



## IMPACTOS DAS MUDANÇAS DE COBERTURA VEGETAL NO SALDO DE RADIAÇÃO E FLUXO DE CALOR NO SOLO NOS TABULEIROS COSTEIROS DE ALAGOAS

Luan Santos de Oliveira Silva<sup>1</sup> 

Rosiberto Salustiano da Silva Junior<sup>2</sup> 

Carlos Alexandre Santos Querino<sup>3</sup> 

José Marcelo Lopes Júnior<sup>4</sup> 

Marcos Antonio Lima Moura<sup>5</sup> 

### Destaques:

- A precipitação ficou abaixo da média histórica a partir do início da época chuvosa;
- Importância da cobertura do solo no saldo de radiação e fluxo de calor no solo;
- Contribuição da monocultura da cana de açúcar no balanço energético nos tabuleiros costeiros;
- Energia disponível sofre influência da precipitação e cobertura vegetal;

**Resumo:** O Estado de Alagoas tem uma área de 10,95% destinada ao cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) O fluxo de calor no solo (FCS) é um importante componente do saldo de radiação (Rn) que também sofre variação com a mudança da cobertura vegetal. O experimento foi realizado em uma área experimental de cultivo de cana de açúcar, no município de Rio Largo (09°28'03" S, 35°49'49" W), no período de novembro/2017 a novembro de 2018, com o propósito de caracterizar FCS e Rn sob condições de diferentes graus de cobertura vegetal do solo nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. As componentes do saldo de radiação foram medidas por um Saldo Radiômetro modelo CNR1 da Kipp e Zonen, enquanto o FCS foi medido por três placas do modelo HFT-3 (REBS, Campbell Scientific Inc., EUA), as quais foram instaladas a uma profundidade de 0,05 metros. A transmitância atmosférica (Kt) predominante foi de céu parcialmente nublado (54,70%). A precipitação, juntamente com a nebulosidade, radiação solar incidente e cobertura do terreno interferiram no ciclo sazonal do saldo de

<sup>1</sup> Graduando em Meteorologia pelo Instituto de Ciências Atmosféricas na Universidade Federal de Alagoas. E-mail: luan.silva@icat.ufal.br.

<sup>2</sup> Professor Nível Associado da Universidade Federal de Alagoas e doutor em Meteorologia pela Universidade de São Paulo. E-mail: rosiberto@icat.ufal.br.

<sup>3</sup> Doutor em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso (2016) e pós-doutor em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Goiás. E-mail: carlosquerino@ufam.edu.br.

<sup>4</sup> Doutorando em Meteorologia pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). E-mail: josemarcelolopesjunior@hotmail.com.

<sup>5</sup> Doutor em Agronomia (Energia na Agricultura) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2000). Atualmente é professor titular do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas. E-mail: malm@ccen.ufal.br.

radiação (Rn) e fluxo de calor no solo (FCS). O impacto, em termos médios, da retirada da cobertura vegetal no Rn foi quase nulo, enquanto no FCS foi de 437% no período diurno e 240% no noturno.

**Palavras-chave:** Balanço de radiação; Cana de Açúcar; Sazonalidade; Nordeste do Brasil, Precipitação.

#### THE IMPACT OF LAND COVER CHANGE ON NET RADIATION AND SOIL HEAT FLUX IN THE COASTAL TABLELANDS OF THE ALAGOAS STATE, BRAZIL

**Abstract:** The State of Alagoas dedicates 10,95% of its area to the cultivation of sugar cane (*Saccharums sp.*). Soil heat flux (SHF) is a crucial component of net radiation (Rn), which also varies due to changes in vegetation cover. This experiment was carried out in an area of experimental sugar cane cultivation in the municipality of Rio Largo (09°28'03" S, 35°49'49" W) from November 2017 to November 2018. The aim was to characterize SHF and Rn under different degrees of soil vegetation cover in the Coastal Tablelands of the Alagoas state, Brazil. Net radiation components were measured using a Kipp and Zonen CNR1 net radiometer, whereas SHF was measured using three HFT-3 plates (REBS, Campbell Scientific Inc., USA), which were installed at a depth of 0.05 meters. The predominant atmospheric transmittance (Kt) classification was partly cloudy (54.70%). Precipitation, along with cloudiness, incident solar radiation, and land cover, influenced the seasonal cycle of net radiation (Rn) and soil heat flux (SHF). On average, the removal of vegetation cover had a negligible impact on Rn, whereas it led to a 437% increase in SHF during the day and a 240% increase during the night.

**Keywords:** Radiation balance; Sugar cane; Seasonality; Northeastern Brazil, Precipitation

#### IMPACTOS DE LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL SOBRE EL BALANCE DE RADIACIÓN Y EL FLUJO DE CALOR DEL SUELO EN LOS TABLEROS COSTEROS DE ALAGOAS

**Resumen:** El Estado de Alagoas tiene un área de 10,95% dedicada al cultivo de caña de azúcar (*Saccharums sp.*). El flujo de calor del suelo (FCS) es un componente importante del balance de radiación (Rn) que también varía con los cambios en la cubierta vegetal. Este experimento se llevó a cabo en un área experimental de cultivo de caña de azúcar, en el municipio de Rio Largo (09°28'03" S, 35°49'49" W), de noviembre de 2017 a noviembre de 2018, con el propósito de caracterizar FCS y Rn bajo condiciones de diferentes grados de cobertura vegetal del suelo en los Tableros Costeros de Alagoas. Los componentes del balance de radiación se midieron con un radiómetro neto modelo CNR1 de Kipp y Zonen, mientras que el FCS se midió con tres placas del modelo HFT-3 (REBS, Campbell Scientific Inc., EUA), las cuales se instalaron a una profundidad de 0,05 metros. La transmitancia atmosférica predominante (Kt) fue parcialmente nublada (54,70%). La precipitación, junto con la nubosidad, la radiación solar incidente y la cobertura terrestre, interfirieron con el ciclo estacional del balance de radiación y el flujo de calor del suelo. El impacto, en términos promedios, de la remoción de la cobertura vegetal en el Rn fue casi nulo, mientras que en el FCS fue del 437% durante el día y del 240% durante la noche.

**Palabras clave:** Balance de radiación; Caña de azúcar; Estacionalidad; Nordeste de Brasil, Precipitación.

## **INTRODUÇÃO**

A cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*), durante o seu ciclo fenológico, é submetida a diversas condições de tempo. Porém, com o passar dos anos, uma cultura perene de cana-de-açúcar é afetada por diferentes fatores e elementos climáticos e meteorológicos a depender da região. As anomalias de precipitação são tidas como um processo capaz de afetar drasticamente o ciclo fenológico da cana-de-açúcar. Com base em Santos *et al.* (2009), a anormalidade sazonal da precipitação pluvial é um dos principais elementos que restringem a produtividade na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, pois está associada ao fato do período seco regional coincidir com o período de maior disponibilidade energética. Além disso, o regime pluviométrico está relacionado aos processos de ordem química, física e biológica na superfície terrestre, que são capazes de alterar as características hídricas e térmicas do solo. Pela estimativa da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2023) o Estado de Alagoas tem uma área destinada ao cultivo de cana-de-açúcar na safra 2022/2023 de cerca de 312 mil hectares, o que corresponde a 10,95% da área total do Estado. Sabe-se que a substituição da vegetação nativa por monocultivo de cana-de-açúcar em escala regional poderia influenciar localmente o clima através da alteração do balanço de radiação e do fluxo de calor no solo (Carvalho *et al.*, 2018).

