



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
MESTRADO EM CIÊNCIAS AGRÁRIA**

**KAROLINE DA SILVA FARIAS**

**SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL E DEPLECIONADA  
DE FEIJÃO-CAUPI**

**CAMPINA GRANDE - PB  
2018**

**KAROLINE DA SILVA FARIAS**

**SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL E DEPLECIONADA  
DE FEIJÃO-CAUPI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba / Embrapa Algodão, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias / Área de concentração: Agrobioenergia e Agricultura sustentável.

**Orientador: Prof. Dr. Diogo Gonçalves Neder**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2018**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

F224s Farias, Karoline da Silva.  
Simulação da produtividade potencial e deplecionada de feijão-caupi [manuscrito] / Karoline da Silva Farias. - 2018.  
62 p. : il. colorido.  
Digitado.  
Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Estadual da Paraíba, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, 2018.  
"Orientação : Prof. Dr. Diogo Gonçalves Neder, Departamento de Agroecologia e Agropecuária -CCAA."  
1. Produtividade agrícola. 2. Vigna unguiculata. 3. Balanço hídrico. I. Título

21. ed. CDD 631.5

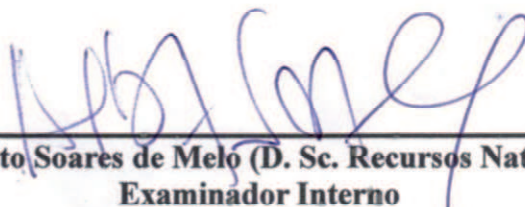
**KAROLINE DA SILVA FARIAS**

**SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL E DEPLECIONADA  
DE FEIJÃO-CAUPI**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias da Universidade Estadual da Paraíba / Embrapa Algodão, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias / Área de concentração: Agrobioenergia e Agricultura Familiar.

**Aprovada em 3 de Agosto de 2018**

**Banca examinadora:**



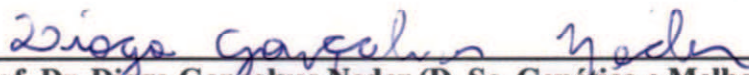
---

**Prof. Dr. Alberto Soares de Melo (D. Sc. Recursos Naturais) - UEPB**  
**Examinador Interno**



---

**Fabiane Rabelo da Costa Batista (D. Sc. Genética e melhoramento de plantas) -**  
**INSA/MCTI**  
**Examinador Externo**



---

**Prof. Dr. Diogo Gonçalves Neder (D. Sc. Genética e Melhoramento de plantas) -**  
**UEPB**  
**Orientador**



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que é digno de toda honra e glória, que tem me sustentado, me guardado, e me proporcionado dias de alegria e paz.

Aos meus pais, Carlos e Maria das Graças, por serem meus maiores incentivadores e por acreditarem em mim e em meu futuro, eles são sem dúvida meus bens mais preciosos.

Aos meus queridos irmãos, Kaline e Júnior, pelo apoio e pelas mãos estendidas sempre que necessito, tenho orgulho de ser irmã de vocês e de sermos tão unidos.

Ao meu avô, Ernesto (in memória), que sempre foi meu melhor conselheiro, e nunca mediu esforços para me fazer avançar na carreira acadêmica, ele que sempre foi um grande pilar em nossa família, que a sua força e perseverança nos motive, em seu nome e das minhas queridas avós Josefa e Inácia, agradeço aos demais familiares por serem meu porto seguro.

Ao meu namorado e melhor amigo, Arthur Henrique, pela segurança que sua presença me transmite, por ser o apoio que em alguns momentos me fez ficar de pé, pela paciência em meio a meus dramas. Seu companheirismo e amor me fazem feliz.

A minha amiga e colega, Maysa, que ao longo do mestrado compartilhamos experiências similares e nossa amizade nos ajudou a superar diversos momentos de dificuldade, sua amizade foi um presente divino.

As minhas amigas, Nathalya, Aline, Geovana, Barbara, Karol (Neguinha) e Mayane pelo apoio, ajuda e amizade, a presença delas tornaram as coisas mais leves e divertidas.

Ao meu orientador, Dr. Diogo Neder, por todos os ensinamentos e ajudas, e que de forma tão sábia e humilde mostrou-me outras vertentes das ciências agrárias.

Ao programa de pós-graduação em ciências agrárias que me proporcionou ao longo de dois anos e meio adquirir conhecimentos sobre uma área na qual eu enquanto filha de agricultores tenho uma enorme empatia.

Aos professores do programa que foram responsáveis e comprometidos com a missão que lhes foi dada, e que cada um com sua peculiaridade e personalidade transmitiram todo o conhecimento necessário.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoas de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa

## RESUMO

Os modelos de simulação de culturas agrícolas são ferramentas que auxiliam na tomada de decisões no planejamento, manejo e pesquisa agrícola. Considerando que modelos de previsão da produtividade de feijão-caupi são raros, o objetivo desta pesquisa foi realizar a estimação da produtividade deplecionada e potencial da cultura do feijão-caupi, a partir da construção de um modelo de simulação agroclimático. Os dados climáticos utilizados no modelo de simulação foram a temperatura, precipitação e insolação. Os dados foram provenientes de 6 municípios do estado da Paraíba. No modelo proposto foi realizada a estimação da área foliar do feijão-caupi para a determinação da taxa fotossintética e respiratória, com correções para temperatura, sombreamento, senescência, CO<sub>2</sub>, seguida da partição de biomassa, crescimento e desenvolvimento, assim como os métodos de simulação das variáveis climáticas de entrada para o modelo. As produções deplecionadas foram estimadas através do balanço hídrico, a partir do qual, o coeficiente de depleção foi estimado. A partir das simulações realizadas com o modelo proposto, pode-se concluir que este pode ser usado para predição dos resultados para produção deplecionada e potencial de feijão-caupi. Também foi possível determinar as melhores regiões e épocas de cultivo de feijão-caupi no Estado da Paraíba.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Vigna unguiculata*. balanço hídrico. índice de área foliar.

## ABSTRACT

Agricultural crops simulation models are tools that assist with decision making in the agricultural planning, management and research. Taking into account that cowpea productivity forecasting models are rare, the aim of this research was to perform the estimation of depleted and potential productivity of the cowpea crop based on the construction of an agro-climatic simulation model. The climate data used in the simulation model were temperature, precipitation and sunshine. The data were obtained in six cities in the state of Paraíba. In the proposed model it was performed an estimation of the cowpea leaf area to determine the photosynthetic and respiratory rates, with corrections of temperature, shading, senescence, CO<sub>2</sub>, followed by the partition of biomass, growth and development, as well as the simulation methods of climate variables for input in the model. The depleted productions were estimated through the water balance, from which the depletion coefficient was estimated. Based on the simulations performed with the proposed model, it can be concluded this can be used to predict the results of the depleted and potential cowpea production. It was also possible to determine the best regions and seasons for cowpea growing in the state of Paraíba.

KEY WORDS: *Vigna unguiculata*. water balance. leaf area rate.

## SUMÁRIO

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| <b>1.</b>   | <b>INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>2.</b>   | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>2.1.</b> | <b>Importância socioeconômica do feijão-caupi.....</b>                          | <b>9</b>  |
| <b>2.2.</b> | <b>Caracterização do feijão-caupi (<i>vigna unguiculata</i> (L.) Walp).....</b> | <b>10</b> |
| <b>2.3.</b> | <b>Fisiologia da produção de feijão-caupi.....</b>                              | <b>11</b> |
| <b>2.4.</b> | <b>Elementos do clima.....</b>  | <b>12</b> |
| 2.4.1.      | Temperatura e dióxido de carbono.....   | 12        |
| 2.4.2.      | Radiação solar.....   | 14        |
| 2.4.3.      | Condições hídricas.....   | 15        |
| <b>2.5.</b> | <b>Produtividade da cultura do feijão-caupi.....</b>                            | <b>16</b> |
| 2.5.1.      | Potencial genético.....   | 16        |
| 2.5.2.      | Produtividade potencial.....  | 17        |
| 2.5.3.      | Produtividade deplecionada.....   | 18        |
| <b>2.6.</b> | <b>Modelagem na agricultura.....</b>  | <b>20</b> |
| 2.6.1.      | Modelos de simulação.....   | 20        |
| 2.6.2.      | Principais modelos utilizados no Brasil e no mundo.....                         | 21        |
| <b>3.</b>   | <b>OBJETIVOS.....</b>   | <b>24</b> |
| <b>3.1.</b> | <b>Objetivos gerais.....</b>  | <b>24</b> |
| <b>3.2.</b> | <b>Objetivos específicos.....</b>   | <b>24</b> |
| <b>4.</b>   | <b>METODOLOGIA.....</b>   | <b>25</b> |
| <b>5.</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>   | <b>32</b> |
| <b>5.1.</b> | <b>João Pessoa.....</b>   | <b>32</b> |
| <b>5.2.</b> | <b>Campina Grande.....</b>  | <b>36</b> |
| <b>5.3.</b> | <b>Areia.....</b>   | <b>39</b> |
| <b>5.4.</b> | <b>Monteiro.....</b>  | <b>42</b> |
| <b>5.5.</b> | <b>Patos.....</b>   | <b>44</b> |
| <b>5.6.</b> | <b>Sousa.....</b>   | <b>47</b> |
| <b>6.</b>   | <b>CONCLUSÃO.....</b>   | <b>51</b> |
|             | <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>52</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O feijão-caupi ou feijão-de-corda (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é uma leguminosa nativa da África e bastante cultivada nas regiões tropicais dos continentes africano, asiático e americano, onde constitui uma das principais fontes de proteína para a população de baixa renda. A área plantada de feijão-caupi no mundo é de 10,4 milhões de hectares, perfazendo uma produção de 5,5 milhões de toneladas de grãos (FAO, 2016). No Brasil, pode ser considerada uma das principais culturas de subsistência nas regiões Norte e Nordeste, representando cerca de 90% de toda área cultivada no Brasil que, atualmente, é de aproximadamente um milhão de hectares (MATOS FILHO et al., 2009). Além de um dos componentes básicos da dieta alimentar, esta cultura é um importante gerador de empregos e renda, tanto na zona rural quanto na urbana (LIMA, 2008).

Apesar de sua importância, a cultura do feijão-caupi apresenta baixa produtividade média, principalmente devido à pouca disponibilidade de nutrientes do solo, como o nitrogênio (XAVIER et al., 2007) e baixo nível tecnológico utilizado, já que o feijão-caupi é normalmente cultivado como agricultura de subsistência (AURAS; AMÂNCIO, 2015), assim sendo, a produtividade nacional é de aproximadamente 401 kg ha<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2016).

Comparada a outras culturas, o feijão-caupi tem seu potencial genético pouco explorado, entretanto, já foram obtidas, em condições experimentais, produtividades de grãos secos acima de 3.000 kg.ha<sup>-1</sup>, com expectativa que seu potencial genético ultrapasse os 6.000 kg.ha<sup>-1</sup> (BEZERRA, 1997).

Dentre os fatores que impactam a produtividade agrícola, o clima é um dos maiores desafios para a agricultura mundial, dificultando assim o manejo correto das culturas. Para que as plantas apresentem um bom desenvolvimento é essencial que tenham disponíveis de acordo com suas necessidades, elementos como temperatura média (diurna e noturna), precipitação e radiação solar que satisfaçam as exigências da cultura (FANCELLI; DOURADO, 2000).

Uma das formas que vem sendo utilizadas na compreensão dos efeitos do ambiente na produtividade das culturas são os modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas, eles objetivam contribuir no monitoramento e na previsibilidade de produção das culturas, possibilitando a geração de previsões de safras e de rendimentos finais, associadas a diferentes opções de manejo (MARIN et al., 2011; CARON et al., 2009). Bastos (1999) exaltou a importância da utilização destes modelos no planejamento e manejo agrícola, auxiliando os produtores de forma rápida e de baixo custo, potencializando suas rendas líquidas.

O uso desses modelos tem crescido significativamente nos últimos anos, pois apesar da grande importância dos experimentos de campo, estes nem sempre são viáveis devido ao tempo necessário para a sua execução, como também as dificuldades logísticas apresentadas, além de muitas vezes não responderem pontualmente a questionamentos que envolvem fatores climáticos e suas interações com os fatores de produção. Enquanto que os modelos computacionais estimam a produtividade das culturas, em função das condições climáticas e práticas de manejo cultural e de solo, em um curto período de tempo (OLIVEIRA et al., 2012).

A utilização dos simuladores no conhecimento prévio e preciso das safras agrícolas é uma ferramenta estratégica tanto para os produtores, quanto para o país, pois esta auxilia no planejamento do abastecimento interno, como também no externo, amenizando a volatilidade do mercado (ZACHARIAS et al., 2008; CORAL et al., 2005). A busca por estas ferramentas vem aumentando devido ao aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e de outros gases de efeito estufa na atmosfera, bem como a elevação da temperatura do ar em diversas localidades do planeta, afetando diretamente o setor agrícola, já que as plantas são diretamente influenciadas por estas variáveis (TAIZ; ZEIGER, 2009).

De acordo com MARIN et al. (2011) e CARON et al. (2009), modelos de crescimento e desenvolvimento de culturas baseados em processos são passíveis de contribuir no monitoramento e na previsão de produtividade, servindo como auxiliares na compreensão dos mecanismos envolvidos nas respostas da cultura ao ambiente. Assim sendo, o objetivo do presente estudo foi construir um modelo de simulação para a cultura do feijão-caupi que permita estimar a área foliar, a conversão da energia radiante em carboidratos, a partição de fotoassimilados e o balanço hídrico visando prever a produtividade potencial e deplecionada da cultura em diferentes regiões e épocas de semeadura.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Importância socioeconômica do feijão-caupi

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) originário do continente africano, representa uma importante fonte alimentar em diversas localidades do mundo (VIEIRA et al., 2000; FREIRE FILHO et al., 2005). Ele tem sido destaque e vem ganhando importância não apenas como alimento, mas também como gerador de emprego e renda, e por apresentar altos valores nutricionais constitui-se um componente básico para alimentação das populações rurais e urbanas (FREITAS, 2012).

O vigna conhecido como feijão-caupi, feijão-macassar, feijão-de-corda, entre outros, tem seu mercado fundamentado principalmente na comercialização de grãos secos, verdes e de sementes (SOUSA et al., 2015). O cultivo de grãos secos para consumo apresenta predominância, porém a produção de grãos verdes tem maior agregação de valor, e tem se destacado como uma alternativa promissora para agricultores familiares (ANDRADE et al., 2010).

Ele é cultivado nas diversas regiões do Brasil, porém sua produção se concentra nas regiões Norte, Nordeste e Centro-oeste. A maioria dos agricultores o cultivam em pequena escala, principalmente nas regiões Norte e Nordeste, proporcionando baixos rendimentos em função do uso limitado, ou não uso de insumos tecnológicos. Já na região Centro-Oeste nos estados como Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, por meio da agricultura empresarial e de larga escala, tem proporcionado elevados rendimentos a cultura (CARVALHO, 2011).

O seu cultivo no nordeste do Brasil é destaque por localizarem-se nessa região as maiores áreas plantadas com a cultura no país, porém nos últimos anos vem ocorrendo variações tanto de acréscimo, como de decréscimo, com tendência oscilante. Estas modificações na produção são características de regiões cujos processos produtivos são dependentes de clima (FROTA; PEREIRA, 2000).

Segundo dados da Conab a produtividade média de feijão-caupi na primeira safra de 2016 foi estimada em 209 kg ha<sup>-1</sup>, 364 kg ha<sup>-1</sup> na segunda e 546 kg ha<sup>-1</sup> na terceira safra, porém alguns autores afirmam que o feijão-caupi tem capacidade de superar a produtividade de 6.000 kg ha<sup>-1</sup> (FREIRE et al., 2011). Segundo MENDES et.al., 2007, este baixo índice de produtividade, é resultado de vários fatores, entre eles estão a utilização de sementes de baixa qualidade, geralmente não melhoradas, a produção em solos de baixa fertilidade, e as condições climáticas adversas.



