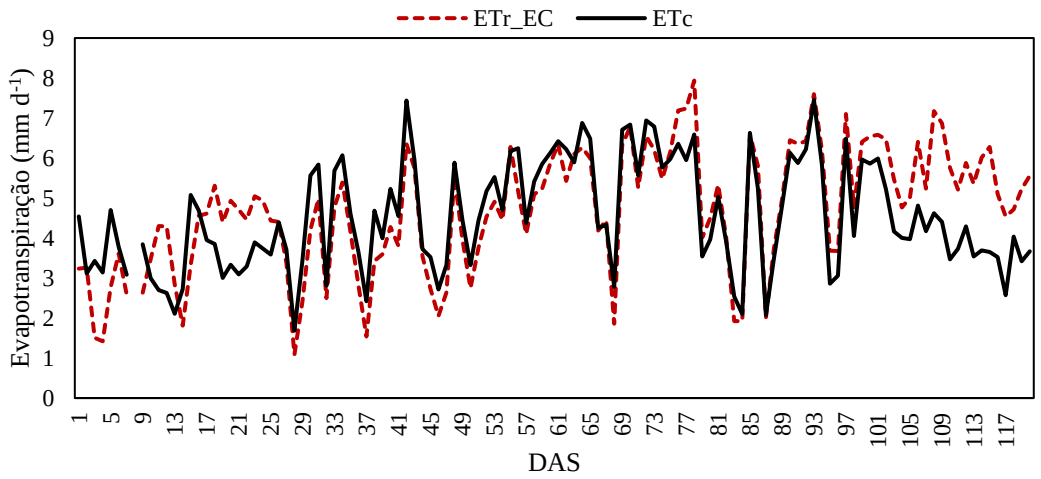

Figura 21. Relação da evapotranspiração de cultura (ETc) estimada e da evapotranspiração real obtida pelo método Eddy Covariance (ETr_EC).

5.4. Análise dos fluxos de massa e energia no período de renovação do canavial

5.4.1. Fluxo de CO_2, energia e água

A fase *Soja* se distinguiu dos demais períodos, por ser a etapa de renovação do canavial em que ocorreu a transição do fluxo líquido de CO_2 (NEE) positivo, com predominância da emissão nos períodos com solo em pousio, para negativo, com o consumo de CO_2 durante o ciclo de cultivo de soja (Figura 22). A média diária total para NEE do período *Cp* foi da emissão de 2,51 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}, a média diária de emissão no período *Sp* foi de 3,10 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1} e a média diária de consumo de CO_2 do período *Soja* foi de -1,47 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}.

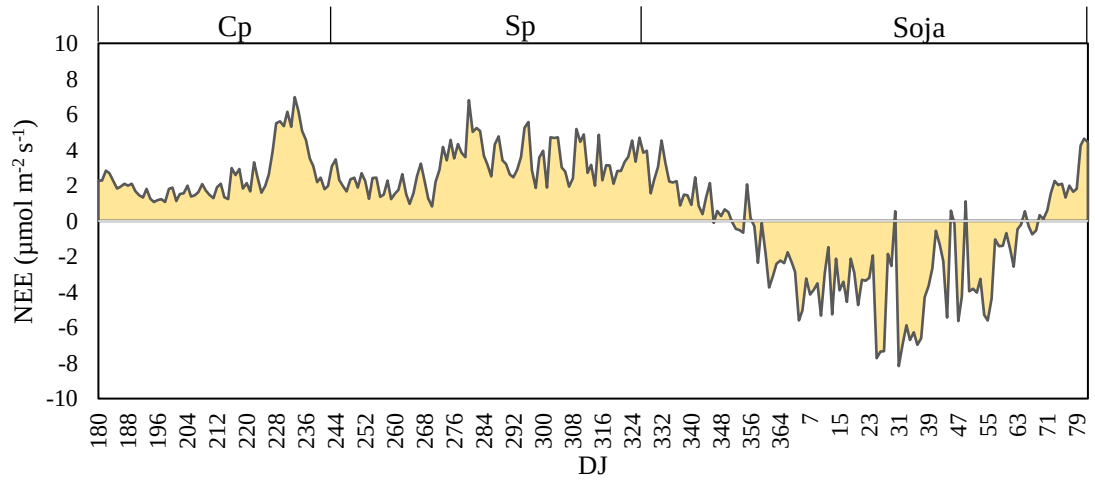

Figura 22. Média diária do fluxo líquido de CO_2 (NEE) nos períodos de solo com cobertura de palha (Cp), solo sem cobertura (Sp) e cultivo de soja (Soja) durante a renovação do canavial, analisado em Dias Julianos (DJ).

