



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CAMPUS DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CECA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA



JULIANNA CATONIO DA SILVA

**CONSUMO DE ÁGUA, RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DESEMPENHO
PRODUTIVO DA CULTURA DO GERGELIM EM FUNÇÃO DA DISPONIBILIDADE
HÍDRICA**

Rio Largo, AL

2023

JULIANNA CATONIO DA SILVA

**CONSUMO DE ÁGUA, RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DESEMPENHO
PRODUTIVO DA CULTURA DO GERGELIM EM FUNÇÃO DA DISPONIBILIDADE
HÍDRICA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Agronomia do *Campus* de Engenharia e Ciências
Agrárias da Universidade Federal de Alagoas -
UFAL, em cumprimento às exigências para obtenção
do título de Doutor em Agronomia, área de
concentração: Produção Vegetal.

Orientadores:

Professor Dr. Alexsandro Claudio dos Santos Almeida - UFAL

Professor Dr. Márcio Aurélio Lins dos Santos - UFAL

Rio Largo, AL

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S586c Silva, Julianna Catonio da.

Consumo de água, respostas fisiológicas e desempenho produtivo da cultura do
gergelim em função da disponibilidade hídrica. / Julianna Catonio da Silva. – 2023.

106f.: il.

Orientadores: Alexsandro Claudio dos Santos Almeida.
Márcio Aurélio Lins dos Santos

Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia,
Área de concentração em Produção Vegetal. Campus de Engenharias e Ciências
Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2023.

Inclui bibliografia

1. *Sesamum indicum* L. 2. Lisimetria de drenagem. 3. Manejo da irrigação.
I. Título.

CDU: 631.53: 631.67

TERMO DE APROVAÇÃO

JULIANNA CATONIO DA SILVA

(Matrícula 2019106492)

“CONSUMO DE ÁGUA, RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DESEMPENHO PRODUTIVO DA CULTURA DO GERGELIM EM FUNÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA”

Tese apresentada e avaliada pela banca examinadora em 11 de julho de 2023, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal do Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS.

Documento assinado digitalmente
 **ALEXSANDRO CLAUDIO DOS SANTOS ALMEIDA**
Data: 15/12/2023 15:52:07-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Alexsandro Claudio dos Santos Almeida
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **GUSTAVO BASTOS LYRA**
Data: 15/07/2023 18:41:27-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Gustavo Bastos Lyra
Membro Titular

Documento assinado digitalmente
 **VILMA MARQUES FERREIRA**
Data: 17/07/2023 09:04:47-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Vilma Marques Ferreira
Membro Titular

 **ALEXANDRE MANICOBDA DA ROSA FERRAZ .**
Data: 15/07/2023 12:31:28-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dr. Alexandre Manicobda da Rosa Ferraz Jardim
Membro Titular

Documento assinado digitalmente
 **CERES DUARTE GUEDES CABRAL DE ALMEI**
Data: 16/07/2023 07:00:25-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof.^a Dr.^a Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida
Membro Externo

Documento assinado digitalmente
 **GEORGE DO NASCIMENTO ARAUJO JUNIO**
Data: 15/07/2023 18:58:15-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dr. George do Nascimento Araújo Junior
Membro Externo

Documento assinado digitalmente
 **JULIANNA CATONIO DA SILVA**
Data: 14/12/2023 16:08:24-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Julianna Catonio da Silva
Discente

Rio Largo, AL

Julho de 2023

Aos meus pais, Erinaldo Catonio da Silva (in memorian) e Josenilda Teles da Silva e minhas irmãs, Rafaella Catonio da Silva, Ana Maria Catonio da Silva e Renata Catonio da Silva, por todo incentivo e amor.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que na sua infinita bondade em minhas orações sempre me conduziu para os melhores caminhos;

Aos meus orientadores, Prof. Alessandro Almeida e Prof. Márcio Aurélio, pela orientação e ensinamentos durante todo o percurso;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – PPGA, pelos conselhos e ensinamentos;

Aos professores e pós-doutorandos do laboratório de irrigação e agrometeorologia – LIA, em especial, Iêdo Teodoro, Ricardo Júnior, Guilherme Lyra e Marcos Alex, Adolpho Quintela e George Araújo, por todo aprendizado;

Ao secretário do PPGA, Gustavo Nepomuceno, por toda competência e disponibilidade em ajudar; A todos servidores do Campus de Engenharia e Ciências Agrárias – CECA, agradeço a prestabilidade e disponibilidade da estrutura física do Campus;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo;

À EMBRAPA – UEP / Rio Largo, pelo apoio e fornecimento de água para realização da pesquisa e a EMBRAPA Algodão pela doação das sementes utilizadas na pesquisa;

Aos membros da banca pelas sugestões e correções para enriquecimento deste trabalho;

Aos colegas e amigos de laboratório e pós-graduação: Jhullyanne Santos, Constantino Júnior, Joyce Lopes, José Wanderson, Marcos Moraes, Ricardo Barros, Wellington Santos, José Wellington, Thiago Amaral, Anderson Sabino, Wanda Pimentel, Marcelo Tertuliano, Antônio Costa, Larisse Araújo, Natasha Oliveira, Gustavo Santos, Sandra, Joicy Barbosa, Cristian, Pedro Vinícius, Breno Lyra, Levi Cordeiro, José Carlos, pela ajuda na pesquisa e pelos bons momentos. Em especial, agradeço a Iêdo Peroba, pela disponibilidade, responsabilidade e dedicação durante todas as etapas da pesquisa.

Aos meus pais, Erinaldo Catonio (*in memorian*) e Josenilda Teles, por me darem à vida e, sobretudo todos os valores que me foram passados e por todos os esforços destinados à minha formação para que eu chegasse até aqui.

Às minhas irmãs: Rafaella Catonio, Ana Maria Catonio e Renata Catonio, pela motivação nos momentos mais difíceis;

Ao meu namorado Luis Felipe, por todo amor, ajuda, paciência e companheirismo durante todas as etapas para que eu chegasse até aqui;

Finalmente gostaria de agradecer a todos, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e conclusão deste trabalho. **Minha sincera gratidão!**

RESUMO

O cultivo de gergelim é de interesse econômico para as mesorregiões da zona da mata e litoral de Alagoas. Todavia, a distribuição das chuvas nesta região ocorre de forma irregular ao longo do ano. Para tanto, é fundamental conhecer a necessidade hídrica dessa cultura para a região, com vistas a auxiliar produtores no adequado manejo dos cultivos e obtenção de produtividades sustentáveis. Assim, objetivou-se nesta pesquisa determinar a evapotranspiração da cultura (ET_C) e os coeficientes de cultivo simples (K_c) e duplo (K_e e K_{cb}), bem como, avaliar as respostas fisiológicas e produtivas do gergelim nas estações chuvosa e seca da região. Para isso, foram conduzidos dois experimentos de campo, simultaneamente, em duas estações de crescimento, na chuvosa que foi de fevereiro a junho de 2021, e na seca entre outubro de 2021 e janeiro de 2022. O experimento 1 consistiu em um conjunto com 25 lisímetros de drenagem onde foram determinados a ET_C e os coeficientes de cultivo, aplicando-se o balanço de água no solo. Os coeficientes de cultivo foram obtidos pela razão ET_C/ET_0 , em que a evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada pelo método de Penman-Monteith-FAO. Os valores de K_e foram calculados pela razão de evaporação da superfície do solo e ET_0 , enquanto o K_{cb} pela razão entre transpiração e ET_0 . Para a estação chuvosa, os valores acumulados de chuva, de ET_C e de ET_0 foram de 870,1; 450,4 e 476,50 mm, respectivamente. Já na seca, foram de 212,9; 440,1 e 513,40, respectivamente. Os valores médios de K_C foram iguais a 0,26; 0,90; 1,26 e 0,75 para as fases inicial, desenvolvimento, intermediária e final na estação chuvosa, e de 0,29; 0,94; 1,17 e 0,59 para a estação seca. No experimento 2, em uma área paralela ao experimento 1, avaliou-se o desempenho da cultura submetida a diferentes regimes hídricos (L1, L2, L3, L4 e L5 referente a lâminas de 50, 75, 100, 125 e 150% da ET_C determinada no experimento 1), com os tratamentos arranjados em delineamento em blocos ao acaso. As avaliações das variáveis de crescimento das plantas: altura da planta (AP), diâmetro do caule (DC), índice de área foliar (IAF) e fitomassa seca total (FSTa) ocorreram quinzenalmente. Quando a cultura atingiu a floração plena foram avaliados os seguintes parâmetros fisiológicos: teor relativo de água na folhas (TRA), potencial hídrico foliar antemanhã ($\Psi_{w \text{ antemanhã}}$) e ao meio-dia ($\Psi_{w \text{ meio-dia}}$), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), concentração intercelular de CO_2 (C_i), taxa fotossintética líquida (A), temperatura foliar (T_f), eficiência instantânea do uso da água (EUAi), eficiência quântica do PSII ($\Phi PSII$), eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m) e índice SPAD. Na colheita de cada ciclo foram analisados os componentes de produção: produtividade, eficiência do uso da água, número de cápsulas por planta, número de grãos por cápsula, peso de 1000 grãos e massa seca de grãos. A água aplicada (chuva + irrigação) para cada tratamento foi de: 904,6; 927,1; 957,7; 979,6 e 1003,6 mm para o período chuvoso e 419,9; 511,5; 616,1; 721,8 e 815,9 mm para a estação seca, em L1, L2, L3, L4 e L5, respectivamente. No período chuvoso, o Ψ_w foliar variou de -3,7 a -1,1 MPa ao meio-dia para 50 e 150% da ET_C , respectivamente. No período seco, para esses mesmos níveis, o Ψ_w foliar variou de -1,74 a -0,98 kPa e -3,9 a 1,0 kPa para a antemanhã e meio-dia, respectivamente. Aplicação de 50% da ET_C reduziu a gs (180 e 303%), a E (56 e 97%), a C_i (239 e 400%), $\Phi PSII$ (36%), F_v/F_m (18%) e aumentou a T_f (8%) respectivamente, para o período chuvoso e seco, em relação à 150% da ET_C . Os maiores valores de A (35,8 e 33,7 $\mu mol \text{ CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foram obtidas com a aplicação de 109 e 108% da ET_C , respectivamente. Para o período seco, os maiores valores obtidos para as variáveis de crescimento foram: 249,0 cm; 18,7 mm; 6507 cm^2 ; 10,8 $m^2 \text{ m}^{-2}$ e 16629,8 $kg \text{ ha}^{-1}$, para AP, DC, AF, IAF e MSTa, respectivamente. No período seco, a máxima produtividade foi de 3114,5 $kg \text{ ha}^{-1}$, com a aplicação de 622 mm (101% da ET_C), de água valor este 20% superior à média do período chuvoso. A máxima PUA (5,78 $kg \text{ ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) foi obtida com a lâmina de 557 mm (90% da ET_C). Observou-se pouca variação nos valores de coeficientes de cultivos nas duas estações de crescimento. Portanto, é possível utilizar os mesmos valores de coeficientes para as duas estações, de modo a facilitar o manejo de irrigação na região de Rio Largo - AL. O crescimento e produtividade da cultura varia entre as

estações, sendo que a maior disponibilidade de radiação solar na estação seca possibilita obter maiores produtividades quando comparado a chuvosa, desde que cultivado com irrigação.

Palavras-chave: *Sesamum indicum* L., Evapotranspiração, Lisimetria de drenagem, Manejo da irrigação

ABSTRACT

Sesame cultivation is of economic interest to the mesoregions of the Zona da Mata and the coast of Alagoas. However, the distribution of rainfall in this region is irregular throughout the year. For this reason, it is essential to know the water requirements of this crop for the region, in order to help producers properly manage their crops and obtain sustainable yields. The aim of this research was to determine crop evapotranspiration (ET_C) and the single (K_c) and double (K_e and K_{cb}) crop coefficients, as well as to evaluate the physiological and productive responses of sesame in the region's rainy and dry seasons. To this end, two field experiments were conducted simultaneously in two growing seasons: the rainy season from February to June 2021, and the dry season from October 2021 to January 2022. Experiment 1 consisted of a set of 25 drainage lysimeters where ET_C and crop coefficients were determined using the soil water balance. Crop coefficients were obtained from the ET_C/ET_0 ratio, where reference evapotranspiration (ET_0) was calculated using the Penman-Monteith-FAO method. K_e values were calculated from the ratio of evaporation from the soil surface to ET_0 , while K_{cb} was calculated from the ratio of transpiration to ET_0 . For the rainy season, the accumulated rainfall, ET_C and ET_0 values were 870.1, 450.4 and 476.50 mm, respectively. In the dry season, they were 212.9, 440.1 and 513.40, respectively. The average K_C values were 0.26, 0.90, 1.26 and 0.75 for the initial, development, intermediate and final stages in the rainy season, and 0.29, 0.94, 1.17 and 0.59 for the dry season. In experiment 2, in an area parallel to experiment 1, the performance of the crop subjected to different water regimes was evaluated (L1, L2, L3, L4 and L5 referring to water levels of 50, 75, 100, 125 and 150% of the ET_C determined in experiment 1), with the treatments arranged in a randomized block design. Evaluations of plant growth variables: plant height (PH), stem diameter (SD), leaf area index (LAI) and total dry phytomass (TDSM) took place every two weeks. When the crop reached full bloom, the following physiological parameters were assessed: relative leaf water content (RAW), leaf water potential in the morning (Ψ_w in the morning) and at midday (Ψ_w at midday), stomatal conductance (gs), transpiration rate (E), intercellular CO_2 concentration (C_i), net photosynthetic rate (A), leaf temperature (Tf), instantaneous water use efficiency (EUA_i), PSII quantum efficiency (Φ_{PSII}), maximum PSII quantum efficiency (Fv/Fm) and SPAD index. At the harvest of each cycle, the production components were analyzed: yield, water use efficiency, number of pods per plant, number of grains per pod, weight of 1000 grains and dry mass of grains. The water applied (rain + irrigation) for each treatment was: 904.6; 927.1; 957.7; 979.6 and 1003.6 mm for the rainy season and 419.9; 511.5; 616.1; 721.8 and 815.9 mm for the dry season, in L1, L2, L3, L4 and L5, respectively. In the rainy season, leaf Ψ_w ranged from -3.7 to -1.1 MPa at midday for 50 and 150% of ET_C , respectively. In the dry period, for these same levels, leaf Ψ_w ranged from -1.74 to -0.98 kPa and -3.9 to 1.0 kPa for the morning and midday, respectively. Application of 50% of ET_C reduced gs (180 and 303%), E (56 and 97%), C_i (239 and 400%), Φ_{PSII} (36%), Fv/Fm (18%) and increased Tf (8%) respectively, for the rainy and dry periods, compared to 150% of ET_C . The highest A values (35.8 and 33.7 $\mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) were obtained with the application of 109 and 108% of the ET_C , respectively. For the dry period, the highest values obtained for the growth variables were: 249.0 cm; 18.7 mm; 6507 cm^2 ; 10.8 $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ and 16629.8 kg ha^{-1} , for AP, DC, AF, IAF and MSTa, respectively. In the dry season, the maximum yield was 3114.5 kg ha^{-1} , with the application of 622 mm (101% of the ET_C) of water, which was 20% higher than the average for the rainy season.

The maximum PUA ($5.78 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) was obtained with 557 mm of water (90% of the ET_C). There was little variation in the crop coefficient values in the two growing seasons. Therefore, it is possible to use the same coefficient values for the two seasons in order to facilitate irrigation management in the Rio Largo - AL region. The growth and productivity of the crop varies between the seasons, and the greater availability of solar radiation in the dry season makes it possible to obtain higher yields when compared to the rainy season, as long as it is cultivated with irrigation.

Keywords: *Sesamum indicum* L., Evapotranspiration, Drainage lysimetry, Irrigation Management.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1. Representação esquemática de um lisímetro de drenagem.	21
Figura 1.2. Processo simultâneo de evaporação (E) + transpiração (T) nas plantas.	22
Figura 1.3. Processo de evapotranspiração de referência (ET_0).	23
Figura 1.4. Comportamento do Coeficiente de cultivo (K_c) para culturas anuais.	23

CAPÍTULO II

Figura 2.1. Mapa de localização da área experimental na região de Rio Largo, AL.	40
Figura 2.1. Sistema de lisímetros (A), cultura do gergelim aos 20 dias (B), 40 dias (C), 60 dias (D) e 85 dias (E) após a semeadura.	42
Figura 2.1. Evapotranspiração da cultura (ET_c), evapotranspiração de referência (ET_0) e chuva ao longo do ciclo produtivo do gergelim cultivado durante o período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso – A) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (B), na região de Rio Largo, AL.	48
Figura 2.2. Curva do coeficiente da cultura do gergelim diário (K_c), coeficiente da cultura basal (K_{cb}), coeficiente de evaporação (K_e) e índice de área foliar (IAF) na região de Rio Largo, AL, no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso, a) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco, b).	49
Figura 2.3. Relação entre índice de área foliar (IAF) e coeficiente de cultura (K_c) do gergelim. Cada ponto é o IAF quinzenal e o K_c médio quinzenal no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco).	51

CAPÍTULO III

Figura 3.1. Esquema representativo da parcela experimental da cultura do gergelim.	67
Figura 3.1. Distribuição dos tratamentos, em delineamento de blocos casualizados do experimento com gergelim.	68
Figura 3.1. Temperatura média do ar ($^{\circ}C$), umidade relativa média do ar (%) e chuva (mm) no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco).	75
Figura 3.1. Balanço hídrico sequencial da cultura do gergelim sob os níveis de irrigação, L1 (A), L2 (B), L3 (C), L4 (D) e L5 (E) para o período chuvoso de fevereiro a junho de 2021 e L1 (F), L2 (G), L3 (H), L4 (I) e L5 (J) para o período seco de outubro de 2021 a janeiro de 2022, na região de Rio Largo, AL. CAD: capacidade de água disponível; UC: umidade crítica; ARM: armazenamento de água no solo; P: Chuva e I: Irrigação.	77
Figura 3.1. Potencial hídrico foliar (Ψ_w , MPa) no período da antemanhã e ao meio-dia (A) e teor relativo de água na folha (TRA, %) (B) do gergelim cultivado sob diferentes níveis de irrigação ($\%ET_c$).	80
Figura 3.2. Condutância estomática (gs) taxa transpiratória (E), concentração intercelular de CO_2 (C_i), taxa fotossintética líquida (A) e temperatura foliar de plantas de gergelim cultivadas nos períodos chuvoso e no período seco do gergelim cultivado sob diferentes níveis de irrigação ($\%ET_c$).	82
Figura 3.3. Eficiência quântica efetiva do PSII ($\Phi PSII$), eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m) e índice SPAD do gergelim cultivado sob diferentes disponibilidades hídricas (%) da ET_c	84
Figura 3.1. Fitomassa seca total ($kg\ ha^{-1}$) (A e E), altura da planta (cm) (B e F), índice de área foliar ($m^2\ m^{-2}$) (C e G) e diâmetro do caule (mm) (D e H) do gergelim durante os períodos chuvoso e seco de crescimento, respectivamente. L1:50% da ET_c ; L2:75% da ET_c ; L3:100% da ET_c ; L4:125% da ET_c e L5:150% da ET_c . ** Significativo ao nível de 0,01 de probabilidade; e ns- não significativo pelo teste F ($p<0,05$).	90

Figura 3.1. Produtividade de grãos (kg ha^{-1}) e produtividade do uso da água (PUA) ($\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) do gergelim durante o período seco sob diferentes disponibilidades hídrica acumulada (mm).	93
Figura 3.2. Número de cápsulas por planta do gergelim durante o período seco sob diferentes disponibilidades hídricas no solo (mm).	94
Figura 3.1. Análise de componentes principais (PCA) das variáveis de fisiológicas e de crescimento submetidas à diferentes níveis de irrigação (50, 75, 100, 125 e 150% da evapotranspiração da cultura - ET_C). Abreviaturas: AP- altura da planta; DC- diâmetro do caule; AF- área foliar; IAF- índice de área foliar; MSTa- massa seca total; SPAD- índice SPAD; ΦPSII eficiência quântica do PSII; Fv/Fm - eficiência fotoquímica do fotossistema II; A- fotossíntese líquida; Tf- temperatura foliar; E- taxa transpiratória; EUAi- eficiência instantânea do uso da água; TRA- teor relativo de água na folha; ψ_{w5h} - potencial hídrico foliar na antemanhã; ψ_{w512h} 12- potencial hídrico foliar ao meio-dia; Ci- concentração intercelular de CO_2 e gs- condutância estomática; CH: período chuvoso; SC: Período seco.	95

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO II

Tabela 2.1. Atributos químicos e físico-hídricos do solo cultivado com gergelim durante os períodos seco e chuvoso de 2021, no município de Rio Largo, AL.....	40
Tabela 2.2. Ciclo fenológico do gergelim, BRS Seda em suas fases fenológicas, no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco)	44
Tabela 2.3. Valores médios mensais da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento , radiação solar global e totais mensais da chuva (mm) e evapotranspiração de referência (ET_0), no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco).....	47
Tabela 2.4. Duração (dias), graus-dia acumulados ($^{\circ}C$), a transpiração (T), evaporação (E), coeficiente da cultura (K_C), coeficiente basal da cultura, K_{Cb} (T/ET_0), e coeficiente de evaporação da água do solo, K_e (E/ET_0) de cada fase do gergelim na região de Rio Largo, AL, no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco).....	49
Tabela 2.5. Valores de K_C médios por fases do gergelim em diferentes regiões.....	53

CAPÍTULO III

Tabela 3.1. Atributos químicos e físico-hídricos do solo cultivado com gergelim durante os períodos seco e chuvoso de 2021, no município de Rio Largo, AL.....	65
Tabela 3.2. Chuva total, chuva efetiva, irrigação total, lâmina total aplicada (Chuva efetiva + irrigação total), déficit hídrico e excesso hídrico (mm) no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco) em cultivo de gergelim.....	76
Tabela 3.3. Análise de variância das variáveis fisiológicas aos 55 (ciclo 1) e 56 (ciclo 2) DAS do gergelim cultivado sob diferentes lâminas de irrigação no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período chuvoso)	78
Tabela 3.4. Análise de variância dos parâmetros de crescimento do gergelim cultivado sob diferentes lâminas de irrigação, no período de fevereiro a junho de 2022 (período chuvoso) e outubro de 2022 a janeiro de 2022 (período seco)	85
Tabela 3.5. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de crescimento do gergelim cultivado sob diferentes lâminas de irrigação, no período de fevereiro a junho de 2022 (período chuvoso) e outubro de 2022 a janeiro de 2022 (período seco)	87
Tabela 3.6. Análise de variância dos parâmetros produtivos obtido na colheita do gergelim cultivado sob diferentes lâminas de irrigação na região de Rio Largo – AL, Brasil, no período de fevereiro a junho de 2021 (ciclo 1 – período chuvoso) e outubro de 2021 a janeiro de 2022 (ciclo 2 – período chuvoso).....	92

APÊNDICES

Apêndice 1- Montagem do sistema de lisimetria.	98
Apêndice 2- Preenchimento dos lisímetros com as camadas e saturação do solo.	98
Apêndice 3- Vista geral da área lisimétrica com os reservatórios para irrigação, lisímetros, tubos de acesso e o sistema de drenagem.	99
Apêndice 4- Fases do ciclo da cultura do gergelim.	99

SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Taxa fotossintética líquida ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
AC	Área conhecida (cm^2)
ADS	Água Disponível no Solo (mm)
A/E	Eficiência instantânea do uso da água ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$)
AF	Área foliar (m^2)
AL	Alagoas (estado brasileiro)
Al	Alumínio
AP	Altura da plantas(cm)
Ca	Cálcio
CECA	<i>Campus</i> de Engenharia e Ciências Agrárias
CC	Capacidade de campo
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
Ci	Concentração intercelular de CO_2 ($\mu\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
CO_2	Dióxido de carbono
CTC	Capacidade de troca de cátions
D	Drenagem (mm)
DAP	Dias após o plantio
DC	Diâmetro do caule (mm)
DPV	Déficit de pressão de vapor
Dr.	Doutor
Ds	Densidade do solo
E	Taxa transpiratória ($\mu\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
E	Evaporação
ET	Evapotranspiração de referência (mm)
ET_0	Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1})
ET_c	Evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1})
ea	Pressão atual do vapor médio diário (kPa)
es	Pressão de saturação do vapor médio diário (kPa)
es-ea	Déficit de saturação de vapor médio diário (kPa)
EUA	Eficiência do uso da água
FAO	Food and Agriculture Organization
G	Densidade do fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)
GDA	Graus-dia acumulado ($^{\circ}\text{C}$)
G_s	Condutância estomática ($\mu\text{mol de H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
H	Hidrogênio
ha	Hectare (10.000 m^2)
I	Irrigação (mm)
IRGA	Infrared gas analyzer
K	Potássio

K _C	Coeficiente da cultura
L	Nível de irrigação (% ET _C)
LIA	Laboratório de Irrigação e Agrometeorologia
MAFC	Massa da área foliar conhecida (g)
MFTF	Massa fresca total da folha (g)
Mg	Magnésio
mm	Milímetro
MO	Matéria orgânica (%)
N	Nitrogênio
Na	Sódio
P	Precipitação (mm)
P	Fósforo
PET	Polietileno Tereftalato
Ph	Potencial hidrogeniônico
PMP	Ponto de murcha permanente
PPGA	Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Rn	Radiação líquida na superfície da cultura (MJ m ⁻² dia ⁻¹),
SB	Soma de bases
SEAGRI	Secretaria de Estado da Agricultura do Estado de Alagoas
T	Transpiração
T	Temperatura do ar diária a 2m de altura (°C)
t ha ⁻¹	Toneladas por hectare
Tmed	Temperatura média do ar (°C)
Tmin	Temperatura mínima do ar (°C)
Tmax	Temperatura máxima do ar (°C)
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
U	velocidade do vento média diária à altura de 2 m (m s ⁻¹)
UR	Umidade relativa do ar (%)
Urmed	Umidade relativa do ar média (%)
V	Saturação por bases (%)
Y _C	Produtividade da cultura (Kg ha ⁻¹)
Δ	declividade da curva da pressão do vapor em relação à temperatura (kPa °C ⁻¹)
Δ A	Variação do armazenamento da água do solo (mm)
γ	coeficiente psicrométrico (kPa °C ⁻¹)

SUMÁRIO

CONSUMO DE ÁGUA, RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DESEMPENHO PRODUTIVO DA CULTURA DO GERGELIM EM FUNÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA.....	17
1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 Objetivo Geral	19
2.2 Objetivos Específicos	19
CAPÍTULO I	20
3. REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1 Aspectos gerais e exigências bioclimáticas	20
3.2 Manejo de irrigação com lisimetria	21
3.3 Consumo de água em cultivo de gergelim	24
3.4 Estresse por déficit hídrico e parâmetros fisiológicos do gergelim.....	25
3.5 Estresse por déficit hídrico e o crescimento do gergelim.....	27
3.6 Eficiência no uso da água (EUA)	28
REFERÊNCIAS	30
CAPÍTULO II.....	37
4. NECESSIDADE HÍDRICA E COEFICIENTES DA CULTURA SIMPLES E DUPLO DO GERGELIM NO NORDESTE DO BRASIL.....	37
Resumo	37
Abstract	37
4.1 INTRODUÇÃO	38
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	40
4.2.1 Descrição da área de experimental.....	40
4.2.2 Implantação da área experimental	41
4.2.3 Adubação, práticas culturais e manejo da irrigação	42
4.2.4 Evapotranspiração da cultura - ET_C	43
4.2.5 Coeficiente da cultura (K_C)	44
4.2.6 Evapotranspiração de referência - ET_0	45
4.2.7 Análise estatística.....	46
4.3 RESULTADOS	46
4.3.1 Variáveis meteorológicas	46
4.3.2 Evapotranspiração (ET_C) e coeficiente da cultura simples (K_C) e duplo (K_{cb} e K_e).....	47
4.4. DISCUSSÃO.....	51
4.5 CONCLUSÕES.....	55

REFERÊNCIAS	56
CAPITULO III	61
5. FISIOLOGIA, CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DO GERGELIM SOB DIFERENTES DISPONIBILIDADES DE ÁGUA NO SOLO	61
Resumo	61
Abstract	62
5.1 INTRODUÇÃO	63
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	65
5.2.1 Descrição da área experimental e preparo da área	65
5.2.2 Aplicação dos tratamentos.....	67
5.2.3 Manejo da irrigação.....	68
5.2.4 Avaliações fisiológicas.....	70
5.2.5 Avaliações de crescimento	71
5.2.6 Parâmetros produtivos	73
5.2.7 Análise estatística.....	74
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.3.1 Variáveis agrometeorológicas	74
5.3.2 Balanço de água no solo	75
5.3.3 Parâmetros fisiológicos	78
5.3.4 Parâmetros de crescimento	84
5.3.5 Parâmetros produtivos	91
5.3.6 Análise multivariada.....	95
REFERENCIAS	97

CONSUMO DE ÁGUA, RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E DESEMPENHO PRODUTIVO DA CULTURA DO GERGELIM EM FUNÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA

1. INTRODUÇÃO

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é a nona oleaginosa mais cultivada no mundo (KHORAMI et al., 2020) e apresenta expressiva exploração em regiões tropicais e subtropicais na África, Ásia e América Latina (MAHDY et al., 2022), devido agregar sabor aos alimentos. É uma cultura crescente no mercado dos grãos e óleo para elaboração de produtos alimentícios, cosméticos, farmacêuticos e oleoquímicos, o que segue uma tendência mundial de busca por uma alimentação mais saudável, natural, orgânica e livre de aditivos químicos (GHARBY et al., 2017). O grão apresenta 50-60% de gordura e 17-32% de proteínas, além do seu óleo ser saudável, sem colesterol e oferece excelente valor nutricional (BASTUG et al., 2021; DOSSOU et al., 2023).

A cultura do gergelim é resistente à seca e pode produzir com 300 mm de água bem distribuídos ao longo do ciclo, mas a faixa ótima está entre 500 e 650 mm (EBRAHIMIAN et al., 2019). Normalmente produzida em condições de sequeiro no semiárido nordestino, tem apresentado produtividade média de 600 kg ha⁻¹ com o uso de poucos investimentos tecnológicos (ARRIEL et al., 2009). Porém, se cultivada em condições de baixa fertilidade do solo as produtividades são inferiores a 500 kg ha⁻¹ (EUBA NETO et al., 2016), que reduz ainda mais em período de baixa disponibilidade hídrica, alcançando 242 kg ha⁻¹ (LIMA et al., 2018), e 400 kg ha⁻¹ (GHOLAMHOSEINI et al., 2020). Por outro lado, com a utilização de tecnologias avançadas, a cultura exibe possibilidades reais de produzir entre 2.000 kg ha⁻¹ e 2.500 kg ha⁻¹ de grãos (GRILO JUNIOR et al., 2013; SEAGRI, 2020).

Ainda que seja considerada uma cultura tolerante à seca, a produtividade do gergelim é muito influenciada tanto pelo déficit quanto pelo excesso hídrico (PABUAYON et al., 2019; EBRAHIMIAN et al., 2019; SABOURY et al., 2021). Os estresses causados pelas secas (BETRAM et al., 2003), assim como, pelo excesso hídrico (irrigação e/ou chuva) afetam negativamente a produção do gergelim (TAN, 2011). Na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, a precipitação anual está na faixa de 1800 mm, sendo que 70% desta se concentram nos meses de abril a setembro (SOUZA et al., 2005). Por outro lado, o período de outubro a fevereiro

é caracterizado pela baixa ocorrência de chuvas (290 mm), sendo necessária a adoção da irrigação para aumentar o desempenho agrônomo da cultura (HEIDARI et al., 2011).

Estudos que avaliaram a resposta do gergelim à irrigação, mostraram que a cultura apresenta potencial produtivo satisfatório, variando de 1500 a 2000 kg ha⁻¹ (MESQUITA et al., 2013; SILVA et al., 2014; HAILU et al., 2018; PABUAYON et al., 2019; BASTUG et al., 2021). Em contrapartida, deve-se considerar o manejo da água na redução dos impactos da agricultura irrigada sobre os recursos hídricos, por meio da maximização da eficiência no uso da água (pegada hídrica). Estudos têm sido realizados para reduzir o consumo de água pelas culturas sem causar danos significativos no rendimento final (BLUM, 2009; HAILU et al., 2018). Hailu et al. (2018) relataram que a maior produção do gergelim (1846,7 kg ha⁻¹) foi obtida a partir da aplicação de 50% da ET_C. Os resultados do estudo de Pabuayon et al. (2019) demonstraram que gergelim, açafrão e girassol são culturas oleaginosas com baixo consumo hídrico, que facilmente se desenvolvem em condições de estresse sem reduções significativas em seu rendimento.

A evapotranspiração da cultura (ET_C) é uma importante variável utilizada para determinar e monitorar o uso da água em diferentes estágios de desenvolvimento. Normalmente, ET_C é calculada pela multiplicação da evapotranspiração de referência (ET₀) e o coeficiente de cultivo (K_C) (variável em função do estágio fenológico) (ALLEN et al., 2011). No entanto, não existem valores de K_C no boletim 56 da FAO para todas as fases do ciclo da cultura do gergelim, além disso, os mesmos são sensíveis e dependem de vários aspectos, como as características da cultura, variáveis meteorológicas, cobertura do dossel, densidade, estágio de crescimento, umidade do solo e operações agrícolas, o que pode acarretar valores superestimados ou subestimados da quantidade da real ET_C. Sepaskhah; Andam (2001) descobriram que a ET_C do gergelim em um período de 5 meses foi de 910 mm e que os valores de K_C da safra para o período intermediário e final do ciclo foram de 1,08 e 0,64, respectivamente. Allen et al. (2007) relataram os valores de coeficiente de cultivo de 1,10 e 0,25 para os mesmos estágios, respectivamente, sendo o mesmo influenciado por uma série de fatores inerentes à planta, solo, clima, entre outros.

A hipótese defendida no presente estudo é que a precipitação anual na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas pode atender a demanda hídrica do gergelim no período chuvoso. Em contrapartida, no período seco faz-se necessário o uso de irrigação para complementar a demanda hídrica e, conseqüentemente, o desempenho agrônomo da cultura. Algumas características fisiológicas das plantas de gergelim (condutância estomática, fotossíntese, transpiração) favorecem seu crescimento e produtividade, o que garante maior consumo de água e capacidade de conversão de água em matéria seca (eficiência do uso da água) que varia conforme a época do ano (seca e chuvosa) de modo a possibilitar com o uso da

irrigação, seu cultivo durante vários períodos do ano. O presente estudo está estruturado nos seguintes tópicos:

- Objetivos;
- Capítulo I – Revisão de Literatura;
- Capítulo II – Evapotranspiração e coeficientes de cultura simples e duplo do gergelim em período chuvoso e seco.
- Capítulo II – Fisiologia, crescimento e produtividade do gergelim sob diferentes disponibilidades de água no solo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o consumo hídrico, o rendimento fisiológico e produtivo da cultura do gergelim em função da disponibilidade hídrica no solo.

2.2 Objetivos Específicos

1. Quantificar a evapotranspiração da cultura (ET_C), coeficientes de cultivo (K_C) e eficiência do uso da água do gergelim em períodos chuvoso e seco;
2. Avaliar o efeito da disponibilidade de água no solo sobre os aspectos fisiológicos, crescimento e produtividade da cultura do gergelim em períodos chuvoso e seco.