## 2.2. Caracterização do feijão-caupi

O feijão-caupi é uma planta herbácea, que exhibe variações de porte, podendo se desenvolver de forma ereta, semiereta, semiprostrada ou prostrada (FREIRE FILHO et al., 1999). É uma planta autógama, com flores completas, suas pétalas exibem colorações variadas, podendo ser branca, amarela ou violeta e sua propagação ocorre por meio de sementes (TEÓFILO et al., 1999).

O tegumento de suas sementes é diversificado em cores, podendo ser preto, branco, esverdeado, marrom, e podem exhibir coloração uniforme ou apresentar estrias, manchas ou pontuações, com presença ou ausência de hilo. Segundo ARAÚJO et al. (1981) o feijão-caupi exhibe hábito de crescimento determinado, onde o caule produz uma quantidade limitada de nós e quando emite sua primeira inflorescência cessa o crescimento, como também indeterminado, onde o caule continua crescendo e emitindo novos ramos secundários e gemas apicais.

Planta rústica, tolerante a secas e altas temperaturas, quando submetidas a temperaturas ente 18 °C e 34 °C, apresenta uma boa produção, se comparado com outras culturas, porem quando expostas a temperaturas inferiores a 20<sup>o</sup> podem ter seu desenvolvimento paralisado (SHIMELIS; SHIRINGANI, 2010).

Possui sistema radicular do tipo axial, relativamente superficial, porém algumas raízes podem alcançar a profundidade de 2,0 m, fator que conseqüentemente caracteriza a capacidade de manter-se por longos períodos sem irrigação. A raiz principal e as secundárias apresentam nódulos quase sempre eficientes devido à associação com bactérias nitrificadoras nativas do solo (FREITAS, 2012).

O desenvolvimento do feijão *Vigna* também é bastante influenciado pelo fotoperíodo, onde há cultivares que apresentam sensibilidade e outras não a esse elemento climático. O crescimento vegetativo, arquitetura da planta e desenvolvimento reprodutivo são principalmente determinados pela interação de genótipos com a duração do dia e temperaturas do ar (STEELE e MEHRA, 1980).

Em relação a seu ciclo, o feijão-caupi pode ser classificado em: ciclo super precoce (maturidade é atingida até 60 dias após o plantio); ciclo precoce (maturidade atingida entre 61 e 70 dias após plantio); ciclo médio (maturidade é atingida entre 71 e 90 dias após plantio) e ciclo tardio (maturidade após 91 dias de plantio) (FREIRE FILHO, et al, 2000).

O déficit hídrico é o fator que mais tem limitado a produção de grãos mundialmente, principalmente nas regiões semiáridas (FRITCHE; BOREM, 2011). A produtividade do feijão-caupi na região nordeste é frequentemente afetada negativamente pela deficiência hídrica



(MENDES et al., 2007). Apesar deste ser um fator limitante, 60% das áreas cultivadas no mundo estão submetidas a esta condição (AGUIAR et al., 2008).

A exigência hídrica do feijão-caupi é determinada de acordo com a fase em que a planta se encontra, variando entre 300 e 450 mm/ciclo, bem distribuídos nos distintos estágios de desenvolvimento (NASCIMENTO, 2009). Para alcançar índices maiores de produtividade, é importante fazer o manejo dessa cultura de maneira adequada, conhecendo a relação entre déficit hídrico e produtividade (NASCIMENTO et al., 2004).

### 2.3. Fisiologia da produção de feijão-caupi

O conhecimento da fisiologia da cultura do feijão-caupi é de fundamental importância para os pesquisadores que buscam de alguma forma modelar, simular ou prever o comportamento do sistema de produção desta cultura sobre diferentes configurações, envolvendo diferentes características genéticas, edafoclimáticas, de manejo e ocorrência de pragas e doenças.

O conhecimento das sucessivas etapas do desenvolvimento da cultura (fenologia), a funcionalidade da espécie (fisiologia) e as interações com o ambiente em que se encontra (ecofisiologia), são necessários para o planejamento e obtenção de elevadas produtividades. A reação da fotossíntese pode ser representada por meio dos seus constituintes inorgânicos e elementos energéticos formados segundo a equação abaixo:



Dessa forma, são necessárias três moléculas de ATP para a fixação ou redução de cada molécula de  $\text{CO}_2$  (LEHNINGER, 1976).

Quando os produtos da fotossíntese são reduzidos por intermédio da respiração celular, são produzidos  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , energia e compostos intermediários. A partir da combinação dos substratos produzidos na respiração, existe uma reorganização e nova biossíntese de compostos, como os aminoácidos, proteínas, carboidratos, ácidos graxos e outros. Esses são utilizados para o crescimento estrutural, manutenção, desenvolvimento reprodutivo e armazenamento de reservas, que no final serão utilizadas dentro das diversas cadeias tróficas como fonte de alimento e fibra.

Algumas plantas, assim como o feijão-caupi, fixam o  $\text{CO}_2$  por intermédio do ciclo de Calvin, sendo que os primeiros produtos estáveis oriundos da fotossíntese são as trioses (ácido 3-fosfoglicérico ou 3PGA e glicerato), que são constituídas por três átomos de carbono. SEDIYAMA et al. (1985) indicam que a quantidade de glicerato produzida é muito grande, onde se supõem que ela é derivada de uma hidrólise realizada pela enzima-catalizada de PGA, confirmada pela rápida conversão na ausência de luz.

Existe um grupo de plantas, denominadas de C3, da qual o feijão-caupi faz parte, que o primeiro elemento formado é o  $C_3H_6O_3$ , no outro grupo estão as plantas cujo primeiro elemento formado é o  $C_4H_8O_4$ . A principal diferença entre plantas C3 e C4 é a presença de fotorrespiração mensurável e significativa nas plantas C3, nessas plantas, a fotorrespiração representa 25-30% do valor da fotossíntese (MAGALHÃES, 1985).

Em ambientes com baixa concentração de  $CO_2$ , ocorre uma perda considerável de energia que deveria ser utilizada para a formação de fitomassa, e segundo Booker et al. (1997), o enriquecimento de  $CO_2$  na atmosfera causa um aumento de 56% na fotossíntese líquida, enquanto a fotorrespiração possui uma redução de 36% na principal folha apical. Além disso, elevados níveis de  $CO_2$  promovem aumento na produtividade das plantas, devido o incremento nos fotoassimilados e supressão da fotorrespiração. A fotossíntese líquida foi aumentada e as taxas de fotorrespiração, durante o crescimento vegetativo e reprodutivo, foram reduzidos.

A fotorrespiração é um mecanismo regulador da fixação de  $CO_2$  quando a pressão de  $O_2$  é alta e a de  $CO_2$  é baixa. Em plantas de ciclo C3, existe uma concentração mínima de  $CO_2$  que permite que ocorra fotossíntese (formação de 3-PGA), denominada de ponto de compensação de  $CO_2$  (LARCHER, 2000). A taxa de  $CO_2$  perdida por intermédio da fotorrespiração varia conforme o ambiente e o genótipo, situando-se na faixa de 10-50% do total do carbono fixado na fotossíntese (SHIBLES et al., 1975; LEHNINGER, 1976; MÜLLER, 1981).

Considerando a eficiência da interceptação de radiação solar, as plantas C4 são mais eficientes comparadas com as C3, porém essa diferença torna-se pequena em baixa intensidade luminosa (DRIESSEN; KONIJN, 1992). Os mesmos autores comparam a taxa de assimilação de plantas C3 e C4 em duas condições de temperatura. As plantas C3 apresentam menor assimilação em qualquer um dos casos quando comparadas com as plantas C4. Porém, sob condições climáticas mais amenas (temperaturas), a melhor taxa de acúmulo fotossintético é obtida entre 15-20° C enquanto que, sob condições mais tropicais, a melhor taxa de acúmulo varia de 25-30° C.

## **2.4. Elementos do clima**

### **2.4.1 Temperatura e dióxido de carbono**

A mudança do estágio fenológico para algumas culturas depende essencialmente da temperatura, ou seja, do acúmulo de unidades térmicas acima da temperatura mínima para o crescimento. Essa também é definida como graus-dia, que é a diferença entre a temperatura

média diária e a temperatura basal exigida por uma espécie (VILLA NOVA et al., 1972). O bom desenvolvimento da cultura do caupi ocorre na faixa de temperatura de 18 a 34 °C e a temperatura base abaixo da qual cessa o crescimento, varia com o estágio fenológico. Para a germinação, varia de 8 a 11 °C, enquanto para o estágio de floração inicial é de 8 a 10 °C (ANDRADE JÚNIOR et al., 2002).

Embora a cultura do feijão-caupi possa ser cultivada em uma ampla faixa ambiental e por isso, seja considerada tolerante a muitos tipos de estresses como o térmico, pode haver uma redução significativa da produtividade de grãos, devido ao abortamento de flores, pela ocorrência de elevada temperatura do ar, quando esta coincide com o estágio de florescimento. Verifica-se, pois, que o conhecimento de aspectos climáticos relacionados à fenologia do feijão-caupi é importante ferramenta para otimização nos sistemas de produção desta cultura. Neste sentido, a forma mais satisfatória para determinar etapas de desenvolvimento da cultura do feijão-caupi, levando em consideração as exigências calóricas ou térmicas, é por meio do método designado como graus-dia de desenvolvimento (Almeida et al., 2015).

O método de graus-dias baseia-se na premissa de que a planta necessita de certa quantidade de energia, representada pela soma térmica acima de uma temperatura base, para completar determinada fase fenológica ou mesmo o seu ciclo total (Souza et al., 2011). A taxa de crescimento da cultura é definida então pela variação da fitomassa seca com o tempo, e representa a capacidade de produção da cultura. Portanto, sua determinação possibilita modelar o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Muller et al., 2005); além de poder gerar informações possíveis de nortear as durações dos ciclos de cultivo, inferindo sobre seu atraso ou antecipação, de acordo com estimativas das variações térmicas ao longo do ano.

A temperatura do planeta aumentou de 3 a 4 °C, principalmente devido a maior concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre (TAYLOR; MacCRACKEN, 1990; WATSON et al., 1990). No início do século passado, os níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera eram de 280 ppm e, atualmente chegam a 370 ppm, uma taxa de crescimento de 1,8 ppm por ano (MENDELSON; ROSENBERG, 1994; ETHERIDGE et al., 1996; KEELING; WHORF, 2000). Estima-se que no final deste século a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera atinja de 600 a 1000 ppm (COX et al., 2000).

Diversas alterações no clima do planeta devem ocorrer, principalmente com relação à temperatura. O Plano Global da Mudança do Clima (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) estima que o incremento de temperatura seja de 1,0 a 3,5 °C em 2100, baseado nas previsões de alguns modelos de estimacão GCM, GISS, UKMO, OSU e GFDL-R30 (IPCC,

2001). Os efeitos do aumento da temperatura irão afetar a agricultura, no sentido de alterações no crescimento e desenvolvimento das plantas, sendo que em última análise, ocorrerá na produtividade e na produção de alimentos (COX et al., 2000; HANSEN et al., 2000).

#### 2.4.2. Radiação solar

O aumento da produção de alimentos relaciona-se diretamente com a maximização da utilização dos recursos naturais. Dentre esses, a radiação solar constitui-se uma fonte energética básica. MONTEITH (1994) indica que a produção de matéria seca pode ser expressa das seguintes formas: (i) recurso disponível por unidade de solo; (ii) quantidade de recurso capturado por unidade de recurso disponível (eficiência de captura) e (iii) taxa de matéria seca por unidade de recurso capturado (eficiência de captura). Além disso, se a disponibilidade de nutrientes e água para as plantas não for limitante, a radiação solar disponível para o processo fotossintético irá determinar a produção de fitomassa.

Segundo Taiz e Zieger (2004), a radiação solar é um dos fatores que mais limitam o crescimento e desenvolvimento das plantas. A radiação solar origina toda a energia necessária para a transformação do CO<sub>2</sub> atmosférico em energia metabólica. A radiação solar que chega até a superfície terrestre pode ser separada em duas fases, uma quando a radiação é direta e a outra é chamada de difusa, que é refletida ou espalhada por nuvens e pela atmosfera (GOUDRIAAN; van LAAR, 1994). Cada uma dessas fases pode ser dividida mais duas vezes, que são chamadas de bandas, a primeira é a de baixo comprimento de onda (inferior a 3000 nm) e a segunda é a radiação térmica (superior a 3000 nm).

Quando se analisa em separado a radiação de baixo comprimento de onda, separa-se também em bandas que possuem diferentes efeitos sobre as plantas. A faixa da radiação visível varia de 400 a 700 nm, e são especialmente estudadas na área agrônômica, devido ser radiação fotossinteticamente ativa (KUBINS, 1971). Os fluxos de radiação em direção a superfície terrestre compõem-se da radiação solar incidente de ondas curtas (direta e difusa) e da radiação de ondas longas. Em contrapartida, a superfície reflete ondas curtas e radiação de ondas longas emitidas pela superfície para a atmosfera (TANNER; LEMON, 1962). A intensidade com que as ondas curtas são refletidas para o espaço (albedo) varia com o ângulo de incidência solar, grau de cobertura do solo, umidade do solo e das plantas e tipo e quantidade de cobertura por nuvens (BLAD; BAKER, 1972). A partir das trocas verticais de radiação é possível definir o saldo de radiação, que será utilizado nos processos de evaporação, e transpiração das plantas nos processos de aquecimento do ar, do solo e das plantas, e no processo de fotossíntese.

A radiação solar atua diretamente no processo fotossintético, na alongação da haste principal e formação de ramificações, expansão foliar, manutenção de vagens e grãos e fixação biológica de nitrogênio (CÂMARA, 2000). Somente a presença de radiação solar não é suficiente para a produção de fitomassa seca. A produção de fitomassa depende da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e interceptada e a eficiência de utilização dessa energia pelo processo fotossintético (SHIBLES; WEBER, 1965).

A produção de grãos não é apenas função direta da radiação solar, mas também da partição dos fotoassimilados que são destinados para a sua produção. Durante a fase de enchimento de grãos, a interceptação de radiação fotossinteticamente ativa deve ser máxima, com isso haverá uma maximização da taxa fotossintética e uma maior produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, uma maior produção de grãos (SHIBLES; WEBER, 1965). Altas intensidades luminosas absorvidas pela planta podem ocasionar a fotoinibição, resultando, assim, na saturação luminosa (DEMMIG-ADAMS; ADAMS, 1992).

Dessa forma, a cultura de feijão-caupi é classificada como C3, o que proporciona uma baixa capacidade competitiva, sendo assim quando considera-se a relação entre a fotossíntese e a intensidade de luz para plantas C3 e C4, verifica-se que nas plantas C3 existe uma saturação com aproximadamente 1/3 da luz solar máxima, e nas plantas C4 não se atinge a saturação com aumento da intensidade luminosa (MAGALHÃES, 1985).

#### 2.4.3. Condições hídricas

Estresse hídrico é uma situação comum para muitas culturas e constitui um dos principais fatores que afetam a produção agrícola, influenciando todos os aspectos relativos ao desenvolvimento das plantas (DAMATTA, 2007). A extensão dos danos causados pelo estresse hídrico varia de acordo com a duração, intensidade, frequência, tempo de ocorrência e genótipo. A frequência e a intensidade do déficit hídrico são os mais importantes fatores responsáveis pela restrição da produção agrícola global (SANTOS & CARLESSO, 1998).