O balanço de energia ao longo do período de estudo (Figura 23), possui forte relação com a cobertura do solo e as condições meteorológicas. A inserção de um cultivo no sistema de renovação do canavial alterou acentuadamente a partição energética de LE, Hs e G. Durante a renovação do canavial, houve distinção na evapotranspiração do solo em pousio entre os períodos considerados como *seco* ou *úmido*, com um aumento significante da evapotranspiração na inserção do cultivo de soja na área.

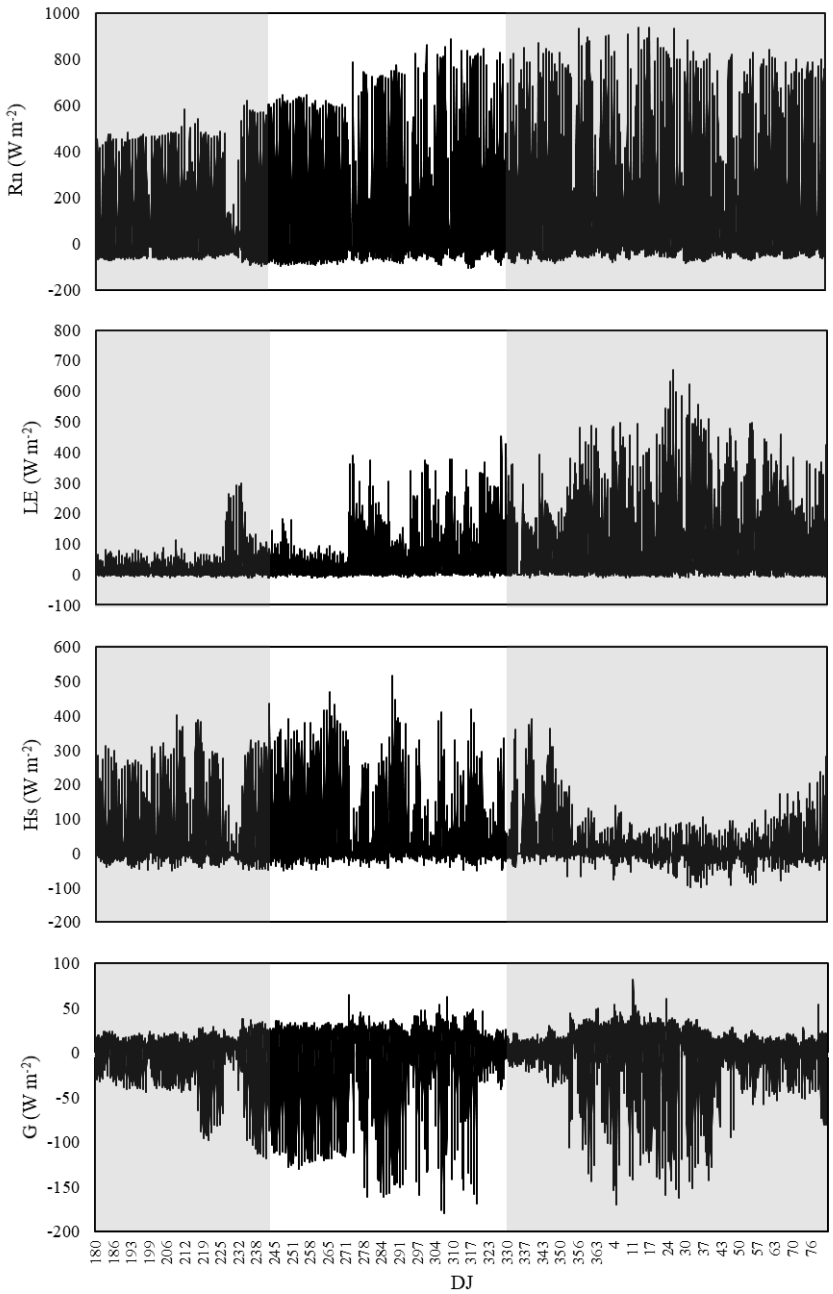

Figura 23. Saldo de radiação (Rn), Fluxo de calor latente (LE), Fluxo de calor sensível (Hs) e Fluxo de calor no solo (G) no período de estudo, sendo divididos os períodos em solo coberto com palha (Cp) na região hachurada em cinza a esquerda; solo sem cobertura (Sp) na região não hachurada; e Cultivo de Soja (Soja) na região hachurada em cinza a direita. Sendo DJ o dia juliano.