CAPÍTULO I

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Aspectos gerais e exigências bioclimáticas

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma oleaginosa pertencente à família Pedaliaceae, cultivada tanto em regiões tropicais quanto em regiões subtropicais na África, Ásia e América Latina (FAO, 2018). Sua principal utilização é *in natura* e compondo produtos da indústria alimentícia, panificação, óleo, bem como para fins medicinais, farmacêuticos e industriais (GHARBY et al., 2017) e ocupa a nona posição entre as oleaginosas mais cultivadas no mundo (PERIN et al., 2010; MESQUITA et al., 2013; PINTO et al., 2014).

Em sua constituição, a semente do gergelim contém 50–60% de gordura e 17–32% de proteína. Além disso, apresenta óleo comestível e saudável, sem colesterol e com excelente valor nutricional, bem como uma alta porcentagem de ácidos graxos insaturados (47% oleico e 39% linoleico) (SANKAR et al., 2004; MOAZZAMI et al., 2006). Constituída por 13 gêneros, 75 espécies, é uma planta anual ou perene, que dependendo da cultivar, possui altura variável de 0,5 a 3 m, caule ereto, com ou sem ramificações, possui nível de heterofilia, folhas pecioladas pubescentes, flores axilares, com fruto tipo cápsula e deiscência loculicida (BELTRÃO; VIEIRA, 2001).

O seu rendimento depende de vários fatores climáticos, como temperaturas entre 25 e 30 °C e altitudes abaixo de 500 m. A espécie é considerada resistente à seca e pode produzir com um mínimo de pluviosidade (300 mm) bem distribuída, mas a faixa ótima está entre 500 e 650 mm. A espécie prefere solos profundos com textura franca, bem drenados e de boa fertilidade natural (macro e micronutrientes). A planta pode crescer e se desenvolver em tipos diversos de solos sem atingir a plenitude observada nos solos preferenciais. Os solos devem apresentar reação neutra, pH próximo a 7, visto que a planta não tolera aqueles solos com pH abaixo de 5,5 ou acima de 8,0. Além disso, é extremamente sensível à salinidade e à alcalinidade (GRILO JÚNIOR; AZEVEDO, 2013).

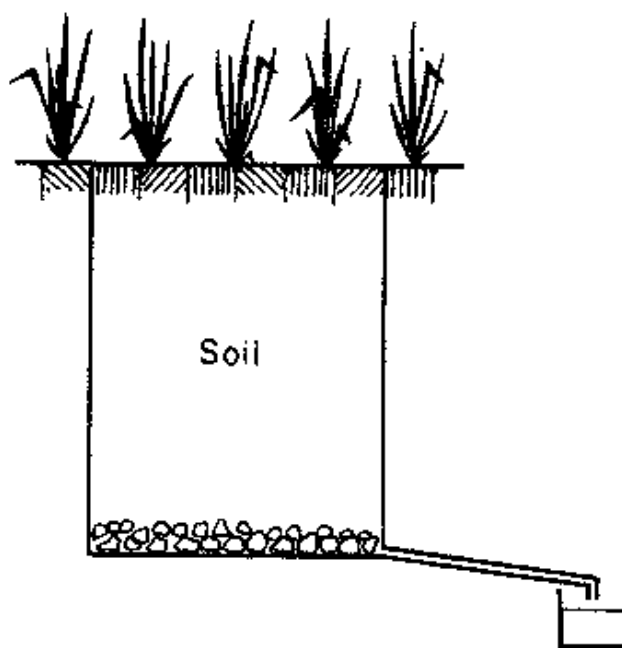
No ano de 2018, a produção mundial de gergelim foi de 6,0 milhões de toneladas em 11,7 milhões de hectares, enquanto a produtividade média foi de 512,82 kg ha⁻¹. No Brasil, a produção do gergelim foi de 127,7 mil toneladas na safra 2019, concentrada basicamente em três estados: Mato Grosso (61,90 mil toneladas), Goiás (20,90 mil toneladas) e Tocantins (44,90 mil toneladas) (CONAB, 2021), com produtividade média de 519 kg ha⁻¹. Aliar técnicas de manejo culturais com o correto manejo da irrigação possibilita melhorar o rendimento da cultura do gergelim.

3.2 Manejo de irrigação com lisimetria

O manejo de irrigação consiste no emprego racional da água com o objetivo de atender as necessidades hídricas da planta que eleva a produção e minimiza as perdas por lixiviação e evaporação (SHUKLA et al., 2014). O uso eficiente de água de irrigação, sem comprometer a rentabilidade econômica de uma cultura é possível através da aplicação precisa de água de irrigação no momento certo. A irrigação deve repor ao solo a quantidade de água retirada pela planta, no momento que a disponibilidade de água assumir um valor baixo que prejudique o desenvolvimento da planta (YASOUR et al., 2017). Diversas técnicas são utilizadas para o correto manejo da irrigação, uma delas é a utilização da lisimetria de drenagem com a finalidade de determinar o consumo hídrico das culturas (GHAMARNIA et al.; 2013; GHARMARNIA et al.; 2014; BASTUG et al.; 2021).

A lisimetria de drenagem é uma forma direta utilizada para determinar de maneira precisa o consumo hídrico de uma cultura. Um lisímetro é basicamente um recipiente que isola o solo do seu entorno, que deve manter as condições mais idênticas possíveis (Figura 1.1). Este fornece um ambiente controlado de água no solo para medição precisa do uso da água (MUNIANDY et al., 2016).

Figura 1.1. Representação esquemática de um lisímetro de drenagem.

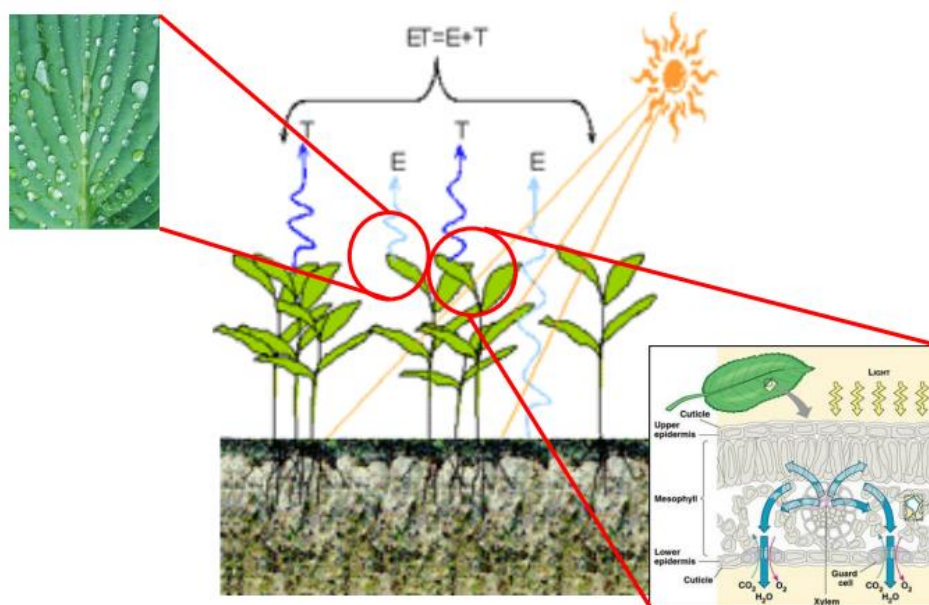


Fonte: FAO.org

Deve-se ter precauções relativas à instalação e manutenção do lisímetro, que garante a precisão e medição direta confiável da evapotranspiração da cultura (ABOUKHALED et al., 1982). Entre precauções, pode-se mencionar: (a) manter a vegetação dentro e fora do lisímetro o mais semelhante possível, em termos de altura e índice de área foliar; (b) atentar às condições físicas do solo no interior do lisímetro, a estrutura precisa aproximar-se, tanto quanto possível, das condições do solo externo; (c) a profundidade do recipiente de lisimetria deve possibilitar o desenvolvimento normal do sistema radicular da planta (ALLEN et al., 1998). Dispondo das medidas de entrada e saída de água do lisímetro é possível determinar a evapotranspiração (ET).

Segundo Allen et al. (1998), a evapotranspiração é definida como a combinação de dois processos distintos, a evaporação (E) da água perdida da superfície do solo e a transpiração (T) das plantas (Figura 1.2). O conhecimento da evapotranspiração é fundamental para o estudo das mudanças climáticas globais, gestão dos recursos hídricos, otimização do manejo da irrigação e produtividade da água, pesquisa agrícola e dinâmica do ciclo hidrológico (XU; CHEN, 2005; CASTELLVÍ; SNYDER, 2010; DING et al., 2013; VALIPOUR, 2015; ANAPALLI et al., 2016).

Figura 1.2. Processo simultâneo de evaporação (E) + transpiração (T) nas plantas.



Fonte: PEREIRA et al. (2002)

De acordo com Allen et al. (2007) a evapotranspiração de referência (ET_0) é definida como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, coberta por uma cultura hipotética

com altura média de 0,12 m uniforme, resistência aerodinâmica de superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23, sem restrições de água, que cresce ativamente e recobre completamente o solo (Figura 1.3). Também chamada de evapotranspiração potencial (ET_p), é um parâmetro agrometeorológico indispensável para o planejamento e manejo de irrigação, e também é considerada elemento do balanço hídrico, daí sua aplicação em estudos meteorológicos, climatológicos e hidrológicos (CARVALHO et al., 2011).

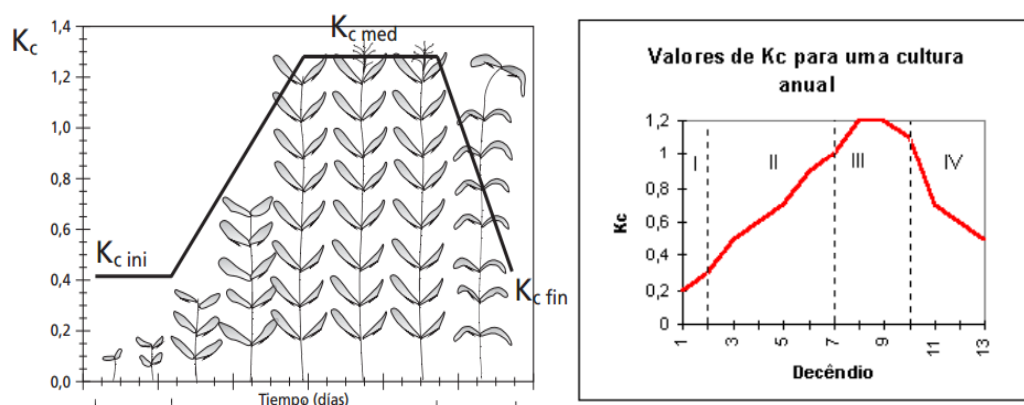
Figura 1.3. Processo de evapotranspiração de referência (ET_0).



Fonte: PEREIRA et al. (2002)

Normalmente, a necessidade hídrica de uma cultura é determinada pela multiplicação da ET_0 pelo coeficiente de cultivo (K_c) (ALLEN et al., 2011) (Figura 1.4). No entanto, os valores de K_c são sensíveis e dependem de vários aspectos, como o tipo de cultura, variáveis climáticas, cobertura do dossel, densidade, estágio de crescimento, umidade do solo e operações agrícolas, o que pode acarretar valores superestimados ou subestimados da quantidade de água aplicada, necessitando de formas precisas que determinem o consumo hídrico da cultura.

Figura 1.4. Comportamento do Coeficiente de cultivo (K_c) para culturas anuais.



Fonte: Adaptado FAO Boletim 56 (1998); Pereira et al.(2002).

A abordagem padrão FAO56 (ALLEN et al., 1998), para estimar a necessidade hídrica das culturas, usa a ET_0 calculada com a Equação de Penman-Montheith (FAO56 PM) e um valor de K_C . Os valores de K_C são obtidos pela medição de ET_C (geralmente com lisímetros ou uma abordagem do balanço hídrico do solo), ao relacionar a ET_C com a ET_0 . Vários valores de K_C estão disponíveis na literatura e recentemente os valores de K_C foram atualizados para muitas culturas (vide PEREIRA et al. 2021).

3.3 Consumo de água em cultivo de gergelim

Um dos fatores ambientais mais limitantes para a produção de gergelim é a disponibilidade hídrica (BETRAM et al., 2003). Esta é considerada uma cultura que se adequa tanto ao cultivo irrigado quanto ao sequeiro, no entanto, quando cultivada em períodos com baixas precipitações assim como a irrigação em excesso afetam negativamente a sua produção (TAN, 2011). Langham et al. (2008) afirmaram que o gergelim é resistente à seca, mas atinge melhor rendimento em condições irrigadas, assim como muitas culturas, enquanto Boureima et al. (2011) afirmaram que as fases em que a cultura é mais sensível ao déficit hídrico são a floração e a frutificação. A espécie pode produzir com um mínimo de pluviosidade (300 mm) bem distribuída, mas a faixa ótima está entre 500 e 650 mm (SILVA et al., 2014).

Alguns pesquisadores relataram os efeitos da água de irrigação sobre o rendimento e a qualidade do gergelim. O maior rendimento e consumo de água das plantas na região mediterrânea da Turquia foram de 1,67 t ha⁻¹ e 464,6 mm, respectivamente (DER-VIS, 1986). El Naim e Ahmed (2010) observaram que os componentes de produção (altura da planta e diâmetro do caule) e o teor de óleo de gergelim foram significativamente afetados por diferentes níveis de irrigação.

Kassab et al. (2005) investigaram os efeitos de diferentes métodos de irrigação (superfície, gotejamento enterrado e irrigação por gotejamento de superfície) e regimes de água (100, 80 e 60% da necessidade hídrica) sobre o crescimento e a produtividade de gergelim. Os resultados indicaram que a irrigação com 100% da lâmina de irrigação aumentou a eficiência do uso da água, bem como o crescimento da cultura e as características de produtividade. Sepaskhah e Andam (2001) descobriram que a evapotranspiração potencial sazonal (ET_p) do gergelim em um período de crescimento de 5 meses foi de 910 mm e que os valores de K_C para os períodos de frutificação e maturação de frutos foi de 1,08 e 0,64, respectivamente.

Allen et al. (2007) relataram valores de coeficiente de cultivo de 1,10 e 0,25 para os mesmos estágios, respectivamente. Bastug et al. (2021) ao avaliar os efeitos de irrigação deficitária na evapotranspiração e rendimento do gergelim obtiveram valores de

evapotranspiração da cultura de 518,8 e 509,2 mm para as cultivares Muganli-57 e Birrkan, respectivamente. Eskandari et al. (2009) observaram que todas as características de rendimento, exceto o peso dos grãos, foram afetados pelo regime de irrigação quando a evaporação do tanque classe A atingiu 150, 200, 250 e 300 mm. Loggale (2018) testou os efeitos da irrigação suplementar em duas variedades de gergelim sob irrigação plena, uma irrigação suplementar e condições de sequeiro e encontrou resultados estatisticamente significativos entre os regimes de umidade, para altura de planta, número de cápsulas por planta, tamanho da semente, e produtividade de sementes.

3.4 Estresse por déficit hídrico e parâmetros fisiológicos do gergelim

O estresse hídrico geralmente é definido como um fator externo, que exerce uma influência negativa sobre a cultura, que ocorre tanto pela falta como pelo excesso de água. Os efeitos causados a planta podem variar de acordo com a intensidade do estresse (TAIZ et al., 2017; GUAN et al., 2015) a qual depende da espécie, cultivar e da parte da planta. Desta forma, as plantas podem apresentar tolerância quando sobrevivem às adversidades, ou suscetibilidade quando sofrem redução em seu crescimento, podendo chegar à morte a depender da intensidade do estresse (LARCHER, 2006; ANJUM et al., 2016).

O fluxo de água do solo para a planta, e desta para a atmosfera é diretamente dependente das condições hídricas do solo e da condução de água pelos diferentes órgãos da planta até as folhas (LARCHER, 2006). Sendo assim, a tolerância das plantas ao estresse hídrico se manifesta geralmente de quatro formas: (i) limitação do crescimento, (ii) adaptações morfológicas, (iii) adaptações fisiológicas, e (iv) alterações metabólicas (PINCELLI, 2010).

A determinação do teor relativo de água na folha (TRA) é uma das formas de avaliar a influência do estresse sobre a planta, o qual é definido como a quantidade de água presente em um tecido comparada com a quantidade máxima que o mesmo pode reter (TAIZ et al., 2017). Assim, é considerado como a variação de massa de água da célula e, conseqüentemente, da variação de volume celular entre a turgescência e a perda desta (ANGELOCCI, 2002). Hassanzadeh et al. (2009), ao estudar a cultura do gergelim, obtiveram valores de conteúdo relativo de água nas folhas de 68,02 e 88,48% para os tratamentos com irrigação durante todo o ciclo e até a floração, respectivamente. Enquanto Swami et al. (2010) em cultivo irrigado obtiveram valores de conteúdo relativo de água nas folhas de 90,2 e 73,2% para as fases de crescimento vegetativo e frutificação plena, respectivamente.

Além do TRA, o potencial hídrico foliar decresce na presença de déficit hídrico. Embora haja variação ao longo do dia, esse parâmetro descreve o estado hídrico da folha, e tem sido

muito utilizado em estudos das relações hídricas de plantas, sobretudo quando são submetidas a déficit hídrico (BERGONCI et al., 2000). O potencial hídrico determinado através da bomba de pressão tipo Scholander é aceito mundialmente como um dos indicadores mais estáveis, confiáveis e precisos para programação de irrigação para muitas culturas (ABRISQUETA et al., 2015). Segundo Larcher (2006), quanto menor a disponibilidade de água no solo, mais negativo deve ser o potencial hídrico. De acordo com Pimentel (2004), existem algumas espécies que apresentam alto grau de tolerância à falta de água, o que pode chegar a -6,0 MPa, o que representa um potencial para essas espécies.

O índice SPAD (soil-plant analysis development) permite diagnosticar a integridade do aparato fotossintético das plantas submetidas ao déficit hídrico (MAGALHÃES et al., 2009). É determinado através de um medidor portátil SPAD-502 que permite leituras instantâneas de clorofila sem destruição do material vegetal, que faz com que tal método seja caracterizado pela simplicidade e rapidez.

Plantas sob condições de déficit hídrico alteram rapidamente as trocas gasosas, em que o fechamento estomático é a primeira resposta a tal condição (GUAN et al., 2015). Isso pode ocorrer devido a fatores como o déficit de pressão de vapor, diferenças entre folhas de sol ou de sombra e entre estômatos das superfícies abaxial e adaxial. Quando a cultura está submetida ao déficit hídrico, tendem ao fechamento estomático numa tentativa de restringir a perda de água pela transpiração. Esse processo é uma das primeiras estratégias para evitar a desidratação, em que a planta com os estômatos fechados consegue minimizar a perda de água (SHIMAZAKI et al., 2007).

Quando a cultura está hidratada absorve grande quantidade de água, mas perdem aproximadamente 97% pela transpiração. Assim, o fechamento estomático é, comumente, a estratégia mais utilizada pelas plantas para diminuir a transpiração e manter a turgescência durante os horários mais quentes do dia (GUAN et al., 2015).

Venora e Calgacno (1991) afirmam que o déficit de água diminuiu a condutância estomática nas plantas de gergelim, pois, a planta fecha os estômatos para reduzir a transpiração. Para Sousa et al. (2014) a condutância estomática do gergelim varia num intervalo de 0,4 a 0,8 mol m⁻² s⁻¹ em ambiente com menor e maior disponibilidade hídrica, respectivamente. Por outro lado, Dias et al. (2018) avaliando a resposta do gergelim à qualidade da água de irrigação, obtiveram valores entre 0,15 e 0,45 mol m⁻² s⁻¹. Contudo, o fechamento estomático compromete a assimilação fotossintética do carbono, que pode afetar o crescimento e a produtividade das culturas (NASCIMENTO, 2009).

A limitação da condutância estomática com o estresse hídrico resulta na diminuição da concentração intracelular de CO_2 (Ci), o que indica que a condutância estomática é um fator importante na fotossíntese (TAIZ et al., 2017). Sousa et al. (2014) ao avaliar o efeito de lâminas de irrigação na cultura do gergelim, obtiveram fotossíntese máxima igual a $21,3 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Por outro lado, Bastug et al. (2021), na Turquia, obtiveram valores de Ci entre 225 e 299 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. De acordo com Shimazaki et al. (2007), a diminuição do CO_2 pode ser causa da diminuição da taxa de assimilação carbono pela planta, pois durante processo das trocas gasosas, a absorção de CO_2 converge na perda de água, que restringe a assimilação de dióxido de carbono e consequentemente diminui a Ci .

3.5 Estresse por déficit hídrico e o crescimento do gergelim

A análise de crescimento de plantas é um método que descreve suas condições morfofisiológicas em diferentes intervalos de tempo, entre duas amostras sucessivas, dentro de um ciclo. Com isso é possível avaliar seu crescimento como um todo e a contribuição dos diferentes órgãos. A partir dos dados de crescimento pode-se inferir atividade fisiológica, isto é, estimar as causas de variações de crescimento entre plantas geneticamente diferentes (BARBERO et al., 2013).

A análise de crescimento das plantas tem sido usada por pesquisadores, na tentativa de explicar diferenças no crescimento de ordem genética ou resultante de modificações do ambiente (BRANDELERO et al., 2002) e constitui uma ferramenta eficiente para a identificação de materiais promissores. Também, pode ser usada para avaliação da produtividade de culturas e permite que se investigue a adaptação ecológica a novos ambientes, a competição entre espécies, os efeitos de manejo e tratamentos culturais, e a identificação da capacidade produtiva de diferentes genótipos (ALVAREZ et al., 2005).

A altura da planta é considerada uma das mais importantes variáveis na análise do crescimento das plantas. Em condições de disponibilidade hídrica adequada, Bastug et al. (2021) obtiveram valores de 190,2 e 206,4 cm para as cultivares de gergelim Muganli-57 e Birkan, respectivamente. Os mesmos autores observaram variação de 108,5 a 218,3 cm em função da disponibilidade hídrica no solo. Por outro lado, Shubhra et al. (2014) observaram que a altura da planta diminui significativamente sob condições de estresse hídrico, e podem variar entre 80,0 a 201,6 cm para as variedades de gergelim e diferentes práticas de manejo (ARSLAN et al., 2014; SAMAN ; OZTURK, 2012; VURARAK et al., 2012).

Assim como a altura da planta, o diâmetro do caule é uma variável que reflete acerca do status hídrico em que a cultura se encontra, que proporciona maior resposta na absorção de

nutrientes do solo. Para Bastug et al. (2021) o diâmetro do caule pode variar em função das condições climáticas a que as plantas estão submetidas. Eles encontraram valores que variaram de 8,0 a 14,0 mm em 2014 e 9,6 a 14,2 mm em 2015, em função da disponibilidade hídrica do solo. Enquanto Samon e Ozturk (2012) que avaliaram os efeitos de diferentes densidades de plantas, encontraram valores de diâmetro do caule com variação de 5,5 a 7,2 mm. Por outro lado, El Naim e Ahmed (2010), obtiveram valores de 11,7 e 18,6 mm para a cultura do gergelim.

A quantidade de folhas existente na planta tem grande relação com os seus aspectos produtivos. Diretamente relacionada ao número de folhas, a área foliar de uma planta depende da cultura, do número e tamanho das folhas, assim como da sua permanência na planta, que geralmente aumenta até determinado ponto com posterior redução devido à senescência natural (CARVALHO et al., 2012).

Ao avaliar a resposta da cultura do gergelim a diferentes lâminas de irrigação, Silva et al., (2014) obtiveram área foliar máxima (90 DAS) próximo a 4000 cm², enquanto Grilo e Azevedo. (2013) e Ribeiro et al., (2018) encontraram valores de 6000 e 6600 cm², respectivamente, para o mesmo período avaliado. Paralelamente à área foliar, tem-se o índice de área foliar (IAF) que é a relação entre a área foliar e a área ocupada pelas plantas. É um importante parâmetro na análise de crescimento, que se relaciona diretamente ao momento da fase de crescimento, sendo que quando atinge o ponto máximo, ocorre o início de perda das folhas (SILVA et al., 2016). Ribeiro et al. (2018) obtiveram IAF igual a 3,59 m² m⁻² aos 109 DAS para a cultura do gergelim. Enquanto, Gloaguen et al. (2019) ao avaliar um método para desenvolver sistemas de apoio à decisão de irrigação para a cultura do gergelim, obtiveram o maior IAF em função dos graus-dia acumulados igual a 3,0 m² m⁻².

As características de crescimento envolvidas e determinadas na análise de crescimento indicam a capacidade do sistema assimilatório das plantas em sintetizar e colocar a matéria orgânica nos diversos órgãos (drenos) que dependem da fotossíntese, respiração e translocação de fotoassimilados dos sítios de fixação aos locais de utilização ou de armazenamento (FONTES et al., 2005). Portanto, expressam as condições fisiológicas da planta e quantificam a produção líquida derivada do processo fotossintético, e seu desempenho é influenciado pelos fatores bióticos e abióticos.

3.6 Eficiência no uso da água (EUA)

A eficiência no uso da água (EUA) é definida pela razão entre a quantidade de produção agrícola por área e o volume de água usado para obter a safra. Para atingir um rendimento máximo, é necessário reduzir a quantidade de água aplicada sem diminuir significativamente o

rendimento ou aumentar a produção por área com o uso da mesma quantidade de água. Diversos pesquisadores em várias regiões do mundo têm obtido esse índice com a finalidade de definir a quantidade de água necessária para cada cultura em função da produtividade esperada (KOECH ; LANGAT et al., 2018; ROPOKIS et al., 2019). Esse índice também é analisado em cultivos de culturas oleaginosas, a exemplo de Candogan et al. (2013), que trabalharam com soja (*Glycine max* (L.) Merrill) em Bursa, Turquia, obtiveram valores que variaram de 0,49 a 0,63 kg m⁻³ e os maiores valores foram obtidos nos menores níveis de irrigação testados.

As unidades mais usadas internacionalmente para EUA são mega grama (tonelada) de matéria verde ou seca por mega litro de água (Mg ML⁻¹) e o quilograma de produto, matéria verde ou seca, por metro cúbico de água consumida (kg m⁻³). A EUA também pode ser expressa na forma de consumo de água (milímetro de água por quantidade de produto – mm t⁻¹) para facilitar a contabilidade dos custos com a água aplicada via irrigação. Inman Bamber; Smith (2005) sugerem que a EUA seja calculada pela Equação 1.1:

$$EUA = \frac{Y_c}{ET_c} \quad \text{(Equação 1.1)}$$

em que Y_c é a produtividade da cultura e ET_c é a evapotranspiração da cultura.

A EUA de uma cultura é variável em função da prática agrícola em que a cultura está submetida. Trabalhar com aplicação de diferentes lâminas de irrigação é um parâmetro relativo, pois, maior eficiência não significa maior produtividade (CARVALHO et al., 2011). Estes mesmos autores, em seu estudo observaram que a maior eficiência no uso da água foi estimada em 74,76 kg ha⁻¹ com a aplicação de 334,1 mm, obtendo produtividade de 30,542 kg ha⁻¹, inferior a máxima produtividade de 35,3 kg ha⁻¹ para uma lâmina de 443,9 mm de água. A EUA traduz a taxa de conversão do grão, isto é, a quantidade de matéria que é produzida para cada unidade de água aplicada.

Nas regiões em que a quantidade de água disponível é insuficiente, trabalhar com estratégias de irrigação que aplique menos água e aumente a EUA torna-se uma alternativa indispensável, é o que foi feito por Abdelkhalik et al. (2020). Bastug et al. (2021) ao avaliar a EUA de duas cultivares de gergelim (Birkan e Muganli-57), em função de cinco tratamentos (sequeiro e quatro tratamentos com irrigação: 25%ET_c; 50% ET_c; 75% ET_c e 100%ET_c), observaram que para ambas as cultivares, a EUA diminuiu à medida que a água de irrigação aumentou, entretanto, todas as EUA foram maiores que aquelas dos tratamentos em sequeiro. Nessa mesma pesquisa, a EUA média para a cultivar Muganli-57 foi de 3,4 e 3,6 kg ha mm⁻¹ em

2014 e 2015, respectivamente, e 3,3 e 3,5 kg ha mm⁻¹ em 2014 e 2015, respectivamente, para a cultivar Birkan.

REFERÊNCIAS

- ABDELKHALIK, A.; PASCUAL, B.; NÁJERA, I.; DOMENE, M. A.; BAIXAULI, C.; PASCUAL-SEVA, N. Effects of deficit irrigation on the yield and irrigation water use efficiency of drip-irrigated sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) under Mediterranean conditions, **Irrigation Science**, v.38, p. 89-104, 2020.
- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. Lysimeters. Rome: FAO, 1982. 68 p. (Irrigation and Drainage, Paper 39).
- ABRISQUETA, I.; CONEJERO, W.; VALDÉS-VELA, M.; VERA, J.; ORTUÑO, M. F.; RUIZ-SÁNCHEZ, M. C. Stem water potential estimation of drip-irrigated early-maturing peach trees under Mediterranean conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 114, p. 7-13, 2015
- ALLEN, R. G.; PEREIRA L. S.; RAES D.; SMITH M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food Agriculture Organization of the United Nations: v. 301, 1998
- ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L.; PRUITT, W.O. **Water requirements**. In: Hoffman GJ, Evans RG, Jensen ME (eds) Design and operation systems, 2nd edn. ASABE, Michigan, pp 208–288. 2007
- ALLEN, R.G. Skin layer evaporation to account for small precipitation events—an enhancement to the FAO-56 evaporation model. **Agricultural Water Management**. v. 99, p. 8–18, 2011.
- ALVAREZ, R. C. F.; RODRIGUES, J.D.; MARUBAYASHI, O.M.; ALVAREZ, A.C.C.; CRUSCIOL. Análise de crescimento de duas cultivares de amendoim (*Arachis hypogaea* L.). **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 27, n. 4, p. 611-616, 2005
- ANAPALLI, S. S.; AHUJA, L. R.; GOWDA, P. H.; MA, L.; MAREK, G.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with data in weighing lysimeters. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 177, p. 274-283, 2016
- ANGELOCCI, L.R. Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: introdução ao tratamento biofísico. Piracicaba: ESALQ/USP, 2002. 272p.
- ANJUM, S.A.; TANVEER, M.; ASHRAF, U.; HUSSAIN, S.; SHAHZAD, B.; KHAN, I.; WANG, L. Effect of progressive drought stress on Growth, leaf gas Exchange, and antioxidant production in two maize cultivars. **Environmental Science and Pollution Research**, v.23, p.17132-17141, 2016.
- ARRIEL, N.H.C., BELTRÃO, N.E.DE.M., FIRMINO, P.DE.T. EMBRAPA Informação Tecnológica, 2009. Gergelim: o produtor pergunta, a Embrapa responde.
- ARSLAN, H.; HATİPOĞLU, H.; KARAKUS, M. Şanlıurfa yöresinde tarımı yapılan susam genotiplerinden seçilen bazı hatların ikinci ürün koşullarında verim ve verim unsurlarının belirlenmesi. **Türk J Agric Res**, v.1, p.109–116, 2014

BARBERO, L.M.; PRADO, T.F.; BASSO, C.K.; KRUGER, C.B.; MARTINS NETO, L.R.; SILVA, G.A.S. Análise de crescimento em plantas forrageiras aplicada ao manejo de pastagens. **Periódicos Brasileiros em Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 19, 2013.

BASTUG, R.; KARACA, C.; BUYUKTAS, D.; AYDINSAKIR, K.; DINC, N. The effects of deficit irrigation practices on evapotranspiration, yield and quality characteristics of two sesame varieties (*Sesamum indicum* L.) grown in lysimeters under the Mediterranean climate conditions. **Irrigation Science**, v. 1, 2021

BELTRÃO, N. E. de M.; VIEIRA, D. J. **O agronegócio do gergelim no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 93 – 107, 2001

BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; SANTOS, A.O. Potencial da água na folha como um indicador de deficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 8, p. 1531-1540, 2000

BETRAM, K.; JANSSENS, M.J.J.; ABDALWAHAB, A. Breeding for drought tolerance in Sesame (*Sesamum indicum*). **Conference on Technological and Institutional Innovations for Sustainable Rural Development**. Gottingen, p 135, 2003

BLUM, A. Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. **Field Crops Research**, v. 112, p. 119-123, 2009

BOUREIMA, S.; EYLETTERS, M.; DIOUF, M.; DIOP, T. A.; VAN DAMME, P. Sensitivity of seed germination and seedling radicle growth to drought stress in sesame (*Sesamum indicum* L.). **Research Journal of Environmental Sciences**, v. 5, p.557–564, 2011

BRANDELERO, E.M. Índices fisiológicos e rendimento de cultivares de soja no município de Cruz das Almas BA. 2001. 63f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)-Escola de Agronomia da Universidade Federal da Bahia, Cruz das Almas, 2002

CANDOGAN, B.; SINCIK, M.; BUYUKCANGAZ, H.; DEMIRTAS, C.; GOKSOY, A. T.; YAZGAN, S. Yield, quality and crop water stress index relationships for deficit-irrigated soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] in sub-humid climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 118, 2013

CARVALHO, D. R.; MASCIMENTO, P. G. M.L.; SILVA, M. G.O.; MESQUITA, H. C.; CUNHA, J. L.X. Comparação de métodos para estimativa da área foliar do *Myrciaria tenella* O. Berg. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande, v. 8, n. 4, p. 01- 06, 2012.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G.F.A.; MIRANDA, W.L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesqui. Agropecu. Trop**, v.41, n.3, 2011

CASTELLVÍ, F.; SNYDER, R. L. A comparison between latent heat fluxes over grass using a weighing lysimeter and surface renewal analysis. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 381, n. 3-4, p. 213-220, 2010

CONAB (2021). Companhia Nacional de abastecimento. < <https://www.conab.gov.br/>>

DERVIS, O. **Çukurova koşullarında buğdaydan sonra ikinci ürün susamin su tüketimi-Rapor**. n. 67, Tarsus, 1986.