Pode-se destacar que a importância da eficiência e aplicações da produção de cana-de-açúcar seria o aproveitamento da queima da biomassa na produção de biocombustíveis, que tem despertado atualmente grande interesse no cenário energético mundial, quando da geração de energia elétrica por meio da combustão. A cana-de-açúcar produz muita palha e bagaço no processo de geração de açúcar e álcool, que são direcionados para a produção de etanol de segunda geração e cogeração de energia elétrica (Lorenzi e Andrade, 2019). Dentre as culturas de importância no setor energético nacional, a cana-de-açúcar desponta das demais pelo fato de seu cultivo ser tradicional em várias regiões do Brasil, tanto que a biomassa da cana ocupa atualmente 19,1% das fontes renováveis da matriz energética nacional, segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2021).

Portanto, aumentar a eficiência do cultivo de cana-de-açúcar resultaria no aumento da produção de açúcar, álcool e geração de energia. Logo, o saldo de radiação ( $R_n$ ) e o fluxo de calor no do solo (FCS) são elementos essenciais na quantificação precisa do balanço de energia na interface solo-atmosfera, visto que eles são fundamentais para os processos turbulentos que modificam a evaporação e o aquecimento do ar. O fluxo de calor no solo é intrinsecamente dependente das propriedades físicas do solo, as quais envolvem condutividade e difusividade térmica, além da capacidade calórica volumétrica, assim como os processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem no solo e são dependentes da temperatura, umidade e do fluxo de calor do mesmo (Carneiro *et al.*, 2013).

Como o clima é um conjunto de fatores e elementos meteorológicos para um determinado local e período, a disponibilidade de energia solar é crucial na sua determinação. Na fase final de desenvolvimento da cultura, quando ocorre o corte da cana, o solo fica exposto diretamente aos raios solares. E essa mudança de cobertura do solo pode levar a alterações no saldo de radiação e no fluxo de calor no solo e, conseqüentemente, na partição da energia disponível ( $R_n - FCS$ ) entre os fluxos de calor latente e calor sensível. Cunha *et al.* (2013) asseguram que a mudança do uso do solo altera significativamente as propriedades biofísicas da superfície, modificando a rugosidade e as propriedades físicas e, por esta razão, os fluxos de energia e massa.

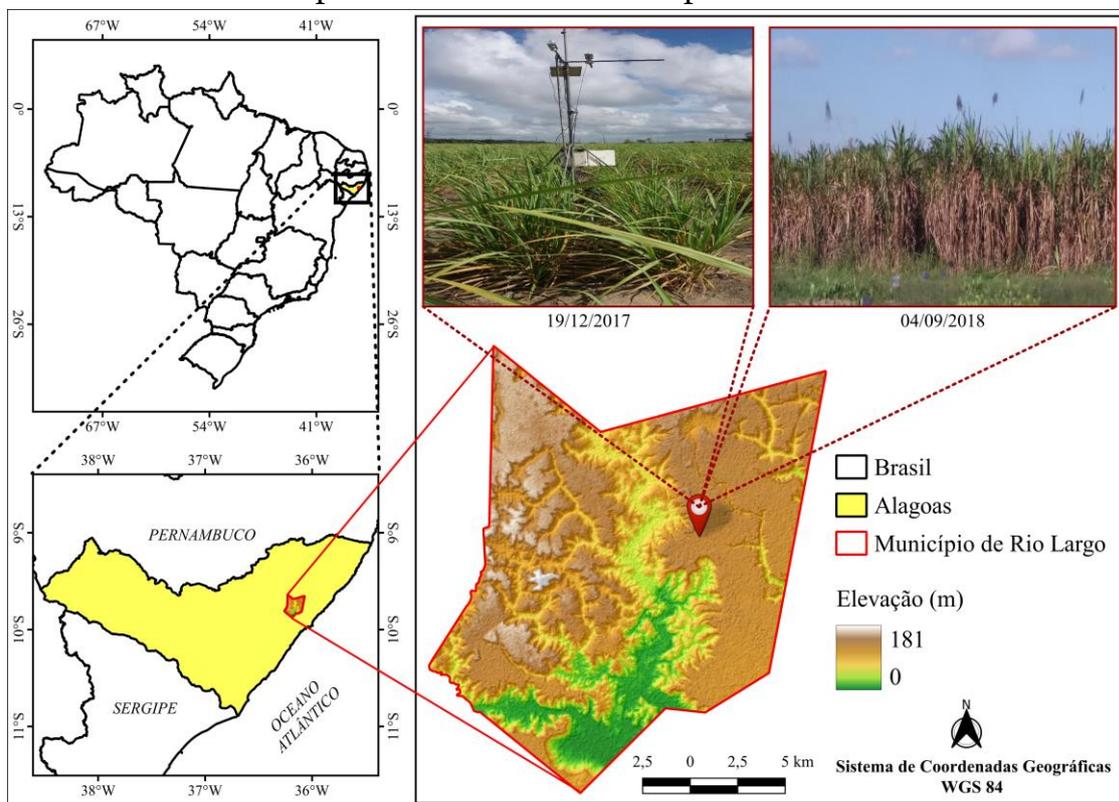
Tendo em vista que o FCS é um importante componente do  $R_n$ , sendo esta a principal variável caracterizadora do sistema climático global, dependente das condições da superfície, pesquisas avaliativas sobre o uso e cobertura do solo são importantes na definição e caracterização das trocas de energia entre solo e a atmosfera assim como as suas implicações no microclima. Por esta razão, o presente trabalho tem por objetivo elucidar o comportamento do  $R_n$  e FCS e caracterizar suas modificações sob condições de diferentes graus de cobertura do solo para uma superfície coberta por cana de açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.

## **METODOLOGIA**

### **Área de estudo**

O estudo foi realizado no município de Rio Largo localizado na região leste do Estado de Alagoas, portanto, faz parte da microrregião do leste alagoano pertencente a região metropolitana de Maceió-AL, cujo relevo integra a unidade dos Tabuleiros Costeiros de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2006) (Figura 1). O experimento foi realizado na área experimental de cana-de-açúcar do Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). O canal tinha espaçamento alternado de 1,5x0,9 m onde as parcelas foram compostas de seis linhas com seis metros de comprimento, totalizando 40 parcelas. O plantio deste canal foi realizado em 22/07/2016 com primeiro corte em 06/09/2017 e o segundo em 06/10/2018.

**Figura 1** - Localização geográfica do Estado de Alagoas e município de Rio Largo com mapa de elevação em destaque e fotos ilustrativas após o início e próximo do término do experimento.



Fonte: Os autores (2023).

## **Climatologia da região**

O município de Rio Largo está localizado na região leste do Estado de Alagoas, portanto, faz parte da microrregião do leste alagoano e pertence a região metropolitana de Maceió-AL, cujo relevo faz parte da unidade dos Tabuleiros Costeiros de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2006). O clima da região é tropical litorâneo úmido com precipitação de outono-inverno (As') com uma estação seca bem definida de acordo com a classificação climática de Köppen (Barros *et al.*, 2012). O regime pluviométrico em Alagoas está associado com os seguintes sistemas meteorológicos: Perturbações Ondulatórias dos Ventos Alísios (POAS), Brisas, Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN), Ondas de Leste, Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM). Já o período seco, com algumas secas severas, está relacionado com às variações que ocorrem na circulação de grande escala e, possivelmente, por mecanismos externos ao sistema terra-atmosfera-oceano (Molion e Bernardo, 2002; Silva Junior *et al.*, 2022). A região apresenta uma estação chuvosa no inverno, entre abril e julho, e nítida estação seca no verão, de novembro a fevereiro e período de transição pré-chuvoso em março e pré-seco em agosto, setembro e outubro.

De acordo com Ferreira Junior *et al.* (2015) a região apresenta médias climatológicas anuais (1972-2010) de precipitação pluvial de 1.789,5mm, temperatura média do ar de 25,4 °C, umidade relativa 81,8% e fração de nebulosidade de 42,9%. O solo foi classificado como latossolo amarelo istrocoeso argissólico, de textura média/argilosa na qual as propriedades físicas apresentam, para um perfil com profundidade de 0,60 m, em média, 56,8% de areia, 12,8% de silte e 30,4% de argila e densidade do solo de 1,32 Mg m<sup>-3</sup>.