5.5. Balanço de água e carbono na renovação do canavial

O período de pousio atuou como fonte de carbono, em comparação ao período de cultivo da soja. A a inserção de plantas de cobertura em substituição ao solo sem cultivo, tem o potencial de promover uma inversão nos fluxos e o período passe a inserir carbono no sistema (LEWCZUK et al., 2017).

O fluxo líquido (NEE) acumulado de CO_2 para o período total de renovação do canavial foi de 930,85 gCO_2 m^{-2}. Para o período *Cp*, o NEE acumulado foi de 609,72 gCO_2 m^{-2}, para o período *Sp* o total acumulado foi de 991,02 g CO_2 m^{-2}. O ciclo de cutivo de soja teve como balanço final um acumulado de -669,89 gCO_2 m^{-2} para NEE, -4359,93 gCO_2 m^{-2} para GPP e -3865,36 gCO_2 m^{-2} para R_{eco}.

O estudo realizado por VEECK (2018), em Carazinho (RS) com a metodologia de Eddy Covariance para análise dos fluxos de CO_2 para um cultivo de soja, obteve um acumulado do NEE para o cico de cultivo de -209,20 gC m^{-2}, um acumulado de -1222,88 gC m^{-2} para GPP e um acumulado de 1063,31 gC m^{-2} para R_{eco}. Realizando a conversão dos acumulados dos fluxos de CO_2 da unidade de gCO_2 m^{-2} para gC m^{-2} por meio da divisão pelo fator 3,67 e considerando que o GPP noturno é nulo, na questão de conversão para escala diária foram consideradas 12h em um dia, os fluxos acumulados encontrados por VEECK (2018) são semelhantes aos obtidos neste estudo, que foram de -182,53 gC m^{-2} para NEE, -1187,99 gC m^{-2} para GPP e 1053,23 gC m^{-2} para R_{eco}.

O fluxo acumulado de CO_2, representou bem como acontece a diferença dos fluxos ao longo de cada período com diferentes coberturas (Figura 24). Com a inserção do cultivo de plantas no sistema, o fluxo inverteu de positivo para negativo e passou a consumir CO_2 para fotossíntese, predominando sobre a emissão por respiração do sistema.

O acumulado final do NEE para todo o período de renovação do canavial foi de 9,31 ton CO_2 ha^{-1}, representando uma maior emissão de CO_2 em relação ao consumo, mesmo com cultivo de soja durante o período. O cultivo foi responsável pela amenização da emissão no balanço final, mas não anulou o CO_2 emitido durante o período de pousio.

Ao final da renovação do canavial, nota-se que de acordo com o manejo empregado, existe maior perda de água do solo quando o solo em pousio está descoberto em relação ao solo com cobertura. A evapotranspiração total do período com solo em pousio com cobertura de palha (*Cp*) foi de 46,33 mm e do período com solo sem cobertura (*Sp*) foi de 171,38 mm. O consumo hídrico do cultivo de soja no local de estudo foi de 527,70 mm (Figura 25). O estudo realizado por Suyker & Verma (2010) em Nebraska (EUA), com o método Eddy Covariance, em relação a 3 safras de soja entre 2002 e 2006, para soja irrigada, obteve uma evapotranspiração total do ciclo de 454 mm e para soja não irrigada de 430 mm. No trabalho com soja irrigada realizado por Anapalli et al. (2018) no Mississippi (EUA), a evapotranspiração total do ciclo da soja foi de 422 mm com a metodologia EC.

O experimento realizado por Moreira et al. (2015) com o método EC em Cruz alta (Brasil), alcançou uma evapotranspiração total do ciclo de 410,8 mm.