DIAS, A. S.; LIMA, G. S.; GHEYI, H. R.; NOBRE, R. G.; FERNANDES, P. D.; SILVA, F.A. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica do gergelim sob estresse salino e adubação com nitrato-amônio. **Irriga**, v. 23, n. 2, p. 220-234, 2018

DOSSOU, S. S K.; FANG-TAO, X.; DOSSA, K.; RONG, Z.; YING-ZHONG, Z.; LIN-HAI, W. Antioxidant lignans sesamin and sesamolin in sesame (*Sesamum indicum* L.): A comprehensive review and future prospects. **Journal of Integrative Agriculture**, v.22, n.1, p.14-30, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.08.097>

DING, R.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, Y.; TONG, L. Evapotranspiration measurement and estimation using modified Priestley-Taylor model in an irrigated maize field with mulching. **Agricultural and Forest Meteorology**, London, v. 168, n. 1, p. 140-148, 2013

EBRAHIMIAN, E.; SEYYEDI, S. M.; BYBORDI, A.; DAMALAS, C. A. Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability. **Agricultural Water Management**, v. 218, 2019

EUBA NETO, M.; PEREIRA, W.E.; SOUTO, J.S.; ARRIEL, N.H.C. Growth and productivity of sesame in entisol as a function of organic and mineral fertilization. **Rev. Ceres**, v. 63, n.4, 2016

EL NAIM, A.M.; AHMED, M.F. Effect of irrigation on vegetative growth, oil yield and protein content of two sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, v.6, n. 5, p. 630–653, 2010

ESKANDARI H, S.S. I.; GOLEZANI, K.G.; GHARINEH, M.H. Effects of water limitation on grain and oil yields of sesame cultivars. **Journal of Food Agriculture and Environment**, v.7, p. 339–342, 2009

FONTES, P.C.R.; DIAS, E.N.; SILVA, D.J.H. Dinâmica do crescimento, distribuição de matéria seca e produção de pimentão em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v.23, n.1, p.94-99, 2005

GHAMARNIA, H.; JAFARIZADE, M.; MERI, E.; GOBADEI, M. A. Lysimetric Determination of *Coriandrum sativum* L. Water Requirement and Single and Dual Crop Coefficients in a Semiarid Climate. **Journal of irrigation and drainage**, v. 139, p. 447-455, 2013

GHAMARNIA, H.; MIRI, E.; GHOBADI, M. Determination of water requirement, single and dual crop coefficients of black cumin (*Nigella sativa* L.) in a semi-arid climate. **Irrigation Science**, v. 32, p. 67-76, 2014

GHARBY, S.; HARHAR, H.; BOUZOUBAA, Z.; ASDADI, A.; EL YADINI, A.; CHARROUF, Z. Chemical characterization and oxidative stability of seeds and oil of sesame grown in Morocco. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.16, n.2, p.105–111, 2017

GLOAGUEN, R. M.; ROWLAND, D. L.; BENNETT, J.; HOCHMUTH, G.; LANGHAM, D.R.; BRYM, T. Root Life History of Non-dehiscent Sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars and the 2 relationship with Canopy Development, **Field crops research**, v.241, 2019

GHOLAMHOSEINI, M. Evaluation of sesame genotypes for agronomic traits and stress indices grown under different irrigation treatments. **Agronomy Journal**, v.112, p.1794–1804, 2020

GRILO JÚNIOR, J. A. S.; AZEVEDO, P. V. DE. Crescimento, desenvolvimento e produtividade do gergelim 'BRS Seda' na agrovila de Canudos, em Ceará Mirim (RN). **Revista Holos**, v.2, p.19-33, 2013

GUAN, X.K.; SONG, L.; WANG, T.C.; TURNER, N.C.; LI, F.M. Effect of Drought on the Gas Exchange, Chlophyll Fluorescence and Yield of Six Different-Era Spring Wheat Cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 201, p. 253-266, 2015

HAILU, E. K.; URGU, Y. D.; SORI, N. A.; BORENA, F. R.; TUFA, K. N. Sesame Yield Response to Deficit Irrigation and Water Application Techniques in Irrigated Agriculture, Ethiopia. **International Journal of Agronomy**, v. 1, 2018

HASSANZADEH, M.; EBADI, A.; PANAHYAN-E-KIVI, M.; ESHGHI, A.G.; JAMAATI-E-SOMARIN.; SAEIDI, M.; ZABIHI-E-MAHMOODABAD, R. Evaluation of drought stress on relative water content and chlorophyll content of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes at early flowering stage. **Research Journal of Environmental Sciences**, v.3, p.245–350, 2009

HEIDARI, M.; GALAVI, M.; HASSANI, M. Effect of sulfur and iron fertilizers on yield, yield components and nutrient uptake in sesame (*Sesamum indicum* L.) under water stress. **African Journal of Biotechnology**, v.10, n.44, p.8816-8822, 2011. <https://doi.org/10.5897/AJB11.854>

INMAN-BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research, Amsterdam**, v.92, p.185-202, 2005.

KASSAB, O.; EL-NOEMANI, A.A.; EL-ZEINY, H.A. Influence of some irrigation systems and water regimes on growth and yield of sesame plants. **Journal of Agronomy**, v.4, p.220–224, 2005

KHORAMI, A.M.; SINAKI, J.M.; DEHAGHI, M.A.; REZVAN, S.; DAMAVANDI, A. Sesame (*Sesame indicum* L.) biochemical and physiological responses as affected by applying chemical, biological, and nano-fertilizers in field water stress conditions. **Journal of plant nutrition**, v. 43, n. 3, p. 456-475, 2020.

KOECH, R.; LANGAT, P. Improving Irrigation Water Use Efficiency: A Review of Advances, Challenges and Opportunities in the Australian Context. **Water**, 2018

LANGHAM, D.R.; RINEY, J.; SMITH, G.; WIEMERS, T. **Sesame grower guide**. Sesaco Corporation, San Antonio, 2008

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2006, 531p.

LIMA, M. S. R.; ROCHA, M. S.; MELO, A. S.; DUTRA, W. F. Physiological, biochemical and productive changes in sesame genotypes subjected to different rates of water replenishment. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.3, p.176-182, 2018

LOGGALE, L.B. Performance of two sesame cultivars as influenced by supplemental irrigation at Abu Naama. **IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science**, v.11, p.6–11, 2018

MAGALHÃES, P. C.; SOUZA, T. C.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; KARAM, D.; MAGALHÃES, M. M.; CANTÃO, F. R. O. Caracterização ecofisiológica de linhagens de milho

submetidas à baixa disponibilidade hídrica durante o florescimento. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 8, n. 3, p. 223-232, 2009.

MAHDY, R.E.; GABER, D.A.; HASHEM, M.; ALAMRI, S.; MAHDY, E.E. Improving Sesame (*Sesamum indicum* L.) Seed Yield through Selection under Infection of *Fusarium oxysporum* f. sp. *Sesami*. **Plants**, v.11, 2022

MESQUITA, J. B. R. DE; AZEVEDO, B. M. DE; CAMPELO, A. R.; FERNANDES, C. N. V.; VIANA, T. V. DE A. Crescimento e produtividade da cultura do gergelim (*Sesamum indicum* L.) sob diferentes níveis de irrigação. **Irriga**, v.18, p.364-375, 2013

MOAZZAMI, A.A.; ANDERSSON, R.E.; KAMAL-ELDIN, A. HPLC analysis of sesaminol glucosides in sesame seeds. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.54, p.633–638, 2006

MUNIANDY, J. M.; YUSOP, Z.; ASKARI, M. Evalution of reference evapotranspiration models and determination of crop coefficient for *Monordica charantia* and *Capsicum annuum*. **Agricultural water management**, v. 169, p. 77-89, 2016

NASCIMENTO, J. L. **Crescimento e assimilação de carbono em plantas jovens de *Attalea funifera* Mart. submetidas ao sombreamento e ao estresse hídrico**. Ilhéus: UESC, 110p. 2009. Dissertação Mestrado

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (FAO). *Review of cassava in Africa: with country case studies on Nigeria, Ghana, the United Republic of Tanzania, Uganda and Benin*. Rome: 2005.

PABUAYON, I. L.; SINGH, S.; RITCHIE, G. Effects of deficit irrigation on yield and oil content of sesame, safflower, and sunflower. **Crop ecology and physiology**, v.3, n.5, p.3091-3098, 2019

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. *Agrometeorologia (Fundamentos e aplicações práticas)*. Livraria e Editora Agropecuária. Guaíba – RS. 2002.478p.

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; LÓPEZ-URREA, R.; HUNSAKER, D. J.; MOTA, M.; SHAD, Z. M. Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. **Agricultural Water management**, v. 243, 2021

PERIN, A.; CRUVINEL, J. D.; SILVA, W. J. DA. Desempenho do gergelim em função da adubação NPK e do nível de fertilidade do solo. **Acta Scientiarum**. Agronomy, v.32, p.93-98, 2010

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: Editora Universitária, 2004. 19 p.

PINCELLI, R.P. Tolerância à deficiência hídrica em cultivares de cana-de-açúcar avaliada por meio de variáveis morfofisiológicas. 65f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Botucatu, 2010

PINTO, C. DE M.; TÁVORA, F. J. A. F.; PINTO, O. R. DE O. Relações hídricas e trocas gasosas em amendoim, gergelim e mamona submetidas a ciclos de deficiência hídrica. **Agropecuária Técnica**, v.35, p.34- 40, 2014

RIBEIRO, R. M. P.; ALBUQUERQUE, J. R. T.; SANTOS, M. G.; BARROS JÚNIOR, A. P.; GRANGEIRO, L. C.; SILVEIRA, L. M. Growth dynamics of sesame cultivars. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 4, p. 1062-1068, 2018

ROPOKIS, A.; NTATSI, G.; KITTAS, C.; KATSOULAS, N.; SAVVAS, D. Effects of Temperature and Grafting on Yield, Nutrient Uptake, and Water Use Efficiency of a Hydroponic Sweet Pepper Crop. **Agronomy**, v.9, p. 1-15, 2019

SABOURY, A.; GHOLAMHOSEINI, M.; BAZRAFSHAN, F.; HABIBZADEH, F.; AMIRI, B. Interaction of irrigation and nitrogen fertilization on yield and input use efficiency of sesame cultivars. **Agronomy Journal**, v.113, p.5133–5142, 2021

SAMAN, O.; OZTURK, O. İkinci ürün susamda farklı ekim sıklıklarının verim ve verim unsurları üzerine etkileri. **Tarım Bilim Araştırma Derg.**, v.5, p.118–123, 2012

SANKAR, D.; AMBANDAM, G.; RAMAKRISHNA, R.A.O. M.; PUGALENDI, K.V. IMPact of sesame oil on nifedipine in modulating oxidative stress and electrolytes in hypertensive patients. **Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition**, v.13, p.107, 2004

SEAGRI. 2020. Em Alagoas, Seagri realiza início da safra de grãos. <http://www.agricultura.al.gov.br/sala-de-imprensa/noticias/2020/abril/em-alagoasseagri-realiza-inicio-da-safra-de-graos>

SEPASKHAH, A.R.; ANDAM, M., M. Crop coefficient of sesame in a semiarid region of I.R. Iran. **Agricultural Water management** 49:51–63, 2001

SHIMAZAKI, K. I.; DOI, M.; ASSMANN, S.M.; KINOSHITA, T. Light regulation of stomatal movement. **Annual Review of Plant Biology**, v. 58, n. 1, p. 219-247, 2007

SHUBHRA, K.; DAYAL, J.; GOSWAMI, G.L.; MUNJAL, R. Effects of water defcit on oil of Calendula aerial parts. **Biol Plant**, v.48, p.445–448, 2014

SHUKLA, S.; SHRESTHA, N. K.; JABER, F. H.; SRIVASTAVA, S.; OBREZA, T. A.; BOMAN, B. J. Evapotranspiration and crop coefficient for watermelon grown under plastic mulched conditions in sub-tropical Florida. **Agricultural Water management**, v. 132, p. 1-9, 2014

SILVA, J. C. A.; FERNANDES, P. D.; BEZERRA, J. R. C.; ARRIEL, N. H. C.; CARDOSO, G. Crescimento e produção de genótipos de gergelim em função de lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.4, p.408–416, 2014

SILVA, T. N.; MORO, G. V.; MORO, F. V.; SANTOS, D. M. M.; BUZINARO, R. Correlation and path analysis of agronomic and morphological traits in maize. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 2, p. 351-357, 2016

SOUSA, G. G., VIANA, T. V.A., DIAS, C. N., SILVA, G. L., AZEVEDO, B. M. Lâminas de irrigação para cultura do gergelim com biofertilizante bovino. **Revista Magistra**, v.26, n.3, p.347 - 356, 2014

SOUZA, J. L.; NICÁCIO, R.M.; MOURA, M.A.L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brasil. **Renewable Energy**, v.30, p.1203-1220, 2005.

SWAMI, P.; SAXENA, S.; TRIPATHI, S.L. Study of behavior of sesame (*Sesamum Indicum* L.) to relative turgidity, diffusion pressure deficit and transpiration intensity under arid conditions of western Rajasthan. **J Agric Sci**, v. 2, P.129–134, 2010

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p

TAN, A.Ş. Bazı susam çeşitlerinin Menemen koşullarında performansları. **Anadolu, Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Derg**, v. 21, p.11–28, 2011

VALIPOUR, M. **Temperature analysis of reference evapotranspiration models**. Meteorological Applications, Amsterdam, v. 22, n. 3, p. 385-394, 2015

VENORA, G.; CALCAGNO, F. Study of stomatal parameters for selection of drought resistant varieties in Triticum durum DESF. **Euphytica**, v.57, p.275–283, 1991

VURARAK, Y.; ANGIN, N.; BILGILI, M.E. Susamda farklı hasat yöntemlerinin dane olgunlaşmasına olan bazı etkilerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. **Tarım Bilim Araştırma Derg**, v.5, p.93–96, 2012

XU, C. Y.; CHEN, D. Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 19, n. 18, p. 3717-3734, 2005

YASOUR, H.; TAMIR, G.; STEIN, A.; COHEN, S.; TAL-BAR, A.; BEN-GALA.; YERMIYAHU, U. Does water affect pepper plant response to nitrogen fertigation. **Agricultural Water Management**, v.191, p.57-66, 2017.

CAPÍTULO II

4. NECESSIDADE HÍDRICA E COEFICIENTES DA CULTURA SIMPLES E DUPLO DO GERGELIM NO NORDESTE DO BRASIL

Resumo: O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma oleaginosa de grande importância principalmente por suas propriedades nutricionais. No entanto, há carência de informações técnico-científicas sobre a necessidade hídrica da cultura para fins de manejo de irrigação. Assim, objetivou-se com este estudo determinar as necessidades hídricas, os coeficientes da cultura simples (K_C) e duplo ($K_{Cb} + K_e$) do gergelim em dois períodos de cultivo na região Nordeste do Brasil. A evapotranspiração de referência (ET_0) foi estimada usando o método de Penman-Monteith com dados agrometeorológicos obtidos de uma estação localizada ao lado da área experimental. A evapotranspiração da cultura (ET_C) foi obtida por lisímetros de drenagem, pelo método do balanço de água no solo. Além disso, o K_C foi determinado pela razão ET_C/ET_0 . Os valores de K_e e K_{Cb} foram calculados pela razão de evaporação da superfície do solo e transpiração para ET_0 , respectivamente. As necessidades totais de água foram de 450,4 e 440,1 mm e média diária de 3,7 e 4,0 mm dia⁻¹ para os períodos chuvoso e seco, respectivamente. Os valores médios de K_C , K_e e K_{Cb} foram 0,79; 0,51 e 0,28 para o período chuvoso e 0,75; 0,57 e 0,18 para o período seco. Os resultados obtidos demonstram a importância da determinação da ET_C e do K_C para aumentar a eficiência no manejo da irrigação em diferentes períodos ao invés de adotar valores generalizados de K_C .

Palavras-chave: Lisímetro; Demanda hídrica; Manejo de irrigação; Evapotranspiração.

WATER REQUIREMENT AND SINGLE AND DOUBLE CROP COEFFICIENTS OF SESAME IN NORTHEASTERN BRAZIL

Abstract: Sesame (*Sesamum indicum* L.) is an oilseed of great importance mainly for its nutritional properties. However, there is a lack of technical and scientific information about the water requirements of the crop for irrigation management purposes. Thus, this work aimed to determine the water requirements, the simple (K_C) and double ($K_{Cb} + K_e$) crop coefficients of sesame in two growing seasons in the Northeast region of Brazil. The reference evapotranspiration (ET_0) was estimated using the Penman-Monteith method with agrometeorological data obtained from a station located next to the experimental area. The crop evapotranspiration (ET_C) was obtained by drainage lysimeters, using the soil water balance method. Furthermore, the K_C was determined by the ratio ET_C/ET_0 . K_e and K_{Cb} values were calculated by the ratio of evaporation from the soil surface and transpiration to ET_0 , respectively. The total water requirements were 450.4 and 440.1 mm and daily average of 3.7 and 4.0 mm day⁻¹ for the rainy and dry periods, respectively. The average values of K_C , K_e and K_{Cb} were 0.79, 0.51 and 0.28 for the rainy period and 0.75, 0.57 and 0.18 for the dry period. The results obtained demonstrate the importance of determining ET_C and K_C to increase the efficiency of irrigation management in different periods instead of adopting generalized K_C values.

Keywords: Lysimeter; Water demand; Irrigation management; Evaporation.

4.1 INTRODUÇÃO

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é uma das primeiras culturas oleaginosas utilizadas pelo homem, e ocupa a nona posição entre as mais cultivadas no mundo (LIMA et al., 2018; BASTUG et al., 2021). Seu consumo tem sido estimulado devido aos seus benefícios nutricionais tanto para humanos quanto para animais (DOSSOU et al., 2023). Suas sementes contêm 27,89% a 62,7% de óleo, elevado valor proteico que varia de 16,72% a 27,79%, 13,5% de carboidratos, minerais e vários antioxidantes (EBRAHIMIAN et al., 2019; DOSSOU et al., 2023). Sua principal utilização é in natura, sendo utilizado também na fabricação de produtos da indústria alimentícia e para fins medicinais, sobretudo, em países orientais (GHARBY et al., 2017; KERMANI, et al., 2019).

Embora seja cultivado em diversas regiões do mundo, o gergelim é uma planta anual e nativa de regiões áridas e semiáridas (GHOLINEZHAD et al., 2020). Seu rendimento depende de vários fatores, como temperatura do ar entre 25 e 30 °C, disponibilidade hídrica e altitudes abaixo de 500 m (EBRAHIMIAN et al., 2019). Essa cultura consegue produzir com disponibilidade de 300 mm de água bem distribuídos ao longo do ciclo produtivo, contudo, a faixa ótima está entre 500 e 650 mm ciclo⁻¹ (BERNARDO et al., 2009). Nessas condições, a sua produtividade pode atingir valores iguais a 519 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023). Embora seja considerado tolerante à seca, quando submetido a longos períodos de estiagem, o gergelim tem seu crescimento e produção de biomassa e de sementes reduzidos significativamente (KERMANI et al., 2019). Além disso, há o aumento da susceptibilidade a pragas e doenças (YOUSEFZADEH NAJAFABADI; EHSANZADEH, 2017), bem como a redução da concentração de metabólitos secundários nas sementes (MUNDIM; PRINGLE, 2018). Isso torna a irrigação dessa cultura benéfica em regiões propensas a seca (GHOLINEZHAD et al., 2020).

Estudos que avaliaram a resposta do gergelim à irrigação mostraram que a cultura apresenta potencial produtivo satisfatório, podendo atingir produtividades de 1500 a 2000 kg ha⁻¹ (MESQUITA et al., 2013; SILVA et al., 2014; HAILU et al., 2018; PABUAYON et al., 2019; BASTUG et al., 2021). Quando irrigado, o desempenho agrônômico do gergelim torna-se menos dependente do período de cultivo e das estações do ano. Na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, a precipitação anual está na faixa de 1800 mm, sendo que 70% se concentram nos meses de abril a setembro (SOUZA et al., 2005). Por outro lado, o período de outubro a fevereiro é caracterizado pela baixa ocorrência de chuvas (290 mm), sendo necessária a adoção da irrigação para aumentar o desempenho agrônômico da cultura (HEIDARI et al., 2011). Para esses mesmos autores, o cultivo de culturas de maior valor agregado, como o gergelim, tem ganhado espaço em

áreas anteriormente cultivadas com cana-de-açúcar, principalmente, entre os pequenos produtores.

A escolha da quantidade de água utilizada na irrigação é empírica (PEREIRA et al., 2021; SOUSA et al., 2021), isto é, sem levar em consideração qualquer informação técnica sobre eficiência. O manejo de irrigação deve ser adotado com o objetivo de fornecer a quantidade de água adequada à cultura, com reflexos positivos sobre o seu rendimento (DRECHSLER et al., 2022; IPPOLITO et al., 2023). Para isso, é fundamental o conhecimento da real necessidade hídrica da planta, que pode ser obtida a partir da determinação da evapotranspiração da cultura (ET_C) e do coeficiente da cultura ($K_C = K_{Cb} + K_e$). Em condições de pleno crescimento e desenvolvimento, a ET_C e o K_C refletem a exigência de água a ser adotada na prática de irrigação (ALVES et al., 2022). A ET_C pode ser determinada a partir do método descrito no boletim FAO-56, que consiste na multiplicação da evapotranspiração de referência (ET_0) com o K_C (ALLEN et al., 1998). O K_C reflete as características da planta sobre a evapotranspiração (PEREIRA et al., 2021; AL TAMIMI et al., 2022), e compreende o coeficiente basal da cultura (K_{Cb}) (i.e., componente transpiração) e o coeficiente de evaporação do solo (K_e) (TAN et al., 2022).

Outra forma de determinar a ET_C é por meio da lisimetria de drenagem, que permite conhecer a necessidade de água pela cultura para condições locais específicas (XU et al., 2018; SILBER et al., 2019; LÓPEZ-URREA et al., 2020; BASTUG et al., 2021). Essa técnica já foi utilizada para a cultura do gergelim. Por exemplo, Pereira et al. (2017), nas condições semiáridas do Rio Grande do Norte, obtiveram valor acumulado de ET_C igual a 566 mm e K_C de 0,6, 0,9 e 0,8 para as fases inicial, médio e final, respectivamente, da cultivar BRS Anahí. Para as condições climáticas do Mediterrâneo da Turquia, Bastug et al. (2021) estudaram as cultivares Muganli-57 e Birrakon e encontraram valores de ET_C variando de 157,8 a 518,8 mm e 156,4 a 509,2 mm, respectivamente.

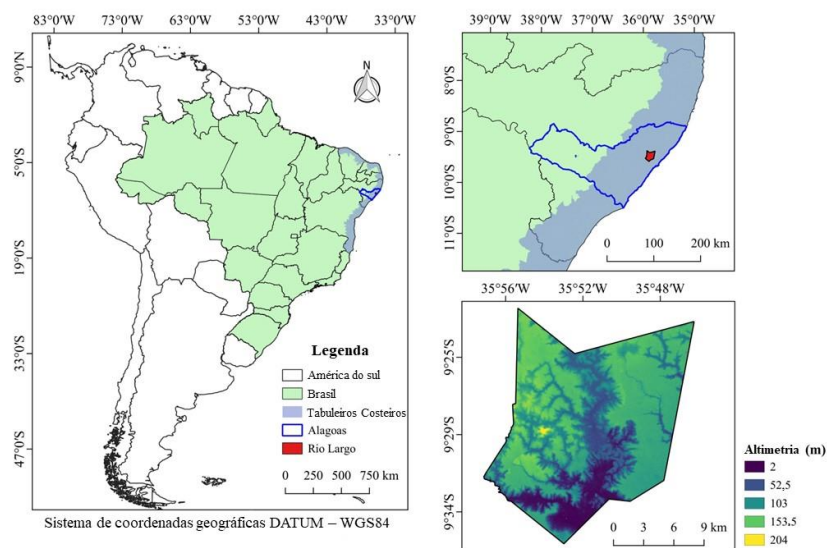
Para a região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas não há informações sobre a real necessidade hídrica do gergelim. O manejo de irrigação realizado com base na necessidade de água pela planta, é fundamental para melhorar o uso dos recursos hídricos, o rendimento da cultura e, conseqüentemente, a renda do produtor (EBRAHIMIAN et al., 2019). Dessa forma, objetivou-se com esse estudo determinar a ET_C diária e acumulada, bem como os coeficiente de cultivo simples (K_C) e duplo ($K_{Cb} + K_e$) do gergelim cultivado nos períodos seco e chuvoso dessa região.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Descrição da área de experimental

O estudo foi realizado em uma área experimental localizada no Campus de Engenharia e Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas, situada na região dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste brasileiro, no município de Rio Largo (9°28'29,1'' S; 35°49'43,6'' W e 127 m), Alagoas, Brasil (Fig. 2.1). O clima da região é úmido, megatérmico, com moderada escassez de chuva no verão e excesso no inverno (THORNTHWAITE ; MATHER, 1955), com temperatura média anual de 25,4 °C, umidade relativa média do ar em torno de 70%, evapotranspiração potencial anual e média diária de 1.477 mm ano⁻¹ e chuva de 1.800 mm ano⁻¹ (SOUZA et al., 2005).

Figura 2.1. Mapa de localização da área experimental na região de Rio Largo, AL.



Fonte: AUTOR, 2023.

O tipo de solo presente na área foi classificado como Latossolo amarelo coeso argisólico, com textura médio-argilosa (EMBRAPA, 2018). Os valores dos atributos químicos e, físico-hídricos do solo nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20-0,40 m são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Atributos químicos e físico-hídricos do solo cultivado com gergelim durante os períodos seco e chuvoso de 2021, no município de Rio Largo, AL

Atributos químicos											
Prof.	pH	P	Ca	Mg	K	SB	Al	H+Al	CTC	V	M.O
m		mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³							%	g kg ⁻¹
0.0-0.20	5.6	29.92	2.9	1.3	0.11	4.03	0.0	4.29	8.32	48.0	42.6
0.20-0.40	4.9	13.05	1.3	0.4	0.06	1.77	0.7	4.46	6.23	28.0	21.4

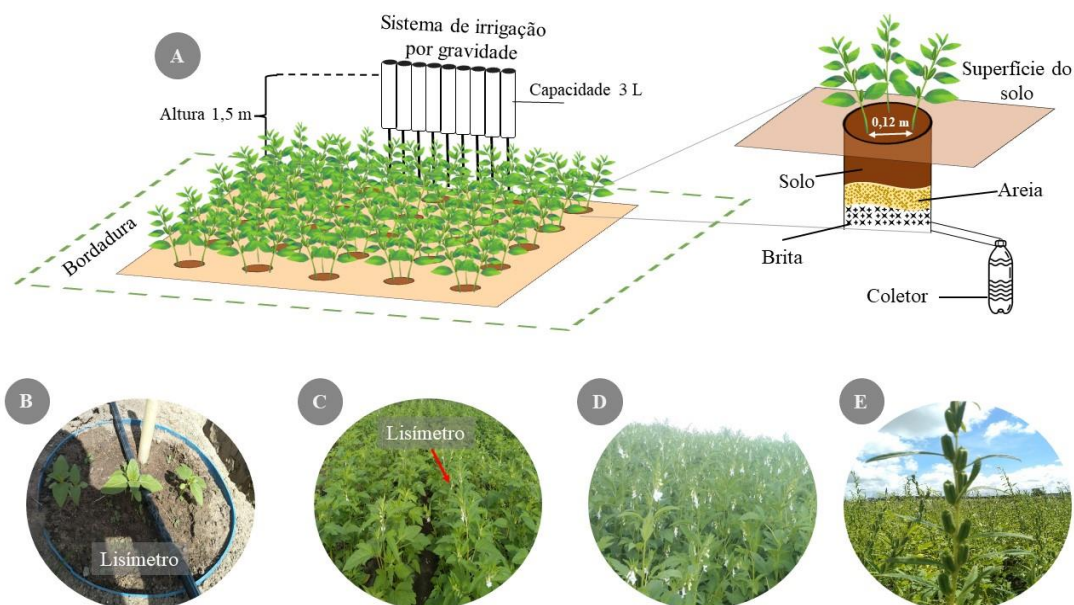
Atributos físico-hídricos						
Prof.	Densidade do solo ⁽¹⁾	Porosidade total ⁽¹⁾	VIB ⁽¹⁾	Granulometria		
m	(Mg m ⁻³)	(%)	(mm hora ⁻¹)	(%)		
				Areia	Silte	Argila
0,0-0,20	1.5	42.3	52.0	54	30	16

⁽¹⁾ Carvalho (2003) Nota: Metodologia Embrapa; Extratores: Água (pH); Mehlich (P, K, Na, Fe, Cu, Zn, Mn); KCl (Ca, Mg e Al); Oxidação (C); Acetato de Cálcio (H+Al); B (HCl); Sulfato de Cálcio (S); Cálculos: SB=Ca+Mg+Na+K; CTC=SB+(H+Al); V%=(SB/CTC)*100. Nota²: Metodologia: IAC; Extratores: Resina (P). VIB = velocidade de infiltração básica.

4.2.2 Implantação da área experimental

As implantações da área ocorreram em fevereiro/2021 (primeiro experimento) e outubro/2021 (segundo experimento), com a instalação do sistema de lisímetros de drenagem (Fig. 2.2). O sistema foi composto por 25 lisímetros, instalados na região central da área experimental. Cada lisímetro, construído a partir de recipientes plásticos de formato cilíndrico, apresentou diâmetro interno igual a 0,4 m. Posteriormente, uma camada de brita e outra de areia, ambas com 0,02 m de espessura na base do lisímetro foi adicionada para facilitar a drenagem. Um tubo de polietileno com diâmetro de 20 mm foi instalado na base inferior de cada lisímetro e conectado aos coletores de drenagem, de modo que tivesse um pequeno desnível no sentido do dreno a fim de viabilizar a drenagem da água. Os lisímetros foram preenchidos com camadas de 0,1 m de solo e, cada camada foi compactada manualmente para atingir a densidade de 1,50 g cm⁻³, conforme descrito por Carvalho (2005). O solo foi saturado com água por um período de 24 horas. Para garantir que os macroporos e microporos estivessem cheios de água, as saídas de drenagem foram hermeticamente fechadas. Após esse período, o tampão foi retirado para que o excesso de água fosse drenado e o solo estivesse em capacidade de campo.

Figura 2.2. Sistema de lisímetros (A), cultura do gergelim aos 20 dias (B), 40 dias (C), 60 dias (D) e 85 dias (E) após a semeadura.



Fonte: AUTOR, 2023.

Nesse estudo foi avaliada a cultivar de gergelim BRS Seda, durante os períodos de 12 de fevereiro a 14 de junho de 2021 e 08 de outubro de 2021 a 24 de janeiro de 2022, caracterizados como chuvoso (período I) e seco (período II), respectivamente. O semeio ocorreu em 12 de fevereiro de 2021 e 08 de outubro de 2021, com a semeadura de cinco sementes em cada uma das três covas presentes em cada lisímetro. As covas estavam a distância de 0,12 m entre si. Em ambos os períodos, realizou-se o primeiro desbaste aos 15 dias após a semeadura (DAS), deixando-se duas plantas em cada uma das três covas. O desbaste definitivo ocorreu aos 22 e 21 DAS nos períodos I e II, respectivamente, deixando-se três plantas por lisímetro, totalizando um estande inicial igual a 167 mil plantas ha^{-1} .

4.2.3 Adubação, práticas culturais e manejo da irrigação

Antes da adubação de fundação, realizou-se a aplicação de 289 g de calcário em cada lisímetro. A adubação química foi realizada com a aplicação de 50 kg ha^{-1} de N, 40 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 60 kg ha^{-1} de K_2O , conforme a análise de solo da área experimental e o manual de recomendação do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA, 2008). A adubação nitrogenada de cobertura foi dividida em duas aplicações, sendo a primeira (25 kg ha^{-1}) realizada após o desbaste e a segunda (25 kg ha^{-1}) 20 dias após a primeira. Quando necessário, realizou-se o controle das plantas espontâneas, pragas e doenças.

A irrigação foi realizada por gravidade, por meio de um sistema por gotejamento, com emissores espaçados a 20 cm, com vazão nominal de 1,0 L h⁻¹. Para isso, 25 reservatórios (i.e., um para cada lisímetro), com capacidade para 3 litros de água cada, foram instalados ao lado da área experimental a uma altura de 1,5 m. Diariamente, foi aplicada uma quantidade de 1 litro de água em cada lisímetro durante maior parte do ciclo produtivo da cultura. A partir dos 68 e 31 DAS até os 116 e 95 DAS, nos períodos I e II, respectivamente, a quantidade de água aplicada foi igual a 1,5 litros, devido à redução do volume de água drenado. Após esse período, a quantidade de água de 1 litro de água voltou a ser aplicada, perdurando até o final do ciclo da cultura.

4.2.4 Evapotranspiração da cultura - ET_C

A evapotranspiração da cultura (ET_C) foi determinada pelo resíduo do método simplificado do balanço de água do solo (LIBARDI, 2005), conforme Eq. 2.1. Nesse estudo, a profundidade efetiva do sistema radicular do gergelim foi considerada igual a 0,40 m, conforme Gloaguen et al. (2019).

$$ET = P + I - D - ES \quad \text{Eq.2.1}$$

onde ET_C é a evapotranspiração (mm), P é a precipitação (mm), I é a irrigação (mm), D é a drenagem (mm) e ES é o escoamento superficial (mm).

A água drenada era armazenada em coletores isolados para cada lisímetro (Figura 2.2) para posterior determinação do volume, a qual era realizada diariamente, no dia seguinte após cada irrigação nos lisímetros, por meio de uma proveta graduada. Em seguida, a água retornava para o sistema de aplicação, a fim de evitar perdas dos nutrientes por lixiviação. A precipitação foi medida com um pluviômetro instalado na área experimental. Nos dias com ocorrência de chuva, foi calculado o escoamento superficial (ES), baseado no manual de Fundamentos do modelo IPHS1 (2004) e CHOW et al. (1988). A partição da evapotranspiração da cultura, em transpiração (T) e evaporação (E) foi obtida pelas Equações 2.2 e 2.3 (ALBERTO et al., 2014).

$$T = ET_c [1 - \exp(-k \times IAF)] \quad \text{Eq. 2.2}$$

$$E = ET_c - T \quad \text{Eq. 2.3}$$

Onde IAF é o índice de área foliar (m² m⁻²) e k é o coeficiente de extinção, igual a 0,681 conforme Koocheki et al. (2016). Valores diários de IAF necessários para a Eq. 2 foram estimados a partir de valores medidos quinzenalmente por interpolação linear. Os dados de IAF foram ajustados

pelo modelo Peak Log Normal, 3 parâmetros, com coeficiente de ajuste igual a 0,91 e 0,97, respectivamente para os períodos 1 e 2.

4.2.5 Coeficiente da cultura (K_c)

Foram usadas as seguintes equações para derivar o coeficiente de cultura (K_c) (Eq. 2.4), coeficiente de cultura basal (K_{cb}) (Eq. 2.5) e coeficiente de evaporação da água do solo (K_e) (Eq. 2.6) (Allen et al., 1998):

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad \text{Eq.2.4}$$

$$K_{cb} = \frac{T}{ET_0} \quad \text{Eq.2.5}$$

$$K_e = \frac{E}{ET_0} \quad \text{Eq.2.6}$$

Para demonstrar o comportamento do K_c ao longo do ciclo produtivo, determinou-se a fenologia do gergelim. Conforme observações diárias em campo, a fase inicial foi definida como o período da emergência das plântulas até o momento em que o dossel da planta alcançou 10% da cobertura de solo. Nesse período foi realizado o primeiro desbaste, quando as plantas apresentaram de duas a quatro folhas definitivas. Ao final da fase inicial, iniciou-se a fase de desenvolvimento da cultura, perdurando até o início da floração. Quando 40 a 50% das plantas apresentaram flores, iniciou-se a fase intermediária da cultura, que perdurou até o início de maturação dos frutos (i.e., cápsulas) (ARRIEL et al. 2009). A fase final foi caracterizada com o período da abertura dos primeiros frutos. A quantidade de dias de cada fase fenológica durante os dois ciclos produtivos é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Ciclo fenológico do gergelim, BRS Seda em suas fases fenológicas, no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco)

Fase	Fase fenológica	Período (DAS)		Duração (dias)	
		1º ciclo	2º ciclo	1º ciclo	2º ciclo
I-Inicial	Emergência a 10% da cobertura de solo	1-15	1-15	15	15
II-Desenvolvimento	10% da cobertura de solo ao início da floração	16-46	16-46	31	31
III-Intermediária	Início da floração ao início da maturação	47-103	47-84	57	38

IV-Final	Início da maturação ao final do ciclo da cultura	104-123	85-109	19	25
Total				123	109

As medidas de dias após a semeadura (DAS) foram convertidas para graus-dia de crescimento diários (GDA) estimados pela Eq. 2.7:

$$GDA_{10} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_b \quad \text{Eq.2.7}$$

onde T_{max} e T_{min} são as temperaturas do ar máximas e mínimas, respectivamente, e T_b a temperatura base da cultura, considerada igual a 10 °C conforme Sepaskhah ; Andam (2001) e Meena ; Rao (2013).