As estratégias das plantas para lidar com o estresse hídrico pode ser divididas em três tipos: escape da seca, conservação de água e tolerância a seca (SALEHI-LISAR; BAKHSHAYESHAN-AGDAM, 2016). Escape é a estratégia usada pelas plantas com ciclo curto, em que completam seu ciclo de vida durante a estação chuvosa do ano, evitando a estação seca. A conservação da água inclui estratégias que favorecem a manutenção do status da água armazenada em detrimento da produção fotossintética. A tolerância à seca corresponde a mecanismos que envolvem a tentativa de manter os estômatos abertos durante o maior tempo



possível, mesmo em detrimento do potencial de água reduzido ou desidratação de tecidos. Assim, a agricultura de subsistência em regiões semiáridas utiliza principalmente a estratégia de fuga. No entanto, devido à irregularidade de precipitação de tais regiões, a experiência de longos períodos sem chuva durante o ciclo de cultivo, conhecida como "veranicos", é comum. Neste caso, a sobrevivência das plantas e o rendimento das colheitas dependerá de várias estratégias incluindo a conservação da água ou a tolerância da seca.

Os períodos mais críticos à deficiência hídrica são determinados por intermédio de estudos que submetem diferentes níveis de irrigação em diferentes estádios fenológicos. A maioria dos resultados indica que a sensibilidade do feijão-caupi é mínima durante a fase vegetativa, a não ser que a severidade limite muito o porte da planta (BOERMA; ASHLEY, 1982), e máxima durante o período reprodutivo, principalmente na formação de legumes e enchimento de grãos (KORTE et al., 1983).

## **2.5. Produtividade da cultura do feijão-caupi**

Para definirmos se uma determinada produtividade de feijão-caupi está condizente com a potencialidade da cultura, em um dado ambiente, deve-se primeiro definir o nível de estimacão que está sendo focado (produtividade genética, potencial, deplecionada ou altas produtividades a campo). Com base nos elementos do clima (radiação solar, concentração de CO<sub>2</sub> e disponibilidade hídrica), vários autores (LOOMIS; WILLIAMS, 1963; DOORENBOS; KASSAM, 1979) sugerem métodos para estimar a produtividade máxima em diferentes culturas.

Em produções comerciais, as produtividades para a cultura de caupi ultrapassaram 3.000 kg.ha<sup>-1</sup>, mas nem todos os produtores conseguem atingir tais níveis, devido às limitações fatores que regulam tais produtividades. Podem-se agrupar esses fatores em três categorias, a saber: clima, manejo (nutrientes, solo, pragas, doenças e plantas daninhas) e potencial genético da cultura. Contudo, serão destacados a seguir os principais pontos que diferenciam os níveis de potencial produtivo.

### **2.5.1. Potencial genético**

Atualmente, estudiosos estão sugerindo que o potencial produtivo das culturas está sendo atingido, e que aumentos nos rendimentos logo cessarão. As estimativas para o desempenho das produções de cereais não são unânimes. Estimativas do Banco Mundial e da FAO, baseadas em tendências de crescimento que tem-se mantido praticamente constante desde 1950, apontam

para um crescimento da produção mundial de grãos (COELHO et al., 2003). Por outro lado, o Ministério da Agricultura do Japão indica que as condições da agricultura mudaram muito durante os últimos anos, e que as produtividades que aumentaram linearmente entre 1960 e 1990, não deverão continuar aumentando no futuro (MARTIN, 2007).

A produtividade, considerando a sua capacidade genética, é elevada, porém ela não é atingida, devido à abscisão dos órgãos reprodutivos (flores, legumes e sementes). Isso ocorre devido à interação da planta com o ambiente, que compete por recursos do meio (NAVARO JÚNIOR; COSTA, 2002).

O potencial genético é exteriorizado, na sua totalidade, quando os fatores bióticos e abióticos não interferem na expressão da sua capacidade de produção. O rendimento final de cada uma das plantas de feijão-caupi depende da quantidade de flores que são emitidas, do número de flores que são fertilizadas e transformam-se em legumes e, posteriormente, o número de legumes que originam grãos e do peso médio destes grãos. Porém, com a adversidade ambiental, muitas das flores caem antes de serem fertilizadas, outras logo após e outras poucas são abortadas quando já se apresentam em forma de legume. A condição de maior abscisão de flores, em relação aos legumes, é devida a uma proteção que a própria planta possui, evitando assim gasto energético desnecessário, procurando se ajustar ao meio. Assim sendo, quanto maior a adaptação de um genótipo às condições ambientais submetidas, melhor será o seu desempenho produtivo.

### 2.5.2. Produtividade potencial

A produtividade é resultado dos componentes formadores e das características do local, bem como as suas qualidades nos sistemas de uso da terra. Os modelos de estimação de uso da terra não são simples, eles são descritos como dinâmicos no que diz respeito aos seus requerimentos e aos quais correspondem as qualidades dos locais. Devem-se considerar ainda, as suas interações diretas e indiretas, entre os seus componentes constituintes.

Quando o objetivo é observar a produtividade potencial de uma determinada espécie, primeiramente devem-se entender as inter-relações entre o genótipo, o ambiente e o manejo. Quanto maior for o conhecimento do genótipo, melhor será a utilização desse para potencializar o seu uso. O ambiente de produção também deve ser conhecido quanto as suas potencialidades, para melhorar os aspectos deficitários e maximizar a utilização das características favoráveis.

Os elementos que constituem o meio são os bióticos e abióticos, que podem ser favoráveis ou desfavoráveis à produção. Dentre os bióticos estão as pragas, doenças, plantas

daninhas e microrganismos fixadores de nitrogênio. No caso dos abióticos, têm-se os elementos do clima e do solo, que irão interferir de diferentes formas, conforme a sua intensidade de presença. Dessa forma, o ambiente deve favorecer ao máximo o desenvolvimento e a produção da espécie escolhida para o cultivo. E por último, deve-se destacar o homem e a sua capacidade de modificação do meio. A gerência e a modificação do ambiente, ou sistema, devem-se a sensibilidade de percepção que o homem possui sobre as interações existentes entre o ambiente e a planta. Os fatores limitantes da produtividade devem ser rapidamente superados para que o potencial produtivo da cultura seja explorado ao máximo.

Os sistemas de simulação de produção devem definir a cultura a ser utilizada em determinada região, além do manejo aplicado. Segundo Driessen e Konijn (1992), modelos de simulação de produção são compostos por inúmeros outros modelos, cada etapa determina os requerimentos utilizados em cada região, além da qualidade da região, para assim estimar a produção potencial. Primeiramente, será quantificada a desempenho da cultura, onde será levada em consideração somente a temperatura e a radiação solar. As demais características do local, onde será estimada a produção potencial, serão consideradas em nível máximo para o desenvolvimento da cultura.

Define-se produtividade potencial de grãos como a produção de uma variedade cultivada em ambiente ao qual está adaptada, sem limitações edafoclimáticas e nutricionais, livre da ação de pragas e doenças, e com os demais estresses efetivamente controlados (EVANS, 1993). Ou seja, é a produtividade máxima de uma cultura quando todos os outros fatores limitantes, passíveis de controles, são removidos ou minimizados, independente da viabilidade econômica do sistema.

Segundo COOPER (2003), os objetivos de estudar as produtividades máximas são: (i) tentar repetir nos campos de multiplicação as produtividades encontradas nas parcelas experimentais; (ii) detectar os fatores limitantes da produção e (iii) identificar as produtividades máximas possíveis. A orientação de processos de modelos de crescimento de plantas tem sido usada extensivamente em estudos de impactos climáticos (ALEXANDROV; HOOGENBOON, 2000; GUEREÑA et al., 2001), devido a mudanças climáticas alterarem a simulação do crescimento de plantas.

### 2.5.3. Produtividade deplecionada

A produtividade deplecionada de grãos, ou ainda, estimativa da produção de grãos, leva em consideração questões relacionadas com a disponibilidade hídrica e/ou o suprimento de



nutrientes, que muitas vezes causa estresse nas plantas e reduz a produtividade total. O crescimento da planta depende da taxa fotossintética por unidade de área da folha, área total disponível para a fotossíntese e duração da área foliar, em contrapartida, a senescência foliar das folhas mais velhas pode ser acelerada para reduzir o consumo de água pela planta (BEEG; TURNER, 1976).

Esse aspecto deve ser considerado ao modelarmos a produção da cultura de feijão-caupi, sendo que esse é um fator de redução da produtividade potencial. Analisando os estádios de desenvolvimento e crescimento que são mais afetados pelo estresse hídrico, considera-se que o período entre a semeadura e a emergência e entre a floração e o enchimento de grãos (desenvolvimento de vagens), são os períodos mais críticos.

As relações entre a redução da produtividade e as condições hídricas podem ser descritas por intermédio de três hipóteses, segundo Vossen (1990): (i) a redução da produtividade é relacionada com a deficiência hídrica acumulada durante todo o ciclo da cultura; (ii) a deficiência hídrica afeta diretamente a produtividade, dependendo do estágio fenológico, sendo o efeito final aditivo e (iii) a deficiência hídrica afeta diretamente a produção, dependendo do estágio fenológico que ocorre o estresse hídrico, sendo o efeito final multiplicativo.

Com o propósito de estabelecer um modelo de penalização independente da cultura, Segovia e Andrade (1982) utilizaram a relação de que, quando o teor de água do solo se torna menor que a umidade ideal, a produtividade deve ser reduzida. Assim, esses autores estabeleceram as variações de produtividade de uma cultura em função da precipitação pluvial e porcentagem de espaço poroso no solo. A partir desse modelo, obteve-se a relação  $ET_r/ET_p$  (evapotranspiração real e potencial) e teores de água disponíveis, para a penalização da cultura de feijão-caupi em decorrência do déficit hídrico.

Um dos modelos de crescimento de planta é o CROPGRO, que é um processo orientado de modelagem que simula carbono, água e balanço de nitrogênio para as culturas leguminosas, em nível de planta e de solo (HOOGENBOOM et al., 1992; BOOTE et al., 1996). As equações do modelo expressam as relações entre os processos ocorridos nas plantas (incluindo o desenvolvimento fenológico, fotossíntese, respiração, acúmulo de biomassa, partição de fotoassimilados e o balanço de água e entre o solo e a planta) com a temperatura, o fotoperíodo, insolação e estresse por água e nitrogênio.

## 2.6. Modelagem na agricultura

### 2.6.1. Modelos de simulação

Presumir safras agrícolas de forma precisa e antecipada é algo complexo e desafiador por envolver diversos fatores como a diversidade de culturas estabelecidas no mercado, os distintos tipos de manejo, de solo e climas existentes no Brasil (ALFONSI, 2008).

Atualmente, os modelos de simulação vêm sendo bastante utilizados no planejamento do processo produtivo das culturas, exercendo assim um papel importante na agricultura, onde através dessa ferramenta é possível fazer previsões de safras e de rendimentos finais. Segundo Oliveira et al., (2012) com o auxílio destes modelos é possível analisar cenários, considerando-se diversos fatores climáticos, edáficos e da cultura, que influenciam na sua produtividade.

As técnicas de previsão numéricas utilizadas para a agricultura geralmente fundamentam-se na agrometeorologia. Enquanto esta, por sua vez, baseia-se na relação estatística entre as variáveis dependentes que deverão ser estimadas e as variáveis agrometeorológicas independentes. (HOOGENBOOM et al., 2010).

Os elementos climáticos são as variáveis de entrada, e são consideradas nestes modelos de simulação como fatores imprescindíveis e que desempenham certa influência da produtividade da cultura. Alguns desses fatores são temperaturas do ar, precipitação e radiação solar. Eles são responsáveis por suprir dados para alimentar os sistemas de previsão de safras agrícolas, como também o seu uso é eficaz para verificar durante o ciclo da cultura fatores que podem causar danos a produtividade, ajudando assim na tomada de decisões (SILVA et al., 2011; ROSA et al., 2010).

As culturas têm seu crescimento e desenvolvimento analisados através dos componentes da planta como folhas, raízes e caule, porém os simuladores vão além desta análise, não apenas estimando a biomassa total, incluindo também informações quantitativas sobre a maioria dos processos envolvidos no crescimento e desenvolvimento vegetal (SOLER, 2004).

Monteith (1996) já definia os modelos de simulação como um conjunto de equações responsáveis por estimar o crescimento, desenvolvimento e produção de determinada cultura, através de dados de coeficientes genéticos e variáveis ambientais, tornando possível a análise de diversos componentes da produção.

Em processo de planejamento, eles são considerados como elementos chaves na tomada de decisões dos planos de desenvolvimento. Na irrigação de um sistema, as informações geradas podem auxiliar nas decisões sobre planos ótimos de cultivo e ocupação da área de produção, com

base na água disponível. Através destes modelos também é possível indicar a melhor época de cultivo, para que a cultura não fique exposta a déficits hídricos em momentos cruciais de sua produção (HOWELL et al., 1992; FRIZZONE et al., 2005).

Apesar destes modelos serem elaborados para representar a dinâmica de funcionamento de um sistema solo-planta-atmosfera, e interagir simultaneamente com o clima e com diversas práticas culturais, eles não fundamentalmente descrevem e simulam todos os processos desse sistema (ANDRADE et al., 2014).

A modelagem de cultura pode apresentar duas abordagens, segundo seus objetivos e finalidades: a científica e de engenharia. A engenharia objetiva ofertar consultorias de gestão ou previsões para decisões futuras, e são baseados em teorias robustas e relações empíricas. Geralmente este tipo de modelo é mais conveniente para o produtor rural, por ser de mais fácil entendimento. Já a científica, é uma abordagem destinada a ser mecânica, baseadas em leis e teorias sobre os processos, e seu conteúdo geralmente aplica-se a uma quantidade maior de fenômenos. Ela objetiva principalmente explicar com maior clareza o comportamento das culturas, sua fisiologia e suas respostas as mudanças ambientais, melhorando assim a compreensão destes fenômenos (PASSIOURA, 1996; THORNLEY; JONHSON, 2000).

A modelagem agrícola baseada em modelos mecânicos apresenta variadas aplicações, como o impacto do plantio e da colheita, onde os dados produzidos podem ser analisados e utilizados nas decisões a serem tomadas, como a melhor época de plantio e de colheita. No desenvolvimento de avaliação comparativa dos limites de produção, potenciais e atingíveis em regiões distintas. Na melhoria da eficiência do uso da água e previsão de produtividade (NASSIF, 2010).

Os modelos de simulação segundo Thornley e Jhonson (2000) apresentam dois tipos de aplicação: aplicações em pesquisas e aplicações práticas. Os aplicados a pesquisa geralmente são mais detalhados, baseados em processos, apresentam maior número de parâmetros e consequentemente se aproximam mais da realidade em consequência desses fatores. Já os de aplicação prática, por serem baseados em equações empíricas e serem mais simples, resultam em aproximações mais superficiais e por esse motivo são inadequados para pesquisa.

### 2.6.2. Principais modelos utilizados no Brasil e no mundo

Em decorrências das bruscas mudanças climáticas que vem ocorrendo nos últimos anos, o setor agrícola vem sofrendo pela falta de conhecimento das condições meteorológicas, dificultando assim a tomada de decisões e os rumos que o setor deve seguir (SILVA et al., 2011).

O uso de tecnologia tem auxiliado nessas questões e tem desenvolvido soluções exponencialmente mais sofisticadas, reduzindo assim o tempo de espera pela resposta certa e abrangente. Essas técnicas desenvolvidas através de tecnologias têm permitido que os agricultores permaneçam sempre competitivos. O uso de modelos computacionais é apresentado como alternativas capazes de gerar informações de modo rápido e abrangente (SANTOS, 2015).

Na literatura são descritos diversos modelos de simulação, em vários níveis de complexidade, em decorrência das peculiaridades existente nas diversas culturas e regiões, e a escolha por qual optar dependerá do seu objetivo (VERHAGEM et al., 2001).