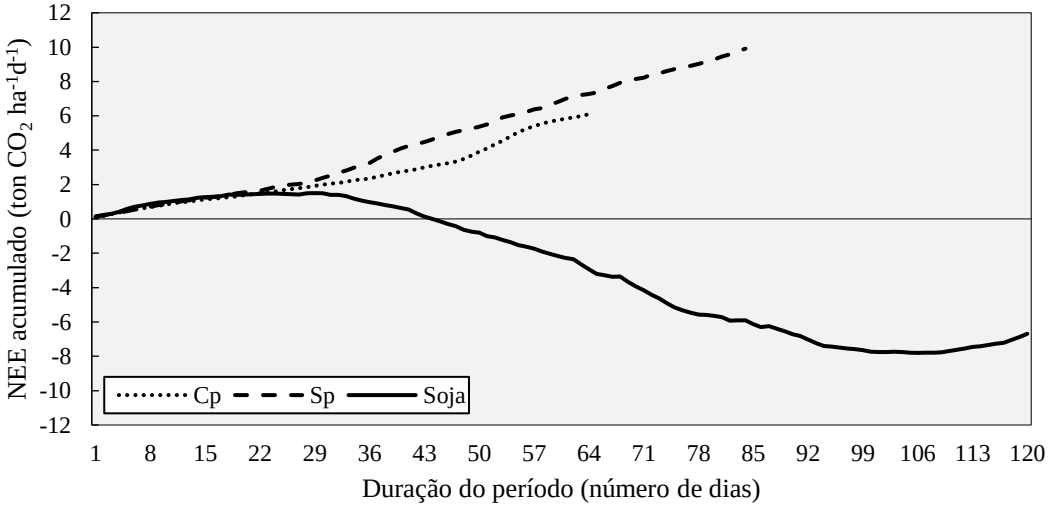

Figura 24. Fluxo líquido de carbono acumulado nas diferentes coberturas do solo, sendo: Solo coberto com palha (Cp); solo sem cobertura (Sp); e cultivo de soja (Soja).

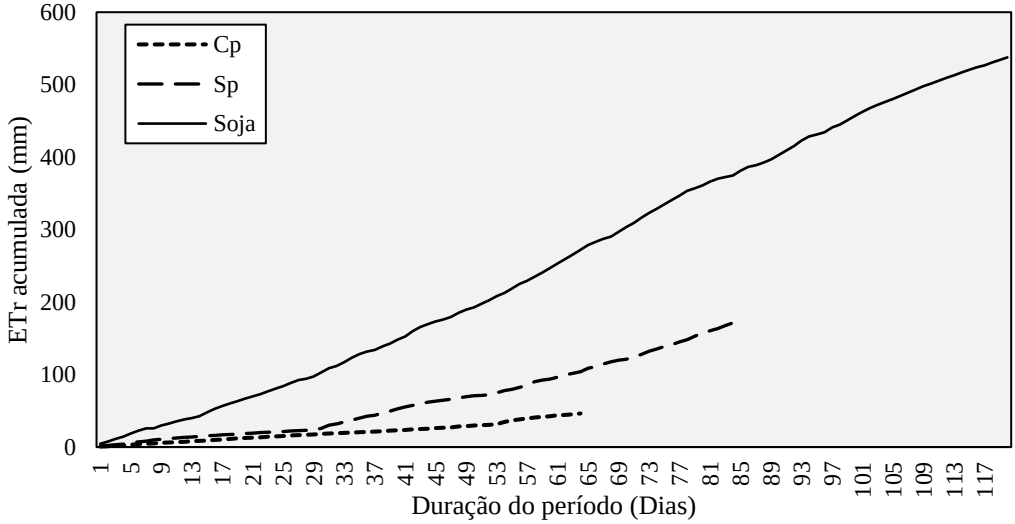

Figura 25. Evapotranspiração acumulada nos períodos Cp (solo coberto de palha), Sp (solo sem cobertura) e Soja.