Para avaliar o comportamento do K_C em função do crescimento da cultura, quinzenalmente foram avaliadas as plantas existentes em dois lisímetros extras, que totalizam 6 plantas (3 em cada lisímetro) por avaliação. A área foliar foi determinada pelo método dos discos que consiste em estimar a partir da massa de uma área conhecida (AC) de folhas. Para isso, foi utilizado um cilindro com seção de 5,79 cm², sendo utilizado para retirar 2 discos foliares de cada amostra de folhas. As amostras de folhas consistem em todas as folhas frescas de cada planta (MFTF). A AF foi determinada conforme a Eq. 2.8.

$$AF = \frac{AC \times MFF}{MFAC} \quad \text{Eq.2.8}$$

em que, AF: área foliar (cm²); MFF: massa fresca das folhas (gramas); MFAC: massa fresca da área conhecida (gramas); AC: área conhecida, 11,58 cm² (2 discos com diâmetro de 2,715 cm).

4.2.6 Evapotranspiração de referência - ET_0

As variáveis agrometeorológicas necessárias para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0) foram obtidas através de uma estação automática com auxílio de um Micrologger (CR10X, Campbell Scientific, Logan, Utah) instalada a 50 m do experimento. A estação disponibiliza dados de temperatura do ar (máxima, média e mínima; °C), umidade relativa do ar (máxima, média e mínima; %), velocidade do vento (m s⁻¹), radiação solar global (MJ m⁻² d⁻¹) e chuva (mm). A ET_0 foi calculada pelo método de Penman-Motheith-FAO, conforme a Eq. 2.9:

$$ET_0 (mm \text{ dia}^{-1}) = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \left(\gamma \frac{900}{T + 273}\right) U_2 (e_s - e)}{\Delta + [\gamma(1 + 0,34 U_2)]} \quad \text{Eq. 2.9}$$

em que, Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor d'água saturado versus temperatura do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); γ é o coeficiente psicométrico; T é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); U_2 é a velocidade média do vento a 2,0 m de altura (m s^{-1}); e_s é a pressão de saturação do vapor d'água do ar (kPa) é a pressão do vapor d'água do ar (kPa).

O R_n diário foi considerado fração da irradiação solar global diária (H_g , $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) em que os valores de H_g foram obtidos por meio de integrações de R_g . Esta relação é oriunda de medições sobre a grama (*Paspalum notatum* Flüggé) em condições padrões (Allen et al., 1998) realizadas entre janeiro a setembro de 2006, sendo utilizados apenas os dias sem chuva ($n = 158$) pelo Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar (LARAS) da UFAL.

4.2.7 Análise estatística

Para medir o grau de associação entre duas variáveis, os dados de K_c e IAF foram submetidos a análise de correlação de Pearson (r), conforme a Eq. 2.10.

$$r = \frac{\sum SiMi - \frac{\sum Si \sum Mi}{n}}{(n-1) \times Ssi \times Ssmi} \quad \text{Eq. 2.10}$$

em que: r é o coeficiente de correlação de Pearson; $\sum XY$ é a soma dos produtos entre os valores de X e Y ; $\sum X * \sum Y$ é o produto da soma dos valores de X e Y ; n é o número de observações; S_x é o desvio padrão dos valores de x ; S_y é o desvio padrão dos valores de y .

Posteriormente foi gerado um modelo a partir de regressão linear afim de estimar valores de K_C a partir de dados de IAF em situações onde os dados de K_C são de resistência.

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Variáveis meteorológicas

Os valores mensais da temperatura média do ar (Temp. med), chuva (P) e umidade relativa do ar (UR) são apresentados na Tabela 2.3. Durante o primeiro ciclo produtivo (i.e., período chuvoso), a T_{med} foi igual a $25,8 ^\circ\text{C m}^{-1}$. O total de chuva foi de 870,1 mm, sendo os meses de abril e maio os mais chuvosos do período, com valores mensais acumulados iguais a 331,7 mm e 281,7 mm, respectivamente. A UR média observada oscilou entre 58% a 88%, com média de 73%. Para o período seco (i.e., segundo ciclo), a variação da T_{med} foi de $24,6$ a $28,8 ^\circ\text{C}$, com média de $26,7 ^\circ\text{C m}^{-1}$. A chuva total foi igual a 212,9 mm, com os meses de dezembro (96 mm) e janeiro (82,6 mm) os mais chuvosos do período e novembro (4,8 mm) o mês menos chuvoso. A UR apresentou valor médio igual a 70%.

Tabela 2.3. Valores médios mensais da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global e totais mensais da chuva (mm) e evapotranspiração de referência (ET_0), no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco)

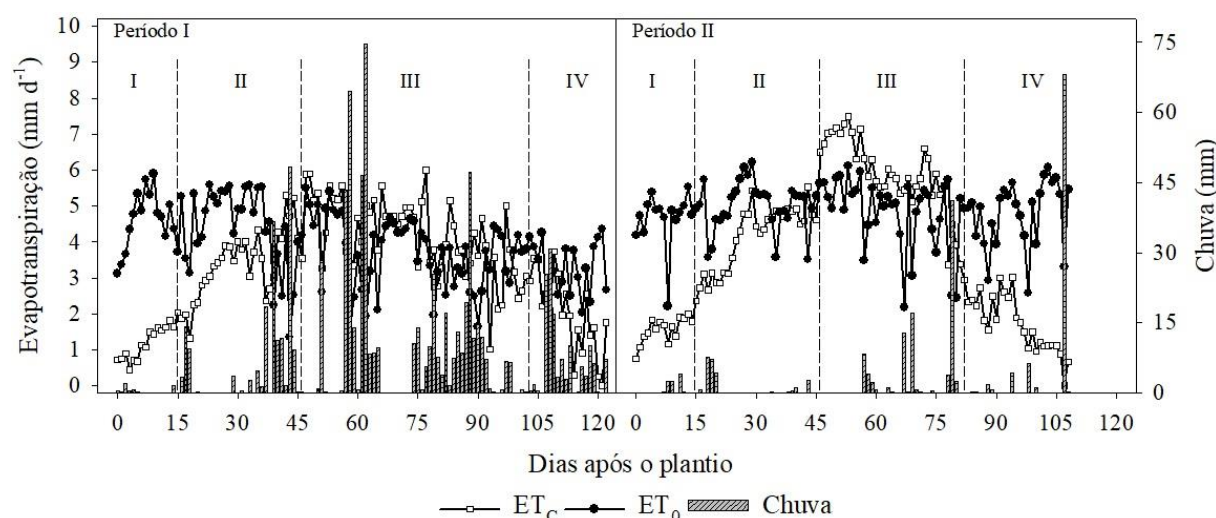
Ano	Período	Meses	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do vento ($m s^{-1}$)	Radiação solar ($MJ m^{-2} d^{-1}$)	Chuva (mm)	ET_0 (mm)
2021	Chuvoso	Fevereiro	27,4	65,6	1,1	21,3	8,8	73,2
		Março	26,4	69	1,7	21,3	174,2	137,4
		Abril	26,3	71,7	1,3	17,8	331,7	118,9
		Maiο	25	74,7	1,3	16,1	281,7	103,2
		Junho	24,6	74,6	1,3	14,3	73,7	44,3
	Total						870,1	477,0
2021/2022	Seco	Outubro	25,3	68,4	1,6	21,6	29,5	109,3
		Novembro	26,8	66	1,9	22,8	4,8	154,0
		Dezembro	26,7	68,7	1,8	21,7	96,0	142,0
		Janeiro	26,4	67,1	1,5	23,1	82,6	112
	Total						212,9	405,3

Velocidade média do vento (a 2 m de altura).

4.3.2 Evapotranspiração (ET_c) e coeficiente da cultura simples (K_c) e duplo (K_{cb} e K_e)

A evapotranspiração da cultura (ET_c) apresentou menores valores no início do período de cultivo (fase I), com valor médio de $1,3 mm dia^{-1}$ observado para ambos os períodos (Fig. 2.3). Com o gradual crescimento da planta e, conseqüentemente, aumento da área foliar, foram registrados aumento constante da ET_c entre as fases II e III, com valores máximos iguais a 6,9 e $7,4 mm dia^{-1}$ (53 DAS), para os períodos I e II, respectivamente. Após esse período, os menores valores foram observados na fase final de desenvolvimento da cultura, com ET_c iguais a 1,32 e 0,67 mm, nos ciclos I e II, respectivamente.

Figura 2.3. Evapotranspiração da cultura (ET_c), evapotranspiração de referência (ET_0) e chuva ao longo do ciclo produtivo do gergelim cultivado durante o período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso – A) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (B), na região de Rio Largo, AL.



Fonte: AUTOR, 2023.

A ET_c acumulada durante todo o ciclo de cultivo no período chuvoso foi de 450,4 mm, com média de $3,72 \text{ mm dia}^{-1}$, enquanto no período seco o valor acumulado observado foi de 440,1 mm, com média de $4,0 \text{ mm dia}^{-1}$ (Tabela 5). As maiores e menores ET_c acumuladas foram 265,0 (59%) e 211,0 (48%) mm obtidas na fase III para os períodos I e II, respectivamente. Em se tratando da partição da ET_c , observou-se comportamento distinto entre as componentes T e E ao longo do ciclo da cultura. Maiores valores de T foram observados na fase III, momento em que as plantas apresentaram um dossel mais desenvolvido ao longo do ciclo produtivo (ver seção Fig. 2.4 IAF), e consequentemente, maior cobertura do solo, resultando em menores valores de E. Nessa fase, os valores de T foram iguais a 242,66 mm no ciclo I, e 209,12 mm no ciclo II, correspondendo a 54% e 47% da ET_c acumulada, respectivamente. Os menores valores de T foram observados nas fases I (1,99 e 0,98 mm) em ambos os ciclos. A fase II foi o período em que a T e E apresentaram resultados mais semelhantes para os dois períodos de cultivo.

A soma térmica dos graus-dia, T, E, K_c e $K_{cb} + K_e$ do gergelim nos diferentes períodos de cultivo estão apresentados na Tabela 2.4. Para completar o ciclo, cada fase foram necessários 262, 502, 892 e 290 GDA para o período chuvoso e 234, 509, 646 e 408 GDA para o período seco. A fase III necessitou de maior acúmulo em graus-dia, 46 e 36% do total acumulado para o período chuvoso e seco, respectivamente. Os valores de K_c variaram entre um valor mínimo de

0,26 e 0,29 na fase inicial e um valor máximo na fase intermediária de 1,26 e 1,17 para os períodos chuvoso e seco, respectivamente. O K_C médio para o período de cultivo foi de 0,79 e 0,75 para o período chuvoso e seco, respectivamente.

Tabela 2.4. Duração (dias), graus-dia acumulados ($^{\circ}\text{C}$), a transpiração (T), evaporação (E), coeficiente da cultura (K_C), coeficiente basal da cultura, K_{Cb} (T/ET_0), e coeficiente de evaporação da água do solo, K_e (E/ET_0) de cada fase do gergelim na região de Rio Largo, AL, no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco)

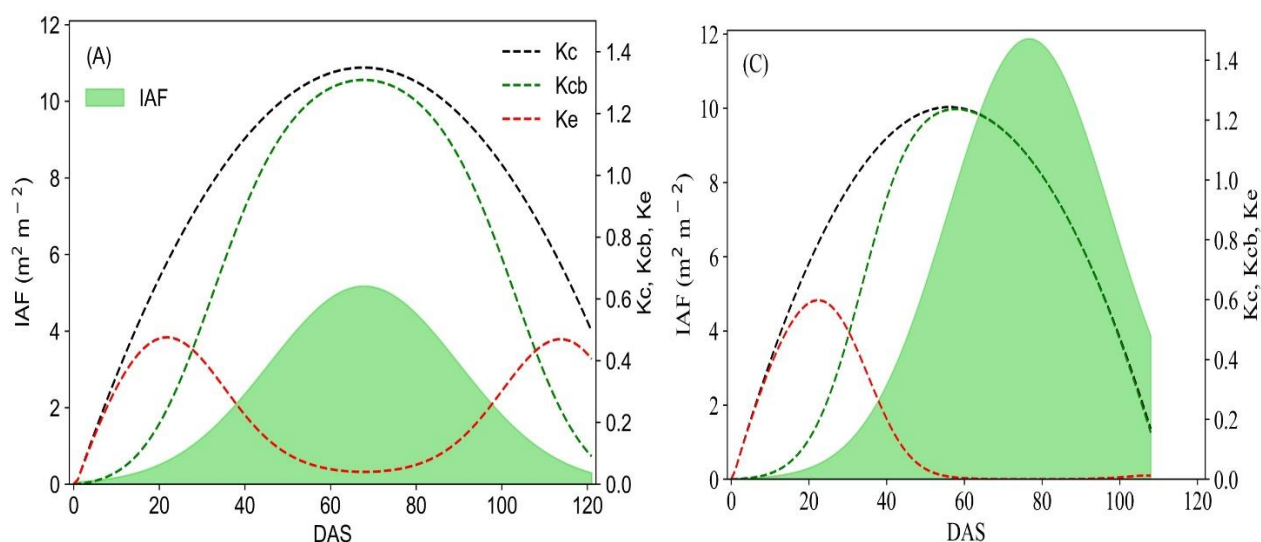
Fenofases	Período chuvoso (2021)							Período seco (2021-2022)						
	Duração (dias)	GDA $^{\circ}\text{C}$ dias	T (mm)	E (mm)	K_C	K_{Cb}	K_e	Duração (dias)	GDA	T (mm)	E (mm)	K_C	K_{Cb}	K_e
Inicial	15	262	1,99	15,60	0,26	0,03	0,23	15	234	0,98	17,87	0,29	0,01	0,29
Desenvolvimento	31	502	69,72	51,22	0,9	0,54	0,36	31	509	78,55	64,18	0,94	0,52	0,42
Intermediária	57	892	242,66	22,31	1,26	1,15	0,11	38	646	209,12	2,16	1,17	1,16	0,01
Final	19	290	20,01	26,85	0,75	0,32	0,43	25	408	66,62	0,59	0,59	0,58	0,01
Total/média	122	1947	334,38	115,98	0,79			109	1797	355,27	84,80	0,75		

Para a partição do K_C , observou-se comportamento diferente entre as componentes K_{Cb} e K_e para as diferentes fases do ciclo da cultura. O K_{Cb} apresentou o mesmo comportamento do K_C , com maiores valores observados na fase III, quando as plantas apresentaram maior cobertura do solo, o que resultou em menores valores de K_e . Nessa fase, o K_{Cb} médio foi de 1,15 e 1,16, nos períodos chuvoso e seco, respectivamente, que representaram 91 e 97% do K_C total dessa fase (Fig. 2.4A e 2.4B). Os maiores valores de K_e foram observados na fase I, quando as plantas apresentavam poucas e pequenas folhas, consequentemente, menor cobertura do solo. Na fase final, confirmou-se a tendência de maiores valores de K_e , ocasionados pela senescência das folhas, o que foi mais evidenciado no período chuvoso.

No período seco, as plantas apresentaram maior índice de área foliar em relação ao período anterior, fazendo com que o K_e dessa fase não fosse superior ao K_{Cb} . Os resultados médios de K_{Cb} para todo o ciclo foram de 0,51 e 0,57 para os períodos chuvoso e seco, respectivamente e de K_e 0,28 e 0,18, para os respectivos períodos.

Figura 2.4. Curva do coeficiente da cultura do gergelim diário (K_C), coeficiente da cultura basal (K_{Cb}), coeficiente de evaporação (K_e) e índice de área foliar (IAF) na região de Rio Largo, AL, no período de

fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso, a) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco, b).

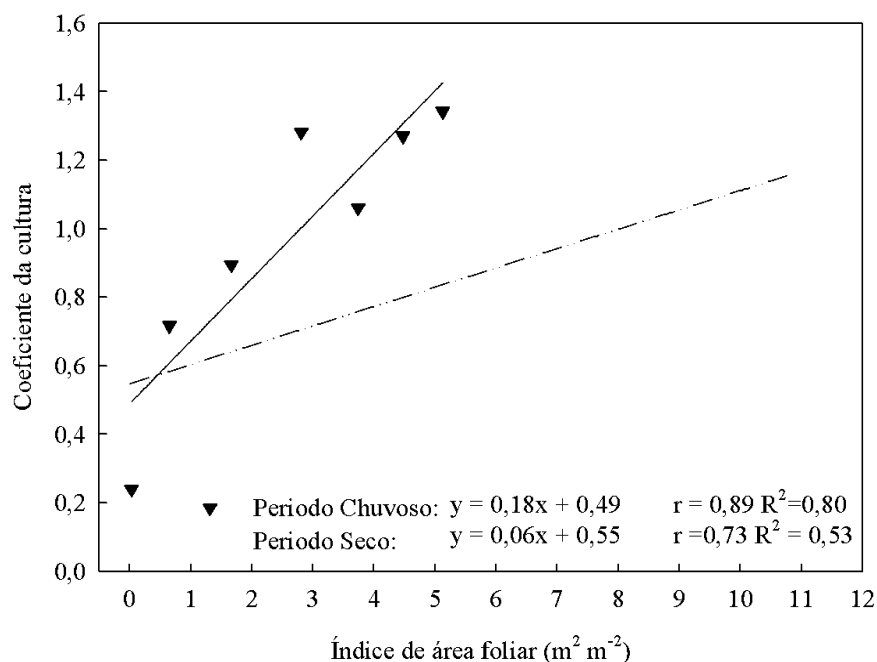


Fonte: AUTOR, 2023.

O crescimento do IAF foi lento no início do ciclo da cultura, com intensificação a partir dos 45. O aumento do IAF foi sempre crescente, tanto no período chuvoso quanto no seco até os 75 DAS, com IAF máximo igual a 5,1 e 10,9 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, para os períodos chuvoso e seco, respectivamente. A partir desse período o IAF tendeu ao declínio, chegando a 1,7 e 4,5 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, para os períodos chuvoso e seco, respectivamente aos 105 DAS.

Paralelamente, na Fig. 2.5 estão apresentadas as relações entre o índice de área foliar e o coeficiente de cultivo. Para o período chuvoso foi observada uma forte associação entre as duas variáveis ($r = 0,89$), assim como, pela regressão linear, uma grande relação ($R^2 = 0,80$). Para o período seco a associação encontrada entre as variáveis foi inferior ($r = 0,73$), assim como estreita relação foi encontrada entre K_c e IAF do gergelim pela regressão linear ($R^2 = 0,53$). Isso indica que o IAF influenciou em 80% para o período chuvoso e de 53% para o período seco no K_c .

Figura 2.5. Relação entre índice de área foliar (IAF) e coeficiente de cultura (K_C) do gergelim. Cada ponto é o IAF quinzenal e o K_C médio quinzenal no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco).



Fonte: AUTOR, 2023.

4.4. DISCUSSÃO

O consumo de água encontrado na presente pesquisa, em ambos os períodos de cultivo foi inferior a faixa relatada na literatura para a cultura do gergelim que é de 500-650 mm (SILVA et al., 2014). Bastug et al. (2021), na Turquia, obtiveram o consumo hídrico para a cultura do gergelim de 518,8 e 509,2 mm para as cultivares Muganli-57 e Birrakon, respectivamente. Nessas condições, a demanda evaporativa necessária para obter essa necessidade hídrica foi de 873,7 mm, superior em 83 e 115% às da presente pesquisa. Também para o gergelim, Pereira et al. (2017) na região de Chapada do Apodí – RN, Brasil, obtiveram ET_C acumulada de 566,2 mm, em condições climáticas de ET_0 igual a 643,4 mm. Os valores de ET_0 obtidos nesta pesquisa são consideravelmente inferiores aos reportados na literatura supracitada. Estes podem ser atribuído a diferenças nas condições climáticas, com temperaturas baixas e alta umidade relativa do ar, que diminui a capacidade do ar absorver umidade, consequentemente diminui a ET_0 . Outros estudos determinaram a ET_C do gergelim, Pereira et al. (2014) avaliando esta variável, pelo método do balanço hídrico do solo, em Barbalha-CE, obtiveram ET_C acumulada de 515,9 mm e que os valores ET_0 foram superiores a ET_C durante as fases de plantio/estabelecimento (I) e maturação

(IV). Nesse mesmo estudo, a ET_C apresentou, em termos médios diários, um comportamento crescente entre as fases fenológicas I e III, aumentando de 3,5 para 7,7 mm d⁻¹, respectivamente. No entanto, na IV fase a ET_C decresceu para 4,6 mm d⁻¹.

A fase intermediária (fase III) foi a que apresentou maior consumo hídrico em relação às demais, sendo 59 e 48% do total acumulado nos períodos chuvoso e seco, respectivamente. Assim como para a ET_C , o somatório térmico para essa fase foi superior às demais, que demandou 46 e 36% do total de todo o ciclo. Os graus-dia representa o acúmulo térmico que uma espécie vegetal necessita para atingir certo grau de maturidade. O desenvolvimento fenológico de uma cultura pode ser relacionado com a temperatura do ar através do acúmulo térmico. A fase intermediária (III) da cultura do gergelim compreende desde o início da floração ao início da maturação dos frutos. Os valores mais elevados de ET_C nesse período podem ser explicados pelo fato de que, a absorção máxima de água ocorre na floração e, diminui gradualmente depois, leva ao aumento da evapotranspiração nesta fase (WEISS, 1983). Lourenço et al. (2018) obtiveram que a fase III, com consumo de 268,5 mm, o qual foi o maior em relação às demais fases (53,5%), na região da Chapada do Apodi, RN, Brasil. O período chuvoso necessitou de uma maior quantidade de dias para a cultura completar seu ciclo, e essa variação foi mais observada nessa mesma fase que apresentou acréscimo de 19 dias e 150 GDA em relação ao período seco. Infeld ; Silva (1987) afirmaram que o aumento da temperatura do ar acelera o desenvolvimento da planta, que reduz o seu ciclo e vice-versa, e consequentemente, a quantidade de graus-dia necessário para a cultura completar o ciclo. Com base nesse princípio, isso explica as diferentes durações do ciclo de uma cultura, em dias, para cultivos em localidades com regimes de temperaturas diferentes.

A ET_C obtida no período chuvoso apresentou maior variação entre os dados diários. A ocorrência de chuva facilita esse processo, uma vez que em dias chuvosos ocorre redução da radiação e da temperatura do ar, aumento da umidade relativa do ar, provocando a diminuição da abertura estomática e, consequentemente, da fotossíntese, reduzindo a ET_C . Fisiologicamente, a transpiração vegetal é um processo importante para o crescimento das plantas, que em contrapartida, é reduzido, ao ocorrer chuvas e as células são mantidas túrgidas, sendo que, neste estado, não atingem o potencial da taxa de crescimento alcançado quando é possível a realização da transpiração pela planta (COSTA, 2001). O decréscimo da ET_C no final do ciclo ocorreu devido à senescência das folhas, o que reduziu a área foliar e, portanto, a área exposta à transpiração da planta (LIMA et al., 2006).

A E foi responsável por 26 e 19 % da ET_C total obtida nos períodos chuvoso e seco, respectivamente. O processo de evaporação tem maior representatividade na fase I, quando a

planta é jovem e apresenta pouca cobertura do solo. Essa quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação não participa dos processos de assimilação de CO₂ pela planta (STEDUTO et al., 2007), reduzindo a eficiência da evapotranspiração e, concomitantemente, um possível aumento da eficiência da transpiração, desde que as condições climáticas não promovam uma diferença perceptível no déficit de pressão de vapor entre o interior da folha e a atmosfera, impulsionado por condições de vento que não influenciem a redução das trocas gasosas (TANNER ; SINCLAIR, 1983). Os maiores valores de transpiração foram obtidos na fase III, período em que a cultura do gergelim apresentou a máxima área foliar, florescimento e crescimento dos frutos.

Os valores de K_C variaram em função da fase fenológica, com valores baixos na fase I, com crescimento na fase II, estabilidade na fase III e decréscimo na fase IV. Na fase III (intermediária), o gergelim está em máximo crescimento, com aumento de sua área foliar, ao mesmo tempo que está no pico de florescimento e finaliza com o enchimento dos grãos, diferente das demais fases que apresentam processos mais simples e são finalizados com menor acúmulo de graus-dia. Os valores de K_C não são constantes, variaram em função das condições climáticas e características da cultura ao longo de seu ciclo (ALLEN et al., 2007). Na Tabela 2.5 estão apresentados os valores de K_C para pesquisas conduzidas em diferentes regiões. De maneira geral, esses valores superestimaram os da presente pesquisa na fase inicial, mas foram semelhantes nas demais fases, exceto na fase final de Allen et al. (2007), que apresentou redução em 67 e 57% em relação aos obtidos na presente pesquisa.

Tabela 2.5. Valores de K_C médios por fases do gergelim em diferentes regiões

Referência	Região	Fase	K_C
Sepaskhah e Andam (2001)	Semiárido do Irã	Inicial	0,58
		Desenvolvimento	0,93
		Intermediária	1,08
		Final	0,64
Allen et al. (2007)		Médio	1,10
		Final	0,25
Amaral e Silva (2008)	Ceará, Brasil	Desenvolvimento	0,60
		Intermediário	0,80
Pereira et al. (2014)	Ceará, Brasil	Inicial	0,63
		Desenvolvimento	0,83
		Intermediária	0,97
		Final	0,56
Pereira et al. (2017)	Rio Grande do Norte, Brasil	Inicial	0,60
		Intermediária	0,90
		Final	0,80

Lourenço et al. (2018)	Rio Grande do Norte, Brasil	Inicial	0,51
		Desenvolvimento	0,73
		Intermediária	1,03
		Final	0,59

Na fase III, os valores de K_c encontrados na presente pesquisa ($K_c > 1$) se assemelham aos da literatura consultada. Isso ocorre devido ao bom nível de umidade no solo e maior necessidade de energia da cultura para a produção e destinação de fotoassimilados para o crescimento e desenvolvimento do fruto (cápsula) (SOUSA et al., 2021). Os resultados de K_e apresentaram relação direta com os diferentes estágios da cultura. Seus valores máximos são no estágio inicial seguido do estágio final (maturação dos frutos). Essas fases caracterizam-se com o período de crescimento inicial da planta que apresenta pouca área foliar e o período de senescência foliar, respectivamente, o que caracteriza menor IAF da planta (Fig. 2.4). Freitas et al. (2014), ao estudarem a evaporação da água do solo, encontraram uma relação direta entre as diferentes frações de cobertura do solo e a redução das taxas de evaporação. Um solo com cobertura superficial de até 50% apresentou reduções na evaporação que variaram de 17 a 30%. Isso se justifica pelo aumento da quantidade de energia que chega ao solo. O comportamento do K_{cb} durante a fase intermediária do gergelim (início da floração ao início da maturação dos frutos) se assemelha ao comportamento do K_c . A cultura atingiu valores máximos quando apresentou seu máximo IAF, período caracterizado pela transição da floração e frutificação. Essa é a fase em que a cultura necessita de maior quantidade de água. Isso proporciona maior absorção de água e nutrientes, levando a uma maior taxa de transpiração (SOUSA et al., 2021). Allen et al. (1998) relataram variações repentinas no K_e devido à variação na umidade do solo, o que causou maiores perdas de água por evaporação e menores por transpiração quando comparado a outros estágios. Isso é resultado do aumento da temperatura e redução da umidade relativa do ar que refletem na menor disponibilidade de água no solo (WIJEWARDANA et al., 2019).

Verificou-se que os valores de K_{cb} variaram consideravelmente, principalmente nas fases de crescimento vegetativo e intermediário, quando há maior necessidade de água no solo, que favorece as atividades fotossintéticas das folhas. Essa atividade resulta em maior abertura estomática que reduzem a resistência estomática, resultando em maior taxa de transpiração (FERREIRA et al., 2022). Essas condições de abundante suprimento de água favorecem a translocação e a produção de fotoassimilados que são destinados à produção das cápsulas; especialmente o estágio de fruto verde é que apresenta ganhos no crescimento dos frutos e, conseqüentemente, maiores valores de produtividade hídrica.

O índice de área foliar apresentou comportamento semelhante ao do K_C , com baixo IAF na fase inicial e, à medida que a cultura aumentou sua área foliar e a cobertura do solo, houve incremento no K_C . Além disso, na fase final ambos tendem ao declínio. De maneira geral, o fechamento do dossel para culturas agrícolas se dá com um IAF em torno de $3,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (ALLEN et al., 1998), valor observado a partir dos 45 DAS para os períodos de cultivo. Sepaskhah e Andam (2001) na região semiárida do Irã, encontraram IAF igual a $8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ao utilizar K_C máximo igual a 1,2 para o gergelim. A estreita relação encontrada pelo K_C e IAF para o período seco, pode estar relacionado aos valores mais elevados de IAF em relação ao período seco. Comumente, diferente do K_{Cb} , o K_e na fase final é superior ao K_{Cb} em decorrência da senescência das folhas que ocorre na fase final, como ocorreu no período chuvoso. Nessa pesquisa, na fase final do período seco, os valores de K_{Cb} foram semelhantes aos de K_C , indicando que, para esse ciclo mesmo na fase de senescência não houve evaporação de água do solo (K_e). O IAF da fase IV do período seco, mesmo com declínio, em comparação a fase anterior, ainda apresentam altos valores (Fig. 2.4). Isso indica que, mesmo na fase final havia cobertura total do solo, o que ocasionou em quase que em sua totalidade K_{Cb} igual ao K_C . Sob condições de altas temperaturas e consequente maior radiação solar, que atua diretamente no processo fotossintético, as plantas de gergelim tendem ao maior ganho de fitomassa e atua na divisão celular, que proporciona maior número, tamanho e expansão foliar, consequentemente o aumento do IAF. Munitz et al. (2019) relataram uma relação linear positiva entre o IAF e o K_C , portanto o IAF pode afetar o consumo de água. Gloaguen et al. (2019) encontrou IAF igual a 4,2 para o gergelim. Gilani et al. (2022) na região do Irã, obtiveram redução de 16,6 e 25,2% do IAF sob déficit hídrico moderado e severo, respectivamente, para a cultura do gergelim em relação à ET_C .

4.5 CONCLUSÕES

As ET_C totais obtidas para a cultura do gergelim foram de 450,40 e 440,1 mm para os períodos chuvoso e seco, respectivamente. O consumo médio diário de água no período chuvoso e seco apresentaram valores de 3,70 e 4,0 mm dia⁻¹, respectivamente. Esses valores ressaltam a importância do manejo correto da irrigação para a cultura do gergelim, pois permitem projetar adequadamente o manejo da água que é mais adequado às necessidades hídricas da cultura.

Os coeficientes de cultivo simples do gergelim para o período chuvoso ($K_C = 0,26; 0,90; 1,26$ e $0,75$) e para o período seco ($K_C = 0,29; 0,94; 1,17$ e $0,59$) e duplo para o período chuvoso ($K_e = 0,23; 0,36; 0,11$ e $0,43$ e $K_{Cb} = 0,03; 0,54; 1,15$ e $0,32$) e seco ($K_e = 0,29; 0,42; 0,01$ e $0,01$ e $K_{Cb} 0,01; 0,52; 1,16$ e $0,58$) são resultados essenciais para a expansão do cultivo irrigado, pois

permitem aumentar a eficiência do uso da água pela cultura, o que, conseqüentemente, resulta em ganhos econômicos para os agricultores.

REFERÊNCIAS

- ALBERTO, M.C.R.; QUILTY, J.R.; BURESH, R.J.; WASSMANN, R.; HAIDAR, S.; CORREA JUNIOR, T.Q.; SANDRO, J.M. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation. **Agricultural Water Management**, v.136, p.1-12, 2014.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA L. S.; RAES D.; SMITH M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food Agriculture Organization of the United Nations: v. 301, 300p., 1998
- ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L.; PRUITT, W.O. **Water requirements**. In: Hoffman GJ, Evans RG, Jensen ME (eds) Design and operation systems, 2nd edn. ASABE, Michigan, pp 208–288. 2007
- ALVES, H. K. M. N.; SILVA, T. G. F.; JARDIM, A. M. R. F.; SOUZA, L. S. B.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SOUZA, C. A. A.; MOURA, M. S. B.; ARAÚJO, G. G. L.; CAMPOS, F. S.; CRUZ NETO, J. F. The use mulch in cultivating the forage cactus optimizes yield in less time and increases the water use efficiency of the crop. **Irrigation and Drainage**, p. 1-15, 2022. <https://doi.org/10.1002/ird.2758>
- AL TAMIMI, M.; M.; GREEN, S.; HAMMAMI, Z.; AMMAR, K.; AL KETBI, M.; AL-SHROUF, A. M.; DAWOUD, M.; KENNEDY, L.; CLOTHIER, B. Evapotranspiration and crop coefficients using lysimeter measurements for food crops in the hyper-arid United Arab Emirates. **Agricultural Water Management**, v. 272, p. 107826, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107826>
- ARRIEL, N.H.C., BELTRÃO, N.E.DE.M., FIRMINO, P.DE.T. EMBRAPA Informação Tecnológica, 2009. Gergelim: o produtor pergunta, a Embrapa responde
- BASTUG, R.; KARACA, C.; BUYUKTAS, D.; AYDINSAKIR, K.; DINC, N. The effects of deficit irrigation practices on evapotranspiration, yield and quality characteristics of two sesame varieties (*Sesamum indicum* L.) grown in lysimeters under the Mediterranean climate conditions. **Irrigation Science**, v. 1, 2021
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: Ed. UFV, 625p, 2009.
- CARVALHO, O. M. **Classificação e caracterização físico-hídrica de solos de Rio Largo, cultivados com cana-de-açúcar**. 2003. P.74. (Dissertação mestrado em agronomia). Rio Largo: Universidade Federal de Alagoas, 2003
- CAVALCANTI, F. J. A. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. 3. ed. Recife, PE: IPA, 2008. 212 p

CHOW, V. T. C.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Applied hydrology. 2. ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 1988.

CONAB (2023). Companhia Nacional de abastecimento. < <https://www.conab.gov.br/>>

COSTA, A. R. As relações hídricas das plantas vasculares. Angelfire, Portugal. 2001. Disponível em: <<http://www.angelfire.com/ar3/alexcosta0/RelHid/Rhw7.htm>>.