## **Aquisição e tratamento dos dados**

Os dados foram coletados no período de novembro/2017 a novembro/2018 através de instrumentos montados em um tripé micrometeorológico instalado na área de cultivo (09°28'03" S, 35°49'49" W). Os dados foram registrados a cada 20 segundos e médias armazenadas a cada 10 minutos em dataloggers (CR10X, Campbell Scientific). As medições da radiação de onda longa atmosférica (Ra) e terrestre (Rs) e radiação solar global (Rg) e

radiação solar refletida ( $R_r$ ) foram realizadas por um saldo radiômetro modelo CNR1 da Kipp e Zonen (Delft, Holanda) e, posteriormente, essas variáveis foram utilizadas para cálculos do  $R_n$ , do Balanço de Ondas Curtas (BOC) e do Balanço de Ondas Longas (BOL), todas em  $W\ m^{-2}$ . O FCS foi medido por três placas do modelo HFT-3 (REBS, Campbell Scientific Inc., EUA), que foram instaladas a uma profundidade de 0,05 metros. Os dados de precipitação, para o mesmo período de estudo, foram coletados pela estação agrometeorológica ( $9^{\circ}28'29,1''$  S,  $35^{\circ}49'43,6''$  W, 127 m alt.) do Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), distante 200 m do tripé micrometeorológico.

Para a definição da nebulosidade, foi utilizada a transmitância atmosférica global ( $K_t$ ) com base na metodologia descrita por Lopes Junior et al. (2021), na qual os critérios de classificação da nebulosidade foram:  $K_t < 0,4$ , as condições são de céu nublado ou com alta nebulosidade (NB),  $0,4 \leq K_t < 0,6$ , céu parcialmente nublado ou com média nebulosidade (PN) e  $K_t \geq 0,6$ , as condições são de céu claro ou com pouca nebulosidade. Após a aquisição dos dados, os mesmos foram analisados, tratados e calculadas às médias horárias, diárias, diurnas e noturnas e confeccionados os gráficos com softwares adequados.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Tendo em vista a relação inversamente proporcional entre nebulosidade (representada pela precipitação pluviométrica) e radiação solar (Macedo e Fisch, 2018) faz-se necessário avaliar o regime de precipitação do período de estudo, no sentido de dimensionar comparativamente com a normal climatológica se houve maior ou menor ocorrência de chuvas para a área de estudo. A distribuição diária da precipitação durante o experimento foi caracterizada por apresentar grande variabilidade temporal, ou seja, distribuição irregular. Em todo caso, nota-se dois períodos distintos: um de máximo e outro de mínimo total pluviométrico, com alguns meses de transição. O período chuvoso é compreendido entre os meses de abril a julho, enquanto o seco de novembro a fevereiro. Foi observada a ocorrência de 222 dias de chuva ao longo do experimento, o qual ocorreu durante 399 dias no total, representando 55,63%, mas com somente 37,84% (151 dias) de

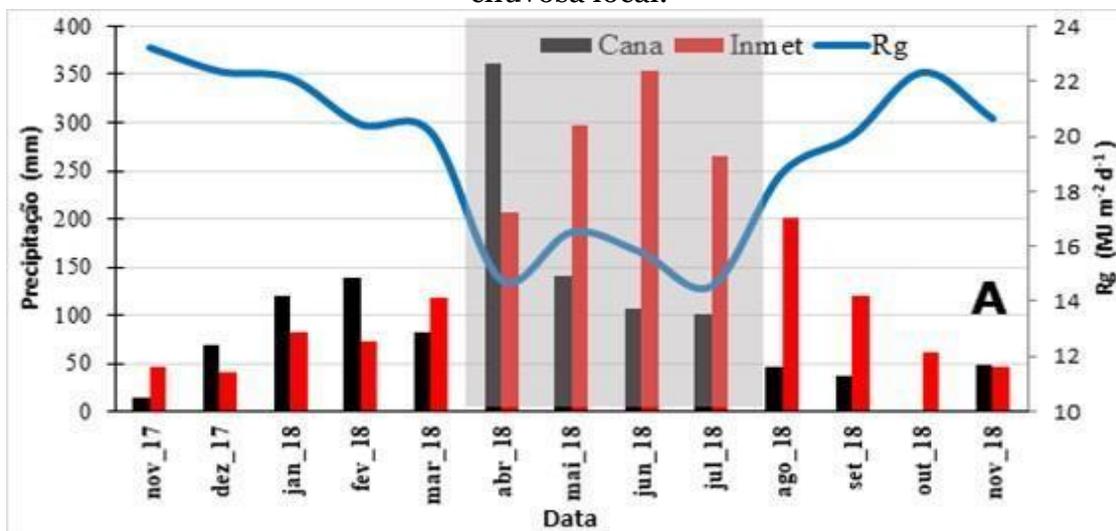
chuva menor que 5mm, 9,52% (38 dias) de chuva entre 5 e 10mm e 8,23% (33 dias) acima de 10mm. A precipitação acumulada durante o experimento (novembro/2017 a novembro/2018) totalizou 1.263,1mm, enquanto a normal climatológica pluviométrica seria de 1.914,3mm, o que corresponde a uma anomalia negativa de 34,01% da precipitação (Figura 2A). Foram observados somente cinco meses (dez-jan-fev-abr-nov) com acumulados mensais acima da precipitação normal, o que resultou em um superávit médio de 24,61%, durante o período seco, enquanto os meses abaixo da normal apresentaram déficit pluviométrico acumulado médio de 66,25%, durante o período chuvoso, o que evidencia uma distribuição pluviométrica extremamente irregular, principalmente devido a intensificação do sistema de alta pressão semipermanente do Atlântico Sul (ASAS), que adentrou na costa leste do Brasil e inibiu a passagem de sistemas frontais (CPTEC, 2018).

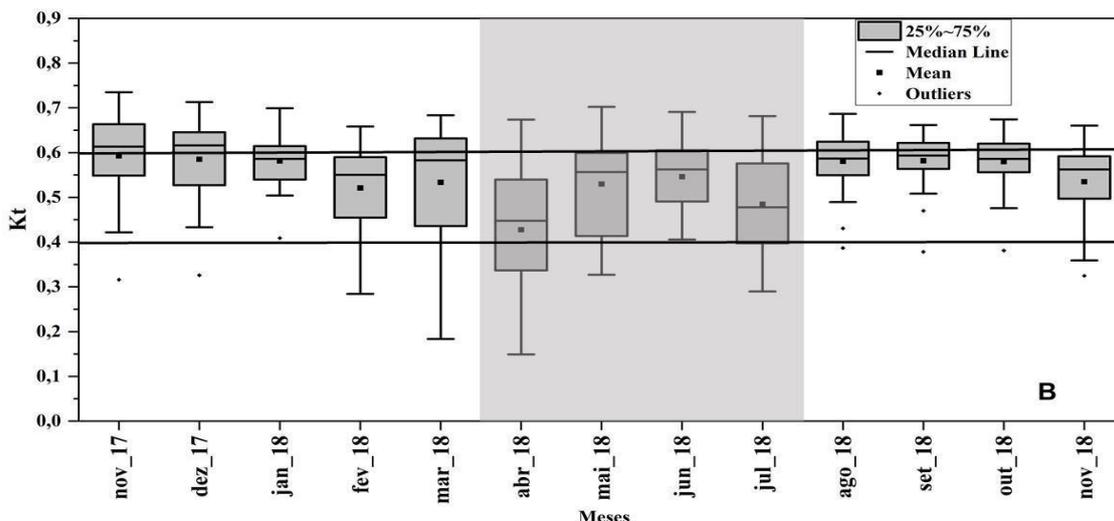
De acordo com Andrade *et al.* (2020) existe uma relação entre os fenômenos El Niño e La Niña com a precipitação pluviométrica no Nordeste do Brasil, sendo que o El Niño tem como característica provocar chuvas abaixo da média climática e La Niña de ocasionar chuvas acima da média. Chaves *et al.* (2022) afirmaram que o ano de 2018 foi caracterizado pelo fenômeno de La Niña até abril e de El Niño de maio em diante. Isso vem referendar o fato pelo qual os meses de dez/17, jan/18, fev/18 e abr/18 registraram precipitação acima da média climática, enquanto no mês de maio/18 em diante choveu abaixo da média, numa clara alusão a influência desses fenômenos. Oliveira Junior *et al.* (2021) trabalhando com séries históricas de precipitação de Maceió definiram que a estação chuvosa (ou quadra chuvosa) correspondente aos meses de abril a julho, foi responsável por 59,52% da chuva, seguido da estação seca (outubro a fevereiro) com 17,20% da chuva e a estação de transição (março, agosto e setembro) correspondendo a 23,28%.