6. CONCLUSÕES

Os fluxos de CO_2, água e energia são alterados conforme a condição hídrica e a cobertura do solo. Existe diferença na emissão de CO_2 por um solo em pousio com cobertura de palha e sem cobertura, principalmente após ocorrência de precipitação. O período com solo em pousio e cobertura de palha obteve um incremento médio do NEE em 54% no período *úmido* em relação ao período *seco*. Com solo descoberto, o incremento foi de 64%. Neste caso, a inserção de um cultivo após período de pousio da área, não anulou a emissão de CO_2 anterior, mas ajudou a amenizar o total da emissão de CO_2 no período de renovação do canavial. O período de renovação do canavial, de acordo com o manejo realizado, foi responsável por emitir 9,31 ton CO_2 ha^{-1} em 268 dias, com solo em pousio sendo manejado com cobertura de palha, sucedido de um período com solo descoberto e inserção de um cultivo de soja. O cultivo de soja obteve um consumo hídrico acumulado de 527, 70 mm em 120 dias de ciclo. A renovação do canavial faz parte do sistema de cultivo de cana-de-açúcar e atua como fonte de CO_2 para o ambiente, pelo período prolongado de solo em pousio. A adoção de um manejo diferenciado durante o período de renovação de um canavial pode contribuir para a diminuição das emissões de CO_2 do sistema.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage**, 56. Rome: FAO, 1998.

ANAPALLI, S. S.; FISHER, D. K.; REDDY, K. N.; WAGLE, P.; GOWDA, P. H.; SUI, R. Quantifying soybean evapotranspiration using an eddy covariance approach. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 228-239, 2018.

AUBINET, M.; VESALA, T.; PAPALE, D. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. **Springer**, 460 pp. 2012.

BOWEN, I. S. The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from any Water Surface. **Physical Review**, v. 27, n. 6, p. 779–787, 1926.

CABRAL, O. M.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; LIGO, M. A.; TATSCH, J. D.; FREITAS, H. C.; BRASILIO, E. Water use in a sugarcane plantation. **Gcb Bioenergy**, 4(5), 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 CO 2 above a sugarcane plantation in Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, 182, 54-66, 2013.

CÂMARA, G.M. de S. Fenologia é ferramenta auxiliar de técnicas de produção. **Visão Agrícola**, v.5, p.63-66, 2006.

CARDOSO, E.J.B.N.; VASCONCELLOS, R.L.F.; BINI, D.; MIYAUCHI, M.Y.H.; DOS SANTOS, C.A.; ALVES, P.R.L.; DE PAULA, A.M.; NAKATANI, A.S.; PEREIRA, J.M.; NOGUEIRA, M.A. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health?. **Scientia Agricola**, 70, p. 274-289, 2013.

CHAMIZO, S.; SERRANO-ORTIZ, P.; LÓPEZ-BALLESTEROS, A.; SÁNCHEZ-CAÑETE, E. P.; VICENTE-VICENTE, J. L.; KOWALSKI, A. S. Net ecosystem CO2 exchange in an irrigated olive orchard of SE Spain: influence of weed cover. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 239, p. 51-64, 2017.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Série histórica das safras**. Disponível em: <www.conab.gov.br>. Acesso em: novembro de 2018.

COPPENS, F.; GARNIER, P.; DE GRYZE, S.; MERCKX, R..; RECOUS, S. Soil moisture, carbon and nitrogen dynamics following incorporation and surface application of labelled crop residues in soil columns. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 6, p. 894-905, 2006.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Faostat – **Statistics Database**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat>. Acesso em 25 de janeiro de 2018a.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crop information. **Website**, 2018b. Disponível em: <www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/soybean/en/>

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Greenhouse Gas Emissions from Agriculture, Forestry and Other Land Use**, 2016. URL < http://www.fao.org/3/a-i6340e.pdf>

FOKEN, T.; LEUNING, R.; ONCLEY, S. R.; MAUDER, M.; & AUBINET, M. Corrections and data quality control. **In: Eddy covariance. Springer**, p. 85-131. Dordrecht, 2012.

HSIEH, CHENG-I; KATUL, G.; CHI, TZE-WEN. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. **Advances in Water Resources**, Volume 23, 7, p. 765-772, 2000.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em 25 de janeiro de 2018.

KLJUN, N.; CALANCA, P.; ROTACH, M. P.; SCHMID, H. P. A Simple Parameterisation for Flux Footprint Predictions. **Boundary-Layer Meteorology**, Volume 112, 3, p. 503–523, 2004.