Um dos modelos de uso frequente no Brasil é o *Crop Environment Resource Synthesis* (CERES), ele é formado por um conjunto de modelos de simulação dos processos fisiológicos de culturas, e foi desenvolvido pelo *Grassland Soil and Water Research Laboratory*. Os modelos do grupo CERES estão reunidos no sistema de suporte ao propósito para transferência de agrotecnologia – DSSAT (JONES et al., 2003; HOOGENBOOM et al., 2015; NEGM; YOUSEEF; JAYNES, 2017). O DSSAT tem sido aplicado eficientemente em todo o mundo, por pesquisadores (NASSIF et al., 2012).

Os modelos de simulação contidos no DSSAT além de simular o crescimento e desenvolvimento de cultura com base no clima, solo, manejo, e aspectos genéticos da cultura, também contém modelos de simulações independentes que são utilizados para a organização dos dados sobre clima, solo, observações de campo, condições experimentais e informações genotípicas. Este sistema engloba em um só software diversos modelos com o objetivo de facilitar a avaliação e aplicação dos modelos de cultura para diferentes finalidades (JONES et al., 2003).

Um das peculiaridades desse modelo envolve a evidência no intervalo de tempo do ciclo da cultura, sendo esta uma característica influenciada pelas diferenças genéticas, maturidade da cultura, fotoperíodo e temperatura. Um dos pontos fortes do modelo está na simulação de nitrogênio no solo, porém é pouco utilizado em regiões com alta demanda atmosférica (CASTRIGNANO et al., 1998).

Outro método utilizado é o *World Food Studies* (WOFOST), ele representa o crescimento e desenvolvimento das cultura alicerçado em métodos fundamentais como a fotossíntese e respiração, enquanto estes por sua vez, são influenciados pelas condições ambientais. Com o auxílio deste, é possível compreender a produção potencial, biomassa, uso da água, entre outras, para um local específico. A simulação nesse sistema ocorre ao longo das fases de crescimento e de reprodução, considerando como ponto inicial a emergência e a colheita como o final da simulação (SCARPARE, 2011; VAN WART et al., 2013).

O modelo WOFOST descreve ao longo de uma escala de 0 a 2 as fases de desenvolvimentos das culturas, onde o zero representa o ponto inicial, ou seja, a emergência, o um representa o florescimento e o dois a maturação completa. A duração de cada fase relaciona-se com as características de cada cultivar e de acordo com a temperatura do ambiente, de acordo com o conceito de somatório térmico (VAN KEULEN; VAN DIEPEN, 1990).

Outra característica desse modelo é a apresentação de três níveis hierárquicos de simulação, criados na tentativa de modelar a diversidade ecológica presente na agricultura. São eles: produção potencial, onde nesse nível de simulação os fatores que determinam o seu crescimento são as características genéticas, radiação solar, temperatura do ar, e concentração atmosférica. Outro nível é a produção limitada, nele há um complemento em relação a produção potencial, considerando dois níveis de produção, seja pelo efeito do período deficitário de nutrientes no solo, ou pelo efeito do período deficitário de umidade do solo durante o crescimento da cultura. A diferença entre estes dois níveis está no fato em que a irrigação poderia ser considerada como um incremento se aplicada. No nível de produção reduzida considera-se que além dos fatores hídricos e nutricionais, os fatores bióticos como pragas, doenças e plantas daninhas podem ser responsáveis na redução do rendimento da cultura (SCARPARE, 2011).

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo geral**

O objetivo do presente trabalho consistiu em implementar um simulador climático, calibrado com dados históricos das estações meteorológicas do estado da Paraíba, e um modelo de simulação do crescimento e desenvolvimento de feijão-caupi. Os quais foram utilizados para estimar a produtividade potencial e deplecionada desta cultura considerando as diferentes mesorregiões do estado da Paraíba e épocas de plantio.

#### **3.2. Objetivos específicos**

- Implementar um simulador climático e um modelo de crescimento e desenvolvimento de feijão-caupi.
- Identificar épocas de plantio do feijão-caupi no estado da Paraíba com menor risco de perda de safras e/ou maior potencial produtivo.

#### 4. METODOLOGIA

A série de dados históricos das variáveis climáticas (temperatura, insolação e precipitação) foi obtida junto ao banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e utilizada para o desenvolvimento, teste e execução do modelo de crescimento e desenvolvimento de feijão caupi do presente estudo. O conjunto de dados utilizados referem-se as seis estações meteorológicas principais do estado da Paraíba, as quais representam as condições climáticas das diferentes mesorregiões do estado, localizadas nos municípios de João Pessoa, Campina Grande, Areia, Monteiro, Patos e Sousa.

Como as variáveis radiação fotossinteticamente ativa e temperatura são correlacionadas, possuindo uma relação de dependência, obteve-se por intermédio de seus parâmetros (média, variância e correlação) um conjunto de valores simulados, cujos parâmetros foram muito próximos aos parâmetros originais. Desta forma, foram utilizados os dados de 01 de janeiro de 1960 a 31 de dezembro de 2017 para calibrar um modelo de simulação de variáveis climáticas baseado numa distribuição normal bivariada. Para isto, primeiramente, simulou-se duas variáveis aleatórias independentes, com distribuições uniforme no intervalo entre 0 e 1 ( $K_1$ ,  $K_2$ ). Em seguida, essas variáveis foram transformadas para possuir distribuição normal univariada (BOX; MULLER, 1958).

$$N_1 = \sqrt{-2\ln(k_1)} \cdot \cos(2\pi \cdot k_2)$$

$$N_2 = \sqrt{-2\ln(k_1)} \cdot \sin(2\pi \cdot k_2)$$

Sendo  $N_1$  independente de  $N_2$ . Devem-se utilizar as funções seno e co-seno em unidades de radianos.

Para a simulação da radiação fotossinteticamente ativa ( $PAR_i$ ), deve-se utilizar a seguinte equação, adaptado de Hogg e Craig, (1978).

$$PAR_i = \mu_2 + \sigma_2 \cdot N_1$$

E para simular os valores de temperatura ( $T_i$ ) utiliza-se a equação:

$$T_i = \left( \mu_i + \left( \rho \cdot \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right) \cdot (PAR_i - \mu_2) \right) + \sqrt{1 - \rho^2} \cdot \sigma_1 \cdot N_2$$



Para o cálculo dos graus-dia acumulados (GDA), foram utilizados os valores diários de temperatura do ar máxima ( $T_{max}$ ) e mínima ( $T_{min}$ ) por meio da seguinte equação:

$$GD = \left( \frac{T_{max} - T_{min}}{2} \right) - T_b$$

Em que,  $T_b$  = temperatura base inferior, considerada igual a 10°C. Assumiu-se uma exigência de 1200 graus-dias da semeadura até o ponto de maturidade fisiológica sendo contabilizada pela razão entre os GD acumulados e a exigência total, caracterizando o desenvolvimento relativo da cultura ( $D_r$ ).

Para o cálculo da fitomassa inicial foram considerados os seguintes parâmetros: emergência de 140.000 plantas por hectare com número efetivo de sementes por hectare ( $N_s = 140.000$ ); 25 g massa seca por 100 sementes ( $M_{cs} = 0,025$  g/semente); uma proporção de embrião na semente de feijão caupi de 15% ( $M_{es} = 0,15$  g de embrião/g de semente); proporção de folha no embrião de 40% ( $M_{fe} = 0,40$  g de folha/g de embrião). Desta forma, a matéria seca foliar inicial (MSFI) pode ser assim calculada:

$$MSFI = \frac{N_s \cdot M_{cs} \cdot M_{es} \cdot M_{fe}}{1000}$$

A partir dos valores da fitomassa seca de folha viva ( $FSf$ , kg.ha<sup>-1</sup>) e da área foliar específica ( $A_{fe}$ , m<sup>2</sup>.kg<sup>-1</sup> = m<sup>2</sup> de folha por kg de folha seca), a qual, para feijão, apresenta uma média de 24 m<sup>2</sup>.kg<sup>-1</sup>, calculou-se o índice de área foliar (IAF, m<sup>2</sup>.m<sup>-2</sup>):

$$IAF_i = \frac{FSf_i \cdot A_{fe}}{10000}$$

A partir das variáveis climáticas simuladas, foram calculadas as produtividades potenciais da cultura de feijão caupi para cada uma das regiões representadas pelas estações climatológicas. As produtividades potenciais foram deplecionadas por intermédio do balanço hídrico. A equação geral correspondente à fotossíntese assim descrita:





Em função do poder refletor da cultura ( $Prc = 0,23 \text{ J.J}^{-1}$ ) e da interceptação de radiação solar fotossinteticamente ativa ( $PAR, \text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ), calculou-se a radiação solar fotossinteticamente ativa líquida ( $PAR_{liq}, \text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ):

$$PAR_{liq_i} = (1 - Prc) . PAR_i$$

Assim, as curvas de resposta da assimilação de dióxido de carbono ( $ADC, \text{kg.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ), correspondente a uma dada concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera ( $C_o = 340 \text{ ppm}$ ), podem ser descritas (GOUDRIAAN, 1982):

$$ADC_i = PLMX_i \left[ 1 - e^{-PLEA \cdot \frac{PAR_{liq_i}}{PLMX_i}} \right] \cdot \left( 1 + \beta \ln \left( \frac{C_x}{C_o} \right) \right)$$

Em que  $C_x$  se refere à concentração atual de  $\text{CO}_2$  na atmosfera (assumiu-se  $C_x = 385 \text{ ppm}$ ),  $PLEA$  e  $\beta$  aos parâmetros empíricos descritos por Vries et al. (1989) ( $PLEA = 0,48 \text{ kg.CO}_2.\text{ha}^{-1}.\text{h}^{-1}.\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) e  $\beta = 0,8$  para espécies C3 e  $\beta = 0,4$  para espécies C4) e  $PLMX$  à variável auxiliar ( $\text{kg.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$ ) calculada por intermédio da seguinte expressão:

$$PLMX_i = 40 \cdot \left( \omega_0 + \frac{\omega_1 \cdot T_i}{\omega_2} \right)$$

Em que  $T_i$  se refere à temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) média do vigésimo dia após a emergência, e  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  e  $\omega_2$  aos parâmetros empíricos dependentes da temperatura, referências para os parâmetros empíricos podem ser obtidos em Vries et al.(1983).

A eficiência inicial da utilização da luz absorvida é caracterizada, em particular, por processos biofísicos sendo os valores constantes. A máxima taxa depende da espécie, refletindo os processos bioquímicos e as condições fisiológicas ideais. A equação referente ao cálculo da assimilação de dióxido de carbono foi estabelecida para condições ótimas de temperatura ( $30^{\circ}\text{C}$ ) e na concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera de  $340 \text{ vppm}$ . Sendo assim, a assimilação de dióxido de carbono máxima, a  $30^{\circ}\text{C}$ , é de  $40 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$  (BEUERLEIN; PENDLETON, 1971; DORNHOFF; SHIBLES, 1970). A correção para a temperatura é apresentada por Hofstra e Hesketh (1969), sendo que o valor obtido na função anterior deve ser multiplicado pelo valor obtido como uma função linear.

A fotossíntese bruta ( $FBfi, \text{kg.ha}^{-1}.\text{d}^{-1}$  - quilograma de carboidrato por hectare de folha por dia) foi assim calculada:

$$FBf_i = \frac{30}{44} \cdot ADC_i \cdot N_i \cdot fLAI \cdot fDr$$

Em que  $fIAF$  e  $fDr$  se referem, respectivamente, aos fatores de correção referentes ao índice de área foliar e ao desenvolvimento relativo da cultura.

O efeito do auto sombreamento da área foliar passou a ser considerado a partir do valor do fator de índice de área foliar ( $f_{IAF}$ ) com índice de área foliar ( $IAF$ ,  $m^2 \cdot m^{-2}$ ) superior a  $1 m^2 \cdot m^{-2}$  segundo as seguintes equações:

$$fIAF_i = 1, IAF_i \leq 1$$

$$fIAF_i = e^{\lambda_0 + \lambda_1 \cdot (IAF_i + \lambda_2)}$$

$$fIAF_i = 0,28$$

Em que  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  se referem aos parâmetros ( $\lambda_0 = 0,131 m^2 \cdot m^{-2}$ ,  $\lambda_1 = -0,14 m^2 \cdot m^{-2}$  e  $\lambda_2 = -0,064284 m^2 \cdot m^{-2}$ ) empíricos.

$$fDr_i = 1, se Dr_i \leq Dr_{f_{ini}}$$

$$fDr = \frac{\ln(fDr_{fim})}{fDr_{ini} - Dr_{f_{ini}}} (Dr_i - Dr_{f_{ini}})$$

Em que  $Dr_{f_{ini}}$ ,  $Dr_{fim}$ ,  $fDr_{ini}$ , e  $fDr_{fim}$  ( $Dr_{f_{ini}} = 0,15$ ,  $Dr_{fim} = 1,00$ ,  $fDr_{ini} = 1$  e  $fDr_{fim} = 0,45$ ) se referem aos parâmetros empíricos.

A fotossíntese líquida ( $FL$ ,  $kg \cdot ha^{-1} \cdot d^{-1}$ ), num dado dia foi calculada pela diferença entre a fotossíntese bruta ( $FB$ ) desse dia e a respiração de manutenção do dia anterior ( $RM_{i-1}$ ) obtendo-se  $FLf$ . Calculada pela seguinte equação:

$$Rm = R_o \cdot Wt_{main} + R_f \cdot FB$$

Sendo,  $R_o$  a proporção de fotoassimilados utilizada na manutenção da fitomassa seca total da cultura (0,00035) e  $R_f$  o custo de fotoassimilados relacionado a atividade fotossintética (0,004). Ambos os coeficientes

corrigidos em função da temperatura, utilizando:

$$Rm = Rm \cdot Q^{\frac{(T_{med} - T_{ref})}{10}}$$

Assumindo  $T_{ref} = 30^\circ C$  e  $Q = 2$ . Por fim, multiplica-se a  $FLf$  pelo  $IAF$ :

$$FL_i = FLf_i \cdot IAF_i$$

A partir da formação dos fotoassimilados, esses foram alocados aos diferentes órgãos da planta. A fração de alocação dependeu do órgão da planta (raiz,  $fR_i$ ; haste,  $fH_i$ ; folha  $fF_i$ ; ou órgão reprodutivo,  $fOR_i$ ;) em questão do desenvolvimento relativo da cultura ( $Dr_i$ ) seguindo um modelo de partição de fotoassimilados em função do desenvolvimento da cultura do feijão caupi, apresentado em Driessen e Konijn, 1992.

A eficiência de conversão de carboidrato para fitomassa seca foi dada pela quantidade de carboidrato acumulada multiplicada pela eficiência de conversão em que  $Ec_R$ ,  $Ec_H$ ,  $Ec_F$  e  $Ec_{OR}$  se referem às eficiências de conversão de carboidrato em fitomassa seca de raiz ( $Ec_R = 0,61$ ), haste ( $Ec_H = 0,72$ ), folha ( $Ec_F = 0,67$ ) e órgão reprodutivo ( $Ec_{OR} = 0,79$ ), respectivamente.

A partir da fração alocada em cada um dos órgãos da planta, obteve-se a quantidade de carboidrato alocada em cada um dos seus órgãos. Essa quantidade de carboidrato deve ser convertida em fitomassa seca.

A eficiência de conversão varia conforme a composição da fitomassa seca formada (carboidratos, proteínas, lipídios, lignina e ácidos orgânicos) do órgão vegetal (folha, haste, raiz ou órgão reprodutivo). No entanto, o produto primário da fotossíntese é o carboidrato e sua conversão em outros compostos orgânicos envolve um custo energético, representado pela respiração de síntese.