Apesar da distribuição irregular da precipitação os dias foram classificados como 13,48% nublados, 54,70% parcialmente nublados e 31,80% claros quanto à transmitância atmosférica global (Kt). Sabe-se que o Kt é sensível à nebulosidade e não à precipitação, já que a nebulosidade nem sempre resulta em registros de precipitação à superfície (Santos *et al.*, 2020). Com exceção de novembro e dezembro/2017 as médias e medianas ficaram dentro do intervalo de dias

parcialmente nublados (Figura 2B). Basicamente a maioria dos meses se apresentaram com assimetria positiva, já que a mediana está próxima do terceiro quartil, visto que em alguns casos os *outliers* distorcem um pouco mais a questão da simetria. Já a dispersão – intervalo interquartil entre o terceiro e primeiro quartil - são claramente maiores de março a julho, o que abrange todo período chuvoso. Outro fato que chama a atenção é que os *outliers* ocorreram nos meses dos períodos de transição e seco. Apesar de Lopes Júnior *et al.* (2021) relatarem que a probabilidade de ocorrência de dias nublados na estação seca na região de estudo é de somente 0,83%, enquanto a ocorrência de dias de céu claro na chuvosa é 0%, mas na figura 2C é possível notar no período chuvoso a ocorrência de dias claros, provavelmente devido a constatada anormalidade no regime pluviométrico.

**Figura 2** - (A) Variabilidade do acumulado mensal de precipitação no experimento (Cana) e Normal Climatológica da Precipitação do INMET (Inmet), ambos em mm, e média mensal do total diário da Radiação Solar Global (Rg), em MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, (B) Boxplot da distribuição mensal da transmitância atmosférica Kt (adimensional) com linhas horizontais dos limites de classificação do Kt. Todos durante período experimental. Área sombreada corresponde à estação chuvosa local.





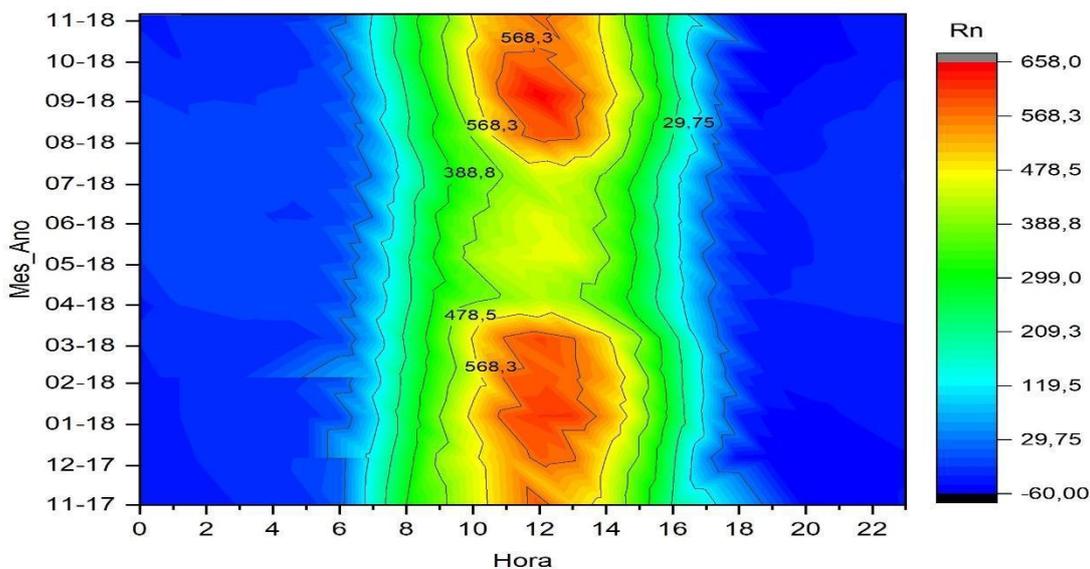
Fonte: Os autores (2023).

Vale ressaltar que a incidência diária e sazonal da  $R_g$  é dependente do regime pluviométrico (nebulosidade), além de outros fatores como latitude, ângulo de incidência, declinação solar, transmitância atmosférica, etc. De abril a julho (período chuvoso) observam-se as menores intensidades de  $R_g$  com médias diárias de  $18,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , possivelmente mais associado à nebulosidade do que à precipitação, já que, como afirmado acima, foi constatado um déficit de precipitação neste período. Este déficit se reflete quando comparamos com o período seco ( $21,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), perfazendo uma diferença relativamente pequena de 17,4%. Outros autores encontraram diferenças de quase o dobro para mesma região de estudo: Lopes Júnior *et al.* (2021), diferença de 28%, enquanto Ferreira Junior *et al.* (2015) de 33,1%, em anos sem anormalidade pluviométrica ou fenômenos climáticos em evidência.

Ao longo do experimento observaram-se dois núcleos de máximos do  $R_n$ , correspondentes ao período seco local e outro de mínimo vinculado ao período chuvoso, independentemente do crescimento da cultura (Figura 3). André *et al.* (2010) afirmaram que não houve mudança no comportamento dos termos do  $R_n$  quando consideraram diferentes estádios de desenvolvimento da cana de açúcar. Já Ferreira Júnior *et al.* (2015) afirmaram que os elementos meteorológicos apresentam comportamentos diferentes entre as fases de crescimento das culturas e que os efeitos da sazonalidade sobre os elementos ambientais são observados entre as fases de crescimento das culturas. A curva do

ciclo diurno de Rn é simétrica em relação ao meio dia com valores crescentes ao amanhecer e declínio no período vespertino até alcançar valores negativos no período noturno. Souza Filho *et al.* (2006) afirmaram que este declínio vespertino do Rn está relacionado ao aumento da temperatura da folhagem da cultura.