KORMANN, R. & MEIXNER, F.X. An Analytical Footprint Model For Non-Neutral Stratification. **Boundary-Layer Meteorology**, 99, 2, p. 207-224, 2001.

LA SCALA JR., N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G.T. Shortterm soil CO_2 emission after conventional and reduced tillage of a no till sugar cane area in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**., 91:244-248, 2006.

LASSLOP, G.; REICHSTEIN, M.; PAPALE, D.; RICHARDSON, ARNETH, A.; BARR, A; STOY, P; WOHLFAHRT, G. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: Critical issues and global evaluation. **Global Change Biology**, v. 16, n. 1, p. 187–208, 2010.

LEWCZUK, N. A.; POSSE, G.; RICHTER, K.; ACHKAR, A. CO_2 and N2O flux balance on soybean fields during growth and fallow periods in the Argentine Pampas: a study case. **Soil and Tillage Research**, v. 169, p. 65-70, 2017.

LINN, D. M. & DORAN, J. W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. **Soil Sci. Soc**. **Am. J.,** vol. 48, 1984.

LLOYD, J. & TAYLOR, J. A. On the Temperature Dependence of Soil Respiration. **Functional Ecology**, vol. 8, no. 3, p. 315–323, 1994.

LUNDEGÅRDH, Henrik. Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. **Soil Science**, v. 23, n. 6, p. 417-453, 1927.

MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT.** Tese de Doutorado, UFRGS, 2007.

MAUDER, M., & FOKEN, T. Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure. **Meteorologische Zeitschrift**, Vol.15, Nº 6, p. 597-609, 2006.

MOITINHO, M. R.; PADOVAN, M. P.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA, N. Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO_2. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1720-1728, 2013.

MONTEIRO, J. E. B. A. Agrometeorologia dos Cultivos, o fator meteorológico na produção agrícola. **Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)**, Brasília, DF, 1ª edição, 530 p., 2009.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, p. 205–234, 1965.

MOREIRA, V. S.; ROBERTI, D. R.; MINELLA, J. P.; ... &ANNES D.G. Seasonality of soil water exchange in the soybean growing season in southern Brazil. **Scientia Agricola**, vol.72 no.2, 2015.

PAPALE, D.; REICHSTEIN, M.; AUBINET, M.; CANFORA, E.; BERNHOFER, C.; KUTSCH, W.; LONGDOZ, B.; RAMBAL, S.; VALENTINI, R.; VESALA, T.; YAKIR, D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. **Biogeosciences**, 3, 571 – 583, 2006.

PAVÃO, M. A.; ALENCAR, L. D.; ZANELLO, C. A., DE MORAIS, J. P. G.; CARDOSO, J. C. Cultivo e produção de soja em reforma de canavial. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, 2(1), 17-25, 2015.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences** 11 (5), 1633–1644, 2007. URL <http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/>

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Mathematical and Physical Sciences**, Vol. 193, nº. 1032, p. 120-145, 1948.

PENMAN; L., H. Evaporation: an introductory survey. **Neth. J. Agric. Sci**., v. 4, p. 9–29, 1956.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. **Guaíba: Agropecuária**, 478 p., 2002.

PERES, J.G.; SOUZA, C. F.; LAVORENTI, N. A. Avaliação dos efeitos da cobertura de palha de cana-de-açúcar na umidade e na perda de água do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 5, p. 875-886, 2010.

PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L.; PARKIN, T. B.; KUSTAS, W. P.; KASPAR, T. C. Carbon dioxide dynamics during a growing season in midwestern cropping systems. **Environmental Management**, 33(1), S330-S343, 2004.

REICHSTEIN, M.; FALGE, E.; BALDOCCHI, D., et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biology**, 11, 1424-1439, 2005.

REICOSKY, D.C. Tillage-induced CO_2 emission from soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 49: 273–285, 1997.

SANTOS, M.R. Estudo de viabilidade técnico-econômica da interação cana soja/amendoim. **Dissertação de Mestrado**, 2010.

ŞAYLAN, L.; KIMURA, R.; MUNKHTSETSEG, E.; KAMICHIKA, M. Seasonal variation of carbon dioxide fluxes over irrigated soybean (*Glycine max* L.). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 105, n. 1-2, p. 277-286, 2011.