Uma aproximação é apresentada por de Vries et al. (1983), onde 1 quilograma de carboidrato fotossintetizado resulta em 404 gramas de proteína, 330 gramas de lipídeos, 472 gramas de lignina, 826 gramas de carboidrato estrutural e 1104 gramas de ácidos orgânicos. Conhecendo a composição percentual de fitomassa seca da planta do feijão-caupi, calcula-se a eficiência de conversão ( $Ec$ ) para cada órgão:

$$Ec = QCE.PCE + QP.PP + QL.PL + QLg.PLg + QAO.PAO$$

Em que QCE se refere à quantidade de carboidrato estrutural, PCE é a composição percentual de carboidrato estrutural na fitomassa seca, QP é a quantidade de proteína e PP é composição percentual de proteína na fitomassa seca, QL é a quantidade de lipídios, PL é a composição percentual de lipídios na massa seca, QLg é a quantidade de lignina, PLg é composição percentual de lignina na massa seca, QAO é a quantidade de ácidos orgânicos, e PAO é composição percentual de ácidos orgânicos na massa seca.

A fitomassa seca acumulada para cada órgão ( $FST$ ,  $kg.ha^{-1}$ ) até a maturidade fisiológica foi dada por:

$$FST_i = FST_{i-1} + Falc_i.Ecf$$

Por fim, a fitomassa seca de grãos é dada por:

$$FSg = 0,8 * FSTor$$

Onde FSTor é o produto entre a fitomassa seca total dos órgãos reprodutivos ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) e 0,8 é a proporção de sementes em relação ao total do órgão reprodutivo. Sendo assim, a produtividade potencial de grãos (PPg,  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) pode ser calculada por intermédio da seguinte equação:

$$PPg = \frac{FSg}{1 - u}$$

Em que u se refere ao teor de água, a base de massa, na semente (considerou-se  $u = 0,13$   $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  – 13 g de água em 100 gramas de semente úmida). A produção diária bruta de carboidratos foi deplecionada em função da quantidade real de luminosidade (insolação) e por intermédio da quantidade real de água disponível no solo para as plantas.

Primeiramente simularam-se os dias chuvosos e a quantidade de chuva que ocorre em cada um deles. Simulou-se um número com distribuição uniforme. Se o número gerado foi menor ou igual à probabilidade do dia em questão, então se considera que o dia seja chuvoso, caso contrário a chuva é igual a zero. Além disso, foram considerados os valores mínimos e máximos ocorridos na série histórica do local. A quantidade de chuva calculada para os dias chuvosos foi dada através da estimação de dois número aleatórios com distribuição uniforme ( $U_1$  e  $U_2$ ), sendo eles independentes. Em seguida devem ser estimados os valores  $V_1$   $V_2$ .

$$V_2 = 2 \cdot (U_2 - 1)$$

$$V_1 = 2 \cdot (U_1 - 1)$$

$$VS = V_1^2 + V_2^2$$

Se o valor simulado (VS) foi maior que 1, então deve-se refazer o passo anterior. Em seguida deve-se calcular o valor acessório ( $V_x$ ) para o cálculo do valor da chuva simulada (CS) que é dado em função:

$$V_x = V_1 \cdot \sqrt{-2 \log(VS) / VS}$$

$$CS_i = Cm_i + V_x \cdot C_{dp}$$

Caso os valores da chuva simulada forem maiores ou menor do valor máximo e mínimo da média histórica para o dia, deve-se recomeçar o processo.

A metodologia proposta por Thornthwaite (1948) foi usada para calcular a evapotranspiração potencial. A evapotranspiração da cultura, assim como os valores do coeficiente da cultura é definida por Doorenbos e Kassam (1979). O balanço hídrico normal segue a sequência descrita por Thornthwaite e Mather (1955).

Para a cultura do feijão caupi, o coeficiente de sensibilidade da cultura ao estresse hídrico foi modificada a partir dos valores descritos por Doorenbos e Kassam (1979). Assim, a relação entre a evapotranspiração real e máxima pode ser usado para determinar a produtividade deplecionada (DP, kg ha<sup>-1</sup>) da cultura, em relação ao rendimento potencial (PP, kg ha<sup>-1</sup>). Portanto,

$$PD = PP. \left[ 1 - k_{y_i} \left( 1 - \left( \frac{Etr_i}{Etc_i} \right) \right) \right]$$

Quando o Dr foi menor que 0,24 então Ky valeu 0,20; quando o Dr esteve entre 0,24 e 0,40 o Ky foi 0,40; com Dr entre 0,4 e 0,48 o Ky teve o valor de 0,6; entre 0,48 e 0,61 o Ky foi 0,60, entre 0,61 e 0,90 o Ky foi 0,90 e quando o Dr foi maior ou igual a 0,90 o Ky foi 1.

O modelo descrito, assim como as simulações descritas nos próximos tópicos, foram implementados utilizando a linguagem de programação JavaScript e executado utilizando o software Nodejs.

Foram realizadas simulações considerando plantios quinzenais ao longo do ano, perfazendo 24 épocas de plantio, para cada uma das seis estações climatológicas, totalizando 144 cenários alternativos os quais foram simulados repetidamente 500 vezes. Contabilizando-se a produtividade potencial e deplecionada média, máxima e mínima, assim como o risco de perda de safras.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. João Pessoa

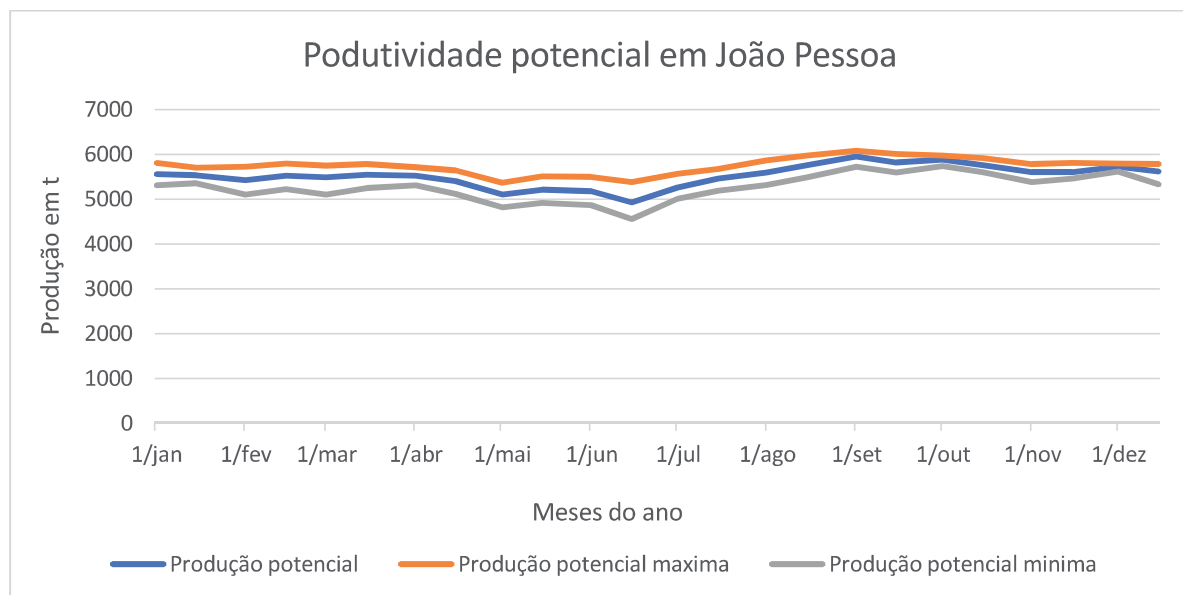
A caracterização dos dados meteorológicos para a região de João Pessoa – PB (Tabela 1) foi realizada utilizando uma série histórica diária de 24 anos, envolvendo a temperatura do ar, máxima e mínima, precipitação e insolação. A partir destes dados, foram realizadas as estimativas mensais de média e desvio padrão da temperatura média, máxima e mínima, precipitação e radiação solar (obtida a partir da insolação) para os diferentes meses do ano. Procurando capturar as tendências centrais e de dispersão destes parâmetros ao longo desta série histórica.

Ainda na Tabela 1 podemos observar temperaturas mensais mais elevadas entre os meses de setembro a maio com uma relativa previsibilidade. Por outro lado, as temperaturas dos meses de junho, julho e agosto tendem a ser mais amenas. Quanto a precipitação, observamos médias elevadas durante os meses de janeiro à agosto, porém associadas a um desvio padrão equivalente ou superior a média. Desta forma, podemos concluir que apesar de uma tendência de precipitação média elevada nos referidos meses, existe uma elevada irregularidade, o qual pode ser um complicador para a cultura do feijão-caupi considerando seu cultivo em sequeiro. A partir do mês de setembro até dezembro, a previsibilidade climática aumenta, com uma redução significativa do desvio padrão em relação à média, em contrapartida, ocorre uma redução drástica na precipitação média mensais, caracterizando os meses mais secos do ano. Por fim, a radiação solar apresenta valores médios elevados entre os meses de setembro a março, porém manifestando valores inferiores entre os meses de abril a agosto. É interessante notar uma associação entre a irregularidade na previsibilidade deste parâmetro com o parâmetro precipitação, fato que se deve a inegável associação entre os meses. Uma vez que maiores níveis de precipitação significam dias mais nublados e conseqüentemente uma menor radiação solar.

**TABELA 1** – Estimativa de média (m) e desvio padrão para a temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax), temperatura média (Tmed), precipitação (Precip) e radiação solar (Rad) para os meses do ano na região de João Pessoa – PB.

| Mês | Tmin  |      | Tmax  |      | Tmed  |      | Precip |        | Rad   |      |
|-----|-------|------|-------|------|-------|------|--------|--------|-------|------|
|     | m     | dp   | m     | dp   | m     | dp   | m      | dp     | m     | dp   |
| Jan | 25.11 | 1.85 | 30.66 | 0.51 | 27.88 | 0.70 | 94.35  | 111.94 | 10.43 | 3.72 |
| Fev | 24.23 | 1.99 | 29.89 | 0.62 | 27.06 | 0.85 | 103.20 | 141.37 | 10.28 | 2.73 |
| Mar | 24.92 | 2.03 | 31.11 | 0.77 | 28.00 | 0.78 | 156.63 | 159.38 | 10.14 | 2.62 |
| Abr | 24.21 | 1.57 | 30.62 | 1.20 | 27.40 | 0.75 | 237.44 | 268.10 | 8.86  | 2.94 |
| Mai | 23.50 | 1.00 | 30.06 | 1.07 | 26.77 | 0.52 | 292.94 | 346.02 | 7.99  | 2.41 |
| Jun | 22.46 | 0.92 | 28.97 | 1.29 | 25.70 | 0.60 | 381.65 | 481.54 | 7.02  | 2.54 |
| Jul | 21.96 | 1.09 | 28.54 | 0.92 | 25.25 | 0.53 | 283.01 | 302.15 | 7.53  | 2.23 |
| Ago | 21.93 | 1.60 | 28.68 | 0.55 | 25.30 | 0.56 | 159.01 | 118.50 | 8.86  | 1.93 |
| Set | 23.08 | 2.05 | 29.23 | 0.39 | 26.16 | 0.69 | 64.77  | 42.32  | 10.03 | 1.50 |
| Out | 24.47 | 1.95 | 29.87 | 0.37 | 27.17 | 0.69 | 30.36  | 8.74   | 10.96 | 1.29 |
| Nov | 25.11 | 1.62 | 30.34 | 0.29 | 27.73 | 0.55 | 24.12  | 8.72   | 11.13 | 1.88 |
| Dez | 25.33 | 2.10 | 30.61 | 0.33 | 27.97 | 0.70 | 35.09  | 16.34  | 10.99 | 1.83 |

**FIGURA 1** – Produtividade potencial média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de João Pessoa – PB.

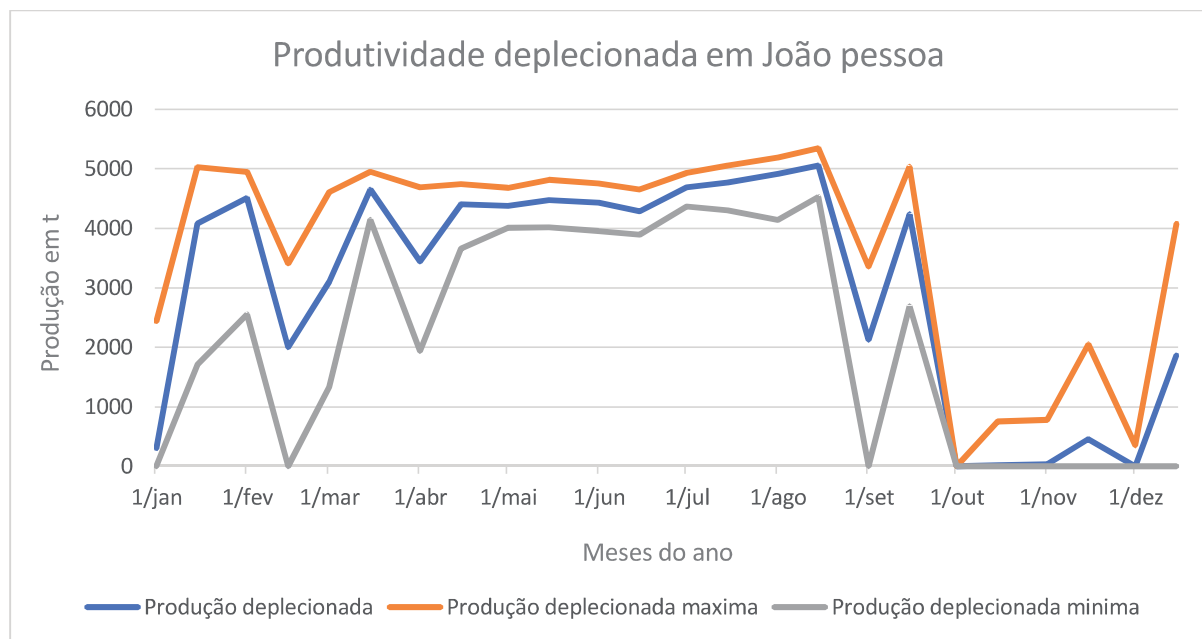


Na Figura 1 estão representadas a produtividade potencial de feijão-caupi, ou seja, sem restrição hídrica para diferentes épocas de plantio na região de João Pessoa. Podemos observar a viabilidade, em termos climáticos do plantio irrigado durante o ano todo na região, porém com oscilações na produtividade potencial decorrente de flutuações na temperatura e radiação



solar no atendimento das necessidades fisiológicas da cultura. De forma geral, podemos observar produtividades máximas previstas a partir de setembro até dezembro, inclusive superando 6 toneladas, além de uma menor amplitude de variação entre a máxima e a mínima. Tal previsão pode ser explicada pela maior disponibilidade de radiação solar, incrementando a taxa fotossintética, associada a temperaturas favoráveis a cultura. Contrariamente, nos primeiros meses do ano, apesar de uma radiação solar média equivalente, a maior variação nas taxas de radiação solar e temperaturas mais elevadas, elevando a respiração da cultura, provavelmente contribuíram para uma redução na produtividade potencial da cultura. Por fim, os meses entre maio a agosto registram as menores produtividades, inclusive com a menor estimativa no plantio em 15 de junho, menor que 5 toneladas. Tais conclusões se devem a redução nas taxas de fotossintéticas em função da redução significativa da radiação solar disponível para as plantas.