**Figura 3** - Comportamento médio horário mensal do Saldo de radiação (Rn), em  $W m^{-2}$ , durante o período experimental

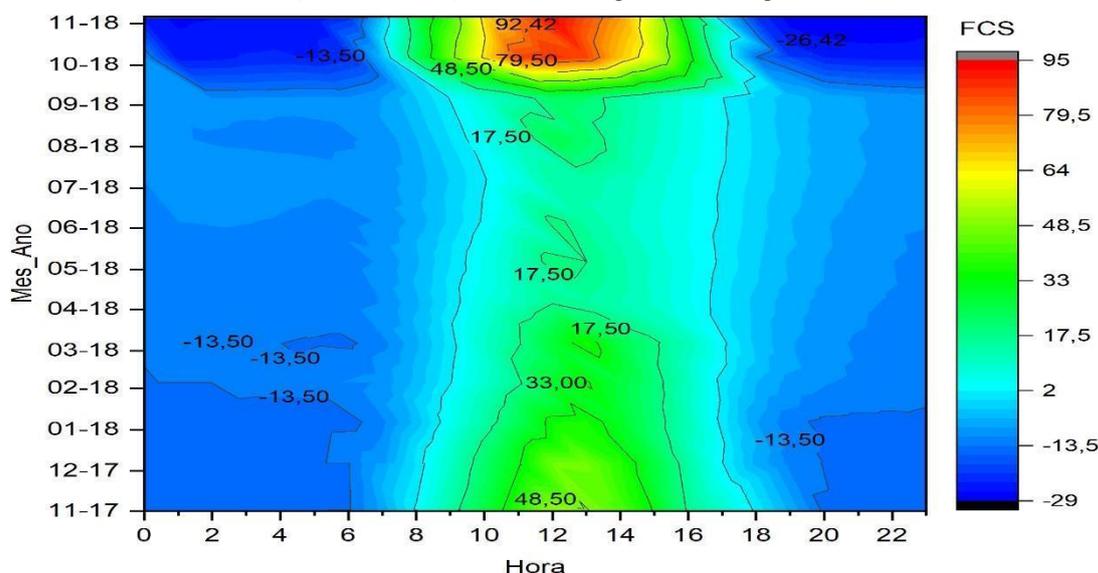


Fonte: Os autores (2023).

Na estação seca foram encontrados valores médios mais elevados de Rn,  $615,43 W m^{-2}$  e  $-58,65 W m^{-2}$ , respectivamente, com média de  $155,29 W m^{-2}$ . Para a estação chuvosa o máximo e mínimo do Rn foram de  $495,37 W m^{-2}$  e  $-42,10 W m^{-2}$  respectivamente, com média de  $131,96 W m^{-2}$ . Carvalho *et al.* (2018a) encontraram uma média de  $157,53 W m^{-2}$  no Submédio do Vale São Francisco. Silva *et al.* (2011) obtiveram uma razão Rn/Rg média de  $59\% \pm 5$  durante todo o ciclo da cana-de-açúcar tipo Soca no interior de Pernambuco, enquanto que neste trabalho foi alcançado 61,18%. Todavia, a amplitude desta relação depende da natureza da superfície. Observa-se também que o nível de Rn depois do corte da cultura (outubro e novembro/18) apresentou valores semelhantes aos constatados ao início do experimento (novembro e dezembro/17), porém menores, conforme tratado adiante. Com isso, a relação Rn/Rg foi um pouco menor: 60%.

O Fluxo de Calor no Solo (FCS) apresentou declínio do início do experimento (novembro) até final do ciclo da cultura (setembro), provavelmente devido ao aumento do grau de cobertura do terreno, na qual as médias horárias mensais variaram de  $-15,63$  a  $50,63 \text{ W m}^{-2}$  (novembro) para  $-10,59$  a  $22,51 \text{ W m}^{-2}$  (setembro) (Figura 4). Carneiro *et al.* (2013) encontraram variações num canalial em Alagoas entre  $-30$  e  $97 \text{ W m}^{-2}$  (período seco) e  $-30$  e  $30 \text{ W m}^{-2}$  (período chuvoso). Inclusive, o FCS entre abril e setembro manteve-se no mesmo nível, apesar do evidenciado déficit pluviométrico constatado no período chuvoso. Manifestadamente isso está relacionado, de certa forma, a dois fatores: precipitação/nebulosidade e grau de cobertura do terreno (crescimento da cultura).

**Figura 4** - Comportamento médio horário mensal do Fluxo de Calor no Solo (FCS), em  $\text{W m}^{-2}$ , durante o período experimental



Fonte: Os autores (2023).

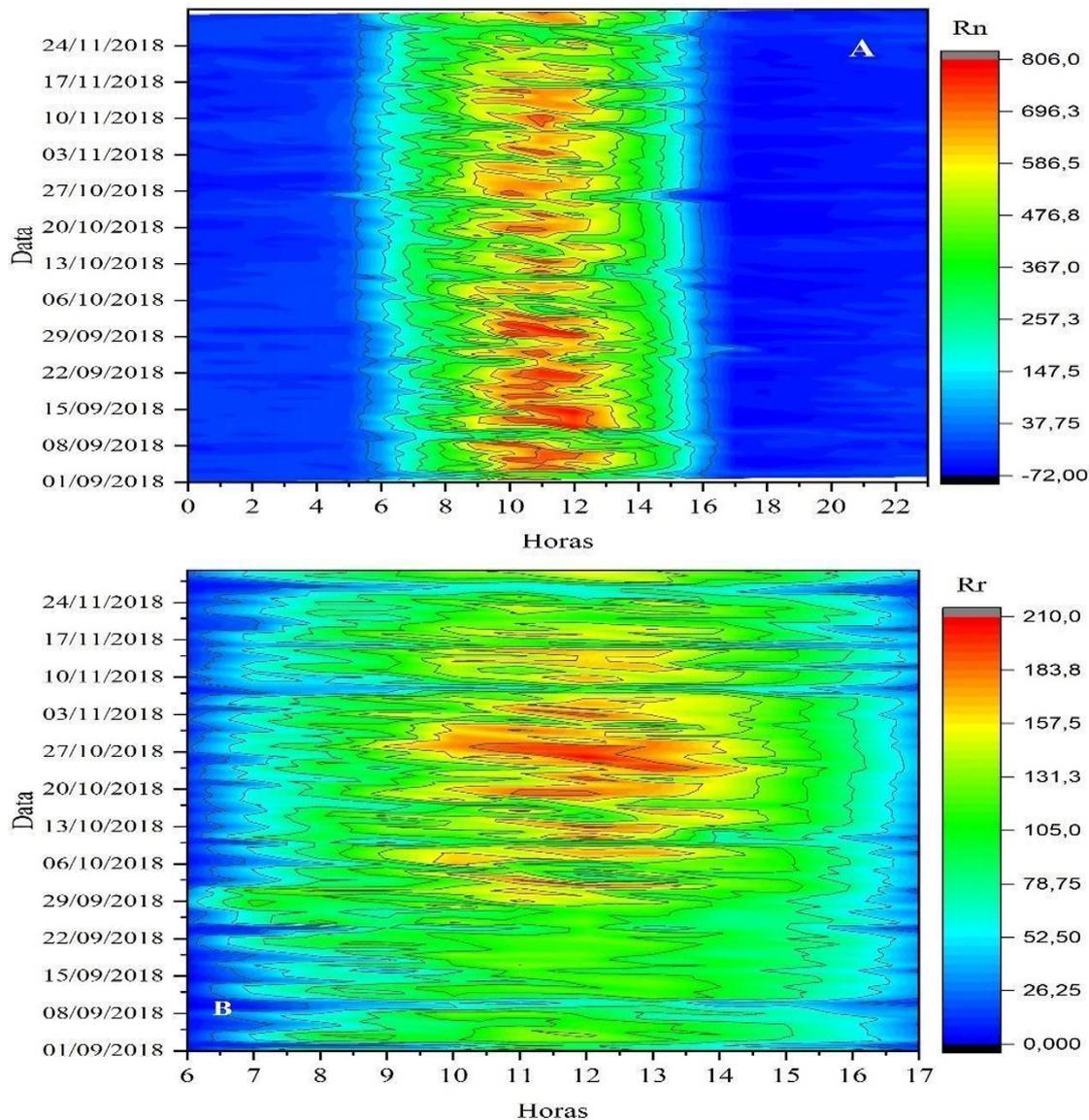
Na ocasião em que se analisa especificamente o impacto da retirada da cultura no  $R_n$  e FCS, observa-se que particularmente o  $R_n$  não variou significativamente depois do corte da cana de açúcar (06.10.2018) (Figura 5A). A explicação para este acontecimento é que durante a noite ocorre uma maior emissão de ondas longas pela superfície terrestre ( $R_s$ ) do que pela atmosfera devido ao aumento da temperatura do solo exposto, como também uma maior taxa de radiação solar refletida pelo solo ( $R_r$ ) durante o período diurno, conforme mostram as Figuras 5C e 5D. O impacto deste maior  $R_r$  no Balanço de Ondas