DRECHSLER, K.; FULTON, A.; KISEKKA, I. (2022) Crop coefficients and water use of Young almond orchards. *Irrig Sci* 40:379-395, 2022 <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00786-y>

DOSSOU, S. S K.; FANG-TAO, X.; DOSSA, K.; RONG, Z.; YING-ZHONG, Z.; LIN-HAI, W. Antioxidant lignans sesamin and sesamol in sesame (*Sesamum indicum* L.): A comprehensive review and future prospects. **Journal of Integrative Agriculture**, v.22, n.1, p.14-30, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.08.097>

EBRAHIMIAN, E.; SEYYEDI, S. M.; BYBORDI, A.; DAMALAS, C. A. Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability. **Agricultural Water Management**, v. 218, 2019

FERREIRA, V.M.; ANDRADE, J.R.; SANTOS, C.M.; MAIA JÚNIOR, S.O.; ARAÚJO NETO, J.C.; SILVA, A.F.V.M.; BEZERRA, L.T.; ENDRES, L. Physiological plasticity in eucalyptus clones in the vegetative stage contributes to drought tolerance. **Journal of Forestry Research**, 2022

FREITAS, L.P.S.; GAVA, R.; FARIA, T.R.; REZENDE, R.; VIEIRA, P.V.D. Soil evaporation under different straw mulch fractions. **Afr J Agric Res**, v.9, p.1793–1800, 2014. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7854>

GHARBY, S.; HARHAR, H.; BOUZOUBAA, Z.; ASDADI, A.; EL YADINI, A.; CHARROUF, Z. Chemical characterization and oxidative stability of seeds and oil of sesame grown in Morocco. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.16, n.2, p.105–111, 2017

GHOLINEZHAD, E.; DARVISHZADEH, R.; MOGHADDAM, S. S.; POPOVIC-DJORDJEVIC, J. Effect of mycorrhizal inoculation in reducing water stress in sesame (*Sesamum indicum* L.): The assessment of agrobiochemical traits and enzymatic antioxidant activity. **Agricultural Water Management**, 238, 106234, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106234>

GILANI, A.; GHOLAMI, A.; ABBASDOKHT, H.; TABARI, Z.T. Evaluation of Superabsorbent Polymer on Leaf Area Index, Relative Leaf Water Content and Growth Rate of Sesame under Water Deficit Stress Condition. **Chem. Proc**, v.4, 2022

GLOAGUEN, R. M.; ROWLAND, D. L.; BENNETT, J.; HOCHMUTH, G.; LANGHAM, D.R.; BRYM, T. Root Life History of Non-dehiscent Sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars and the 2 relationship with Canopy Development, **Field crops research**, v.241,2019

HAILU, E. K.; URGU, Y. D.; SORI, N. A.; BORENA, F. R.; TUFA, K. N. Sesame Yield Response to Deficit Irrigation and Water Application Techniques in Irrigated Agriculture, Ethiopia. **International Journal of Agronomy**, v. 1, 2018

HEIDARI, M.; GALAVI, M.; HASSANI, M. Effect of sulfur and iron fertilizers on yield, yield components and nutrient uptake in sesame (*Sesamum indicum* L.) under water stress. **African Journal of Biotechnology**, v.10, n.44, p.8816-8822, 2011. <https://doi.org/10.5897/AJB11.854>

INFELD, J.A.; SILVA, J.B. da. Somas térmicas da duração da fase vegetativa do arroz irrigado (*Oryza sativa* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETOROLOGIA, 5., Belém-PA, Anais... Belém: SBA, 1987, p. 160-161

IPPOLITO, M.; DE CARO, D.; CIRAOLO, G.; MINACAPILLI, M.; PROVENZANO, G. Estimating crop coefficients and actual evapotranspiration in citrus orchards with sporadic cover weeds based on ground and remote sensing data. **Irrig Sci**, v.41, p.5-22, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00829-4>

KERMANI, S. G.; SAEIDI, G.; SABZALIAN, M. R.; GIANINETTI, A. Drought stress influenced sesamin and sesamol content and polyphenolic components in sesame (*Sesamum indicum* L.) populations with contrasting seed coat colors. **Food Chemistry**, v.289, p.360-368, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.004>

KOOCHKEI, A.; SOLOUKI, h.; NASSIRI-MAHALLATI, M. Evaluation of Radiation Absorption and use Efficiency in Substitution Intercropping of Sesame (*Sesamum Indicum* L.) and Mung Bean (*Vigna Radiata* L.) Adv Plants. **Agric Res**, v.3, 2016.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. EDUSP, 311 p., 2005

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. A. B. O. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.1, p.89-95, 2006.

LIMA, M. S. R.; ROCHA, M. S.; MELO, A. S.; DUTRA, W. F. Physiological, biochemical and productive changes in sesame genotypes subjected to different rates of water replenishment. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.3, p.176-182, 2018

LÓPEZ-URREA, R.; SANCHEZ, J. M.; DE LA CRUZ, F.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; CHÁVEZ, J. L. Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements for sprinkler-irrigated canola. **Agricultural Water Management**, v. 239, 2020.

LOURENÇO, E.R.C.; AZEVEDO, P.V.; PEREIRA, A.R.; BEZERRA, J.R.C.; SABOYA, L.M.F.; ZONTA, J.H. Necessidades hídricas da cultura do Gergelim na região da Chapada do Apodí, Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.11, n.4, p.1275-1289, 2018.

MEENA, H.M.; RAO, A.S. Growing degree days requirements of sesame (*Sesamum indicum* L.) in relation to growth and phenological development in Western Rajasthan. Current Advances in

Agricultural Sciences 5:107–110 ISSN: 0975- 2315, 2013. :
<https://www.researchgate.net/publication/262623722>

MESQUITA, J. B. R. DE; AZEVEDO, B. M. DE; CAMPELO, A. R.; FERNANDES, C. N. V.; VIANA, T. V. DE A. Crescimento e produtividade da cultura do gergelim (*Sesamum indicum* L.) sob diferentes níveis de irrigação. **Irriga**, v.18, p.364-375, 2013

MUNDIM, F.N.; PRINGLE, E.G. Whole-Plant Metabolic Allocation Under Water Stress. **Front. Plant Science**, 9, 852, 1-12, 2018

MUNITZ, S.; SCHWARTZ, A.; NETZER, Y. Water consumption, crop coefficient and leaf area relations of a *Vitis vinifera* cv. ‘Cabernet Sauvignon’ vineyard. **Agricultural Water management**, v. 219, 2019

PABUAYON, I. L.; SINGH, S.; RITCHIE, G. Effects of deficit irrigation on yield and oil content of sesame, safflower, and sunflower. **Crop ecology and physiology**, v.3, n.5, p.3091-3098, 2019

PEREIRA, A. R.; AZEVEDO, P. V.; LOURENÇO, E. R. C.; SABOYA, L. M. F.; BEZERRA, J. R. C. Evapotranspiração da cultura do gergelim irrigada na região da Chapada do Apodí-RN. **Irriga**, v. 22, n. 3, p. 497-511, 2017

PEREIRA, J. R.; ARAÚJO, W. P.; ALMEIDA, E. S. A. B.; BEZERRA, J. R. C.; GUERRA, H. O. C.; ZONTA, J. H. Sesame crop coefficients using crop evapotranspiration by water balance and, reference evapotranspiration by Penman-Monteith. **Irriga, Ed. Especial**, p. 72-84, 2014

PEREIRA, L. S.; PAREDES, P.; LÓPEZ-URREA, R.; HUNSAKER, D. J.; MOTA, M.; SHAD, Z. M. Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. **Agricultural Water management**, v. 243, 2021

SEPASKHAH, A.R.; ANDAM, M. Crop coefficient of sesame in a semiarid region of I.R. Iran. **Agricultural Water Management**, v. 49, p.51–63, 2001

SILBER, A.; NAOR, A.; COHEN, H.; BAR-NOY, Y.; YECHIELI, N.; LEVI, M.; NOY, M.; PERES, D.; DUARI, K.; NARKIS, S.; ASSOULINE, S. (2019) Irrigation of “Hass” avocado: effects of constant vs. temporary water stress. **Irrig Sci**, v. 37, p.451–460, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00622-w>

SILVA, J. C. A.; FERNANDES, P. D.; BEZERRA, J. R. C.; ARRIEL, N. H. C.; CARDOSO, G. Crescimento e produção de genótipos de gergelim em função de lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.4, p.408–416, 2014

SOUSA, D. DE P.; FERNANDES, T.F.S.; TAVARES, L.B.; FARIAS, V.D.; DA S. DE LIMA, M.J.A.; NUNES, H.G.G.C.; COSTA, D.L.P.; ORTEGA-FARIAS, S.; SOUZA, P.J.; DE O.; P. Estimation of evapotranspiration and single and dual crop coefficients of acai palm in the Eastern Amazon (Brazil) using the Bowen ratio system. **Irrig Sci**, v.39, p.5-22, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00710-2>

SOUZA, J. L.; NICÁCIO, R.M.; MOURA, M.A.L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brasil. **Renewable Energy**, v.30, p.1203-1220, 2005

STEDUTO, P., HSIAO, T.C., AND FERERES, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrig. Sci.*, 25:189–207.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955.

TAN, Q.; LIU, Y.; PAN, T.; SONG, X.; LI, X. Changes and determining factors of crop evapotranspiration derived from satellite-based dual crop coefficients in North China Plain. **The Crop Journal**, v. 10, n. 5, p. 1496-1506, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2022.07.013>

TANNER, C. B.; SINCLAIR, T. R. Efficient water use in crop production: Research or re-search? In: TAYLOR, H. M. J.; SINCLAIR, T. R. (Ed.). **Limitations to efficient water use in crop production**. Madison: American Society of Agriculture, 1983. cap. 1, p. 1-27.

WEISS, E. A. Sesame. In: WEISS, E. A. **Oilseed crops**. London: Longman, 1983. p.282-340

WIJEWARDANA, C.; ALSAJRI, F.A.; IRBY, J.T.; KRUTZ, L.J.; GOLDEN, B.; HENRY, W.B.; GAO, W.; REDDY, K.R. Physiological assessment of water deficit in soybean using midday leaf water potential and spectral features. **J Plant Interact**, v.14, p.533–543, 2019. <https://doi.org/10.1080/17429145.2019.1662499>

XU, G.; XUE, X.; WANG, P.; YANG, Z.; YUAN, W.; LIU, X.; LOU, C. A lysimeter study for the effects of different canopy sizes on evapotranspiration and crop coefficient of summer maize. **Agricultural Water Management** , v. 208, p.1–6, 2018

YOUSEFZADEH NAJAFABADI, N.; EHSANZADEH, P. Photosynthetic and antioxidative upregulation in drought-stressed sesame (*Sesamum indicum* L.) subjected to foliar-applied salicylic acid. **Photosynthetica**, v.55, p.611-622, 2017 <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0673-8>

CAPITULO III

5. FISIOLOGIA, CRESCIMENTO E PRODUTIVIDADE DO GERGELIM SOB DIFERENTES DISPONIBILIDADES DE ÁGUA NO SOLO

Resumo: Objetivou-se avaliar as respostas fisiológicas, crescimento e produtividade do gergelim em função de níveis de irrigação. O trabalho foi conduzido entre fevereiro e junho de 2021 (período chuvoso) e outubro de 2021 e janeiro de 2022 (período seco). O experimento foi instalado no delineamento em blocos ao acaso (DBC), com cinco tratamentos e quatro blocos. Os tratamentos foram: L₁:50; L₂:75; L₃:100; L₄:125 e L₅:150% da evapotranspiração da cultura (ET_C) com aplicações diárias da irrigação via gotejamento. A ET_C foi determinada pelo balanço de água no solo utilizando lisímetros de drenagem instalados na área experimental. No período em que a cultura atingiu floração plena, foram avaliados os parâmetros fisiológicos: teor relativo de água nas folhas (TRA), potencial hídrico foliar antemanhã ($\Psi_{w \text{ antemanhã}}$) e ao meio-dia ($\Psi_{w \text{ meio-dia}}$), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), concentração intercelular de CO₂ (Ci), taxa fotossintética líquida (A), temperatura foliar (Tf), eficiência instantânea do uso da água (EUA_i), eficiência quântica do PSII (Φ PSII), eficiência quântica máxima do PSII (Fv/Fm) e índice SPAD. Quinzenalmente foram determinados os parâmetros de crescimento: fitomassa seca total (MSTa), altura da planta (AP), índice de área foliar (IAF) e diâmetro do caule (DC). Ao final de cada ciclo, foram analisados os componentes de produção: produtividade, produtividade do uso da água, peso de 1000 grãos, número de cápsulas por planta, número de grãos por cápsula e massa seca de grãos. A evapotranspiração total (chuva + irrigação) obtida para cada lâmina de irrigação foi de 905, 927, 958, 980 e 1004 mm para o período chuvoso e 420, 511, 616, 722 e 816 mm para o período seco, em L₁, L₂, L₃, L₄ e L₅, respectivamente. A deficiência hídrica variou de 105 a 73 mm e 177 a 34 mm para as lâminas de 50 e 150% da ET_C, no período chuvoso e seco, respectivamente. O excesso hídrico variou de 491 a 558 mm e 53 a 306 mm para as lâminas de 50 e 150% da ET_C, no período chuvoso e seco, respectivamente. No período chuvoso, o Ψ_w foliar variou de -3,7 a -1,1 MPa ao meio-dia para 50 e 150% da ET_C, respectivamente. No período seco, para esses mesmos níveis, o Ψ_w foliar variou de -1,74 a -0,98 e -3,9 a 1,0 para antemanhã e meio-dia, respectivamente. O nível de 50% da ET_C reduziu a gs (180 e 303%), E (56 e 97%), Ci (239 e 400%), Φ PSII (36%), Fv/Fm (18%) e aumentou a Tf (8%) respectivamente, para o período chuvoso e seco, em relação à 150% da ET_C. Os maiores valores de A (35,8 e 33,7 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foram obtidos com a aplicação dos níveis de 109 e 108% da ET_C, respectivamente. Para o período seco, os maiores valores obtidos para os parâmetros de crescimento foram: 249,0 cm; 18,7 mm; 10,8 $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ e 16629,8 kg ha^{-1} , respectivamente para as variáveis AP, DC, IAF e MSTa. No período seco, a máxima produtividade foi de 3114,5 kg ha^{-1} , com a aplicação de 622 mm (101% da ET_C) valor este 20% superior à média do período chuvoso. A máxima PUA (5,78 $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) foi obtida com a lâmina de 557 mm (90% da ET_C). A disponibilidade de água no solo afeta o crescimento, a fisiologia e a produtividade do gergelim nas estações de cultivo nos períodos chuvoso e seco na região de Rio Largo-AL.

Palavras-chave: *Sesamum indicum* L., Estresse hídrico, Manejo da irrigação, Eficiência de uso da água.

PHYSIOLOGY, GROWTH AND PRODUCTIVITY OF SESAME UNDER DIFFERENT SOIL WATER AVAILABILITY

Abstract: The objective was to evaluate the physiological responses, growth and productivity of sesame as a function of irrigation levels. The work was conducted from February to June 2021 (rainy season) and October 2021 January 2022 (dry season). An experiment was set up in randomized block design (RBD), with five treatments and four blocks. The treatments were: L1:50; L2:75; L3:100; L4:125 and L5:150% of crop evapotranspiration (ET_C) with daily drip irrigation applications. The ET_C was determined by soil water balance and used a battery of drainage lysimeters installed in the experimental area. In the period when the crop reached full flowering, the physiological parameters were evaluated: relative leaf water content (TRA), leaf water potential before morning (Ψ_w before morning) and at noon (Ψ_w noon), stomatal conductance (gs), transpiration rate (E), intercellular CO_2 concentration (C_i), net photosynthetic rate (A), leaf temperature (Tf), instantaneous water use efficiency (WUEi), PSII quantum efficiency (Φ_{PSII}), maximum quantum efficiency of photosystem II (Fv/Fm) and SPAD index. Fortnightly growth parameters were determined: total dry mass (MSTa), plant height (PH), leaf area index (LAI) and stem diameter (SD). At the end of each cycle, the production components were analyzed: yield, water use efficiency, weight of 1000 grains, number of pods per plant, number of grains per pod, and dry mass of grains. The total evapotranspiration (rainfall + irrigation) obtained for each irrigation blade were: 905, 927, 958, 980 and 1004 mm for the rainy period and 420, 511, 616, 722 and 816 mm for the dry period at L1, L2, L3, L4 and L5, respectively. The water deficit varied from 105 to 73 mm and 177 to 34 mm for the 50 and 150% of the ET_C in the wet and dry periods, respectively. The excess water varied from 491 to 558 mm and 53 to 306 mm for the blades of 50 and 150% of the ET_C , in the rainy and dry periods, respectively. In the rainy period, the leaf Ψ_w ranged from -3.7 to -1.1 MPa at noon for 50 and 150% of ET_C , respectively. In the dry period, for these same levels, the leaf Ψ_w ranged from -1.74 to -0.98 and -3.9 to 1.0 for the early morning and midday, respectively. The level of 50% of ET_C reduced gs (180 and 303%), E (56 and 97%), C_i (239 and 400%), Φ_{PSII} (36%), Fv/Fm (18%) and increased Tf (8%) respectively for the wet and dry periods, relative to 150% of ET_C . The highest A values (35.8 and 33.7 $\mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) were obtained with the application of the 109 and 108% of ET_C levels, respectively. For the dry period, the highest values obtained for growth parameters were 249.0 cm; 18.7 mm; 10.8 $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ and 16629.8 kg ha^{-1} , for the variables AP, AD, LAI and MSTa, respectively. For the dry period, the maximum yield was 3114.5 kg ha^{-1} , with the application of 622 mm (101% of ET_C) of water was 20% higher than the rainy period average. The maximum US (5.78 $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) was obtained with 557 mm (90% of the ET_C). Soil water availability affects the growth, physiology and productivity of sesame in the rainy and dry growing seasons in the Rio Largo region.

Keywords: *Sesamum indicum* L., Water stress, Irrigation management, Water use efficiency.

5.1 INTRODUÇÃO

O gergelim (*Sesamum indicum* L.) é a nona oleaginosa mais cultivada no mundo (KHORAMI et al., 2020), sendo cultivado em regiões tropicais e subtropicais na África, Ásia e América Latina (MAHDY et al., 2022). Sua principal utilização *in natura* para compor produtos da indústria alimentícia, panificação, óleo, bem como para fins medicinais, farmacêuticos e industriais (GHARBY et al., 2017), além do alto teor de óleo (42-54%) de excelente qualidade e proteína (22 a 25%), que viabiliza ao máximo seu potencial de produção.

No mundo, o rendimento médio do gergelim é de 578 kg ha⁻¹ (ZHANG et al., 2019). No Brasil, a área de cultivo estimada para a safra 2022/2023 é de aproximadamente 213,9 mil hectares, com produção de 110,9 mil toneladas e produtividade de 519 kg ha⁻¹ do grão (CONAB, 2023). O gergelim é capaz de produzir com o uso de poucos investimentos tecnológicos (ARRIEL et al., 2009). Por ser uma cultura tolerante à seca, pode produzir satisfatoriamente com 300 mm de água bem distribuídos ao longo do ciclo, no entanto, a faixa ótima de produção está entre 500 e 650 mm (EBRAHIMIAN et al., 2019). Nessas condições, a cultura apresenta potencial produtivo que pode atingir de 1500 a 2000 kg ha⁻¹ (MESQUITA et al., 2013; SILVA et al., 2014; HAILU et al., 2018; PABUAYON et al., 2019; BASTUG et al., 2021). Na região Nordeste do Brasil, que apresenta irregularidade pluviométrica (CARVALHO et al., 2020; SILVA et al., 2021), geralmente ocorre alternância de períodos chuvosos e secos com excesso e déficit hídrico, respectivamente, que dificultam o cultivo agrícola durante todos os períodos do ano (SILVA et al., 2014). Na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, a precipitação anual está na faixa de 1800 mm, que se concentra (70%) entre os meses de abril a setembro (SOUZA et al., 2005). Em contrapartida, o período de outubro a fevereiro é caracterizado pela baixa ocorrência de chuvas (290 mm), sendo necessário a adoção da irrigação para aumentar o desempenho agrônomo da cultura (HEIDARI et al., 2011).

Apesar disso, a irrigação por si só não garante aumentos satisfatórios na produtividade, para isso, deve-se adotar o correto manejo da irrigação baseado na determinação da necessidade hídrica da cultura em função da fase fenológica (LOURENÇO et al., 2018; MUNITZ et al., 2019). Portanto, desenvolver pesquisas com a cultura do gergelim irrigado é importante para determinar seu manejo hídrico ideal, o que pode aumentar a produtividade e evitar desperdícios de água em regiões de escassez hídrica devido a irregularidade de chuvas. Na maioria das culturas agrícolas, o estresse hídrico promove alterações de vários aspectos fisiológicos e bioquímicos das plantas, principalmente na condutância estomática e captação de CO₂ (LU et al., 2014; DIAS et al., 2018). Nessas condições, a planta reduz a abertura estomática na tentativa de restringir a

perda de água pela transpiração (FERREIRA et al., 2022), o que pode causar redução nas taxas fotossintéticas (SOUSA et al., 2014), declínio na concentração intercelular de CO₂ (BASTUG et al., 2021), e consequentemente, redução na produção de biomassa. Paralelamente, como consequência, o crescimento é afetado reduzindo a altura da planta (SHUBHRA et al., 2014; ARSLAN et al., 2014), o diâmetro do caule (EL NAIM; AHMED, 2010; SAMAN; OZTURK, 2012), e o índice de área foliar (SILVA et al., 2014; GRILO; AZEVEDO, 2013; RIBEIRO et al., 2018).

Em estudo realizado por Der-vis (1986) avaliando diferentes níveis de irrigação, foi encontrado maior rendimento do gergelim com média de 1670 kg ha⁻¹, com a aplicação de 464,6 mm. Enquanto El Naim e Ahmed (2010) descobriram que os componentes de produção e o crescimento (e.g., altura de planta, número de folhas, diâmetro do caule, número de ramos) do gergelim foram afetados significativamente pelos diferentes níveis de irrigação aplicados. Kassab et al. (2005), ao estudar diferentes disponibilidades de água no solo, constataram que quando o solo estava na capacidade de campo, as plantas apresentaram maior eficiência do uso da água (EUA) em relação à disponibilidade hídrica inferiores. Sepaskhah e Andam (2001) relataram que a evapotranspiração da cultura (ET_C) durante um período de 5 meses foi de 910 mm. Em várias pesquisas que avaliaram o efeito do estresse hídrico severo no crescimento e desenvolvimento das plantas foram observadas reduções na EUA devido ao estresse hídrico (MASHILO et al., 2017). No entanto, o estresse por déficit hídrico leve ou moderado pode aumentar a EUA (NORWOOD e DUMLER, 2002). Em condições severas de estresse hídrico, a perda de água pela transpiração é menos reduzida que a capacidade fotossintética resultando em diminuição da EUA.

Apesar da existência de estudos sobre o cultivo de gergelim em resposta à irrigação, são escassas as informações concretas sobre como os componentes fisiológicos e de crescimento atuam sob a cultura na região nordeste do Brasil. Neste sentido, objetivou-se avaliar o crescimento, respostas fisiológicas e produção do gergelim em função da disponibilidade de água no solo.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Descrição da área experimental e preparo da área

Foram realizados dois experimentos de campo entre fevereiro de 2021 e janeiro de 2022, em uma área experimental situada na região dos Tabuleiros Costeiros do Nordeste brasileiro, localizada no Campus de Engenharia e Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas, no município de Rio Largo (9°28'29,1''S, 35°49'43,6''W e 127 m). O clima da região é úmido, megatérmico, com moderada insuficiência de chuva no verão e grande excesso de chuva no inverno (THORNTHWAITE; MATHER, 1955). A temperatura média, umidade relativa do ar e chuva média anual são de 25,4°C, 70% e 1.800 mm, respectivamente (SOUZA et al., 2005). O período chuvoso inicia-se na primeira quinzena de abril e ocorre até a segunda quinzena de agosto. Nesse período, o total de chuva corresponde a 70% do total anual, com máxima ocorrência mensal em junho (301,1 mm). O período menos chuvoso inicia-se na primeira quinzena de outubro e ocorre até a primeira quinzena de fevereiro. O total de chuva nesse período é 16% do valor anual, com mínima ocorrência mensal em dezembro (43,2 mm) (SOUZA et al., 2005; CARDIM, 2003; MOLION e BERNARDO, 2002). O solo da área experimental é classificado como Latossolo amarelo coeso argisólico de textura médio-argilosa. As características químicas e físico-hídricas do solo da área de cultivo estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Atributos químicos e físico-hídricos do solo cultivado com gergelim durante os períodos seco e chuvoso de 2021, no município de Rio Largo, AL

Atributos químicos											
Prof.	pH	P	Ca	Mg	K	SB	Al	H+Al	CTC	V	M.O
m		mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³					%	g kg ⁻¹
0.0-0.20	5.6	29.92	2.9	1.3	0.11	4.03	0.0	4.29	8.32	48.0	42.6
0.20-0.40	4.9	13.05	1.3	0.4	0.06	1.77	0.7	4.46	6.23	28.0	21.4
Atributos físico-hídricos											
Prof.	Densidade do solo ⁽¹⁾		Porosidade total ⁽¹⁾			VIB ⁽¹⁾		Granulometria			
m	(Mg m ⁻³)		(%)			(mm hora ⁻¹)		(%)			
								Areia	Silte	Argila	
0,0-0.20	1.5		42.3			52.0		54	30	16	

⁽¹⁾ Carvalho (2003) Nota: Metodologia Embrapa; Extratores: Água (pH); Mehlich (P, K, Na, Fe, Cu, Zn, Mn); KCl (Ca, Mg e Al); Oxidação (C); Acetato de Cálcio (H+Al); B (HCl); Sulfato de Cálcio (S); Cálculos: SB=Ca+Mg+Na+K; CTC=S.B+(H+Al); V%=(S.B/CTC)*100. Nota²: Metodologia: IAC; Extratores: Resina (P). VIB = velocidade de infiltração básica.

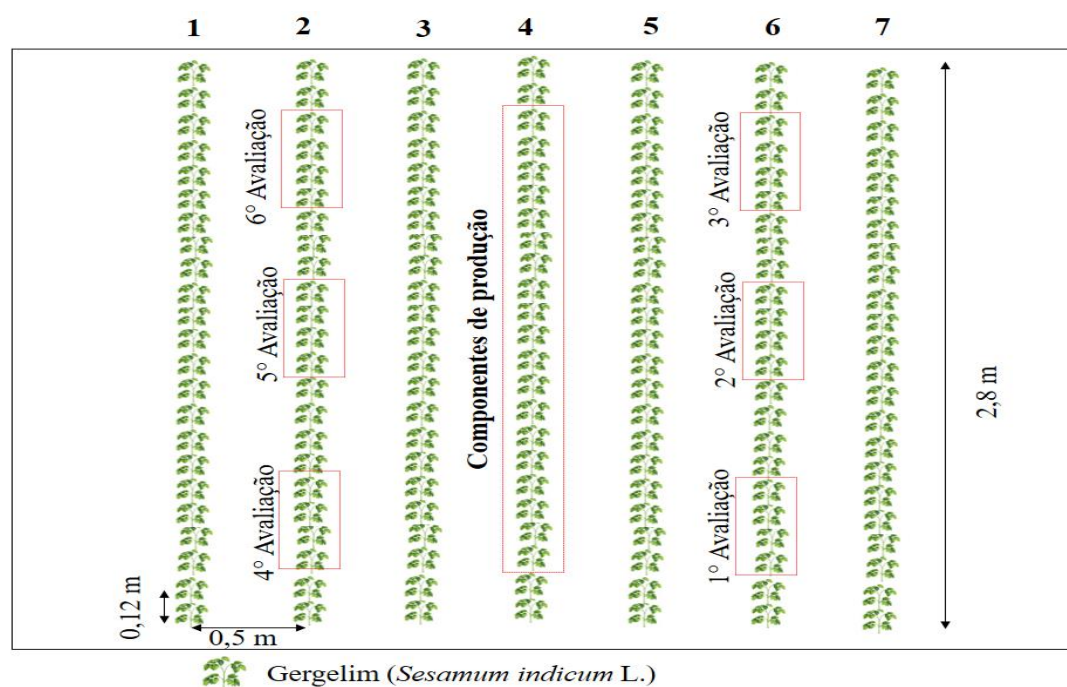
A área total de cultivo apresentava dimensões de 16,5 x 16,0 m de comprimento e largura, respectivamente (Figura 3.1). O preparo do solo procedeu-se pelo revolvimento da camada de 0-

0,25 m com aração e gradagem. A calagem e adubação foram aplicadas em sulcos na profundidade de 0,20 m com espaçamento de 0,5 m. Foram aplicadas 2,3 t ha⁻¹ de calcário no fundo do sulco e antes da adubação. O cálculo da adubação foi definido conforme Cavalcante (2008), seguindo a recomendação de adubação para o estado de Pernambuco: 50 kg ha⁻¹ – 40 kg ha⁻¹ – 60 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, respectivamente. Utilizou-se as fontes ureia (45% de N), superfosfato simples (19% de P₂O₅) e cloreto de potássio (57,8% de K₂O). A adubação nitrogenada foi dividida em duas aplicações, sendo a primeira (25 kg ha⁻¹) realizada após o desbaste das plantas e a segunda (25 kg ha⁻¹) 20 dias após a primeira.

No presente estudo, o material vegetal utilizado foi a cultivar BRS Seda que é amplamente cultivada na região Nordeste, Cerrado de Goiás e região norte fluminense do Brasil. A cultivar apresenta uma cápsula por axila foliar e rendimento médio, peso de 1000 sementes e teor de óleo de 750 a 850 kg ha⁻¹, 3,2 g e 52%, respectivamente (ARRIEL et al., 2009). O espaçamento utilizado foi de 0,5 m entre linhas e 0,12 m entre plantas, equivalente a 167 mil plantas ha⁻¹. Para tanto, semeou-se 5 sementes em cada cova e realizou-se o primeiro desbaste quando as plantas estavam com duas a quatro folhas definitivas (15 dias após a semeadura – DAS), deixando-se duas plantas por cova, e segundo quando as plantas atingiram 0,12 m de altura (22 DAS), deixando-se uma planta, conforme indicado por Arriel et al. (2009).

A parcela experimental tinha dimensões de 2,8 x 3,5 m de comprimento e largura, respectivamente, que totalizou 9,8 m². Cada parcela foi composta por 7 linhas de plantas espaçadas a 0,5 m entre si (Figura 3.1). Para as avaliações de crescimento foram colhidas plantas das linhas 2 e 6, e a linha central (4) foi avaliada somente ao final do ciclo para os parâmetros produtivos (peso de mil grãos, número de sementes por cápsulas, número de cápsulas por planta). As demais linhas (1, 3, 5 e 7) foram consideradas bordadura (Figura 3.1).

Figura 3.1. Esquema representativo da parcela experimental da cultura do gergelim.

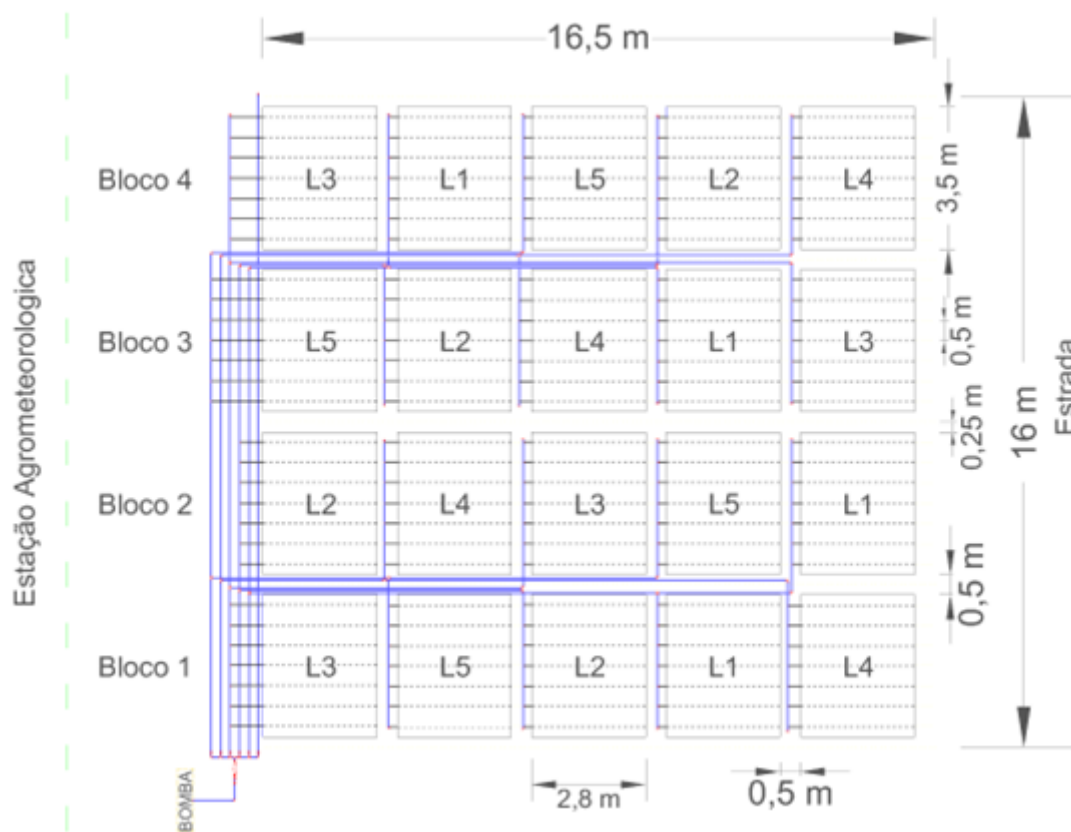


Fonte: AUTOR, 2023.

5.2.2 Aplicação dos tratamentos

Cinco tratamentos de irrigação foram testados, com aplicações diárias, equivalentes a 50, 75, 100, 125 e 150% da evapotranspiração da cultura (ET_C). Durante o período da emergência e estabelecimento das plantas (primeiros 15 dias), foi adotada a lâmina de irrigação equivalente a 100% da ET_C em todas as parcelas experimentais. Adotou-se o delineamento em blocos casualizados com quatro repetições, que totalizou 20 parcelas experimentais (Figura 3.2).

Figura 3.2. Distribuição dos tratamentos, em delineamento de blocos casualizados do experimento com gergelim.



Fonte: AUTOR, 2023.

Para o cultivo conduzido no período chuvoso, a irrigação foi iniciada em 26/02/2021 (15 DAS) e encerrada em 20/03/2021 (37 DAS), quando iniciou o período chuvoso da região, que ocasionou apenas 23 dias com irrigação. No entanto, para o cultivo conduzido no período seco, a irrigação foi iniciada em 23/10/2021 (15 DAS) e encerrada 25/12/2021 (79 DAS), quando as cápsulas iniciaram a maturação fisiológica (61 dias com irrigação). A água de irrigação foi aplicada utilizando um sistema por gotejamento, com emissores espaçados a 20 cm, com vazão nominal de 1,5 L h⁻¹ a uma pressão de 0,1 MPa.

5.2.3 Manejo da irrigação

A evapotranspiração da cultura (ET_C) foi medida através do balanço hídrico em lisímetros de drenagem instalados ao lado da área experimental e calculada pela Equação 3.1:

$$ET_C = P + I - D \quad \text{Eq. 3.1}$$

Em que, ET_C é a evapotranspiração da cultura (mm); I é a irrigação (mm); P é a chuva (mm) e D é a drenagem (mm).

A ET_C obtida nos lisímetros foi equivalente à lâmina de 100% e as demais lâminas adotadas nos tratamentos foram proporcionalmente calculadas. A capacidade de água disponível (CAD, mm) no solo foi calculada através da seguinte Equação 3.2 (PEREIRA et al., 1997):

$$CAD_i = 1000(\theta_{cc} - \theta_{pm})Z_{r,i} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Em que, θ_{cc} e θ_{pm} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) são as umidades volumétricas do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, respectivamente, e o termo subscrito i representa o decêndio i . Os valores de θ_{cc} ($0,248 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) e o θ_{pm} ($0,147 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$) foram determinados para a área experimental pela curva de retenção de água no solo. Considerou-se a profundidade do sistema radicular igual a 0,40 m (GLOAGUEN et al., 2019).

O balanço hídrico sequencial baseou-se no modelo desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955), o qual pode ser apresentado na forma da Equação 3.3.

$$ALT_i = (ARM_i - ARM_{i-1}) \quad \text{Eq. 3.3}$$

Em que, ALT (mm) é a alteração no armazenamento da água do solo; ARM (mm) é o armazenamento da água no solo

O ARM inicial foi considerado igual a CAD , os posteriores foram calculados conforme a sequência lógica abaixo (Equações 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7):

$$DIA \leq 1; \mathbf{ARM} = \mathbf{CAD} \quad \text{Eq. 3.4}$$

$$DIA > 1 \ \& \ ([P + I - ET_C] \geq 0) \ \& \ \{(ARM_{i-1} + [P + I - ET_C]) \geq CAD\}; \mathbf{ARM} = \mathbf{CAD} \quad \text{Eq. 3.5}$$

$$DIA > 1 \ \& \ ([P + I - ET_C] \geq 0) \ \& \ \{(ARM_{i-1} + [P + I - ET_C]) < CAD\}; \mathbf{ARM} = (ARM_{i-1} + [P + I - ET_C]) \quad \text{Eq. 3.6}$$

$$DIA > 1 \ \& \ ([P + I - ET_C] < 0); \mathbf{ARM} = \mathbf{ARM}_{i-1} \mathbf{EXP}([P + I - ET_C]/CAD) \quad \text{Eq. 3.7}$$

Valores referentes à água facilmente disponível (AFD, mm) foram calculados a partir da Equação 3.8:

$$AFD = CAD \times f \quad \text{Eq. 3.8}$$

Em que, f (0,60) refere-se ao fator de disponibilidade de água (ALLEN et al., 1998).