**FIGURA 2** – Produtividade deplecionada média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de João Pessoa – PB.

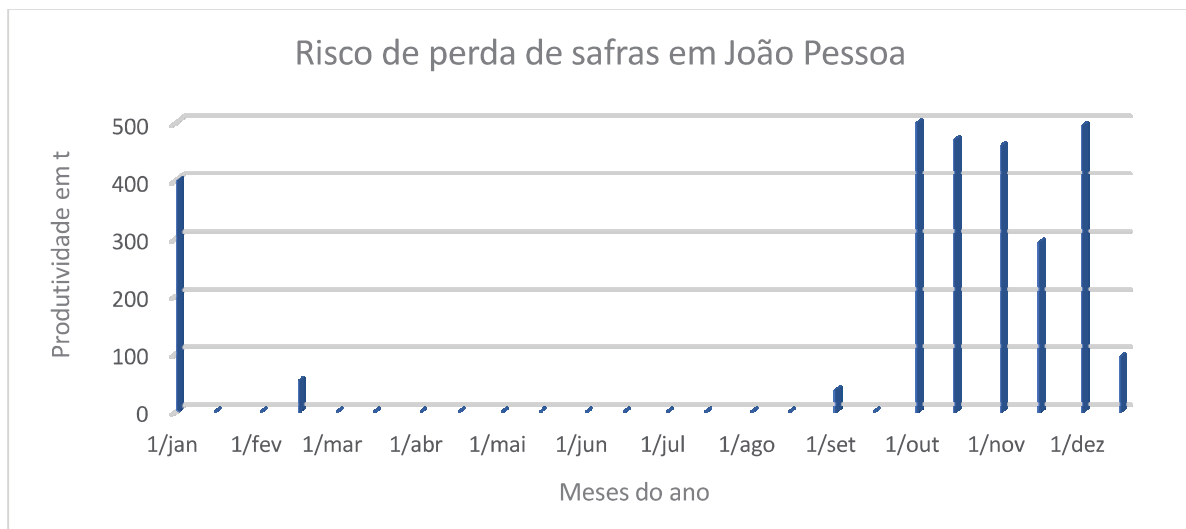


Na Figura 2 é apresentado a produtividade deplecionada em função da ocorrência de estresse hídrico em diferentes épocas de plantio, representando o efeito da oscilação temporal da ocorrência de precipitações ao longo do ano na cultura do feijão-caupi sob condições de sequeiro. Em contraste com a produtividade potencial, relatada anteriormente, podemos observar uma redução significativa na produtividade estimada para todas as épocas de plantio,



além disto, observamos que o período entre setembro e dezembro, considerado o melhor para o plantio irrigado, passa a ser o de menor potencial produtivo com a produtividade média estimada atingindo a nulidade, caracterizando a perda da lavoura. De forma semelhante, os meses de janeiro e fevereiro apresentam uma redução menos acentuada no potencial produtivo, porém observamos também produtividades nulas caracterizando um risco de perdas de safra. Por outro lado, os meses menos favoráveis ao cultivo irrigado, maio a agosto, juntamente com os meses de março a abril, passam a ser os meses mais favoráveis para o cultivo de sequeiro com uma menor redução do potencial produtivo, produtividades médias superiores a 4 toneladas e sem ocorrência de produtividades nulas.

**FIGURA 3** – Risco de perda de safras para diferentes épocas de plantio na região de João Pessoa – PB.



Quando consideramos o risco de perda de safras no cultivo em sequeiro (Figura 3) observamos um risco mais intenso de perdas entre a segunda quinzena de outubro à primeira quinzena de janeiro, período em que quase a totalidade das 500 simulações realizadas apresentou produtividades nulas. Por outro lado, podemos observar entre a segunda quinzena de março até o final de agosto um risco nulo de perdas, podendo ser considerada uma janela de plantio muito favorável ao cultivo de feijão-caupi sob condições de sequeiro na região de João Pessoa.

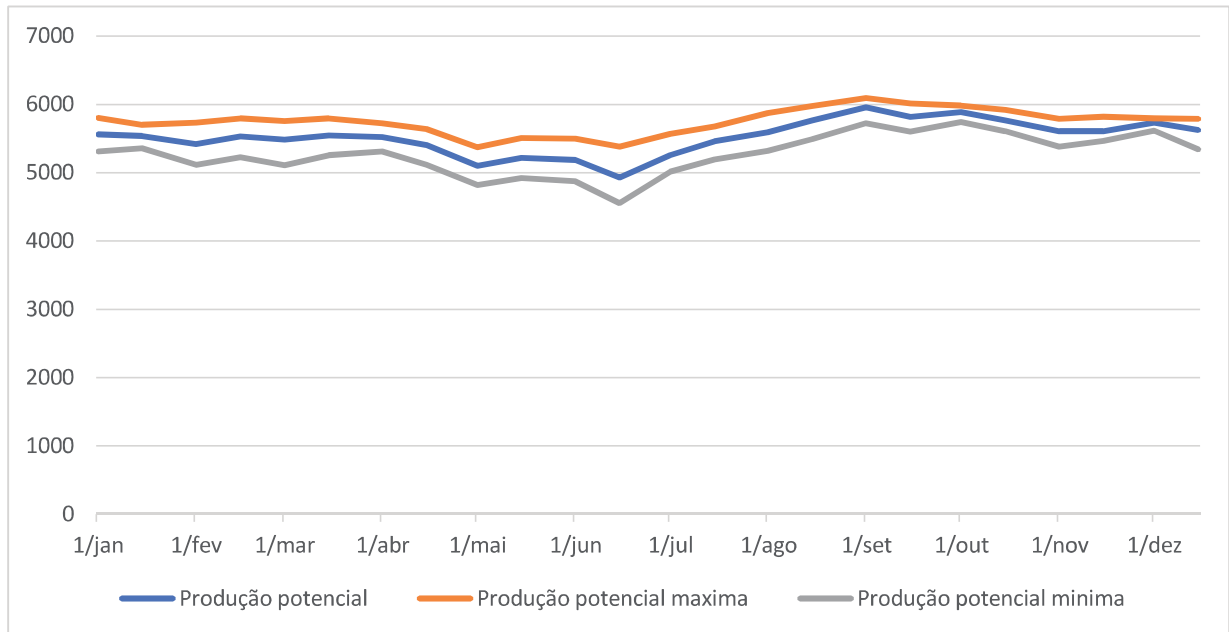
## 5.2. Campina Grande

Para a região de Campina Grande - PB, os dados climáticos obtidos a partir de 24 anos de registro permitiram a estimativa dos parâmetros apresentados na Tabela 1. Podemos observar temperaturas mais elevadas entre os meses de setembro e abril e mais amenas entre maio e julho. Todas estimativas apresentam elevada previsibilidade tendo em vista o baixo desvio padrão das médias mensais. As precipitações médias mensais permitem concluir a existência de um período chuvoso entre os meses de fevereiro e agosto, entretanto os valores das estimativas de desvio padrão demonstram uma elevada variabilidade no regime de chuvas durante o período. Por outro lado, o período compreendido entre os meses de setembro a janeiro apresenta um baixo volume de precipitação mensal, porém com elevada previsibilidade. Enquanto para a radiação solar observamos valores mais elevados entre os meses de setembro e abril, contrastando com os meses de maio a agosto, os quais apresentam os menores valores. Interessante notar que a radiação solar acompanhou as variações da precipitação de forma inversa, quanto maior a precipitação, menor a radiação solar incidente.

**TABELA 2** – Estimativa de média (m) e desvio padrão para a temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax), temperatura média (Tmed), precipitação (Precip) e radiação solar (Rad) para os meses do ano na região de Campina Grande – PB.

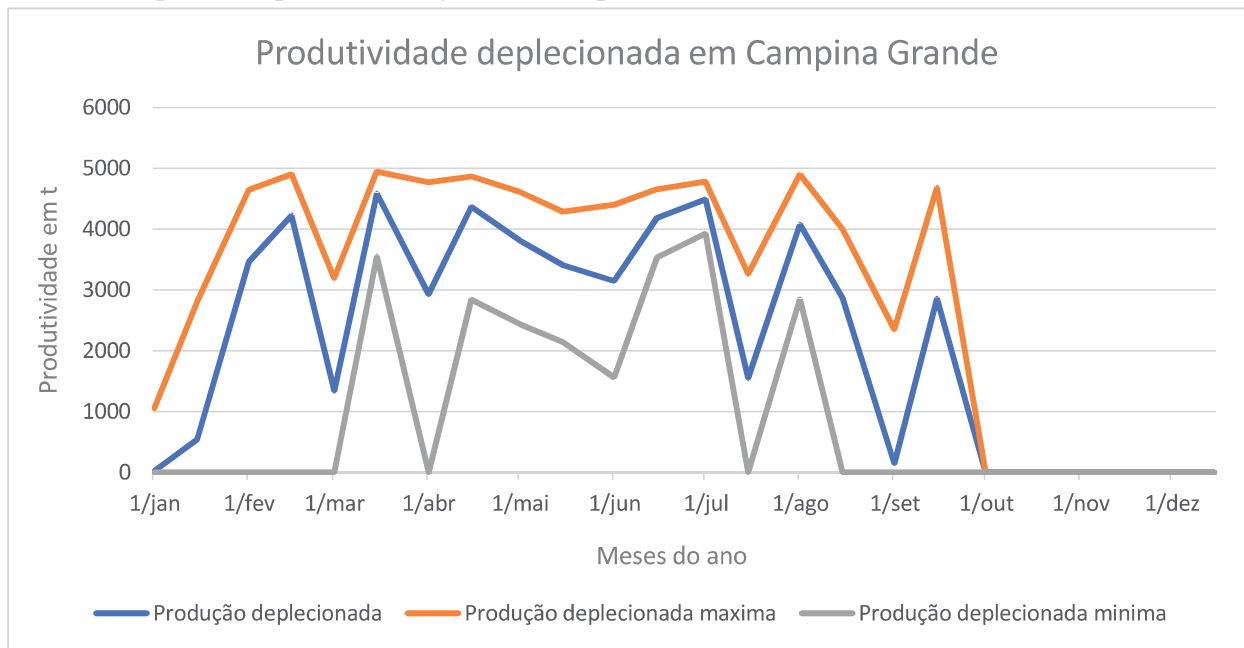
| Mês | Tmin  |      | Tmax  |      | Tmed  |      | Precipitação |       | Radiação |      |
|-----|-------|------|-------|------|-------|------|--------------|-------|----------|------|
|     | M     | dp   | m     | dp   | M     | dp   | m            | dp    | m        | dp   |
| Jan | 21.21 | 0.58 | 30.70 | 2.87 | 25.96 | 0.98 | 50.22        | 30.91 | 10.41    | 2.75 |
| Fev | 20.65 | 0.52 | 29.56 | 3.44 | 25.11 | 1.14 | 73.10        | 77.48 | 10.10    | 2.78 |
| Mar | 21.54 | 0.55 | 30.26 | 3.55 | 25.90 | 1.27 | 100.33       | 96.89 | 10.15    | 2.26 |
| Abr | 21.28 | 0.65 | 29.36 | 2.87 | 25.31 | 1.05 | 91.26        | 58.56 | 9.01     | 2.26 |
| Mai | 20.64 | 0.68 | 27.99 | 4.09 | 24.31 | 1.36 | 112.65       | 68.32 | 7.73     | 2.27 |
| Jun | 19.45 | 0.81 | 26.18 | 2.89 | 22.81 | 0.98 | 138.83       | 86.00 | 6.77     | 2.37 |
| Jul | 18.64 | 1.05 | 25.59 | 2.17 | 22.12 | 0.81 | 112.34       | 71.12 | 7.07     | 2.27 |
| Ago | 18.44 | 0.86 | 26.41 | 2.15 | 22.43 | 0.73 | 79.21        | 36.53 | 8.44     | 2.64 |
| Set | 19.11 | 0.78 | 28.18 | 1.73 | 23.64 | 0.72 | 28.96        | 12.16 | 10.06    | 1.62 |
| Out | 20.02 | 0.49 | 29.96 | 1.44 | 24.99 | 0.55 | 11.34        | 2.22  | 10.94    | 1.37 |
| Nov | 20.57 | 0.40 | 30.64 | 1.44 | 25.61 | 0.49 | 13.49        | 5.18  | 11.06    | 1.28 |
| Dez | 21.05 | 0.40 | 31.03 | 1.57 | 26.04 | 0.53 | 14.16        | 4.83  | 10.64    | 2.71 |

**FIGURA 4** – Produtividade potencial média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de Campina Grande – PB.



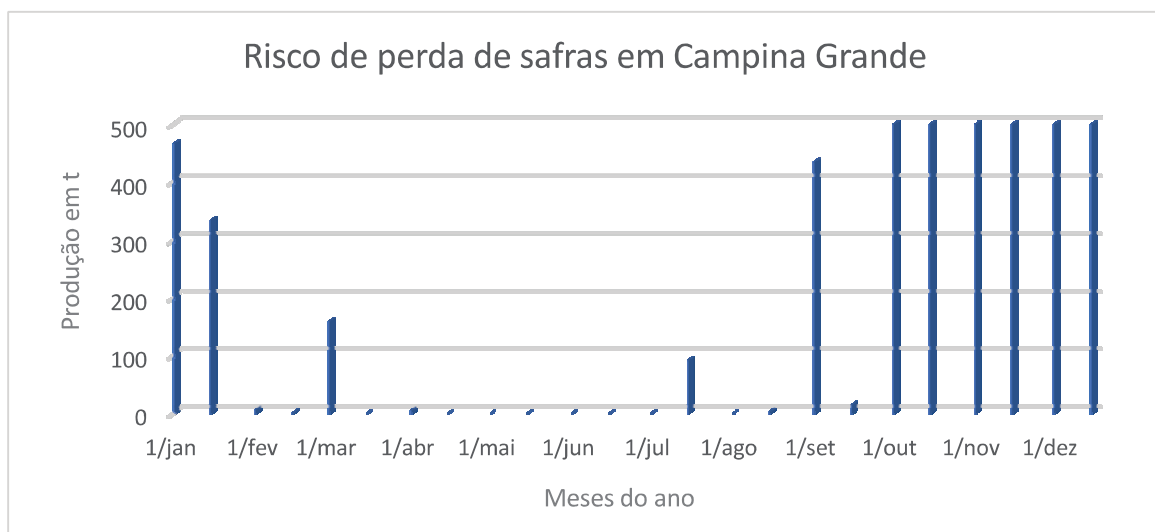
As estimativas da produtividade potencial de feijão-caupi para a região de Campina Grande – PB (Figura 4) demonstram a viabilidade do cultivo irrigado desta cultura durante todo o ano, porém com oscilações nas estimativas de produtividade em função do atendimento das necessidades fisiológicas da cultura por fatores climáticos. As menores estimativas de produtividade foram observadas para os meses de maio a agosto, coincidindo com os menores valores de radiação solar, sendo a menor estimativa de produtividade média (4929,51 kg/ha) obtida para o plantio em 15 de junho, mês com o menor valor de radiação solar observada (6.77). Por outro lado, a maior estimativa (6088,86 kg/ha) ocorreu para o plantio em 01 de setembro, coincidindo com o período de elevação dos níveis de radiação solar. Desta forma podemos concluir que apesar da viabilidade de plantio durante todo o ano, o período menos chuvoso torna-se mais favorável à obtenção de elevadas produtividades quando existir a viabilidade do cultivo irrigado.

**FIGURA 5** – Produtividade deplecionada média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de Campina Grande – PB.



As estimativas da produtividade deplecionada para a região de Campina Grande – PB (Figura 5) demonstraram uma redução média de 60,7 % em função do estresse hídrico, sendo o período compreendido entre julho e abril o de maior redução no potencial produtivo com a ocorrência de plantios com produção nula decorrente da perda de lavouras. Por outro lado, os meses de maio, junho e julho foram os mais produtivos (média de 4608,28 kg/ha). Observa-se uma inversão entre os meses mais produtivos quando considerado a cultura de sequeiro (meses mais secos) e a cultura irrigada (meses mais chuvosos).