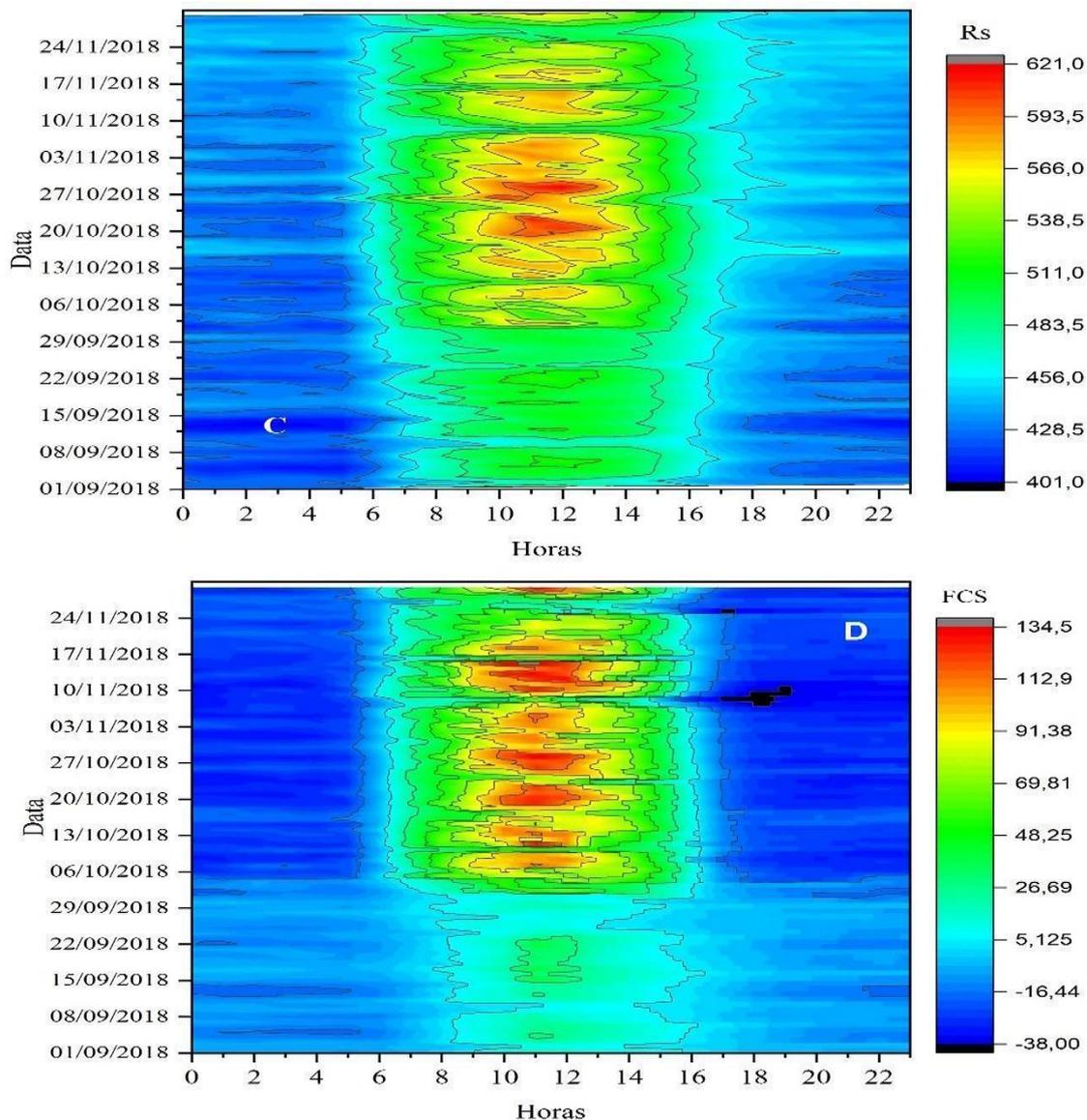
Curtas (BOC) é pequeno, assim como a contribuição da  $R_s$  no Balanço de Ondas Longas (BOL), o que fez resultar nesta pequena alteração no  $R_n$ . Apesar disso, o  $R_n$  apresentou uma amplitude noturna maior. Na ocasião em que se averiguou o  $R_n$  por turnos diurno e noturno constata-se valores médios antes do corte de  $314,78 \text{ W m}^{-2}$  (diurno) e  $-23,63 \text{ W m}^{-2}$  (noturno). Já depois do corte, os valores foram de  $300,08 \text{ W m}^{-2}$  (diurno) e  $-26,22 \text{ W m}^{-2}$  (noturno), ou seja, uma diferença muito pequena em ambos os turnos, justamente pela explanação acima. Isso concorda com Oliveira et al. (2017), que relataram que a radiação líquida é fortemente afetada pela vegetação, consequentemente, valores maiores são esperados em áreas com maior cobertura vegetal e menores em áreas de solo descoberto.

Em relação ao Fluxo de Calor no Solo (FCS), verificou-se que o mesmo foi claramente influenciado pelo corte da cultura (Figura 5D), pois o padrão de comportamento horário foi totalmente alterado, já que a retirada ou mesmo diminuição da cobertura vegetal gera uma maior susceptibilidade do solo aos efeitos da radiação solar incidente ( $R_g$ ). Ressalte-se que o FCS com a cana de açúcar era positivo entre 9 e 15 horas, depois da retirada da cana houve uma expansão desse período (6 as 17 horas) e uma intensificação por volta do meio dia. O impacto no FCS gerado com a retirada da cobertura vegetal, quando considerado os períodos diurno (437%) e noturno (240%):  $9,56 \text{ W m}^{-2}$  (diurno) e  $-10,75 \text{ W m}^{-2}$  (noturno); sem cobertura vegetal:  $41,87 \text{ W m}^{-2}$  (diurno) e  $-25,85 \text{ W m}^{-2}$  (noturno). Silva et al. (2019) encontraram FCS diurno com cobertura vegetal em canavial na Bahia de  $6,73 \text{ W m}^{-2}$ .

Nota-se ainda na Figura 5D alterações provocadas pelo acréscimo de água advinda das precipitações, associado ao incremento da nebulosidade e baixa radiação solar incidente ( $R_g$ ), já que a umidade do solo proporciona uma variação na condutividade térmica, que controla o FCS, e, consequentemente, altera a densidade do FCS. Assim como observa-se que, durante o período de baixa ou nenhuma precipitação, existe uma distribuição mais uniforme do FCS.

**Figura 5** - Comportamento médio horário mensal do (A) Saldo de radiação (Rn), (B) Radiação Solar Refletida (Rr), (C) Radiação Ondas Longas emitida pela superfície (Rs), (D) Fluxo de Calor no Solo (FCS), todos em  $W m^{-2}$ , antes (setembro) e depois (outubro-novembro) do corte (06.10.2018) da cana de açúcar.