A umidade crítica (UC, mm) foi calculada a partir da Equação 3.9:

$$UC = CAD - AFD \quad \text{Eq. 3.9}$$

5.2.4 Avaliações fisiológicas

As avaliações fisiológicas foram realizadas aos 55 e 56 dias após o plantio, para os ciclos conduzidos nos períodos chuvoso e seco, respectivamente. Esse período caracteriza-se pela floração plena (mais de 50% da população de plantas no estágio de floração), correspondente ao período crítico de exigência hídrica da cultura. Todas as análises fisiológicas foram realizadas em folhas completamente expandidas e não sombreadas, escolhendo-se o terceiro ou quarto par de folhas da porção superior das plantas, contadas do ápice a base (DIAS et al., 2018).

As medições do teor de água relativo da folha (%) foram feitas nas amostras de folhas colhidas às 12:00 h. Para isso, 6 discos foram retirados das folhas, postas em gelo e imediatamente pesadas em balança analítica (peso fresco, P_f). Em seguida, os discos foram imersos em água destilada durante 24 horas e novamente pesados (peso túrgido, P_t) e acondicionadas em estufa de ventilação forçada de ar à 65 °C por 24 horas e pesadas para a obtenção da fitomassa seca (peso seco, P_s). Os valores relativos ao teor de água da folha foram determinados por meio da Equação 3.10 (SMART; BINGHAM, 1974; SIDDIQUE et al., 2000; MOLAEI et al., 2012):

$$TRA = 100(P_f - P_s)(P_t - P_s)^{-1} \quad \text{Eq. 3.10}$$

Em que, TRA = teor relativo de água da folha (%); P_f = peso fresco da folha (g); P_t = peso de turgescência (saturação) da folha (g); P_s = peso seco da folha (g).

O potencial hídrico foliar foi determinado na antemanhã (Ψ_w antemanhã), entre 4:00 e 5:00h e às 12:00h (Ψ_w meio-dia) utilizando uma bomba de pressão do tipo Scholander modelo 3000 (Soil Moisture Equipment, Santa Bárbara, USA), em folhas totalmente expandidas. Para tanto, duas folhas por parcela foram destacadas, com o auxílio de uma tesoura, rapidamente envolvidas em plástico e armazenadas em ambiente refrigerado. Imediatamente após as coletas, as mesmas foram levadas ao laboratório para a realização das medidas de potencial hídrico.

O índice SPAD foi mensurado utilizando-se um clorofilômetro portátil modelo SPAD-502, sendo realizadas 10 leituras na região do terço médio da planta. Posteriormente, obteve-se a média geral por folha.

Utilizando um medidor de trocas gasosas com sistema aberto de fluxo de ar IRGA- *Infra Red Gas Analyzer* modelo Li-6400 (Li-Cor, Biosciences Inc., Nebraska, EUA), foram medidas a condutância estomática (g_s , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$), taxa fotossintética (A , $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e transpiratória (E , $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) concentração intercelular de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), temperatura foliar ($^{\circ}\text{C}$) e com os valores de A e E foi calculada a relação da eficiência instantânea do uso da água (A/E). As análises foram realizadas no período de maior exigência hídrica e quando o gergelim é mais sensível ao estresse hídrico (floração plena). Essas medidas foram realizadas entre as 8:00 e 11:00 horas.

As medições de trocas gasosas, em diferentes níveis de PAR (radiação fotossinteticamente ativa) incidente na superfície foliar (0, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram realizadas com o auxílio da Light Curve do Software do IRGA para a determinação da densidade de fluxo de fótons fotossintéticos a serem utilizados na câmara, onde foi empregado um fluxo fotossintético de 1900 $\mu\text{mol de fótons m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A eficiência quântica máxima do fotossistema II (F_v/F_m) foi determinada por meio de um fluorômetro modulado por pulso (Opti-Sciences, Inc., Hudson, NH, EUA), após adaptar as folhas ao escuro por 30 minutos utilizando-se cliques foliares. O rendimento quântico efetivo do PSII (ΦPSII) foi determinado às 12:00 horas sob luz ambiente.

5.2.5 Avaliações de crescimento

As medidas de crescimento foram realizadas a partir de 27 de fevereiro de 2021 (15 DAS) a 22 de maio de 2021 (período chuvoso) e 23 de outubro de 2021 (15 DAS) a 15 de janeiro de 2022 (período seco), em intervalos de 15 dias. Em cada parcela, uma amostra de quatro plantas foi colhida para a determinação das variáveis (fitomassa seca total – FSTa, kg ha^{-1} ; altura das plantas – AP, cm; índice de área foliar – IAF, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ e diâmetro do caule – DC, mm).

A altura da planta (cm) foi medida com uma fita métrica, por meio da medição do colo ao ápice caulinar (TAN, 2011). A curva foi ajustada ao modelo logístico (Equação 3.11), em função dos DAS (TEI et al., 1996).

$$w(DAS) = \frac{W_f}{\left[1 + \left(\frac{W_f}{W_o} - 1\right) \exp(-r \times DAS)\right]} \quad \text{Eq. 3.11}$$

Em que, w representa a altura da planta, cm; W_o e W_f correspondem ao crescimento inicial e final do ciclo da cultura, respectivamente; r é a taxa máxima de crescimento relativo ($\text{cm cm}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) e DAS são os dias após a semeadura.

O diâmetro do caule foi medido a 5 cm do colo da planta, com o auxílio de um paquímetro digital. Sua curva foi ajustada ao modelo Sigmoidal de 3 parâmetros, conforme a Equação 3.12:

$$Y = \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}} \quad \text{Eq. 3.12}$$

Em que, A_1 é o diâmetro ou fitomassa seca total inicial, A_2 diâmetro ou a fitomassa seca total final, b é o centro da curva e x_0 é a constante do tempo.

Para determinar a AF (cm^2) foi utilizado o método dos discos, que relaciona a massa fresca da folha (MFF, g) da amostra com a massa de uma subamostra com área conhecida (MFAC, g). Para tanto, de cada amostra retirou-se dois discos (diâmetro do disco de 2,715 cm) de folhas para quantificar a MFAC (Equação 3.13).

$$AF = \frac{AC \times MFF}{MFAC} \quad \text{Eq. 3.13}$$

O IAF foi obtido através da razão entre a área foliar e área do solo ocupada da planta. O modelo Peak Log Normal, 3 parâmetros (Equação 3.14) foi ajustado para a estimativa dos valores de IAF, em função dos DAS.

$$IAF_{ajs} = a \exp \left\{ -0,5 \times \left[\frac{\ln\left(\frac{DAS}{X_o}\right)}{b} \right]^2 \right\} \quad \text{Eq. 3.14}$$

Em que, IAF_{ajs} representa o índice de área foliar ajustado ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$); a é o valor do IAF_{ajs} máximo (adimensional); b é o grau de decaimento da variável dependente (IAF_{ajs}); X_o é o valor de DAS quando o IAF_{ajs} é máximo ($^\circ\text{C}$); e DAS são os dias após a semeadura.

Para a determinação da fitomassa seca total (folha + caule, em kg ha^{-1}) o material foi seco em estufa de ventilação forçada de ar à $65 \text{ } ^\circ\text{C}$ por 48-72 horas ou até atingir peso constante. Posteriormente, o material foi pesado em balança analítica e os dados de fitomassa seca foram utilizados para ajustar os modelos Sigmoidais de 3 parâmetros, conforme a Equação 3.12.

5.2.6 Parâmetros produtivos

As plantas foram colhidas em 14 de junho de 2021 (123 DAP) no primeiro ciclo e em 24 de janeiro de 2022 (109 DAS) no segundo ciclo, quando as cápsulas apresentaram coloração amarela e as localizadas nos ramos mais baixo começaram a abrir. A produtividade dos grãos (kg ha^{-1}) foi obtida a partir da massa seca dos grãos de uma área de $1,5 \text{ m}^2$ (colheu-se 3 metros de plantas). Os grãos foram secos em estufa até atingir à umidade de 6% conforme Arriel et al. (2009). Também foi determinado o peso de 1000 grãos (g), número de cápsulas por planta e número de grãos por planta. O percentual de matéria seca (%) foi determinada de acordo com AOAC (1990).

A eficiência do uso da água (EUA) para cada lâmina de irrigação foi calculada pela Equação 3.15 (TOLK; HOWELL, 2003):

$$EUA = \frac{Y}{ET_R} \quad \text{Eq. 3.15}$$

Em que, EUA = eficiência do uso da água ($\text{kg m}^{-3} \text{ ha}^{-1}$); Y = rendimento (kg ha^{-1}); ET_R = evapotranspiração real da cultura (mm).

A resposta de produção do gergelim às diferentes disponibilidades hídricas foi calculada usando curvas de regressão polinomial de segundo grau, conforme a Equação 3.16:

$$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad \text{Eq. 3.16}$$

Em que, Y é a produtividade do gergelim (kg ha^{-1}); x é a disponibilidade hídrica (mm) e b_0 , b_1 e b_2 são os coeficientes do modelo de regressão. A análise física da produção para a estimativa da disponibilidade hídrica total que proporciona a produtividade máxima foi feita igualando-se a zero a primeira derivada da Equação 3.16, conforme as Equações 3.17 e 3.18.

$$-Y = b_1 - 2b_2x \text{ (primeira derivada da equação 3.16)} \quad \text{Eq. 3.17}$$

$$\text{igualando - se a zero, tem - se: } b_1 - 2b_2x = 0 \therefore -2b_2x = -b_1 \therefore X_{M\acute{A}X} = \frac{b_1}{2b_2} \quad \text{Eq. 3.18}$$

Em que, $X_{M\acute{A}X}$ é a quantidade de irrigação (lâmina total de irrigação, mm) que proporciona a produtividade máxima (kg ha^{-1}). A produtividade máxima ($Y_{M\acute{A}X}$) foi calculada pela Equação 3.19.

$$Y_{M\acute{A}X} = b_0 - \frac{b_1^2}{4b_2} \quad \text{Eq. 3.19}$$

5.2.7 Análise estatística

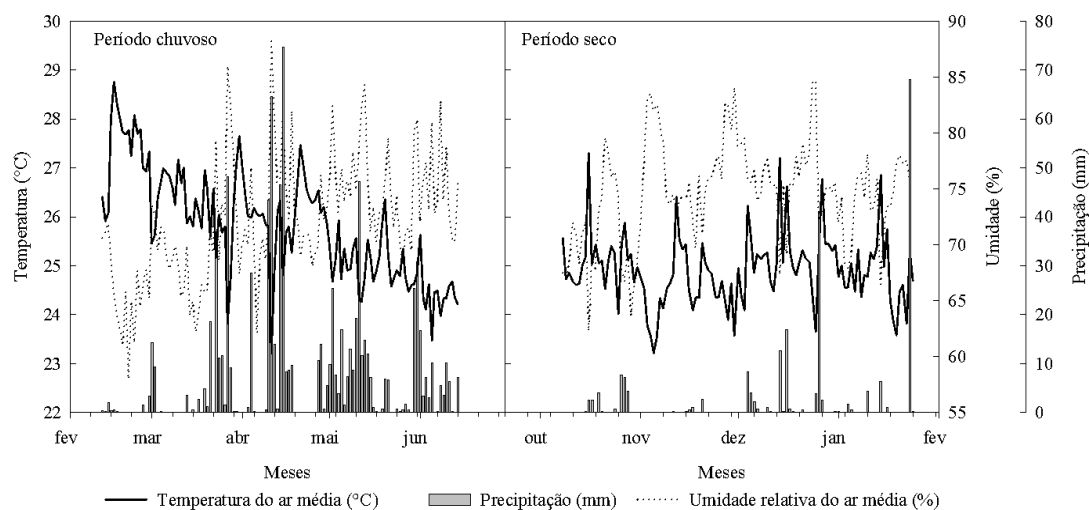
Os dados coletados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, quando significativo, realizada a análise de regressão polinomial para as lâminas de irrigação, utilizando-se o software estatístico SISVAR-ESAL 5.1 (FERREIRA, 2011). Para a identificação dos padrões e efeitos dos tratamentos aplicados nas plantas de gergelim, foi aplicada a análise de componentes principais (PCA) para as variáveis fisiológicas e de crescimento.. Os componentes principais (PC) foram selecionados com base no critério de Kaiser. Esse tipo de critério apenas considera o autovalor maior que 1 para utilização da PC (KAISER, 1960; JARDIM et al., 2021). Além disso, antes da realização da PCA os dados foram padronizados, ao aplicar média igual a 0 e desvio-padrão igual a 1. As análises foram realizadas com o auxílio do software XLSTAT v2018 (ADDINSOFT, 2020).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Variáveis agrometeorológicas

Os valores mensais da temperatura média do ar (Tmed), chuva (P) e umidade relativa do ar (UR) são apresentados na Figura 3.3. Durante o período chuvoso (período 1), a Tmed foi igual a 25,8 °C mês⁻¹. O total de chuva foi de 870,1 mm, sendo os meses de abril (331,7 mm) e maio (281,7 mm) os mais chuvosos do período. A UR média observada oscilou entre 58% e 88%, com média de 72%. Para o período seco (período 2), a variação da Tmed foi de 24,6 a 28,8 °C, com média de 26,5 °C mês⁻¹. A chuva total foi igual a 212,9 mm, com os meses de dezembro (96 mm) e janeiro (82,6 mm) sendo os mais chuvosos do período, e novembro (4,8 mm) o menos chuvoso. Neste período, a UR apresentou valor médio igual a 67,7%.

Figura 3.3. Temperatura média do ar (°C), umidade relativa média do ar (%) e chuva (mm) no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e de outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco).



Fonte: AUTOR, 2023.

5.3.2 Balanço de água no solo

O curto intervalo de irrigação no período chuvoso foi ocasionado pelo início da estação chuvosa da região de cultivo, com diferença de apenas 98 mm entre o menor e o maior nível de irrigação. No período seco, a irrigação foi encerrada quando a cultura finalizou a fase intermediária e iniciou a maturação dos grãos, que proporciona diferença de 396 mm entre o menor e o maior nível de irrigação (Tabela 3.2). Essas informações justificam as maiores diferenças entre a lâmina total aplicada (chuva total mais irrigação) apresentadas para o período seco em relação ao chuvoso. A ET_C acumulada no período de cultivo foi 555,86 e 545,28 mm, com média de 4,5 e 5,0 mm d^{-2} , para o período chuvoso e seco, respectivamente.

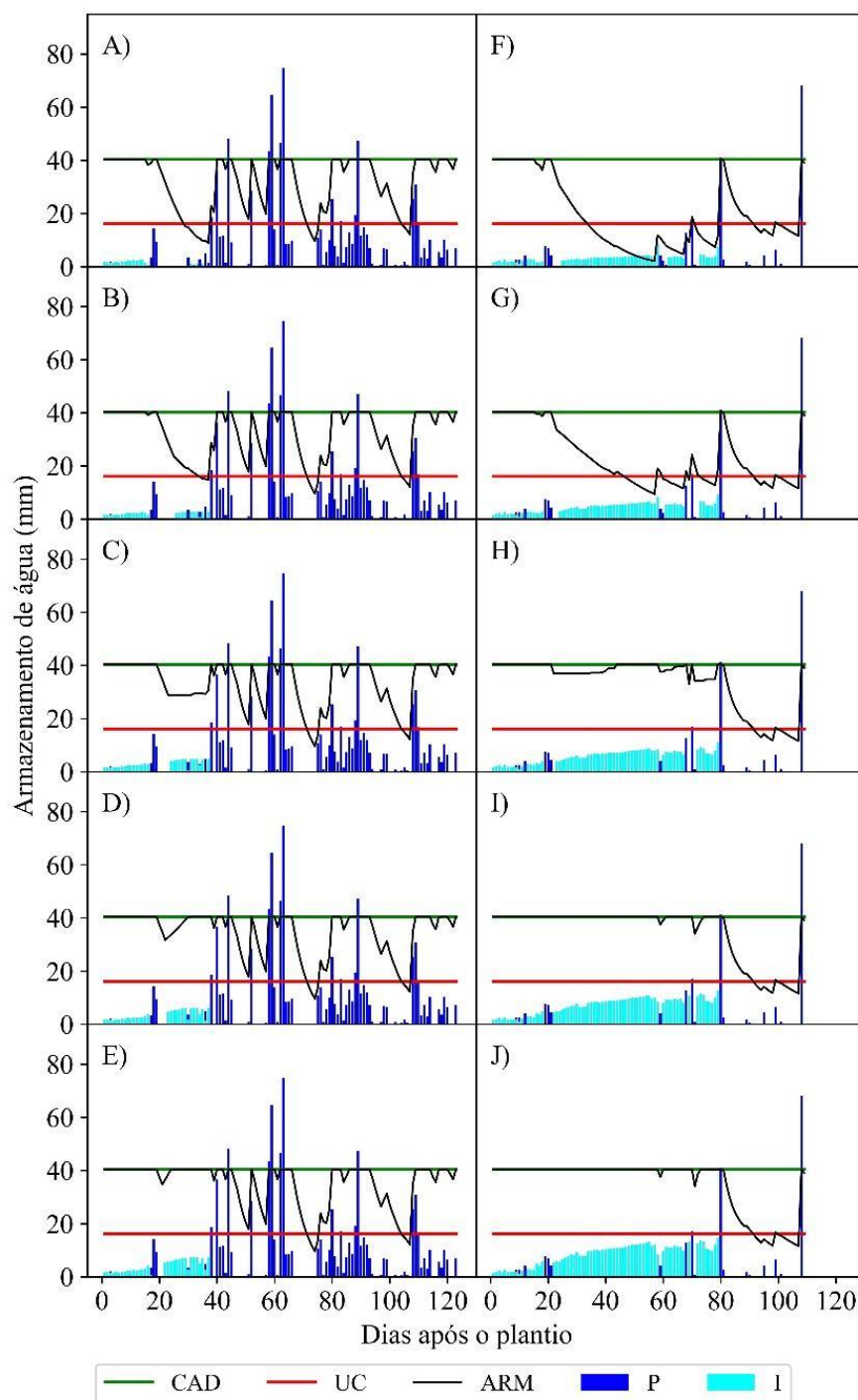
Tabela 3.2. Chuva total, chuva efetiva, irrigação total, lâmina total aplicada (Chuva efetiva + irrigação total), déficit hídrico e excesso hídrico (mm) no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período seco) em cultivo de gergelim

Período	Níveis	Chuva Total	Chuva Efetiva	Irrigação Total	Lâmina Total	Déficit	Excesso
	(%ET _c)						
Chuvoso	50	870,11	379,5	34,49	413,99	104,61	490,61
	75		372,55	56,93	429,48	89,13	497,56
	100		356,01	87,62	443,63	74,98	514,1
	125		335,16	109,47	444,63	73,98	534,95
	150		311,8	133,47	445,27	73,33	558,31
Seco	50	212,87	160,12	207,03	367,15	176,7	52,75
	75		150,62	298,61	449,23	94,62	62,25
	100		105,58	403,25	508,83	35,02	107,29
	125		34,11	508,97	543,08	34,08	178,76
	150		0,00	603,11	603,11	34,08	306,21

O déficit e o excesso hídrico apresentaram comportamento inverso em função dos níveis de irrigação, principalmente no período seco. No período chuvoso, houve variação de 104,61 a 73,33 mm para o déficit e de 490,6 a 558,3 mm para o excesso, para os níveis de 50% e 150% da ET_C, respectivamente. Para esses mesmos níveis, no período seco a variação foi de 176,7 a 34,88 mm para o déficit e de 52,75 a 306,21 mm para o excesso.

Na Figura 3.4 são apresentados os balanços hídricos da cultura do gergelim para os diferentes níveis de irrigação durante o período experimental. A estimativa da umidade do solo em função das entradas e saídas de água mostraram que, no início do ciclo de cultivo, todos os tratamentos permaneceram com o armazenamento de água no solo (ARM) próximo à capacidade de campo (limite máximo igual à CAD). Por outro lado, ao iniciar a aplicação dos tratamentos (15 DAS), observou-se redução mais acentuada no ARM dos níveis de 50% e 75% da ET_C e próximo à CAD para os demais níveis avaliados. No período chuvoso, a partir dos 36 DAS, com o encerramento da irrigação (I) por conta da chuva (P), o ARM igualou-se para todos os tratamentos, com valores próximos ao ARM em dias de chuva e decresceu até a umidade crítica (UC) em sequências de dias sem chuva. Por outro lado, no período seco, houve declínio do ARM até atingir valores inferiores à UC por uma sequência de dias nas fases de desenvolvimento e intermediária dos níveis de 50% e 75% da ET_C e posterior aumento dos seus valores com a ocorrência de chuva. Em contrapartida, as lâminas de 100, 125 e 150% da ET_C apresentaram valores sempre próximos ou iguais à CAD.

Figura 3.4. Balanço hídrico sequencial da cultura do gergelim sob os níveis de irrigação, L1 (A), L2 (B), L3 (C), L4 (D) e L5 (E) para o período chuvoso de fevereiro a junho de 2021 e L1 (F), L2 (G), L3 (H), L4 (I) e L5 (J) para o período seco de outubro de 2021 a janeiro de 2022, na região de Rio Largo, AL. CAD: capacidade de água disponível; UC: umidade crítica; ARM: armazenamento de água no solo; P: Chuva e I: Irrigação.



Fonte: AUTOR, 2023.

Na fase final, em ambos os períodos, todos os tratamentos tiveram redução do armazenamento devido à suspensão da irrigação, uma vez que a cultura do gergelim já se encontrava na fase de maturação dos grãos e a partir desse momento a produtividade não sofre mais influência do déficit hídrico.

5.3.3 Parâmetros fisiológicos

A Tabela 3.3 apresenta a análise de variância das variáveis fisiológicas do gergelim cultivado sob diferentes lâminas de irrigação.

Tabela 3.3. Análise de variância das variáveis fisiológicas aos 55 (ciclo 1) e 56 (ciclo 2) DAS do gergelim cultivado sob diferentes lâminas de irrigação no período de fevereiro a junho de 2021 (período chuvoso) e outubro de 2021 a janeiro de 2022 (período chuvoso)

Quadrado médio									
Variáveis fisiológicas (55 e 56 DAS)									
Fonte da variação	G.L	Ψ_w antemanhã		Ψ_w meio-dia		TRA		Gs	
		CH	SC	CH	SC	CH	SC	CH	SC
Lâmina de irrigação	4	0,274 ^{ns}	0,41**	3,70**	4,58**	97,78*	236,14**	0,04**	0,063**
Bloco	3	0,034 ^{ns}	0,009 ^{ns}	2,07 ^{ns}	0,27 ^{ns}	30,84 ^{ns}	1,55 ^{ns}	0,012 ^{ns}	0,005 ^{ns}
Linear	1	1,57 ^{ns}	8,12**	4,80**	9,38**	4,005**	17,07**	5,13**	12,49**
Quadrática	1	0,99 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,0009 ^{ns}	0,293 ^{ns}	0,883 ^{ns}	2,33 ^{ns}	1,04 ^{ns}
Resíduo	12	0,31	0,02	0,62	0,2	22,76	3,18	0,005	0,001
C.V(%)		33,07	11,47	12,41	18,99	6,91	2,55	28,26	15,28
		E		Ci		A		Tfoliar	
		CH	SC	CH	SC	CH	SC	CH	SC
Lâmina de irrigação	4	1,83**	3,03*	18286,17**	24668,2**	63,46*	154,65**	2,13 ^{ns}	4,54* [*]
Bloco	3	0,52 ^{ns}	3,29 ^{ns}	1398,58 ^{ns}	1017,92 ^{ns}	14,51 ^{ns}	3,06 ^{ns}	28,27 ^{ns}	1,74 ^{ns}
Linear	1	5,23**	3,19**	9,54**	13,99**	2,45 ^{ns}	4,28*	1,26 ^{ns}	5,71* [*]
Quadrática	1	2,48 ^{ns}	1,42 ^{ns}	0,258 ^{ns}	0,256 ^{ns}	3,61*	7,56**	0,56 ^{ns}	2,21 ^{ns}
Resíduo	12	0,19	0,87	751,54	492,83	12,86	7,98	4,25	0,4
C.V(%)		12,68	32,22	17,74	15,09	10,91	10,1	5,98	2,05
		A/E		SPAD		$\Phi PSII$		Fv/Fm	
		CH	SC	CH	SC	CH	SC	CH	SC
Lâmina de irrigação	4	2,34 ^{ns}	16,51 ^{ns}	18,46*	52,34**	0,005 ^{ns}	0,018*	0,002 ^{ns}	0,009* [*]
Bloco	3	8,58 ^{ns}	51,15 ^{ns}	16,38 ^{ns}	17,18 ^{ns}	0,013 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,003 ^{ns}	0,002 ^{ns}
Linear	1	2,51 ^{ns}	0,28 ^{ns}	1,24 ^{ns}	2,39 ^{ns}	1,51 ^{ns}	3,57*	2,16 ^{ns}	4,41* [*]
Quadrática	1	0,17 ^{ns}	0,80 ^{ns}	2,68*	5,91**	0,12 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,63 ^{ns}

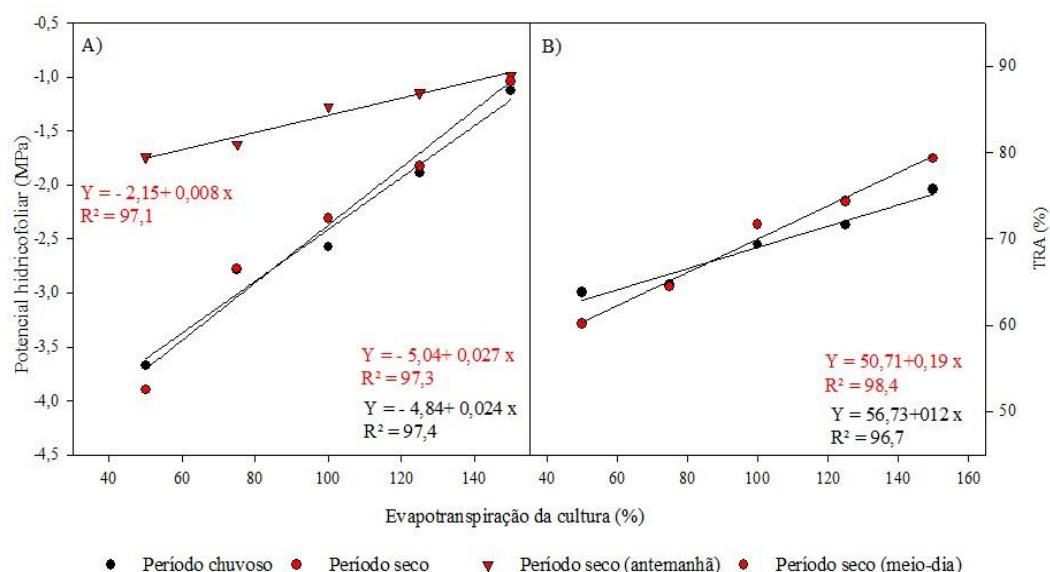
Resíduo	12	1,43	21,62	4,81	4,43	0,006	0,004	0,002	0,002
C.V(%)		12,22	42,35	7,03	6,86	15,01	13,3	6,06	5,96

Ψ_w antemanhã: potencial hídrico foliar antemanhã, Ψ_w meio-dia: potencial hídrico foliar ao meio-dia, TRA: teor relativo de água na folhas, gs: condutância estomática, E: taxa transpiratória, Ci: concentração intercelular de CO₂, A: taxa fotossintética líquida, Tf: temperatura foliar, A/E: eficiência instantânea do uso da água, Φ PSII: eficiência quântica do PSII, Fv/Fm: eficiência quântica máxima do fotossistema II, CH: período chuvoso, CS: período seco; C.V = Coeficiente de variação; GL- Graus de liberdade; ** Significativo ao nível de 0,01 de probabilidade; * significativo ao nível de 0,05 de probabilidade; ns- não significativo pelo teste F ($p < 0,05$). CH- Período chuvoso e SC- período seco.

Houve variação do potencial hídrico foliar (Ψ_w) na cultura do gergelim entre os períodos chuvoso e seco ($p < 0,01$). As medidas do Ψ_w foliar na antemanhã, para o período seco no tratamento com maior disponibilidade hídrica apresentou acréscimo de 77% em relação à menor. Ao meio-dia, as diferenças entre esses tratamentos foram mais acentuadas, com acréscimos de 228% e 278% para os períodos chuvoso e seco, respectivamente (Figura 3.5 A). O teor relativo de água na folha (TRA), por se tratar também de uma medida do status hídrico da planta, apresentou comportamento semelhante ao do potencial hídrico, porém vale ressaltar que as lâminas de 100%, 125% e 150% da ET_C não proporcionaram redução do TRA (Figura 3.5 B). Isso demonstra que nessas condições as folhas mantiveram a sua turgescência.

As plantas apresentaram estratégias semelhantes (comportamento linear) quando submetida aos mesmos tratamentos, independente do período avaliado. O TRA variou entre 63,8 e 75,7% no período chuvoso e 60,2% a 79,3% no período seco (Figura 3.5 B). Decréscimos para TRA podem ser causados devido aos danos nas membranas celulares sob condições de déficit hídrico (SABINO et al., 2021; KAYAK et al., 2023). Ao meio-dia, o Ψ_w foliar das plantas foi mais negativo, com decréscimo acentuado nos níveis de 50% e 75% da ET_C. Quanto menor for a quantidade de água no solo mais negativo deve ser o potencial hídrico desenvolvido pelas raízes, principalmente no horário do meio-dia, quando a transpiração apresenta valores elevados e a pressão negativa no xilema apresenta valores menores da absorção de água pela planta (LARCHER, 2003).

Figura 3.5. Potencial hídrico foliar (Ψ_w , MPa) no período da antemanhã e ao meio-dia (A) e teor relativo de água na folha (TRA, %) (B) do gergelim cultivado sob diferentes níveis de irrigação ($\%ET_C$).



Fonte: AUTOR, 2023.

O potencial hídrico foliar ao meio-dia foi menor em relação à antemanhã, para todos os tratamentos testados nesta pesquisa. Isso pode ser explicado pelo acúmulo de solutos orgânicos compatíveis, capazes de provocar redução no potencial osmótico, sem que haja perda de água para o meio. Conforme Zandalinas et al. (2018), plantas cultivadas sob déficit hídrico mostram reduções no potencial hídrico do tecido foliar, o que pode promover mudanças nos processos fisiológicos e bioquímicos, resultando assim em mudanças no metabolismo celular.

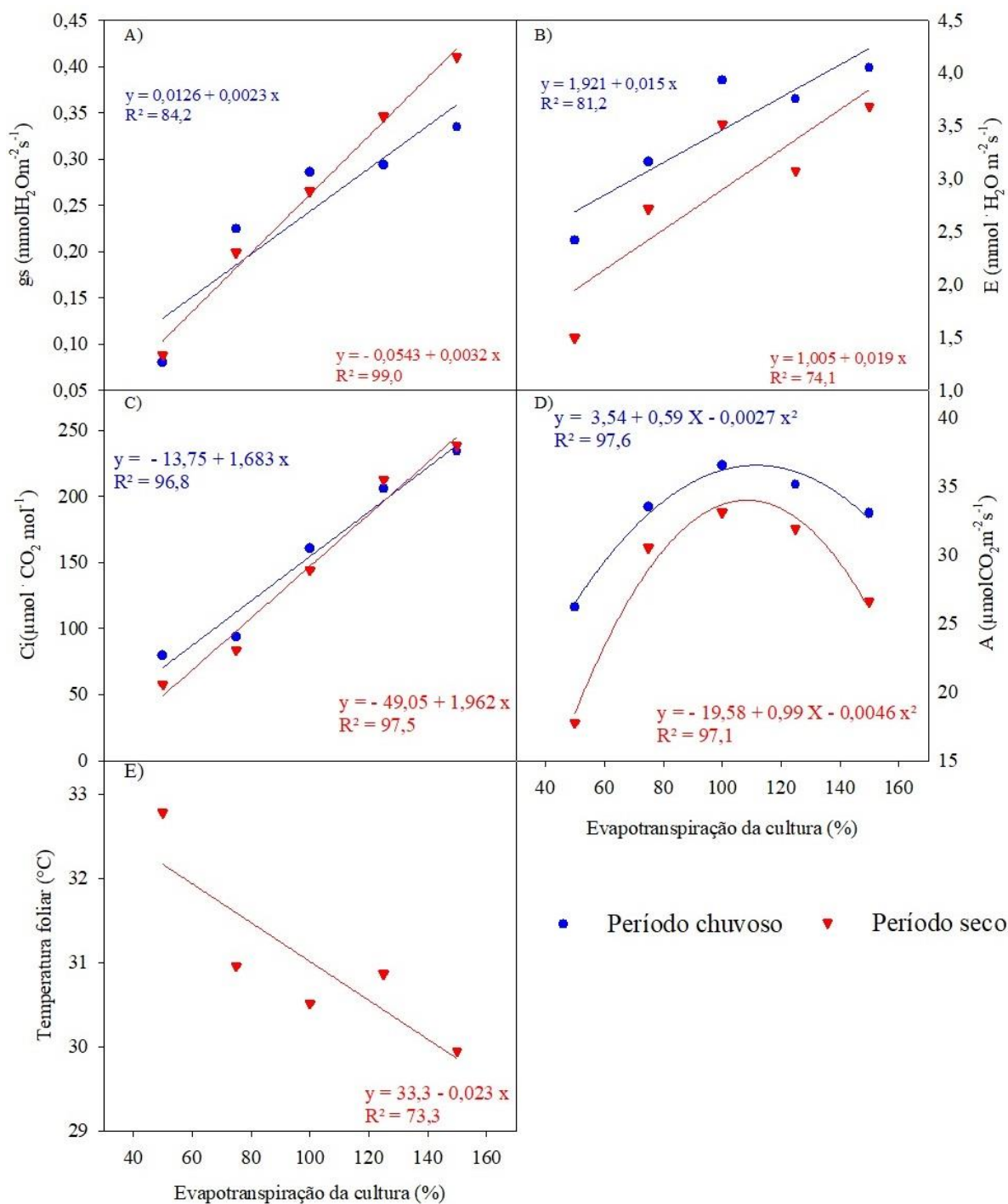
A redução da disponibilidade hídrica do solo (ET_C) promoveu decréscimo nas trocas gasosas do gergelim. A condutância estomática (g_s) variou entre as diferentes disponibilidades de água no solo. O nível de 50% da ET_C reduziu a g_s em 180 e 303%, respectivamente para os períodos chuvoso e seco, em relação à 150% da ET_C (Figura 3.6A). A transpiração das folhas (E) apresentou comportamento semelhante ao da g_s para os diferentes tratamentos, com redução de 56% e 97% em relação à 150% da ET_C (Figura 3.6B). As concentrações intercelulares de CO_2 foram reduzidas em 239 e 400% para os períodos chuvoso e seco, em relação à 150% da ET_C (Figura 3.6C). O fechamento estomático é considerado uma das primeiras estratégias das plantas para prevenir o estresse hídrico (KAPOOR et al., 2020). Resultados semelhantes com espécies cultivadas demonstraram que, menores valores de Ψ_w foliar são observados conforme ocorre a redução da disponibilidade hídrica do solo, o que indica maior desidratação de protoplastos, resultando em maior redução de g_s , E , C_i e A (SILVA et al., 2016; ENDRES et al., 2018). Na

maioria das plantas, sob deficiência hídrica, ocorre redução na condutância estomática, destinada a minimizar a perda de água, no entanto, também diminui a taxa de difusão de CO_2 que reduz a concentração intercelular de CO_2 , e consequentemente a fotossíntese (OCHELTREE et al., 2014).