**FIGURA 6** – Risco de perda de safras para diferentes épocas de plantio na região de Campina Grande – PB.



Quando consideramos o risco de perda de safras no cultivo em sequeiro (Figura 6) observamos um risco mais intenso de perdas entre os meses de julho e abril, período em que grande parte das 500 simulações realizadas apresentou produtividades nulas. Enquanto isto, o período compreendido entre a segunda quinzena de abril e a primeira quinzena de julho, apresentou risco nulo de perda de safras, podendo ser considerado mais favorável para o cultivo de sequeiro na região de Campina Grande – PB.

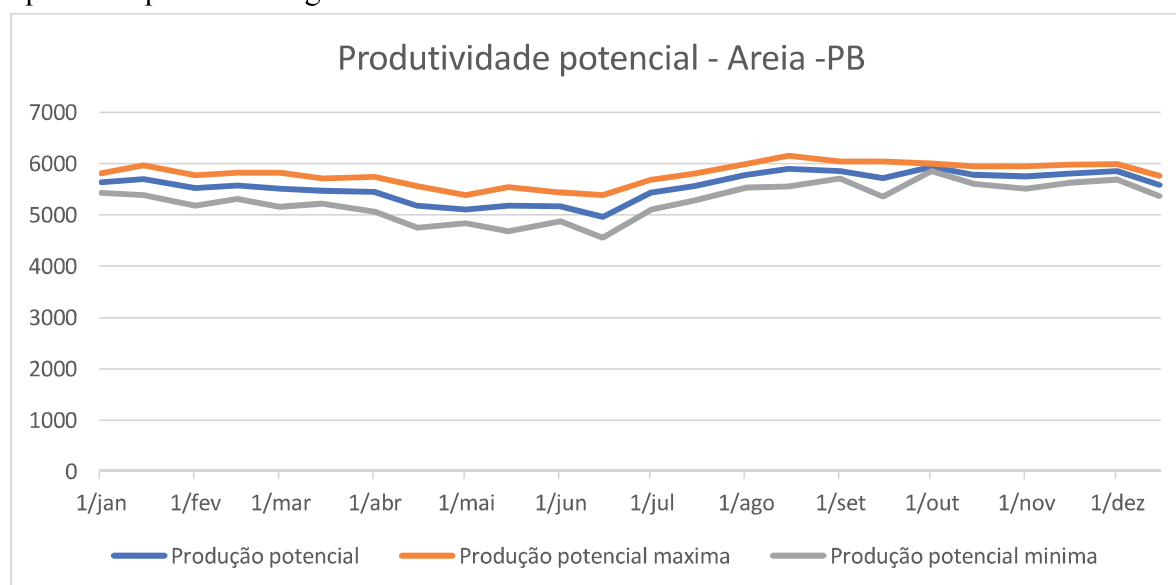
### **5.3. Areia**

A caracterização meteorológica de Areia – PB (Tabela 3) mostra temperaturas médias mensais mais elevadas entre os meses de outubro e março, para os meses de abril, maio e setembro podem ser caracterizados como períodos de transição com temperaturas intermediárias entre o período mais quente e mais ameno. Por fim, os meses de junho, julho e agosto são os de menor temperatura média no ano. Variações significativas são observadas quanto a previsibilidade destas médias, ocorrendo uma maior previsibilidade no período de menores temperaturas, assim como verificamos grande variação quanto a temperatura máxima nos meses mais quentes do ano. Quanto à precipitação mensal média, observamos no período de janeiro a agosto a ocorrência das maiores médias com pico em junho (192,13 mm), entretanto estas médias estão acompanhadas com um elevado desvio padrão, demonstrando uma elevada variação nestas médias ao longo dos anos. Em contraposição, o período entre setembro a dezembro constitui o período de menor volume de chuvas associado a uma previsibilidade um pouco melhor, caracterizando este como o período mais seco do ano para a região. Quanto a radiação solar mensal, observamos os maiores valores entre os meses de outubro a março se correlacionando positivamente ao período de maiores temperaturas e negativamente a ocorrência de precipitações.

**TABELA 3** – Estimativa de média (m) e desvio padrão para a temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax), temperatura média (Tmed), precipitação (Precip) e radiação solar (Rad) para os meses do ano na região de Areia – PB.

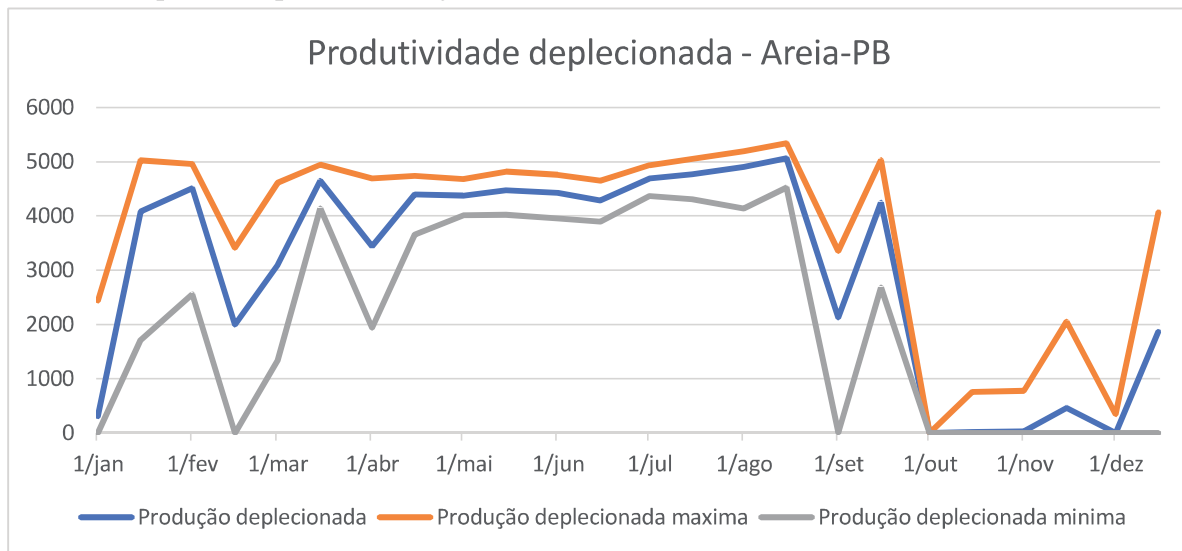
| Mês | Tmin  |      | Tmax  |      | Tmed  |      | Precipitação |        | Radiação |      |
|-----|-------|------|-------|------|-------|------|--------------|--------|----------|------|
|     | m     | dp   | m     | dp   | m     | dp   | M            | dp     | m        | dp   |
| Jan | 20.30 | 1.26 | 28.97 | 3.71 | 24.64 | 1.32 | 92.20        | 75.62  | 9.65     | 3.21 |
| Fev | 19.83 | 1.39 | 27.93 | 3.71 | 23.88 | 1.51 | 106.65       | 115.34 | 9.31     | 2.95 |
| Mar | 20.74 | 1.82 | 28.64 | 3.52 | 24.69 | 1.75 | 145.99       | 113.79 | 9.13     | 2.84 |
| Abr | 20.73 | 1.05 | 27.69 | 2.61 | 24.21 | 1.06 | 152.17       | 128.76 | 7.94     | 2.86 |
| Mai | 20.15 | 0.69 | 26.49 | 3.07 | 23.32 | 1.06 | 182.22       | 134.79 | 7.23     | 2.58 |
| Jun | 19.01 | 0.81 | 24.72 | 2.34 | 21.87 | 0.82 | 214.32       | 140.12 | 6.40     | 2.50 |
| Jul | 18.14 | 1.37 | 24.18 | 2.03 | 21.16 | 0.89 | 192.13       | 117.87 | 6.82     | 2.60 |
| Ago | 17.98 | 1.07 | 24.74 | 1.94 | 21.35 | 0.77 | 144.21       | 95.43  | 7.82     | 3.03 |
| Set | 18.52 | 0.92 | 26.26 | 2.06 | 22.39 | 0.88 | 55.77        | 29.89  | 8.79     | 2.54 |
| Out | 19.13 | 1.33 | 28.19 | 1.35 | 23.66 | 0.77 | 20.92        | 4.84   | 10.07    | 1.78 |
| Nov | 19.58 | 1.90 | 29.03 | 1.64 | 24.30 | 1.16 | 27.17        | 12.85  | 10.47    | 1.65 |
| Dez | 19.99 | 2.63 | 29.49 | 1.81 | 24.74 | 1.24 | 35.88        | 15.43  | 9.83     | 1.62 |

**FIGURA 7** – Produtividade potencial média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de Areia – PB.



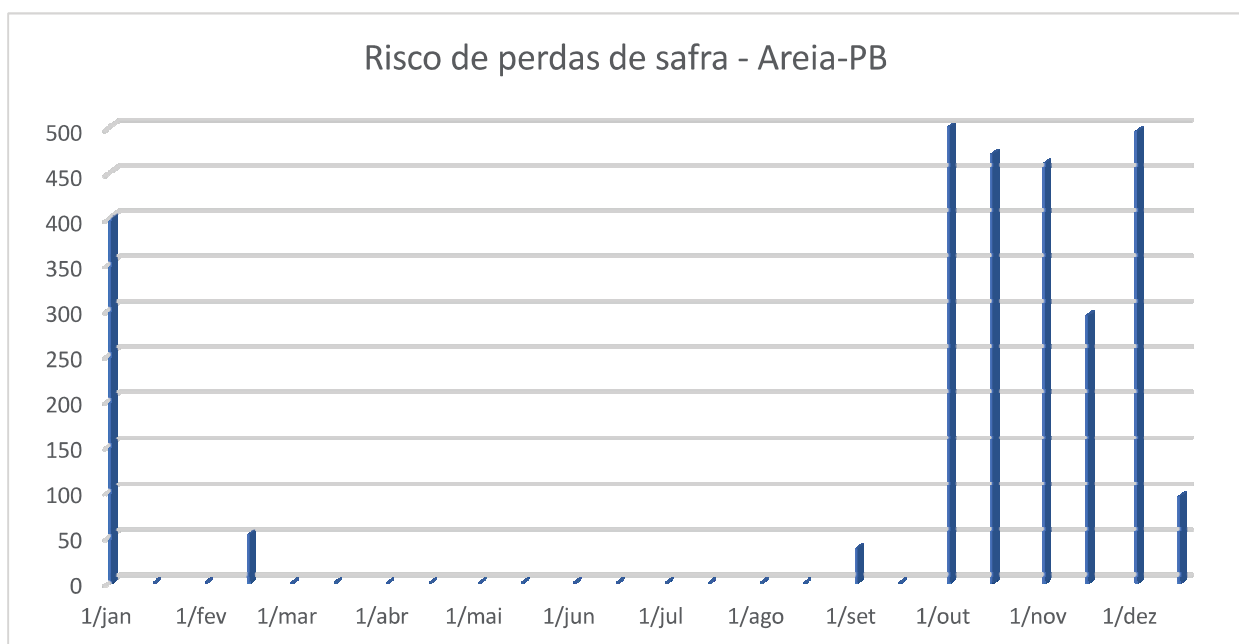
A produtividade potencial estimada para diferentes épocas de plantio na região de Areia – PB (Figura 7) mostra a viabilidade do cultivo desta cultura durante todo o ano. As maiores produtividades potenciais ocorrem no período com temperaturas e radiação solar mais elevadas, os quais coincidem com as menores precipitações médias mensais. Assim sendo, a menor produtividade potencial foi estimada para o plantio em 01 de outubro (5941,01 kg/ha), enquanto a menor produtividade potencial ocorreu no plantio em 15 de junho (4963,64 kg/ha), uma diferença de 977,37 kg/há.

**FIGURA 8** – Produtividade deplecionada média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de Areia – PB.



Para a produtividade deplecionada em função de estresses hídricos (Figura 8), cultura de sequeiro, observamos uma redução média de 46,8 %. As menores produtividades deplecionada ocorrem nos plantios entre outubro e janeiro, ocorrendo diversas produtividades nulas, sendo a menor produtividade estimada para 15 de dezembro (1870,46 kg/ha). Enquanto as maiores produtividades ocorrem entre março e setembro, sendo a maior produtividade observada em 15 de agosto (5060,64 kg/ha).

**FIGURA 9** – Risco de perda de safras para diferentes épocas de plantio na região de Areia – PB.



Conforme apresentada na Figura 9, o período entre os meses de outubro e janeiro são os de maiores riscos de perda de safras, na simulação realizada quase a totalidade dos plantios são perdidos. Entretanto, vale ressaltar riscos nos plantios em fevereiro e agosto, sendo os meses entre abril e agosto os mais seguros quanto a ocorrência de precipitações, não tendo sido identificado risco de perda de safras neste período.

#### 5.4. Monteiro

Podemos visualizar na Tabela 4 a caracterização climática para a região de Monteiro – PB, as temperaturas médias mensais tendem a serem elevadas entre os meses de setembro e maio, enquanto os meses entre abril e agosto são os mais amenos, estimativas obtidas com uma previsibilidade relativa. Os maiores registros nas precipitações mensais são observados para o período entre janeiro e maio, porém com baixa previsibilidade. Os demais meses do ano tendem a registrar baixos volumes de chuva. Quanto a radiação solar verificamos os menores valores entre os meses de maio a agosto coincidindo com os meses de temperaturas mais amenas.

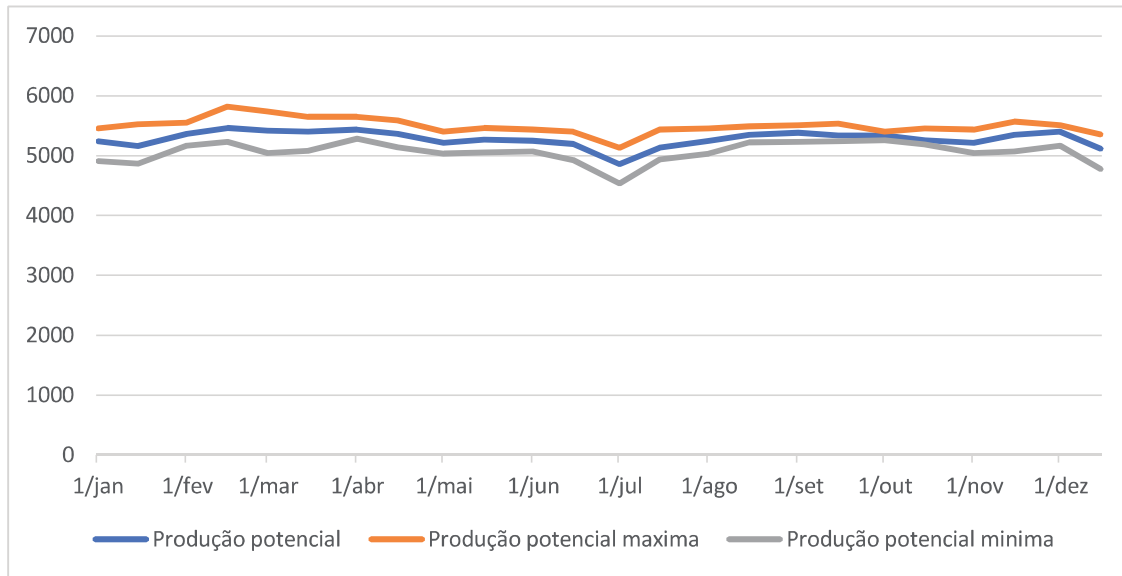
**TABELA 4** – Estimativa de média (m) e desvio padrão para a temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax), temperatura média (Tmed), precipitação (Precip) e radiação solar

| Mês | Tmin  |      | Tmax  |      | Tmed  |      | Precipitação |        | Radiação |      |
|-----|-------|------|-------|------|-------|------|--------------|--------|----------|------|
|     | m     | dp   | m     | Dp   | M     | dp   | m            | dp     | m        | dp   |
| Jan | 19.98 | 3.72 | 32.44 | 3.26 | 26.21 | 1.95 | 70.57        | 79.38  | 10.41    | 3.99 |
| Fev | 19.31 | 2.74 | 31.05 | 3.51 | 25.18 | 1.63 | 82.96        | 85.87  | 10.09    | 2.68 |
| Mar | 20.45 | 1.82 | 31.77 | 3.51 | 26.15 | 1.34 | 115.78       | 102.61 | 10.12    | 2.37 |
| Abr | 20.05 | 1.96 | 30.98 | 3.23 | 25.52 | 1.27 | 84.21        | 78.96  | 9.13     | 1.90 |
| Mai | 19.26 | 2.47 | 29.75 | 4.64 | 24.50 | 1.79 | 110.75       | 127.91 | 7.93     | 1.75 |
| Jun | 17.89 | 3.22 | 28.31 | 3.07 | 23.10 | 1.33 | 51.28        | 28.53  | 7.22     | 1.92 |
| Jul | 17.19 | 3.95 | 28.02 | 2.53 | 22.61 | 1.66 | 34.96        | 27.84  | 7.47     | 2.01 |
| Ago | 16.61 | 3.97 | 29.17 | 2.55 | 22.89 | 1.57 | 19.22        | 7.63   | 8.93     | 1.86 |
| Set | 17.28 | 3.45 | 31.09 | 2.08 | 24.18 | 1.49 | 8.33         | 5.69   | 10.49    | 0.94 |
| Out | 18.91 | 2.05 | 32.52 | 2.01 | 25.71 | 1.09 | 20.50        | 24.20  | 11.07    | 1.53 |
| Nov | 19.85 | 1.52 | 33.03 | 1.59 | 26.44 | 0.89 | 17.35        | 27.01  | 11.35    | 1.62 |
| Dez | 20.30 | 1.63 | 33.02 | 2.58 | 26.67 | 0.96 | 39.37        | 57.19  | 10.60    | 3.31 |

(Rad) para os meses do ano na região de Monteiro – PB.