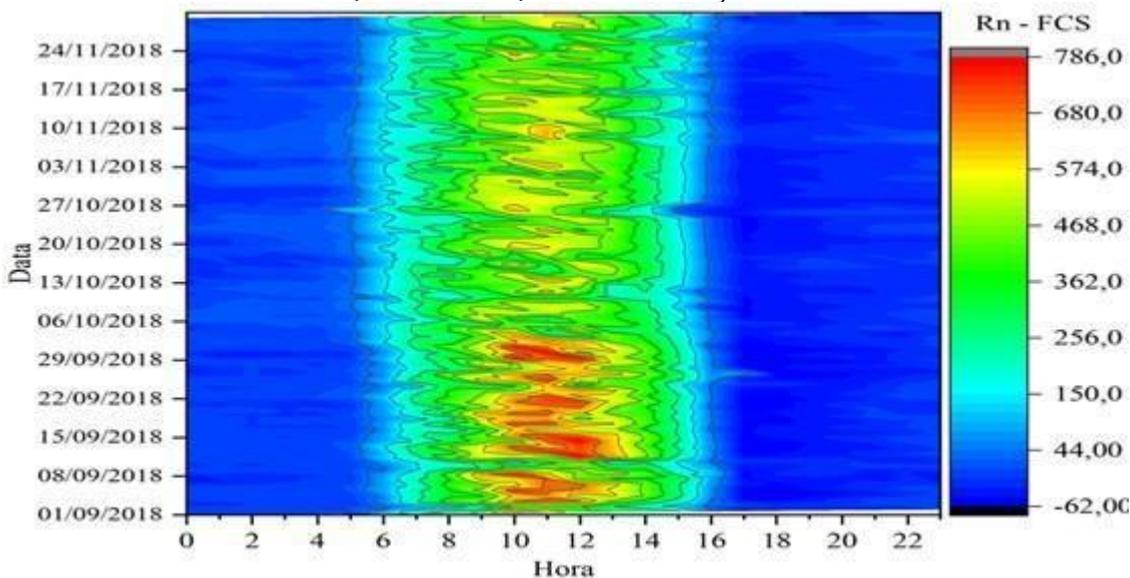


Fonte: Os autores (2023).

A variação horária mensal de  $R_n - FCS$  é apresentada na Figura 6, onde durante o dia o  $R_n - FCS$  médio no solo coberto ( $361,36 \text{ W m}^{-2}$ ) foi maior que o descoberto ( $307,27 \text{ W m}^{-2}$ ). Durante a noite, o  $R_n - FCS$  ascendente médio do coberto ( $-15,18 \text{ W m}^{-2}$ ) foi maior que o descoberto ( $-7,09 \text{ W m}^{-2}$ ). Embora a existência de vegetação pudesse refletir a radiação de onda longa do solo e reduzir sua perda, conforme mostrado anteriormente houve mais perda de radiação de onda longa no sistema solo descoberto por causa da temperatura mais alta da superfície do solo. Durante a noite, a radiação de onda longa emitida do solo foi a fonte de perda de energia do solo, e o FCS (geralmente negativo durante a noite, ou seja, fluxo de calor do solo mais profundo para a superfície do solo) foi a fonte

de entrada de energia do solo. Portanto, a energia disponível instantânea durante a noite pode ser negativa ou positiva, mas no nosso estudo, a média de energia disponível foi negativa durante a noite independentemente da cobertura. Diante disso, fica claro que o dossel da cultura pode afetar a energia disponível. Isso concorda com Oliveira *et al.* (2017), que relataram que a radiação disponível é fortemente afetada pela vegetação, consequentemente, valores maiores são esperados em áreas com maior cobertura vegetal e menores em áreas de solo descoberto.

**Figura 6** - Comportamento médio horário mensal da energia disponível (Rn-FCS), em  $W m^{-2}$ , antes (setembro) e depois (outubro-novembro) do corte (06.10.2018) da cana de açúcar.



Fonte: Os autores (2023).

A variação da relação FCS/Rn está relacionada com vários fatores: tipo de solo, quantidade de água no solo, tipo de cobertura do solo, composição do solo, etc. Contudo, esta razão pode assumir valores muitos diversos de acordo com o período de tempo utilizado na integração. Então, com cobertura vegetal a razão FCS/Rn foi de 3,10% (diurno) e 45,52% (noturno). Enquanto com solo nu foi de 13,67% (diurno) e 98,56% (noturno). Couto (2016), trabalhando com experimento de capim braquiária, encontrou 38% de razão FCS/Rn com superfície totalmente coberta e até 400% com solo nu. Já Carvalho *et al.* (2018b) encontraram 3% numa área com cobertura total de cana de açúcar irrigada e 2% para caatinga. Souza *et al.* (2015) encontraram 3% para Caatinga preservada.

Azevedo *et al.* (2014) 1,5% com canavial na Paraíba. Silva *et al.* (2011) encontraram, em média, de  $3\% \pm 2\%$  para cana de açúcar em Pernambuco. Os autores ainda afirmaram que a cana é afetada pelo suprimento de radiação solar global, nível de cobertura do solo e características do dossel da cultura. Toledo Filho (2001) encontrou 5% em canavial nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.

O regime térmico do solo é determinado pelo aquecimento da superfície, ocasionado pela radiação solar através do transporte de energia, ou seja, por condução, que ocorre em direção ao seu interior. Esse regime é diretamente afetado pelas condições de cobertura do solo, afetando a emissão de radiação pela superfície em direção à atmosfera. Estes valores mais elevados do FCS e FCS/Rn em solo desnudo justificam-se porque parte de Rn é utilizado para aquecer o solo e o ar atmosférico, já que a variação da relação FCS/Rn está relacionada com a configuração do sistema solo-planta do local, variando em função das condições climáticas, cobertura do terreno e do tipo de solo e da quantidade de água. Silva *et al.* (2019) asseguraram que quando ocorre a redução da energia disponível no ambiente (Rn - FCS), uma diminuição significativa do fluxo de calor latente e aumento do fluxo de calor sensível foi constatada no cultivo de canavial na Bahia.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os resultados mostraram que choveu abaixo da média histórica a partir da época chuvosa até o fim do experimento, o que proporcionou uma radiação solar incidente (Rg) maior do que a normal e acarretou uma diferença de somente 17,4% entre os períodos chuvoso e seco, apesar dos dias serem classificados como 13,48% (nublados), 54,70% (parcialmente nublados) e 31,80% (claros) quanto a transmitância atmosférica (Kt), mas isso interferiu pouco na relação Rn/Rg que permaneceu, em média, em 61,18%;

A precipitação, juntamente com a nebulosidade, radiação solar incidente e cobertura do terreno interferem no ciclo sazonal do saldo de radiação (Rn) e fluxo de calor no solo (FCS);

O impacto, em termos médios, da retirada da cobertura vegetal no Rn foi quase nulo, devido a maior emissão de ondas longas pela superfície terrestre (Rs)

e maior taxa de radiação solar refletida pelo solo ( $R_r$ ), enquanto no FCS foi de 437% no período diurno e 240% no noturno;

Sem cobertura vegetal o ciclo horário do FCS acompanha o ciclo do  $R_n$  e independentemente do período do ano e cobertura do solo os mesmos são descaracterizados pelos eventos de precipitação;

Observou-se a diminuição gradativa do FCS do início do experimento até o período chuvoso, cujos valores se mantêm até o período final do ciclo de cultivo muito possivelmente por influência da maior cobertura vegetal;

Houve uma redução da energia diária média disponível ( $R_n - FCS$ ) de 158,52  $W m^{-2}$  com cobertura vegetal para 137,07  $W m^{-2}$  sem cobertura;

A partição do saldo de radiação ( $R_n$ ) utilizada no processo de aquecimento do solo foi variável em função do grau de cobertura do solo, sendo FCS representado, em média, por 24 e 56% de  $R_n$  para solo coberto e descoberto, respectivamente.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, A.M. D.; CARNEIRO, R. G.; LOPES JÚNIOR, J.M.; QUERINO, C.A.S.; MOURA, M.A.L. Dinâmica do aporte e decomposição de serapilheira e influência das variáveis meteorológicas em um fragmento de Mata Atlântica (floresta ombrófila) em Alagoas, Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, João Pessoa, v. 7, p. 1499-1517, 2020. [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071729](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071729)

ANDRÉ, R.G.B.; MENDONÇA, J.C.; MARQUES, V.S.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: Balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 375-382, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862010000400012>

AZEVEDO, P.V.; SABOYA, L. M. F.; DANTAS NETO, J.; OLIVEIRA, F.S. ; BEZERRA, J.R. C. ; FARIAS, C.H.A. Disponibilidade energética para a cultura da cana-de-açúcar nos tabuleiros costeiros do estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, p. 1031-1038, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n10p1031-1038>

BARROS, A. H. C.; ARAUJO FILHO, J. C.; SILVA, A. B.; SANTIAGO, G. A. C. F. Climatologia do estado de Alagoas. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, Recife-PE, Embrapa Solos, p. 32, 2012.