A taxa fotossintética líquida (A) do gergelim ajustou-se ao modelo quadrático para as diferentes disponibilidades de água no solo. Os maiores valores de A ($35,8$ e $33,7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foram obtidos com a aplicação dos níveis de 109 e 108% da ET_C , respectivamente (Figura 3.6D), o que aponta o aumento de 38 e 90% no valor da fotossíntese líquida em comparação com o menor valor. As taxas de A foram mais prejudicadas no período seco, indicando que em condições de déficit hídrico, ocorre maiores danos na taxa fotossintética da planta. Com os estômatos fechados em resposta ao estresse por déficit hídrico, o resfriamento transpiracional cessa e leva a um aumento na temperatura foliar (LUQUET et al., 2003; JONES, 2004). No período seco, a temperatura foliar apresentou comportamento inverso à gs, E e Ci. O nível de 50% da ET_C ($32,15^\circ\text{C}$) apresentou aumento em 8% em relação à 150% da ET_C .

Estudos com plantas de gergelim sob estresse hídrico também encontraram que a cultura manteve seus estômatos praticamente fechados, o que causou redução significativa na taxa fotossintética (SOUSA et al., 2014; BASTUG et al., 2021). As plantas de gergelim apresentaram decréscimo da fotossíntese em níveis superiores a 109 e 108% da ET_C , para os períodos chuvoso e seco, respectivamente. Com a redução da gs, espera-se também a redução de E, Ci e A, que causa a falta de ATP e NADPH, provenientes da cadeia transportadora de elétrons do fotossistema II e, consequentemente, a redução da fixação de carbono (SALES et al., 2012).

Figura 3.6. Condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E), concentração intercelular de CO₂ (Ci), taxa fotossintética líquida (A) e temperatura foliar de plantas de gergelim cultivadas nos períodos chuvoso e no período seco do gergelim cultivado sob diferentes níveis de irrigação (%ET_C).



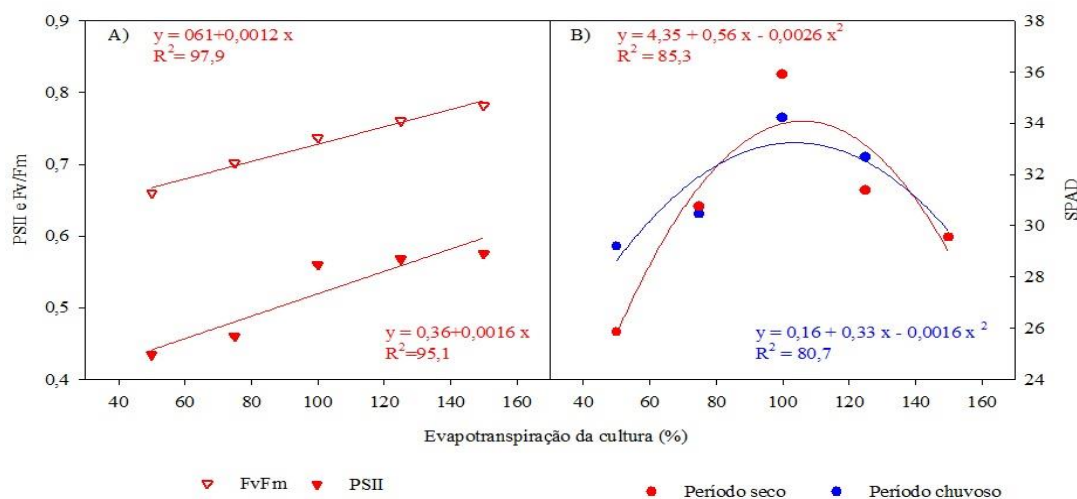
Fonte: AUTOR, 2023.

No período seco, o rendimento quântico efetivo do PSII (Φ PSII) e eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m) apresentaram redução nos menores níveis de irrigação, com Φ PSII e F_v/F_m de 0,44 e 0,60, respectivamente, sendo, 36 e 18% menores em relação à 150% da ET_C (Figura 3.7). Bolhàr-Nordenkamp et al. (1989) relatam que, quando a planta está com seu aparelho fotossintético intacto, a razão F_v/F_m deve variar entre 0,75 e 0,85 enquanto uma queda nesta razão reflete a presença de dano fotoinibitório nos centros de reação do PSII (ocorrido nesta pesquisa em 50% e 75% da ET_C).

O estresse hídrico geralmente resulta em redução na relação F_v/F_m , induzido pelo estresse, indicativo de fotoinibição associada à redução excessiva de PSII (MAXWELL e JHONSON, 2000). Os valores de Φ PSII e F_v/F_m demonstram redução notável nos tratamentos de menor disponibilidade hídrica, dando suporte para a redução da capacidade fotossintética, relacionado ao fechamento estomático devido a menor disponibilidade de água no solo (CHEN et al., 2020). Neste sentido, as respostas do Φ PSII obtidos a partir da fluorescência da clorofila a podem revelar o nível energético de excitação dos pigmentos que dirigem a fotossíntese (GONÇALVES et al., 2010).

Os maiores valores de índice SPAD foram de 33,3 e 34,6 nos tratamentos de 104 e 108% da ET_C , para os períodos chuvoso e seco, respectivamente (Figura 3.7B). Um declínio do índice SPAD é uma característica sensível e facilmente mensurável que poderia ser usada para analisar a tolerância ao estresse (O'NEILL et al., 2006). Por isso, o índice SPAD trata-se de uma boa ferramenta para diagnosticar a integridade do aparato fotossintético de folhas, uma vez que apresenta relação direta com a clorofila que são pigmentos que refletem a cor verde e estão diretamente associadas com o potencial da atividade fotossintética (SABOURY et al., 2021) da cultura, que por sua vez, pode levar ao incremento de produtividade (SILVA et al., 2014).

Figura 3.7. Eficiência quântica efetiva do PSII (Φ PSII), eficiência quântica máxima do PSII (Fv/Fm) (A) e índice SPAD (B) do gergelim cultivado sob diferentes disponibilidades hídricas (%) da ET_C .



Fonte: AUTOR, 2023.

Submetidas a estresses abióticos (e.g., déficit hídrico), as plantas apresentam sintomas de alterações no estado funcional das membranas dos tilacóides dos cloroplastos, que provocam mudanças nas características dos sinais de fluorescência e funcionamento do fotossistema II (PSII) que é um indicador da eficiência no uso da radiação e, consequentemente, na assimilação de CO_2 pelas plantas (FREIRE et al., 2014). Assim como para Φ PSII e Fv/Fm, os maiores valores para o índice SPAD indicam a maior síntese de clorofila e, consequentemente, maior atividade fotossintética da planta (GIL et al., 2002).

5.3.4 Parâmetros de crescimento

Os efeitos das diferentes disponibilidades hídricas sobre os parâmetros de crescimento do gergelim, juntamente com a análise de variância, médias e seus respectivos desvio padrão estão apresentadas nas Tabelas 3.4 e 3.5. No período chuvoso nenhuma das variáveis analisadas apresentaram diferença significativa, já no período seco, a diferença foi observada a partir dos 30 DAS para altura da planta, diâmetro do caule e fitomassa seca total e aos 45 DAS para área foliar e índice de área foliar. A fitomassa seca total ($kg\ ha^{-1}$) foi afetada significativamente pelas diferentes disponibilidades hídricas ($p < 0,01$) para o período seco (período 2), que apresentou maiores valores no final do ciclo para todas as disponibilidades hídricas avaliadas (Figura 3.9E). Na última avaliação (105 DAS) os valores da fitomassa seca total variaram de 6284,24 a

15221,19 kg ha⁻¹ para L1 e L3, respectivamente, com valor máximo 91% superior ao período chuvoso.

Tabela 3.4. Análise de variância dos parâmetros de crescimento do gergelim cultivado sob diferentes lâminas de irrigação, no período de fevereiro a junho de 2022 (período chuvoso) e outubro de 2022 a janeiro de 2022 (período seco)

Quadrados médios - Período Chuvoso					
15 DAS					
FV	GL	Fitomassa seca total (kg ha ⁻¹)	Altura da planta (cm)	Índice de área foliar (m ² m ⁻²)	Diâmetro do caule (mm)
Lâmina de irrigação	4	56,47 ^{ns}	1,40 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,08 ^{ns}
Bloco	3	47,79 ^{ns}	1,16 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,08 ^{ns}
Resíduo	12	25,24	0,96	0,001	0,04
C.V(%)		35,21	10,13	31,23	10,24
30 DAS					
Lâmina de irrigação	4	8238,87 ^{ns}	9,75 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,05 ^{ns}
Bloco	3	5330,48 ^{ns}	11,39 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,03 ^{ns}
Resíduo	12	8330,54	7,55	0,06	0,03
C.V(%)		37,27	13,16	38,28	9,39
45 DAS					
Lâmina de irrigação	4	668169,51 ^{ns}	167,60 ^{ns}	1,55 ^{ns}	3,62 ^{ns}
Bloco	3	252625,02 ^{ns}	194,27 ^{ns}	0,32 ^{ns}	3,91 ^{ns}
Resíduo	12	366689,72	82,77	0,83	2,69
C.V(%)		32,17	14	31,39	15,14
60 DAS					
Lâmina de irrigação	4	491148,23 ^{ns}	98,67 ^{ns}	3,28 ^{ns}	2,87*
Bloco	3	2069362,48 ^{ns}	513,15 ^{ns}	0,77 ^{ns}	3,15 ^{ns}
Resíduo	12	513295,13	159,29	1,17	0,87
C.V(%)		18,91	9,14	27,24	8,12
75 DAS					
Lâmina de irrigação	4	1044404,11 ^{ns}	11,99 ^{ns}	2,38 ^{ns}	2,54 ^{ns}
Bloco	3	3507953,76 ^{ns}	909,48 ^{ns}	2,11 ^{ns}	1,36 ^{ns}
Resíduo	12	5524721,97	174,39	1,55	2,33
C.V(%)		23,46	8,04	29,63	12,9
90 DAS					
Lâmina de irrigação	4	2893469,20 ^{ns}	79,66 ^{ns}	0,39 ^{ns}	1,46 ^{ns}
Bloco	3	7846304,37 ^{ns}	766,77 ^{ns}	2,77 ^{ns}	5,58 ^{ns}

Resíduo	12	3811713,82	133,62	0,53	2,57
C.V(%)		30,13	6,91	22,96	13,21
105 DAS					
Lâmina de irrigação	4	2192752,91 ^{ns}	39,27 ^{ns}	1,13 ^{ns}	3,15 ^{ns}
Bloco	3	7027427,82 ^{ns}	1014,33 ^{ns}	0,49 ^{ns}	2,22 ^{ns}
Resíduo	12	3946516,86	149,84	0,92	2,97
C.V(%)		29,2	6,87	21,57	13,58
Quadrados médios - Período Seco					
15 DAS					
Lâmina de irrigação	4	2,88 ^{ns}	1,42 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,04 ^{ns}
Bloco	3	6,64 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,001 ^{ns}	0,015 ^{ns}
Resíduo	12	1,56	0,45	0,001	0,029
C.V(%)		21,67	10,37	16,77	11,79
30 DAS					
Lâmina de irrigação	4	5566,97**	0,43**	0,005 ^{ns}	1,18**
Bloco	3	279,93 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,002 ^{ns}	0,29 ^{ns}
Resíduo	12	68,06	0,06	0,003	0,18
C.V(%)		7,15	2,1	24,95	7,09
45 DAS					
Lâmina de irrigação	4	1982874,07**	615,22**	5,43**	12,27**
Bloco	3	184321,33 ^{ns}	43,04 ^{ns}	0,45 ^{ns}	2,25 ^{ns}
Resíduo	12	163617,35	51,99	0,55	0,98
C.V(%)		22,92	12,01	23,1	8,96
60 DAS					
Lâmina de irrigação	4	21839246,41**	2567,09**	25,78**	22,72**
Bloco	3	933905,92 ^{ns}	282,24 ^{ns}	1,58 ^{ns}	1,36 ^{ns}
Resíduo	12	909537,69	402,54	3,97	3,24
C.V(%)		18,89	16,43	34,29	14,36
75 DAS					
Lâmina de irrigação	4	50007680,24**	2508,99**	35,22**	12,77**
Bloco	3	2091735,99 ^{ns}	89,48 ^{ns}	2,54 ^{ns}	2,74 ^{ns}
Resíduo	12	1968105,92	177,78	5,81	0,75
C.V(%)		14,54	6,59	31,89	6,44
90 DAS					
Lâmina de irrigação	4	66449839,63**	3698,62**	28,72**	12,23**
Bloco	3	1204118,17 ^{ns}	184,47 ^{ns}	9,16 ^{ns}	4,19 ^{ns}
Resíduo	12	6124743,18	248,84	1,5	1,48
C.V(%)		23,79	7,26	19,8	8,37
105 DAS					

Lâmina de irrigação	4	55151571,83**	3484,49**	4,61*	21,58**
Bloco	3	4601651,09 ^{ns}	255,10 ^{ns}	2,82 ^{ns}	2,46 ^{ns}
Resíduo	12	2168144,41	244,66	1,18	2,27
C.V(%)		14,2	6,83	28,5	9,91

C.V = Coeficiente de variação; GL - Graus de liberdade; ** Significativo ao nível de 0,01 de probabilidade; * significativo ao nível de 0,05 de probabilidade; ns - não significativo pelo teste F ($p < 0,05$).

Tabela 3.5. Valores médios e desvio padrão dos parâmetros de crescimento do gergelim cultivado sob diferentes lâminas de irrigação, no período de fevereiro a junho de 2022 (período chuvoso) e outubro de 2022 a janeiro de 2022 (período seco)

Período Chuvoso				
	FST (kg ha ⁻¹)	AP (cm)	IAF (m ² m ⁻²)	DC (mm)
15 DAS				
L1	11,77(±1,29)	10,39(±1,06)	0,031(±0,01)	1,99(±0,17)
L2	13,96(±7,19)	9,53(±1,12)	0,028(±0,01)	1,82(±0,19)
L3	12,29(±2,32)	8,88(±0,75)	0,03(±0,01)	1,84(±0,28)
L4	12,5(±2,83)	9,55(±1,17)	0,027(±0,01)	2,18(±0,17)
L5	20,83(±9,06)	10,14(±0,84)	0,029(±0,01)	1,94(±0,26)
30 DAS				
L1	191,25(±46,18)	20,21(±2,02)	0,527(±0,25)	2,09(±0,08)
L2	241,77(±21,30)	21,25(±2,58)	0,593(±0,09)	1,88(±0,24)
L3	210,94(±60,90)	19,29(±2,36)	0,652(±0,15)	1,95(±0,12)
L4	296,98(±67,36)	23,38(±2,00)	0,777(±0,20)	2,18(±0,17)
L5	283,44(±166,80)	20,27(±4,62)	0,714(±0,35)	2,00(±0,27)
45 DAS				
L1	1358,74(±618,10)	55,28(±8,37)	2,589(±1,14)	9,5(±1,90)
L2	1681,97(±292,02)	62,76(±2,49)	2,719(±1,24)	10,62(±1,20)
L3	2468,95(±669,46)	72,03(±9,60)	3,876(±0,82)	10,92(±3,01)
L4	1938,33(±436,39)	65,68(±12,17)	3,121(±0,28)	12,16(±0,52)
L5	1963,74(±783,22)	69,27(±14,45)	2,249(±0,27)	11,05(±0,56)
60 DAS				
L1	3679,67(±1020,50)	139,46(±14,36)	2,965(±0,83)	10,38(±0,70)
L2	3867,28(±1381,38)	134,4(±7,77)	3,827(±1,37)	11,27(±1,74)
L3	4306,23(±882,78)	135,84(±23,13)	4,829(±0,79)	12,27(±1,43)
L4	3750,4(±488,45)	146,16(±13,77)	4,992(±1,24)	12,41(±0,78)
L5	3337,28(±393,74)	134,49(±12,60)	3,287(±0,87)	11,12(±0,69)
75 DAS				
L1	4801,65(±971,85)	162,91(±8,61)	3,358(±0,78)	10,87(±0,83)
L2	5587,69(±2155,04)	164,31(±8,76)	4,017(±0,80)	11,4(±1,44)
L3	6117,79(±4252,18)	163,5(±32,89)	4,937(±0,96)	12,73(±2,25)
L4	5494,67(±854,17)	167,21(±16,81)	5,074(±2,13)	12,61(±1,13)
L5	5043,1(±1098,86)	163,31(±9,58)	3,624(±1,27)	11,69(±1,27)

90 DAS				
L1	5416,12(±798,60)	163,69(±10,36)	2,769(±1,07)	11,32(±0,93)
L2	6620,6(±1762,28)	171,69(±6,84)	3,012(±0,88)	12,09(±1,09)
L3	6861,64(±2968,54)	164,25(±27,15)	3,384(±1,35)	12,84(±2,36)
L4	7602,78(±2813,17)	172,44(±15,46)	3,573(±0,89)	12,62(±2,74)
L5	5900,71(±1619,76)	163,88(±13,07)	3,133(±0,59)	11,88(±0,88)
105 DAS				
L1	6232,89(±1259,83)	180,63(±24,27)	2,48(±1,15)	11,83(±0,41)
L2	6654,45(±1191,95)	177,13(±10,17)	2,023(±0,41)	12,94(±1,98)
L3	6999,14(±3368,44)	175,91(±23,88)	1,815(±1,26)	12,87(±1,98)
L4	7980,59(±2451,36)	182,5(±16,99)	3,151(±1,26)	13,98(±2,32)
L5	6154,56(±1565,25)	175,28(±7,89)	2,06(±0,86)	11,88(±0,88)
Período Seco				
	FST (kg ha ⁻¹)	AP (cm)	IAF (m ² m ⁻²)	DC (mm)
15 DAS				
L1	4,62(±0,95)	5,49(±0,88)	0,008(±0,00)	1,61(±0,16)
L2	5,7(±1,35)	5,95(±0,45)	0,013(±0,00)	1,36(±0,10)
L3	9,74(±2,55)	7,29(±0,87)	0,019(±0,00)	1,38(±0,16)
L4	8,64(±1,54)	7,97(±0,69)	0,019(±0,00)	1,58(±0,13)
L5	8,72(±1,20)	7,08(±0,78)	0,018(±0,00)	1,45(±0,19)
30 DAS				
L1	77,08(±9,87)	11,12(±0,17)	0,199(±0,05)	4,51(±0,33)
L2	127,5(±8,79)	15,69(±1,87)	0,336(±0,03)	5,38(±0,29)
L3	299,06(±19,99)	20,68(±1,51)	0,739(±0,06)	7,91(±0,27)
L4	226,67(±28,68)	19,63(±1,35)	0,576(±0,05)	6,99(±0,55)
L5	206,25(±73,49)	20,22(±2,77)	0,519(±0,16)	6,91(±1,31)
45 DAS				
L1	841,14(±247,54)	41,99(±8,04)	1,653(±0,42)	8,21(±1,22)
L2	1258,54(±161,00)	54,93(±4,79)	2,319(±0,47)	10,66(±0,72)
L3	1890,62(±306,82)	60,88(±6,36)	3,645(±0,35)	11,42(±0,79)
L4	2366,03(±634,90)	68,28(±5,07)	4,001(±1,01)	12,32(±1,34)
L5	2469,16(±211,33)	73,99(±5,87)	4,394(±0,66)	12,57(±0,42)
60 DAS				
L1	2125,82(±233,29)	80,51(±5,77)	2,54(±0,28)	8,95(±0,11)
L2	3314,47(±1113,65)	117,28(±23,51)	4,395(±2,13)	11,52(±2,17)
L3	7842,47(±971,48)	144,36(±27,31)	8,986(±1,97)	14,48(±1,42)
L4	6591,22(±1017,97)	130,99(±6,97)	7,527(±2,00)	14,73(±1,92)
L5	5371,12(±392,91)	137,59(±6,23)	5,603(±0,76)	12,99(±0,56)
75 DAS				
L1	5604,98(±1454,23)	169,31(±11,37)	4,819(±1,44)	11,36(±1,11)
L2	7532,47(±423,90)	184,47(±16,38)	5,125(±1,49)	11,99(±1,17)
L3	14837,96(±1086,41)	226,12(±9,07)	10,845(±1,15)	15,77(±0,91)
L4	11079,64(±1794,63)	225,07(±9,38)	10,328(±2,53)	14,38(±0,90)

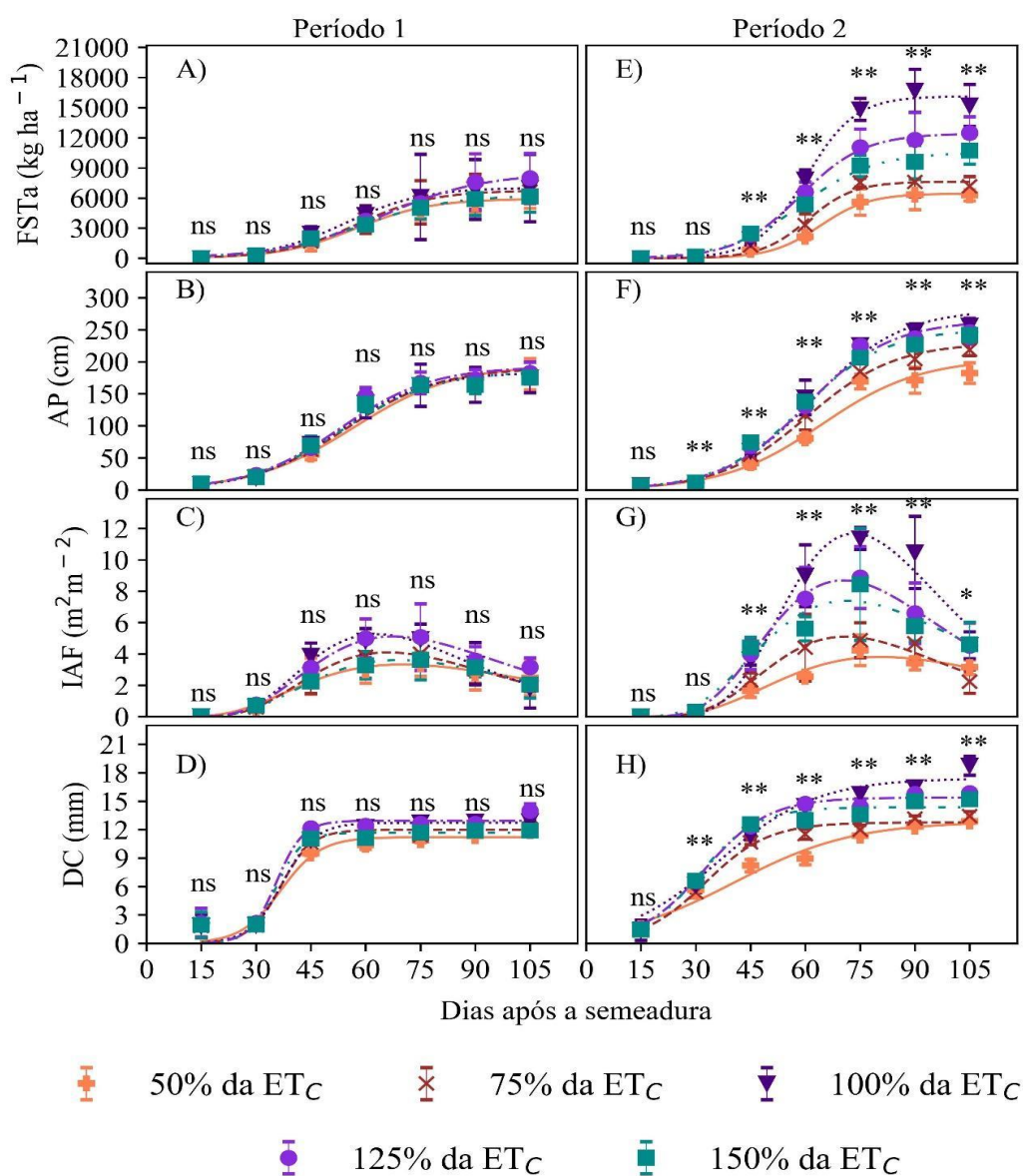
L5	9199,75(±1088,34)	206,44(±5,71)	8,095(±2,73)	13,61(±0,27)
90 DAS				
L1	6336,85(±1505,63)	171,16(±19,95)	3,407(±0,42)	12,34(±0,46)
L2	7601,01(±1486,74)	204,19(±14,75)	4,681(±1,13)	13,16(±1,61)
L3	16678,79(±2154,91)	247,94(±11,55)	10,476(±2,30)	16,48(±1,17)
L4	11817,45(±2716,28)	236,5(±8,52)	6,598(±1,92)	15,78(±1,22)
L5	9579,02(±1666,79)	226,81(±7,96)	5,788(±0,97)	14,98(±1,39)
105 DAS				
L1	6284,25(±559,45)	194,94(±30,13)	3,158(±0,47)	12,87(±1,36)
L2	7156,22(±984,75)	217,88(±22,84)	2,232(±0,74)	13,43(±1,46)
L3	16629,83(±4364,01)	249(±20,00)	4,559(±0,86)	18,74(±1,06)
L4	13266,61(±2035,60)	246,56(±18,33)	4,513(±1,46)	15,85(±1,80)
L5	10701,62(±1316,36)	241,56(±11,13)	4,612(±1,42)	15,19(±0,58)

Dentre as variáveis fisiológicas, a condutância estomática é um parâmetro chave que influencia na produtividade e rendimento potencial para as plantas (OHSUMI et al., 2008; ONO et al., 2013). Para a cultura do arroz, os tratamentos com maior ganho de biomassa tiveram maior condutância estomática (OHSUMI et al., 2008). Resultados semelhantes com alto potencial de rendimento em relação ao alto valor de condutância estomática foram relatados para trigo (FISCHER et al., 1998) e algodão (LU et al., 1994).

A mudança na altura de plantas do gergelim ao longo do período de crescimento está apresentada na Figura 3.8. Como observado, a cultura do gergelim tem crescimento inicial lento e o crescimento mais rápido para todos os tratamentos ocorreu a partir dos 45 DAS, com aumento gradual até os 75 DAS e estabiliza-se até o final do ciclo. Essas observações corroboram as contidas na literatura, entre 30 e 90 dias (AMARAL; SILVA, 2009). Para o período seco, a partir dos 45 DAS houve maior aumento na altura da planta em tratamentos com maior disponibilidade hídrica, em relação à L1 (50% da ET_C), com decréscimo a partir da lâmina de 100% da ET_C . A maior altura da planta na colheita (105 DAS) foi obtida no tratamento L3 (100% da ET_C) com 256,25 cm (Figura 3.8 F), 74 cm maior que no período chuvoso. O aumento da altura de planta está atribuído as condições da umidade do solo, uma vez que, nessas condições a cultura do gergelim não é afetada pelo excesso e déficit hídrico (ver Tabela 3.3) (BASTUG et al., 2021). Consequentemente, a redução da taxa fotossintética é uma das principais vias afetadas pelo déficit hídrico, que acarreta diretamente na redução da altura da planta. Isso pode explicar os maiores valores obtidos em condições irrigadas no período seco, já que o excesso hídrico no período chuvoso provavelmente ocasionou redução na concentração de oxigênio na região radicular e, consequentemente, o fechamento dos estômatos dificultou o crescimento das plantas.

Em outras pesquisas, a altura do gergelim variou entre 80 e 201,6 cm para diferentes variedades e práticas de manejo (VUNARAK et al., 2012; SILVA et al., 2014; ARSLAN et al., 2014).

Figura 3.8. Fitomassa seca total (kg ha^{-1}) (A e E), altura da planta (cm) (B e F), índice de área foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (C e G) e diâmetro do caule (mm) (D e H) do gergelim durante os períodos chuvoso e seco de crescimento, respectivamente. L1:50% da ET_C ; L2:75% da ET_C ; L3:100% da ET_C ; L4:125% da ET_C e L5:150% da ET_C . ** Significativo ao nível de 0,01 de probabilidade; e ns não significativo pelo teste F ($p < 0,05$).



Fonte: AUTOR, 2023.

O maior valor para IAF ($11,36 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$) também foi registrado na L3 (618,87 mm), seguido da L4 (713,67 mm) (Figura 3.8G), enquanto o menor ($4,24 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$) foi obtido na L1 (416,44mm).

Nas menores lâminas de irrigação (déficit hídrico), a primeira resposta da planta é o fechamento dos estômatos para minimizar a perda de água, mas, como consequência, também diminui a taxa de difusão de CO_2 que reduz a concentração intercelular de CO_2 , a fotossíntese e, consequentemente, a redução de área foliar da planta. Corroborando essas informações, Girlani et al. (2022), na região do Irã, registraram redução de 16,6 e 25,2% em relação ao maior IAF sob moderado e elevado déficit hídrico, respectivamente, para a cultura do gergelim. O mesmo comportamento para a cultura do gergelim foi obtido por Saboury et al. (2021) em região Semiárida do Irã que constatou redução do IAF superior à 50% da ET_C em relação à irrigação plena. Nas maiores lâminas de irrigação, sob condições de excesso de água, a planta reduz a absorção de água pela redução nos níveis de O_2 disponíveis. Isso pode ser ocasionado pela baixa difusão do oxigênio na água e pela diminuição da aeração das raízes, o que causa restrição na absorção de água pelas plantas (DALMOLIN et al., 2012; OLIVEIRA; GUALTIERI, 2017). O diâmetro do caule foi afetado significativamente pelas diferentes disponibilidades hídricas ($p < 0,01$) para o período seco. Semelhante ao comportamento da altura da planta, os valores de diâmetro do caule têm crescimento inicial lento, e a partir dos 40 DAS aumenta rapidamente e estabiliza-se até o final do ciclo. Na última avaliação (105 DAS) os valores de diâmetro do caule variaram de 12,86 a 18,74 mm no período seco, para as lâminas com menor disponibilidade hídrica (50% da ET_C) e a reposição de 100% da ET_C , respectivamente (Figura 3.9H). El Naim e Ahmed (2010) encontraram resultados que corroboram aos encontrados no presente trabalho, com diâmetros do caule que variaram entre 11,7 e 18,6 mm.

5.3.5 Parâmetros produtivos

Os resultados da análise de variância, médias e desvio padrão de algumas variáveis relacionadas ao rendimento do gergelim para as diferentes disponibilidades de água no solo estão apresentados na Tabela 3.6. Para ambos os períodos avaliados, chuvoso e seco, as variáveis peso de 1000 grãos, número de grãos por cápsula e massa seca dos grãos não apresentaram diferença significativa. A produtividade, a eficiência do uso da água e o número de cápsulas por planta apresentaram diferença significativa ($p < 0,01$) para o período seco. A produtividade média da cultura durante o período chuvoso foi de 2592 kg ha⁻¹.

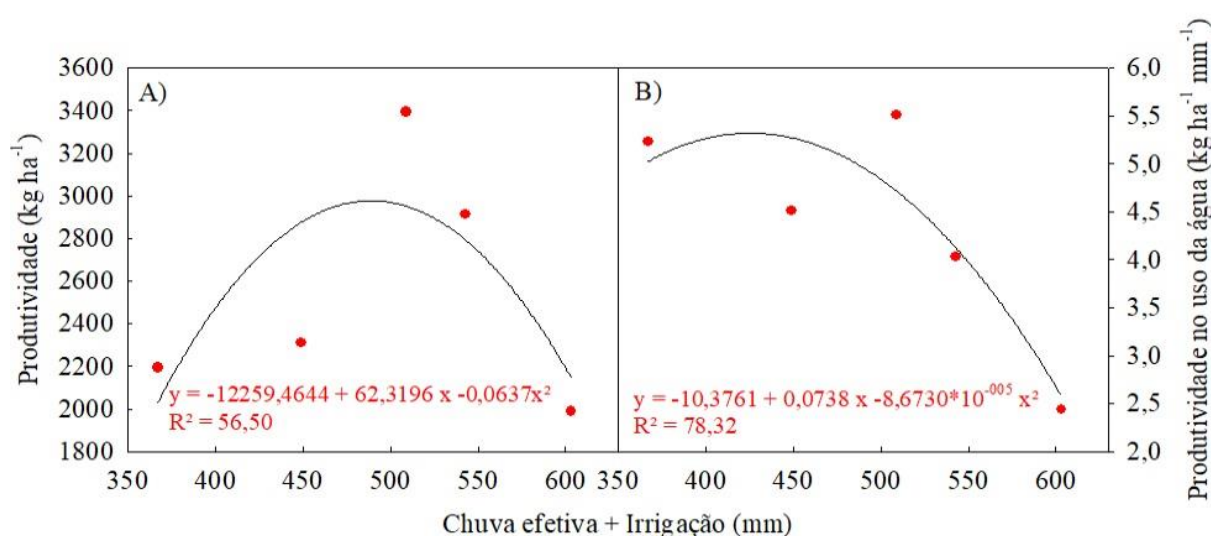
Tabela 3.6. Análise de variância, médias e desvio padrão dos parâmetros produtivos obtido na colheita do gergelim cultivado sob diferentes lâminas de irrigação na região de Rio Largo – AL, Brasil, no período de fevereiro a junho de 2021 (ciclo 1 – período chuvoso) e outubro de 2021 a janeiro de 2022 (ciclo 2 – período chuvoso)

Quadrados médios							
Período chuvoso							
F.V	G. L	Prod. (kg ha ⁻¹)	EUA (kg ha mm ⁻¹)	Peso de 1000 grãos (g)	Nº de cápsulas por planta	Nº de grãos por cápsula	Massa seca de grãos (%)
Lâmina de irrigação	4	654219,49 ^{ns}	0,74 ^{ns}	0,04 ^{ns}	327,48 ^{ns}	33,11 ^{ns}	0,14 ^{ns}
Bloco	3	335970,55 ^{ns}	0,43 ^{ns}	0,05 ^{ns}	173,26 ^{ns}	11,17 ^{ns}	0,05 ^{ns}
Linear	1	0,61 ^{ns}	0,06 ^{ns}	1,01 ^{ns}	1,34 ^{ns}	0,69 ^{ns}	1,09 ^{ns}
Quadrática	1	0,17 ^{ns}	1,90 ^{ns}	1,26 ^{ns}	0,51 ^{ns}	1,02 ^{ns}	2,79 ^{ns}
Resíduo	12	326021,78	0,39	0,05	442,99	59,78	0,04
C.V(%)		23,73	23,79	7,17	26,78	10,36	0,23
Médias							
L1		1961,03(±86,39)	2,17(±0,09)	3,17(±0,10)	66,73(±9,81)	74,25(±8,04)	93,27(±0,20)
L2		2346,32(±198,28)	2,53(±0,21)	3,21(±0,07)	72,05(±6,98)	74,88(±4,64)	93,75(±0,21)
L3		3060,77(±895,13)	3,20(±0,93)	3,22(±0,04)	87,60(±14,18)	79,13(±3,79)	93,72(±0,12)
L4		2746,39(±509,93)	2,80(±0,52)	3,22(±0,06)	80,30(±12,38)	73,50(±6,27)	93,53(±0,12)
L5		2839,14(±382,39)	2,83(±0,38)	2,99(±0,50)	86,33(±11,11)	71,25(±6,90)	93,56(±0,23)
Quadrados médios							
Período seco							
F.V	G. L	Prod. (kg ha ⁻¹)	PUA (kg ha mm ⁻¹)	Peso de 1000 grãos (g)	Nº de cápsulas por planta	Nº de grãos por cápsula	Massa seca de grãos (%)
Lâmina de irrigação	4	1132538,05**	3,41**	0,03 ^{ns}	1059,85**	19,02 ^{ns}	0,49 ^{ns}
Bloco	3	110742,78 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,02 ^{ns}	96,03 ^{ns}	30,38 ^{ns}	0,16 ^{ns}
Linear	1	1,40 ^{ns}	3,43 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,14 ^{ns}	1,17 ^{ns}	2,38 ^{ns}
Quadrática	1	4,87**	3,37**	0,36 ^{ns}	4,54**	1,14 ^{ns}	1,19 ^{ns}
Resíduo	12	141925,44	0,51	0,03	155,39	22,49	0,24
C.V(%)		15,51	17,71	5,31	15,72	5,78	0,51
Médias							
L1		2326,16(±531,94)	5,52(±1,26)	3,22(±0,19)	67,72(±13,28)	79,92(±3,29)	95,09(±0,34)
L2		2447,22(±212,29)	4,75(±0,41)	3,05(±0,13)	77,27(±5,35)	80,90(±5,74)	94,81(±0,31)
L3		3596,26(±505,47)	5,81(±0,82)	3,24(±0,12)	105,72(±13,03)	84,1(±2,49)	95,28(±0,34)
L4		3086,97(±488,77)	4,31(±0,68)	3,21(±0,07)	81,22(±11,11)	81,65(±5,73)	95,29(±0,22)
L5		2108,68(±294,13)	2,59(±0,36)	3,09(±0,17)	64,47(±6,32)	83,8(±0,83)	95,78(±0,67)

C.V = Coeficiente de variação; GL - Graus de liberdade; ** Significativo ao nível de 0,01 de probabilidade; * significativo ao nível de 0,05 de probabilidade; ns - não significativo pelo teste F ($p < 0,05$).