SELESTRINO, P.R.; UNÊDA-TREVISOLI, S.H.; DA SILVA, F.M.; PEREIRA E.M.; VAL, B.H.P. Performance agronômica de genótipos precoces de soja destinadas a áreas de reforma de canavial. **Ciência & Tecnologia**: FATEC-JB, Jaboticabal (SP), v. 6, n. 1, p. 59-71, 2014.

SOUZA, J. F. A. DE; OLIVEIRA, L. R. DE; AZEVEDO, J. L. L. DE; SOARES, I. D.; MATA, M. M. Uma revisão sobre a turbulência e sua modelagem. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 21-41, 2011.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology.** Dordrecht: Kluwer, 1988.

SUYKER, A. E. & VERMA, S. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize–soybean cropping systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, 149:3, p. 443–452, 2009.

SUYKER, A. E. & VERMA, S. Coupling of carbon dioxide and water vapor exchanges of irrigated and rainfed maize–soybean cropping systems and water productivity**. Agricultural and Forest Meteorology,** 150, p. 553–563, 2010.

TAVARES, R. L. M.; SIQUEIRA, D. S.; PANOSSO, A. R.; CASTIONI, G. A. F.; SOUZA, Z. M. D.; SCALA JR, N. L. Soil management of sugarcane fields affecting CO_2 fluxes. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 6, p. 543-551, 2016.

TRIVELIN, P.C.O.; RODRIGUÊS, J.C.S.; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e uréia-15N aplicado ao solo em complemento a vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.31, p.89-99, 1996.

VALE, F.X.R.; FERNANDES FILHO, E.I.; LIBERATO, J.R. Quantificação de doenças - Quant: versão 1.0.1. Viçosa: UFV, 2001. **Software**.

VAN DONK, S. J.; MARTIN, D. L.; IRMAK, S.; MELVIN, S. R.; PETERSEN, J. L.; DAVISON, D. R. Crop residue cover effects on evaporation, soil water content, and yield of deficit-irrigated corn in west-central Nebraska. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 6, p. 1787-1797, 2010.

VASCONCELOS, A. L. S..; CHERUBIN, M. R.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. E.; GMACH, M. R.; SIQUEIRA-NETO, M. Greenhouse gas emission responses to sugarcane straw removal. **Biomass and Bioenergy**, v. 113, p. 15-21, 2018.

VEECK, G. P. Trocas de energia e massa no cultivo de soja e trigo no sul do Brasil. **Dissertação de Mestrado**, UFSM, Santa Maria, RS, 2018.

WAGLE, P.; GOWDA, P. H.; ANAPALLI, S. S.; REDDY, K. N.; & NORTHUP, B. K. Growing season variability in carbon dioxide exchange of irrigated andrainfed soybean in the southern United States. **Science of the Total Environment**, v. 593, p. 263-273, 2017.

WALDO, S.; CHI, J.; PRESSLEY, S. N.; O'KEEFFE, P.; ... & LAMB, B. K. Assessing carbon dynamics at high and low rainfall agricultural sitesin the inland Pacific Northwest US using the eddy covariance method. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 218, p. 25-36, 2016.

WANG, T.; TANG, X.; ZHENG, C.; GU, Q.; WEI, J.; MA, M. Differences in ecosystem water-use efficiency among the typical croplands. **Agricultural Water Management**, v. 209, p. 142-150, 2018.

WEBB, E. K.; PEARMAN, G. I.; LEUNING, R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 106, n. 447, p. 85–100, 1980.

WILCZAK, J. M.; ONCLEY, S. P.; STAGE; S. A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. **Boundary-Layer Meteorology**, 99: 127-150, 2001.

WILSON, K.; GOLDSTEIN, A.; FALGE, E.; AUBINET, M.; BALDOCCHI, D.; BERBIGIER, P.; ... & VERMA, S. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, 113(1), 223-243, 2002.

WUEST, Stewart. Surface effects on water storage under dryland summer fallow: a lysimeter study. **Vadose Zone Journal**, 2017.

WUTZLER, T.; LUCAS-MOFFAT, A.; MIGLIAVACCA, M.; KNAUER, J.; SICKEL, K.; ŠIGUT, L.; MENZER, O.; REICHSTEIN, M. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. **Biogeosciences**, 15, 5015–5030, 2018.