CARNEIRO, R. G.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; ANDRADE, a. M. D.; SANTOS, A. B.; MAIA, R. G. X. Fluxo de calor do solo e saldo de radiação dentro de uma área de mata atlântica em comparação com uma área de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 3, p. 555-565, 2013. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v6.3.p555-565>

CARVALHO, H. D. S.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; RODRIGUES, C.T.A. Controlling factors of 'Caatinga' and sugarcane evapotranspiration in the Sub-middle São Francisco Valley. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.22, n.4, p.225-230, 2018a. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n4p225-230>

CARVALHO, H. D. S.; MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; Fluxos de radiação e energia em Caatinga preservada e cana-de-açúcar no Semiárido. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 33, n. 3, p. 452-458, 2018b. <https://doi.org/10.1590/0102-7786333005>

CHAVES, L. C. G, MOURA, W. B., LIMA, A. L. & ARAÚJO, M. C. Influência dos fenômenos El niño /La niña na variação do espelho d'água do Açude Castanhão, no Estado do Ceará. In: OLIVEIRA, R. J. de (Coord.), **Recursos hídricos: Gestão, planejamento e técnicas em pesquisa**. São Paulo: Editora Científica Digital, 2022. V.2, cap 12, p.163-173.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Observatório Agrícola - Acompanhamento Safra Brasileira de cana-de-açúcar - Safra 2022/23**, Brasília - DF, v. 10, n. 4, p. 1-50, 2023.

COUTO, J.P.C. **Fluxo de calor no solo e radiação líquida em pastagem de capim braquiária com grau de cobertura variável**. 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). Cruz das Almas, Bahia. 2016.

CPTEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. **Infoclima**, 2018. Disponível em: <http://infoclima1.cptec.inpe.br> . Acesso em: 20 de out. 2022.

CUNHA, A.P.M.A.; ALVALÁ, R.C.S.; OLIVEIRA, G.S. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 139-152, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000200003>

EPE. Empresa de Pesquisa Energética/ Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético nacional. 2021- Relatório Síntese - Ano base 2020. 73p. 2021. [https://www.alemnaenergia.engie.com.br/matriz-energetica-brasileira/#:~:text=Segundo%20o%20Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20do,renov%C3%A1veis%20\(7%2C7%25\)](https://www.alemnaenergia.engie.com.br/matriz-energetica-brasileira/#:~:text=Segundo%20o%20Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20do,renov%C3%A1veis%20(7%2C7%25).). Acesso: outubro 2022.

FERREIRA JUNIOR, R.A.; SOUZA, J.L.; LYRA, G.B.; ESCOBEDO, J.F.; SANTOS, M.V.C. Energy conversion efficiency in sugarcane under two row spacings in northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**

**e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.8, p.741–747, 2015.

<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p741-747>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de uso da terra**. 2ª ed., Rio de Janeiro: IBGE, 92p, 2006.

LOPES JÚNIOR, J. M.; MOURA, M. A. L.; COSTA, N. B.; FERREIRA JUNIOR, R. A. Frequência e probabilidade de ocorrência de transmitância atmosférica global para a região de Maceió-Alagoas. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v.7, n.2, p. 14685-14700, 2021.

<https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-204>

LORENZI, B.; ANDRADE, T. O etanol de segunda geração no Brasil: políticas e redes sociotécnicas. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, São Paulo, v. 34, p.1-18, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/3410014/2019>

MACEDO, A.; FISCH, G. Variabilidade Temporal da Radiação Solar Durante o Experimento GOAmazon 2014/15. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.33, p.353-365, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786332017>

MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira Meteorologia**, São Paulo, v.17, n.1, p.1-10, 2002.

OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; SOUZA, P.H.A.; SOUZA, E.O.; VANDERLEI, M.H.G.S.; CORREIA FILHO, W.L.F.; SANTOS, C.T.B.; BATISTA, B.A.; SANTIAGO, D.B.; GOIS, G. Climatologia da Chuva em Maceió: Aspectos Climáticos e Ambientais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.14, n.04, p. 2253-2264, 2021. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.4.p2253-2264>

OLIVEIRA, W.C.; ARRAES, F.D.D.; OLIVEIRA, J. B.; MACÊDO, K.G.; LIMA-JUNIOR, J.C. Energy balance in areas with different land uses in the Chapada do Araripe. **Revista Geama**, Recife, v.3, n.4, p.252-256, 2017.

SANTOS, M.A; LYRA, G. B.; LYRA, G. B.; SOUZA, J. L.; SEDIYAMA, G. C. Coeficiente da cultura no estágio inicial de desenvolvimento para cana-de-açúcar em diferentes datas de plantio na região de tabuleiros costeiros de alagoas. **STAB – Açúcar, Álcool e subprodutos**, Piracicaba, v. 27, p.30 – 33, 2009.

SANTOS, M. F.; QUERINO, C. A. S.; SILVA JUNIOR, J. R.; CARNEIRO, R.G.; LOPES JUNIOR, J. M.; MOURA, M. A. L. Variabilidade estacional do balanço de ondas longas em um ecossistema de mata atlântica no estado de Alagoas-Brasil. **Caminhos da Geografia** (UFU. Online), Uberlândia, MG, v. 21, p. 201-213, 2020. <https://doi.org/10.14393/RCG217551191>

SILVA, T.G.F.; MOURA, M.S.B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J.M.; SOUZA, L.S.B.; BRANDÃO, E.O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia**

**Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.2, p.139–147, 2011.

<https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000200005>

SILVA, T. G. F.; SOUZA, C.A.; MOURA, M. S. B.; MARIN, F.R.; CARVALHO, H. D. S.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; GALVÍNCIO, J.D. Balanço de Energia, Emissão Foliar e Eficiência do Uso da Radiação pela Cana-de-Açúcar em Cultivo sem e com Palhada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 34, n. 1, 69 78, 2019. <https://doi.org/10.1590/0102-7786334016>

SILVA JUNIOR, R. S.; GAMA, M. C. C.; MARIANO, G.L.; OLIVEIRA JUNIOR, J.F.; SILVA, E.H.L.; SILVA, L.S.O.; CARDOSO, K.R.A. Avaliação de eventos extremos de precipitação, associados a desastres naturais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v.15, n.06, p.2755-2767, 2022. DOI:

<http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v15.6.p2755-2767>

SOUZA FILHO, J.D.C.; RIBEIRO, A.; COSTA, M.H.; COHEN, J.C.P.; ROCHA, E.J.P. Variação sazonal do balanço de radiação em uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.21, p.318-330, 2006.

SOUZA, L.S.B., MOURA, M.S.B., SEDIYAMA, G.C., SILVA, T.G.F. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, p.627– 636, 2015. <https://doi.org/10.1590/So100-204X2015000800001>

TOLEDO FILHO, M.R. **Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar (saccharum spp; ) em Alagoas**. 2001. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre-RS, 2001.

Recebido em 06 de fevereiro de 2023

Aceito em 03 de agosto de 2023