A maior produtividade do gergelim ($3.114,5 \text{ kg ha}^{-1}$) no período seco foi obtida com a aplicação de 622 mm (101% da ET_C), 20% superior à média do período chuvoso. No período chuvoso, o excesso de água variou de 490 mm a 558 mm para L1 e L5, respectivamente. A menor produtividade (1.931 kg ha^{-1}) foi obtida com a aplicação da lâmina de 50% da ET_C (Figura 3.9A). Apesar do gergelim ser uma cultura resistente à seca, foi observado que sua produtividade aumentou significativamente a depender da lâmina de irrigação.

Figura 3.9. Produtividade de grãos (kg ha^{-1}) e produtividade do uso da água (PUA) ($\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) do gergelim durante o período seco sob diferentes disponibilidades hídrica acumulada (mm).



Fonte: AUTOR, 2023.

O comportamento da produtividade foi semelhante aos componentes de crescimento como altura da planta e número de cápsulas por planta, os quais apresentaram acréscimo produtivo com posterior decréscimo nos tratamentos que apresentaram maior disponibilidade hídrica. A redução que o estresse hídrico causa, tanto pelo déficit como pelo excesso hídrico na fisiologia (condutância estomática e fotossíntese) e no crescimento (fitomassa, altura de planta, IAF) interferem na resposta final que a produtividade do gergelim, o que também foi relatado em outras pesquisas (HAILU et al., 2018; EBRAHIMIAN et al., 2019; GHOLINEZHAD et al., 2020; NASSIRI-MAHALLAT; JAHAN, 2020; BASTUG et al., 2021; GLOAGUEN et al., 2019).

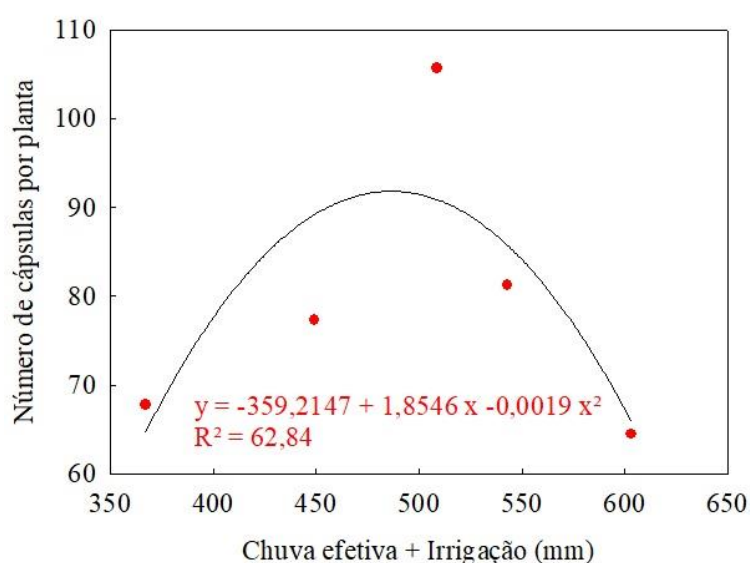
Para a eficiência no uso da água (EUA) as médias obtidas foram: 4,39; 4,22; 5,02; 4,06 e $2,52 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ (Figura 3.9B). De maneira geral, o comportamento da EUA tendeu a decrescer com o aumento da disponibilidade de água no solo, entretanto, a lâmina de 614,6 mm (100% da ET_C) apresentou produtividade média com valor superior à média das demais lâminas, que

ocasiona maior relação rendimento/evapotranspiração que os demais tratamentos. De acordo com Bastug et al. (2021), pode-se interpretar que um certo nível (50%) do estresse hídrico leva a um uso mais eficiente da água em cultivares de gergelim ($3,4\text{--}3,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), que tem relação direta com sua condutância estomática.

Corroborando as informações do presente trabalho, Kassab et al. (2005) ao comparar três sistemas de irrigação, com superfície controlada ($0,530 \text{ kg m}^{-3}$), gotejamento subsuperficial ($0,835 \text{ kg m}^{-3}$) e irrigação por gotejamento superficial ($0,771 \text{ kg m}^{-3}$) para a cultura do gergelim, obtiveram o maior valor de EUA dos tratamentos irrigados no nível de 100% de evapotranspiração. Da mesma forma, Kassab et al. (2012) encontraram os maiores valores de EUA no rendimento de sementes e óleo de gergelim a partir de tratamentos de irrigação no nível de 100% da ET_C . Para ambos os trabalhos de Kassab et al. (2005) e Kassab et al. (2012) a EUA foi calculada pela relação rendimento/irrigação.

Como pode ser visto na Tabela 3.5, para o número de cápsulas obtidas na colheita, as diferenças entre os tratamentos de irrigação no período seco ($p < 0,01$) foram estatisticamente significativas. O maior número de cápsulas (95 unidades) foi obtido com a aplicação de 615 mm (100% da ET_C). Por outro lado, os menores números de cápsulas (64 e 62 unidades) foram obtidos na menor e maior lâmina de irrigação, 50 e 150% da ET_C , respectivamente, semelhante ao que aconteceu com outras variáveis, em que tanto a falta como o excesso de água prejudicaram a produção de cápsulas de gergelim (Figura 3.10).

Figura 3.10. Número de cápsulas por planta do gergelim durante o período seco sob diferentes disponibilidades hídricas no solo (mm).



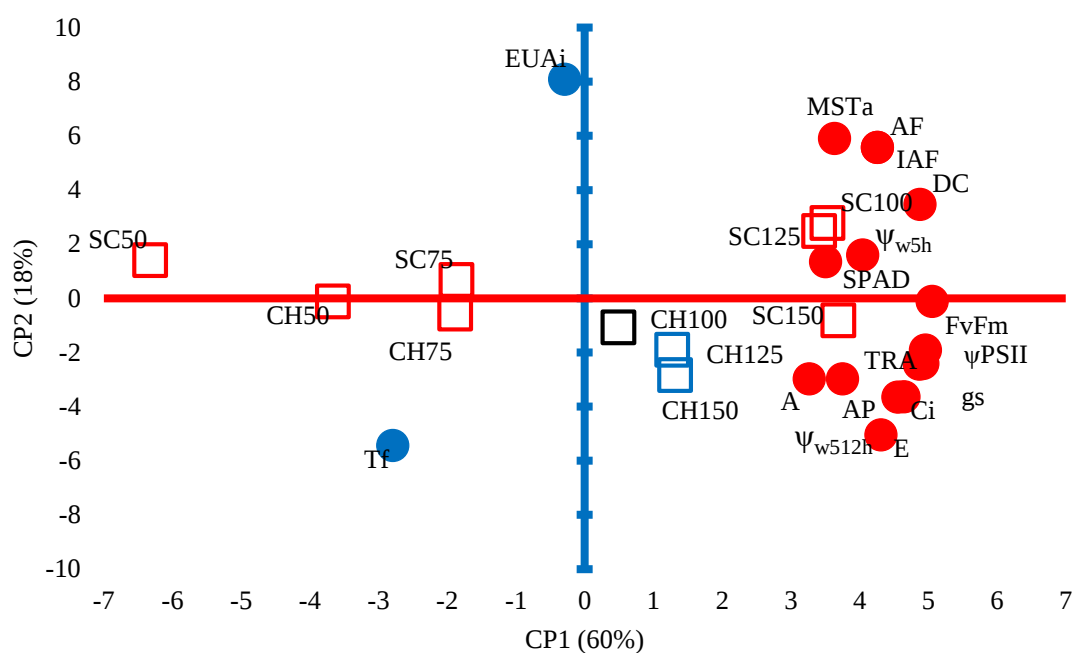
Fonte: AUTOR, 2023.

A cultura do gergelim caracteriza-se por apresentar um fruto (cápsula) por axila foliar, com isso, a altura da planta afeta o número de cápsulas por planta, conforme também mencionado por Loggale (2018). Estudos anteriores mostraram que o número de cápsulas foi significativamente afetado por diferentes níveis de irrigação (HASSANZADEH et al., 2009a; KASSAB et al., 2012; UMAR et al., 2015), intervalos de irrigação (MEMAR; MOJADDAM, 2015) e regimes de irrigação (LOGGALE, 2018).

5.3.6 Análise multivariada

A Figura 3.11 representa a análise de componentes principais (PCA) entre as variáveis de crescimento e fisiológicas do gergelim sob diferentes níveis de irrigação. Dois componentes principais (CP) foram suficientes para explicar 78% da variabilidade total dos dados originais. A PCA revelou que as variáveis de crescimento estiveram associadas à maioria das variáveis fisiológicas, exceto EUAi e Tf. Porém, a relação entre essas variáveis é dependente do tratamento aplicado (disponibilidade hídrica). Na CP1, responsável por explicar 60% da variação total, mostrou uma correlação positiva entre as variáveis, em especial, a TRA, Φ PSII, Fv/Fm e gs, sendo esta última a que apresentou maior peso. A CP1 esteve associada aos níveis de 100, 125 e 150% da ET_C no período chuvoso e seco, que mostra correlação positiva com a maioria das variáveis analisadas. A gs é a primeira estratégia da planta ao déficit hídrico (KAPOOR et al., 2020) e através dela vai desencadear as consequências nas demais variáveis. A MSTa é uma das principais respostas da planta ao déficit hídrico, já que as demais variáveis interagem diretamente no ganho de biomassa. Euba Neto et al. (2016) também encontraram correlação significativa entre as variáveis de crescimento do gergelim. Quando a cultura do gergelim é cultivada em ambiente com adequada disponibilidade hídrica, elas tendem a apresentar melhor desempenho em seu crescimento e fisiologia (GHOLINEZHAD et al., 2020; BASTUG et al., 2021; GLOAGUEN et al., 2019).

Figura 3.11. Análise de componentes principais (PCA) das variáveis de fisiológicas e de crescimento submetidas à diferentes níveis de irrigação (50, 75, 100, 125 e 150% da evapotranspiração da cultura - ET_C). Abreviaturas: AP- altura da planta; DC- diâmetro do caule; AF- área foliar; IAF- índice de área foliar; MSTa- massa seca total; SPAD- índice SPAD; Φ PSII eficiência quântica do PSII; Fv/Fm- eficiência fotoquímica do fotossistema II; A- fotossíntese líquida; Tf- temperatura foliar; E- taxa transpiratória; EUAi- eficiência instantânea do uso da água; TRA- teor relativo de água na folha; ψ_{w5h} - potencial hídrico foliar na antemanhã; ψ_{w512h} - potencial hídrico foliar ao meio-dia; Ci- concentração intercelular de CO_2 e gs- condutância estomática; CH: período chuvoso; SC: Período seco.



Fonte: AUTOR, 2023.

A CP2 explicou 18% variabilidade dos dados, sendo composta pelas variáveis EUAi e Tf, assim como pelos níveis de irrigação de 50 e 75% da ET_c . Logo, nota-se que para maximizar a eficiência do uso da água, a cultura pode ser exposta a um certo nível de estresse hídrico durante determinado período ou ao longo de toda estação de crescimento (BASTUG et al., 2021). A correlação negativa da EUAi e Tf indica que a maior eficiência no uso da água pela cultura pode ser explicada pela sua habilidade em reduzir a Tf mesmo em condições de restrição hídrica (LUQUET et al., 2003; JONES, 2004).

5.4 CONCLUSÕES

A disponibilidade de água no solo afeta o crescimento, a fisiologia e a produtividade do gergelim no cultivo irrigado em períodos chuvoso e seco na região de Rio Largo- AL. Sendo que, as maiores produtividades são alcançadas na estação seca, quando realizado irrigação para atender 100% da ET_c , em função da maior disponibilidade energética que proporciona maiores valores de gs e incrementos de matéria seca.

REFERENCIAS

- ADDINSOFT. 2020. **XLSTAT statistical and data analysis solution**. Boston, USA. <https://www.xlstat.com>
- ALLEN, R. G.; PEREIRA L. S.; RAES D.; SMITH M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food Agriculture Organization of the United Nations: v. 301, 1998
- AMARAL, J. A. B. DO; SILVA, M. T. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do gergelim por manejo de irrigação. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, v.12, p.25-33, 2009
- AOAC. Ofcal Methods of Analysis of the Association of Analytical Chemists, (15th ed). **Association of Analytical Chemists**, v. 837, p.999–1000, 1990
- ARRIEL, N.H.C., BELTRÃO, N.E.de.M., FIRMINO, P.de.T. EMBRAPA Informação Tecnológica, 2009. Gergelim: o produtor pergunta, a Embrapa responde.
- ARSLAN, H.; HATİPOĞLU, H.; KARAKUS, M. Şanlıurfa yöresinde tarımı yapılan susam genotiplerinden seçilen bazı hatların ikinci ürün koşullarında verim ve verim unsurlarının belirlenmesi. **Turk J Agric Res**, v.1, p.109–116, 2014
- BASTUG, R.; KARACA, C.; BUYUKTAS, D.; AYDINSAKIR, K.; DINC, N. The effects of deficit irrigation practices on evapotranspiration, yield and quality characteristics of two sesame varieties (*Sesamum indicum* L.) grown in lysimeters under the Mediterranean climate conditions. **Irrigation Science**, v. 1, 2021
- BOLHÀR-NORDENKAMPF, H. R.; LONG, S. P.; BAKER, N. R.; ÖQUIST, G.; SCHREIDER, U.; LECHNER E. G. Chlorophyll fluorescence as probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: A review of current instrument. **Functional Ecology**, v.3, p.497- 514, 1989
- CARDIM, A. H. Caracterização da estação de cultivo em Alagoas: análise temporal e espacial. Maceió, 2003. 120 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, 2003
- CARVALHO, A.A.; MONTENEGRO, A.A.; SILVA, H.P.; LOPES, I.; MORAES, J.E.F.; SILVA, T.G.F. Trends of rainfall and temprature in Northeast Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e ambiental**, v. 24, n.1, p.15-23, 2020
- CAVALCANTI, F. J. A. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. 3. ed. Recife, PE: IPA, 2008. 212 p.
- CHEN, X.; ZHAO, P.; OUYANG, L.; ZHU, L.; NI, G.; SCHÄFER, K.V. Wholeplant water hydraulic integrity to predict drought-induced *Eucalyptus urophylla* mortality under drought stress. **For Ecol Manag**, v.468, 2020
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Boletim da safra de grãos: sexto levantamento da safra 2021/2022

DALMOLIN, A. C.; DALMAGRO, H. J.; LOBO, F. A.; ANTUNES JUNIOR, M. Z.; ORTÍZ, C. E. R.; VOURLITIS, G. L. Effects of flooding and shading on growth and gas exchange of *Vochysia divergens* Pohl (Vochysiaceae) of invasive species in the Brazilian Pantanal. **Brazilian J. Plant Physiology**, v.24, p.75–84, 2012

DERVIŞS, O. (1986) Çukurova koşullarında buğdaydan sonra ikinci ürün susamin su tüketimi- Rapor No: 67. Tarsus

DIAS, A. S.; LIMA, G. S.; GHEYI, H. R.; NOBRE, R. G.; FERNANDES, P. D.; SILVA, F.A. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica do gergelim sob estresse salino e adubação com nitrato-amônio. **Irriga**, v. 23, n. 2, p. 220-234, 2018

EBRAHIMIAN, E.; SEYYEDI, S. M.; BYBORDI, A.; DAMALAS, C. A. Seed yield and oil quality of sunflower, safflower, and sesame under different levels of irrigation water availability. **Agricultural Water Management**, v. 218, 2019

EL NAIM, A.M.; AHMED, M.F. Effect of irrigation on vegetative growth, oil yield and protein content of two sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars. **Research Journal of Agriculture and Biological Sciences**, V.6, N. 5, p. 630–653,2010

ENDRES, L, SANTOS, C.M.; SOUZA, G.V.; MENOSSE, SANTOS, J.C.M. Morphological changes recorded in different phenophases o sugarcane plants subjected to water stress in tropical field conditions. **Aust J Crop Sci**, v.12(7), p.1041-1050, 2018

EUBA NETO, M.; PEREIRA, W.E.; SOUTO,J.S.; ARRIEL, N.H.C. Growth and productivity of sesame in entisol as a function of organic and mineral fertilization. **Rev. Ceres**, v. 63, n.4, 2016

FERREIRA, D. F. **Sisvar: a computer statistical analysis system**. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

FERREIRA, V.M.; ANDRADE, J.R.; SANTOS, C.M.; MAIA JÚNIOR, S.O.; ARAÚJO NETO, J.C.; SILVA, A.F.V.M.; BEZERRA, L.T.; ENDRES, L. Physiological plasticity in eucalyptus clones in the vegetative stage contributes to drought tolerance. **Journal of Forestry Research**, 2022

FISCHER, R. A.; REES, D.; SAYRE, Z.M.; LU, A.G.; CONDON, A.; SAAVEDRA, L. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies. **Crop Sci**, v.38, p.1467–1475,1998

FREIRE, J.L.O.; DIAS, T.J.; CAVALCANTE, L.F.; FERNANDES, P.D.; LIMA NETO, A.J. Rendimento quântico e trocas gasosas em maracujazeiro amarelo sob salinidade hídrica, biofertilização e cobertura morta. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 1, p. 82-91, 2014

GHARBY, S.; HARHAR, H.; BOUZOUBA, Z.; ASDADI, A.; EL YADINI, A.; CHARROUF, Z. Chemical characterization and oxidative stability of seeds and oil of sesame grown in Morocco. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.16, n.2, p.105–111, 2017

GHOLAMHOSEINI, M. Evaluation of sesame genotypes for agronomic traits and stress indices grown under different irrigation treatments. **Agronomy Journal**, 112, 1794–1804, 2020

GHOLINEZHAD, E.; DARVISHZADEH, R.; MOGHADDAM, S.S.; POPOVIC-DJORDJEVIC, J. Effect of mycorrhizal inoculation in reducing water stress in sesame (*Sesamum indicum* L.): The assessment of agrobiochemical traits and enzymatic antioxidant activity. **Agricultural Water Management**, v.238, 2020

GIL, P. T., FONTES, P. C. R., CECON, P. R. AND FERREIRA, F. A. Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. **Horticultura Brasileira**, v.20, p.611-615, 2002

GILANI, A.; GHOLAMI, A.; ABBASDOKHT, H.; TABARI, Z.T. Evaluation of Superabsorbent Polymer on Leaf Area Index, Relative Leaf Water Content and Growth Rate of Sesame under Water Deficit Stress Condition. **Chem. Proc**, v.4, 2022

GLOAGUEN, R. M.; ROWLAND, D. L.; BENNETT, J.; HOCHMUTH, G.; LANGHAM, D.R.; BRYM, T. Root Life History of Non-dehiscent Sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars and the 2 relationship with Canopy Development, **Field crops research**, v.241,2019

GONÇALVES, E.R.; FERREIRA, V.M.; SILVA, J.V.; ENDRES, L. BARBOSA, T.P.; DUARTE, W.G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.378–386, 2010

GRILO JÚNIOR, J. A. S.; AZEVEDO, P. V. DE. Crescimento, desenvolvimento e produtividade do gergelim 'BRS Seda' na agrovila de Canudos, em Ceará Mirim (RN). **Revista Holos**, v.2, p.19-33, 2013

HAILU, E. K.; URGU, Y. D.; SORI, N. A.; BORENA, F. R.; TUFA, K. N. Sesame Yield Response to Deficit Irrigation and Water Application Techniques in Irrigated Agriculture, Ethiopia. **International Journal of Agronomy**, v. 1, 2018

HASSANZADEH, M.; EBADI, A.; PANAHYAN-E-KIVI, M.; ESHGHI, A.G.; JAMAATI E SOMARIN, S.H.; SAEIDI, M.; MAHMOODABAD, Z. Evaluation of drought stress on relative water content and chlorophyll content of sesame (*Sesamum indicum* L.) genotypes at early flowering stage. **Res J Environ Sci**, v.3, p.245–350, 2009a

HASSANZADEH, M.; EBADI, A.; PANAHYAN-E-KIVI, M.; ESHGHI, A.G.; JAMAATI E SOMARIN, S.H.; SAEIDI, M.; GHOLIPOURI, A. Investigation of water stress on yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.) in Moghan region. **Res J Environ Sci**, v.3, p.239–244, 2009b

HEIDARI, M.; GALAVI, M.; HASSANI, M. Effect of sulfur and iron fertilizers on yield, yield components and nutrient uptake in sesame (*Sesamum indicum* L.) under water stress. **African Journal of Biotechnology**, v.10, n.44, p.8816-8822, 2011. <https://doi.org/10.5897/AJB11.854>

JARDIM, A. M. R. F., DA SILVA, M. V., SILVA, A. R., DOS SANTOS, A., PANDORFI, H., DE OLIVEIRA-JUNIOR, J. F., SILVA, T. G. F. Spatiotemporal climatic analysis in Pernambuco state, Northeast Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v.223, 2021

JONES, H.G. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. **Adv. Bot. Res.**v. 41, p. 107–163, 2004

KAISER, H.F., 1960. The application of electronic computers to factor analysis. Educational and psychological measurement. 20(1), 141–151

KAPOOR, D.; BHARDWAJ, S.; LANDI, M.; SHARMA, A.; RAMAKRISHNAN, M.; SHARMA, A. The impact of drought in plant metabolism: how to exploit tolerance mechanisms to increase crop production. **Appl Sci**, v. 10, 2020.

KASSAB, O.; EL-NOEMANI, A.A.; EL-ZEINY, H.A. Influence of some irrigation systems and water regimes on growth and yield of sesame plants. **J Agron**, v.4, p.220–224,2005

KASSAB, O.M.; MEHANNA, H.M.; ABOELILL, A. Drought iMPact on growth and yield of some sesame varieties. **J Appl Sci Res**, v. 8, p.4544–4551,2012

KAYAK, N.; KAL, U.; DAL, Y.; YAVUZ, D.; SEYMEN, M. Do Proline and Glycine Betaine Mitigate the Adverse Effects of Water Stress in Spinach?. **Gesunde Pflanzen**, v. 75, p. 97-113, 2023.

KHORAMI, A.M.; SINAKI, J.M.; DEHAGHI, M.A.; REZVAN, S.; DAMAVANDI, A. Sesame (*Sesame indicum* L.) biochemical and physiological responses as affected by applying chemical, biological, and nano-fertilizers in field water stress conditions. **Journal of plant nutrition**, v. 43, n. 3, p. 456-475, 2020.

LARCHER, W. (2003). Physiological plant ecology.

LOGGALE, L.B. Performance of two sesame cultivars as influenced by supplemental irrigation at Abu Naama. **IOSR J Agric Vet Sci** v.11, p.6–11, 2018.

LOURENÇO, E.R.C.; AZEVEDO, P.V.; PEREIRA, A.R.; BEZERRA, J.R.C.; SABOYA, L.M.F.; ZONTA, J.H. Necessidades hídricas da cultura do Gergelim na região da Chapada do Apodí, Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.11, n.4, p.1275-1289,2018

LÜ, X.-T., DIJKSTRA, F. A., KONG, D.-L., WANG, Z.-W., & HAN, X.-G. Plant nitrogen uptake drives responses of productivity to nitrogen and water addition in a grassland. **Scientific Reports**, v.4, 2014

LU, Z.; RADIN J.W.; TURCOTTE, E.L.; PERCY, R. High yields in advanced lines of pima cotton are associated with higher stomatal conductance, reduced leaf area and lower leaf temperature. **Physiol Plant**, v.92, p.266–272,1994

- LUQUET, D.; BEGUE, A.; VIDAL, A.; CLOUVEL, P.; DAUZAT, J.; OLIOSO, A.; GU, X.F.; TAO, Y. Using multidirectional thermography to characterize water status of cotton. **Remote Sens. Environ**, v.84, p.411–421, 2003
- MAHDY, R.E.; GABER, D.A.; HASHEM, M.; ALAMRI, S.; MAHDY, E.E. Improving Sesame (*Sesamum indicum* L.) Seed Yield through Selection under Infection of *Fusarium oxysporum* f. sp. *Sesami*. **Plants**, v.11, 2022
- MASHILO, J., ODINDO, A. O., SHIMELIS, H. A., MUSENGE, P., TEFAY, S. Z., & MAGWAZA, L. S. Drought tolerance of selected bottle gourd [*Lagenaria siceraria* (Molina) Standl.] landraces assessed by leaf gas exchange and photosynthetic efficiency. **Plant Physiology and Biochemistry**, 120, 75–87, 2017
- MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence - a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 345, p. 659-668, 2000
- MEMAR, M.R.; MOJADDAM, M. The effect of irrigation intervals and different amounts of super absorption yield and yield components of sesame in Hamidiyeh weather conditions. **Indian J Fundam Appl Life Sci**, v.5, p.179–186, 2015
- MESQUITA, J. B. R. DE; AZEVEDO, B. M. DE; CAMPELO, A. R.; FERNANDES, C. N. V.; VIANA, T. V. DE A. Crescimento e produtividade da cultura do gergelim (*Sesamum indicum* L.) sob diferentes níveis de irrigação. **Irriga**, v.18, p.364-375, 2013
- MOLAEI, P.; EBADI, A.; NAMVAR, A.; BEJANDI, T.K. Water relation, solute accumulation and cell membrane injury in sesame (*Sesamum indicum* L.) cultivars subjected to water stress. **Ann Biol Res**, v.3, p.1833–1838, 2012
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, p.1-10, 2002
- MUNITZ, S.; SCHWARTZ, A.; NETZER, Y. Water consumption, crop coefficient and leaf area relations of a *Vitis vinifera* cv. ‘Cabernet Sauvignon’ vineyard. **Agricultural Water management**, v. 219, 2019
- NASSIRI-MAHALLATI, M.; JAHAN, M. Using the Aqua Crop model to simulate sesame performance in response to superabsorbent polymer and humic acid application under limited irrigation conditions. **International Journal of Biometeorology**, v.64, p. 2105–2117, 2020
- NORWOOD, C. A., & DUMLER, T. J. Transition to dryland agriculture: Limited irrigation vs. dryland corn. **Agronomy Journal**, 94, 310– 320, 2002
- O’NEILL, P.M.; SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S. Use of chlorophyll fluorescence assessments to differentiate corn hybrid response to variable water conditions. **Crop Sci**, v.46, p.681-687, 2006

OCHELTREE, T.W.; NIPPERT, J.B.; PRASAD, P.V.V. Stomatal responses to changes in vapor pressure deficit reflect tissue-specific differences in hydraulic conductance. **Plant Cell Environ**, v.37, p.132–139, 2014

OHSUMI, A.; HAMASAKI, A.; NAKAGAWA, H.; HOMMA, K.; HORIE, T.; SHIRAIWA, T. Response of leaf photosynthesis to vapor pressure difference in rice (*Oryza sativa*, L) varieties in relation to stomatal and leaf internal conductance. **Plant Production Science**, v. 11, p. 184-191, 2008

OLIVEIRA, A. K. M. D., GUALTIERI, S. C. J. Trocas gasosas e grau de tolerância ao estresse hídrico induzido em plantas jovens de *Tabebuia aurea* (Paratudo) submetidas a alagamento. **Ciência Florestal**, v.27, p.181-191, 2017

ONO, K.; MARUYAMA, A.; KUWAGATA, T.; MANO, M.; TAKIMOTO, T.; HAYASHI, K.; HASEGAWA, T. Canopy-scale relationships between stomatal conductance and photosynthesis in irrigated rice. **Global Change Biology**, v.19, n.7, 2013

PABUAYON, I. L.; SINGH, S.; RITCHIE, G. Effects of deficit irrigation on yield and oil content of sesame, safflower, and sunflower. **Crop ecology and physiology**, v.3, n.5, p.3091-3098, 2019

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C.evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

R CORE TEAM, 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <<http://www.R-project.org/>>.

RIBEIRO, R. M. P.; ALBUQUERQUE, J. R. T.; SANTOS, M. G.; BARROS JÚNIOR, A. P.; GRANGEIRO, L. C.; SILVEIRA, L. M. Growth dynamics of sesame cultivars. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 4, p. 1062-1068, 2018

SABINO, F.C.; SOUZA, L.S.B.; SOUZA, M.A.G.; BARROS, J.P.A.; LUCENA, L.R.R.; JARDIM, A.M.R.F.; ROCHA, A.K.P.; SILVA, T.G.F.S. Morphological characteristics, biomass accumulation and gas exchange of an important species native for restoration in Semi-arid Brazilian areas affected by salt and water stress. **Plant Stress**, v. 2, 2021

SABOURY, A.; GHOLAMHOSEINI, M.; BAZRAFSHAN, F.; HABIBZADEH, F.; AMIRI, B. Interaction of irrigation and nitrogen fertilization on yield and input use efficiency of sesame cultivars. **Agronomy Journal**, v.113, p.5133–5142, 2021

SALES, C.R.G.; RIBEIRO, R.V.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, R.S.; DOVIS, V.L.; LAGÔA, A.M.M.A. Trocas gasosas e balanço de carboidratos em plantas de cana-de-açúcar sob condições de estresses radiculares. **Bragantia**, v. 71, p. 319-327, 2012

SAMAN, O.; OZTURK, O. İkinci ürün susamda farklı ekim sıklıklarının verim ve verim unsurları üzerine etkileri. **Tarım Bilim Araştırma Derg**, v.5, p.118–123, 2012

SEPASKHAH, A.R.; ANDAM, M. Crop coefficient of sesame in a semiarid region of I.R. Iran. **Agricultural Water Management**, v. 49, p.51–63, 2001

SHUBHRA, K.; DAYAL, J.; GOSWAMI, G.L.; MUNJAL, R. Effects of water deficit on oil of *Calendula* aerial parts. **Biol Plant**, v.48, p.445–448,2014

SIDDIQUE, M.R.B.; HAMID, A.; ISLAM, M.S. Drought stress effects on water relations of wheat. **Bot Bull Acad Sin**, v.41, p.35–39,2000

SILVA, J. C. A.; FERNANDES, P. D.; BEZERRA, J. R. C.; ARRIEL, N. H. C.; CARDOSO, G. Crescimento e produção de genótipos de gergelim em função de lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.4, p.408–416, 2014

SILVA, M. A.; SANTOS, C.M.; VITORINO, H.S.; RHEIN, A.F.L. Pigmentos fotossintéticos e índice spad como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 173-181,2014

SILVA, R.B.; TEODORO, I.; SOUZA, J.L.; FERREIRA JÚNIOR, R.A.; MAGALHÃES, I.D.; SANTOS, M.A.; LYRA, G.B.; LYRA, G.B.; MOURA FILHO, G.; SOUZA, R.C.; SILVA, L.K.S.; SANTOS, J.V.; OLIVEIRA, J.D.S. Physiological and productive aspects of cassava under different irrigation levels. **Bragantia**, v.80, p. 1-14, 2021

SILVA,P.H.;CAMPOE,O.C.;PAULA, R.C, LEE, D.J.Seedling growth and physiological responses of sixteen eucalypt taxa under controlled water regime. **Forests** 7(6):110, 2016

SMART, R.E.; BINGHAM, G.E. Rapid estimates of relative water content. **Plant Physiol**, v.53, p.258–260,1974

SOUSA, G. G., VIANA, T. V.A., DIAS, C. N., SILVA, G. L., AZEVEDO, B. M. Lâminas de irrigação para cultura do gergelim com biofertilizante bovino. **Revista Magistra**, v.26, n.3, p.347 - 356, 2014

SOUZA, J. L.; NICÁCIO, R.M.; MOURA, M.A.L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brasil. **Renewable Energy**, v.30, p.1203-1220, 2005.

TAN, A.Ş. Bazı susam çeşitlerinin Menemen koşullarında performansları. **Anadolu, Ege Tarımsal Araştırma Enstitüsü Derg** ,v. 21, p.11–28, 2011

TEI, F.; AIKMAN, D.P.; SCAIFE, A. Growth of Lettuce, Onion and Red Beet. 2. Growth Modelling. **Annals of Botany**, vol. 78, n.. 5, p. 645-652, 1996

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955

TOLK, J.A.; HOWELL, T.A. Water use efficiencies of grain sorghum grown in three USA southern great plains soils. **Agric Water Manag**, v.59, p.97–111,2003

UMAR, U.A.; FALAKI, A.M.; ABUBAKAR, I.U.; MANI, H. Productivity of sesame (*Sesamum indicum* L.) varieties as influenced by irrigation scheduling. **Pacific J Sci Technol**, v.16, p.262–269, 2015

VURARAK, Y.; ANGIN, N.; BILGILI, M.E. Susamda farkli hasat yöntemlerinin dane olgunlaşmasına olan bazı etkilerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma. **Tarım Bilim Arastırma Derg.** v.5, p.93–96,2012

ZANDALINAS, S. I.; MITTLER, R.; BALFAGÓN, D.; ARBONA, V.; GÓMEZCADENAS, A. Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. **Physiologia Plantarum**, v.162, p.2-12, 2018

ZHANG, T., ZHANG, Z., LI, Y., and HE, K. The Effects of Saline Stress on the Growth of Two Shrub Species in the Qaidam Basin of Northwestern China. **Sustainability**, v. 11 n. 3, p. 828, 2019

APÊNDICES

Apêndice 1- Montagem do sistema de lisimetria.



Apêndice 2- Preenchimento dos lisímetros com as camadas e saturação do solo.



Apêndice 3- Vista geral da área lisimétrica com os reservatórios para irrigação, lisímetros, tubos de acesso e o sistema de drenagem.



Apêndice 4- Fases do ciclo da cultura do gergelim.