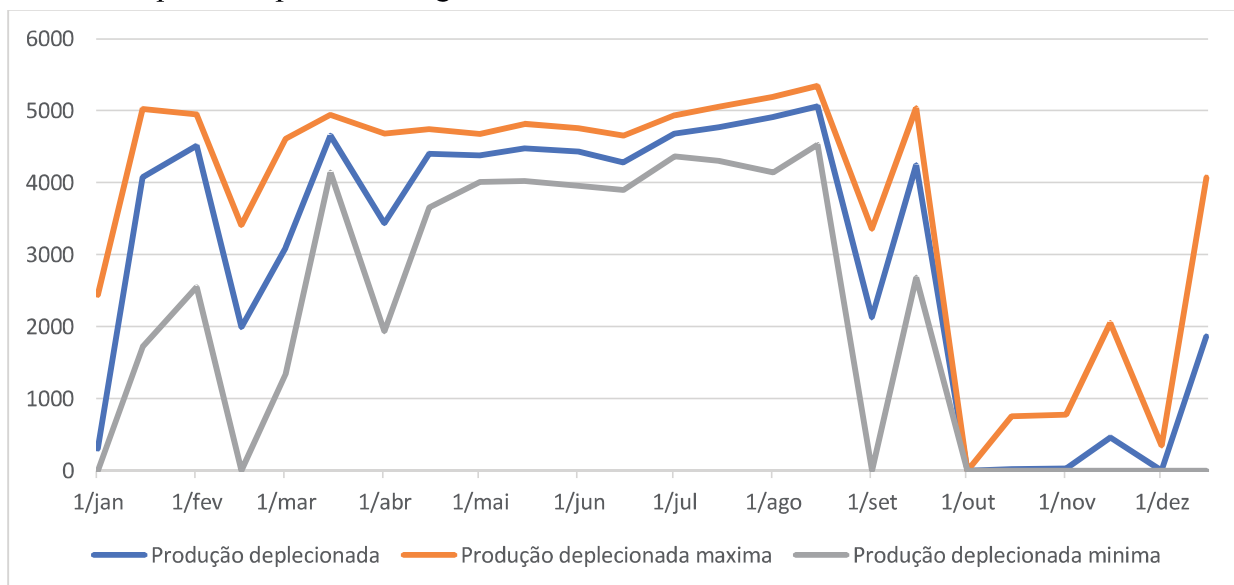


**FIGURA 10** – Produtividade potencial média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de Monteiro – PB.



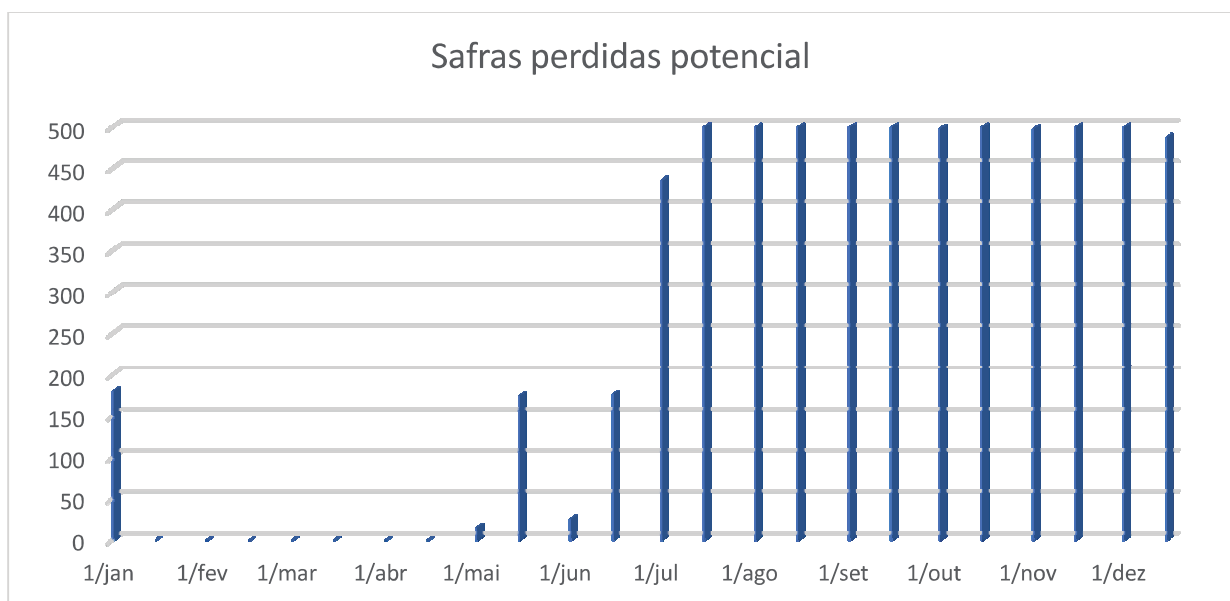
A produtividade potencial média estimada para a região de Monteiro – PB encontra-se na Figura 10, considerando o cultivo irrigado fica evidente a viabilidade do cultivo o ano todo. Porém, caso o objetivo seja o plantio no período com os maiores níveis de produtividade recomenda-se evitar os meses de temperatura mais amenas, sendo 01 de outubro a maior produtividade potencial estimada (5941,01 kg/ha), por outro lado a menor produtividade observada (4963,64 kg/ha) foi observada para a data de 01 de junho.

**FIGURA 11** – Produtividade deplecionada média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de Monteiro – PB.



A Figura 11 apresenta a produtividade média deplecionada (cultivo em sequeiro) para a região de Monteiro – PB. Nesta situação o podemos identificar a maior janela de plantio recomendada como sendo de 01 de março a 15 de agosto, assim como uma segunda janela menor entre a segunda quinzena de janeiro e a primeira de fevereiro. As demais épocas de plantio, especialmente entre outubro e dezembro as médias de produção estimadas são extremamente baixas associadas a diversas produtividades nulas.

**FIGURA 12** – Risco de perda de safras para diferentes épocas de plantio na região de Monteiro – PB.



O risco de perda de safras para a região de Monteiro (Figura 12) comprovam a janela de plantio identificada anteriormente, observamos perdas significativas para plantio entre maio e a primeira quinzena de janeiro. Podemos considerar portanto este período como inviável ao plantio da cultura de sequeiro do feijão caupi pela insuficiência do suprimento hídrico mínimo para o desenvolvimento fisiológico desta planta.

## 5.5. Patos

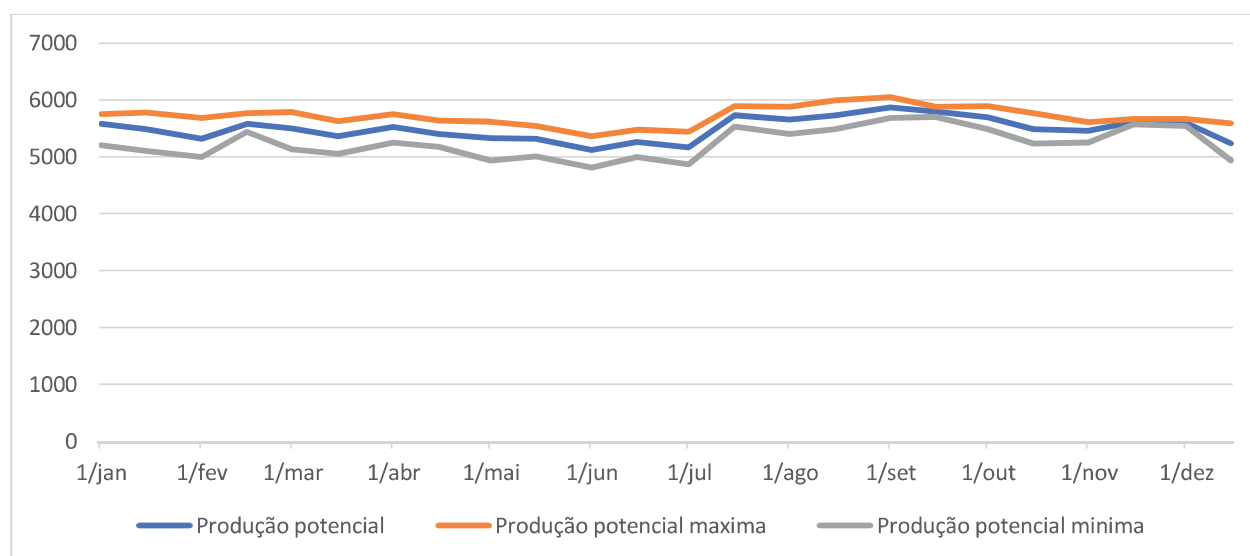
As estimativas das variáveis climáticas para a região de Patos – PB estão apresentadas na Tabela 5. Podemos observar temperaturas médias elevadas durante todo o ano, porém associadas com uma elevada imprevisibilidade, especialmente quando consideramos as temperaturas máximas. As precipitações mais elevadas ocorrem entre janeiro e maio, com reduções significativas nos demais meses do ano. Todas as estimativas para precipitação

apresentaram elevadas oscilações em decorrência das elevadas estimativas de desvio. A radiação solar apresenta níveis mais elevados entre setembro e março, diminuindo um pouco a intensidade entre os meses de abril a agosto.

**TABELA 5** – Estimativa de média (m) e desvio padrão para a temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax), temperatura média (Tmed), precipitação (Precip) e radiação solar (Rad) para os meses do ano na região de Patos – PB.

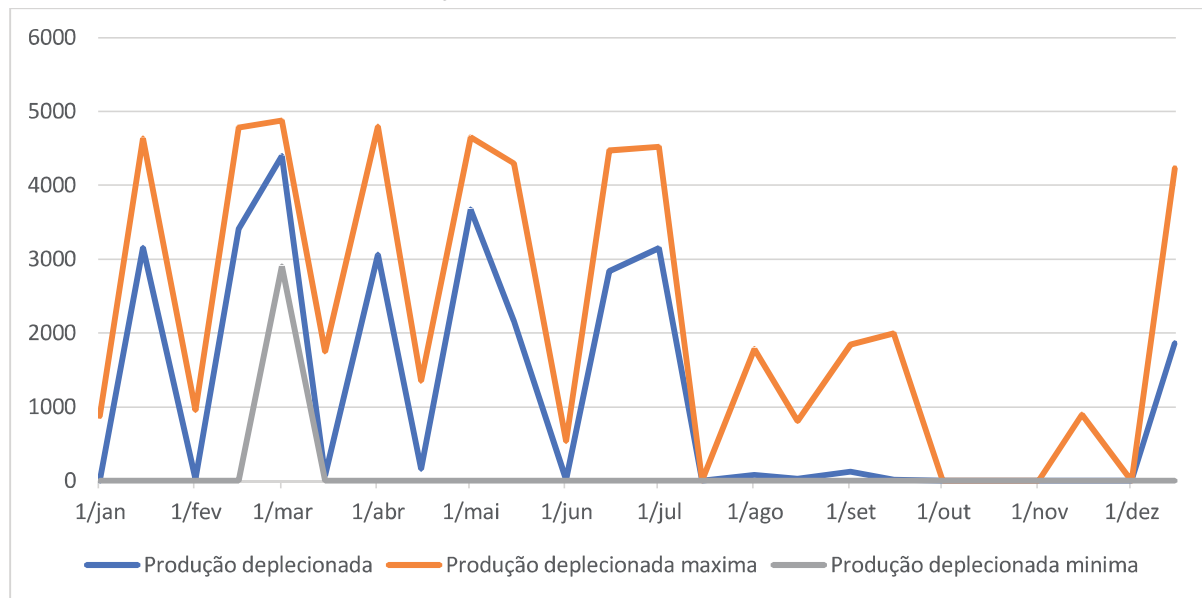
| Mês | Tmin  |      | Tmax  |      | Tmed  |      | Precipitação |        | Radiação |      |
|-----|-------|------|-------|------|-------|------|--------------|--------|----------|------|
|     | m     | dp   | m     | Dp   | m     | dp   | m            | dp     | m        | dp   |
| Jan | 22.87 | 2.97 | 34.88 | 5.00 | 28.87 | 2.62 | 125.65       | 134.40 | 10.74    | 2.92 |
| Fev | 21.83 | 2.37 | 33.03 | 3.92 | 27.43 | 2.21 | 137.78       | 164.60 | 10.29    | 3.14 |
| Mar | 22.31 | 2.46 | 33.72 | 5.15 | 28.00 | 2.40 | 186.98       | 198.91 | 10.59    | 1.99 |
| Abr | 22.36 | 2.07 | 33.45 | 4.33 | 27.90 | 2.05 | 118.68       | 223.11 | 9.81     | 1.16 |
| Mai | 21.85 | 2.42 | 32.90 | 4.08 | 27.36 | 1.89 | 83.74        | 110.49 | 8.67     | 1.38 |
| Jun | 21.21 | 2.43 | 32.16 | 3.21 | 26.68 | 1.52 | 31.24        | 22.03  | 7.91     | 1.68 |
| Jul | 20.57 | 3.17 | 32.33 | 2.25 | 26.45 | 1.43 | 10.40        | 2.79   | 8.27     | 1.76 |
| Ago | 20.58 | 2.21 | 33.36 | 1.93 | 26.97 | 1.09 | 7.25         | 4.49   | 9.66     | 1.25 |
| Set | 21.26 | 1.93 | 34.85 | 1.31 | 28.05 | 0.82 | 1.38         | 0.25   | 11.02    | 0.48 |
| Out | 21.92 | 2.14 | 35.96 | 1.35 | 28.93 | 0.79 | 7.96         | 5.17   | 11.55    | 0.78 |
| Nov | 22.44 | 2.94 | 36.25 | 1.42 | 29.33 | 0.92 | 7.71         | 3.47   | 11.51    | 1.15 |
| Dez | 22.94 | 2.50 | 36.09 | 2.08 | 29.50 | 1.37 | 41.07        | 56.02  | 11.19    | 1.75 |

**FIGURA 13** – Produtividade potencial média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de Patos – PB.



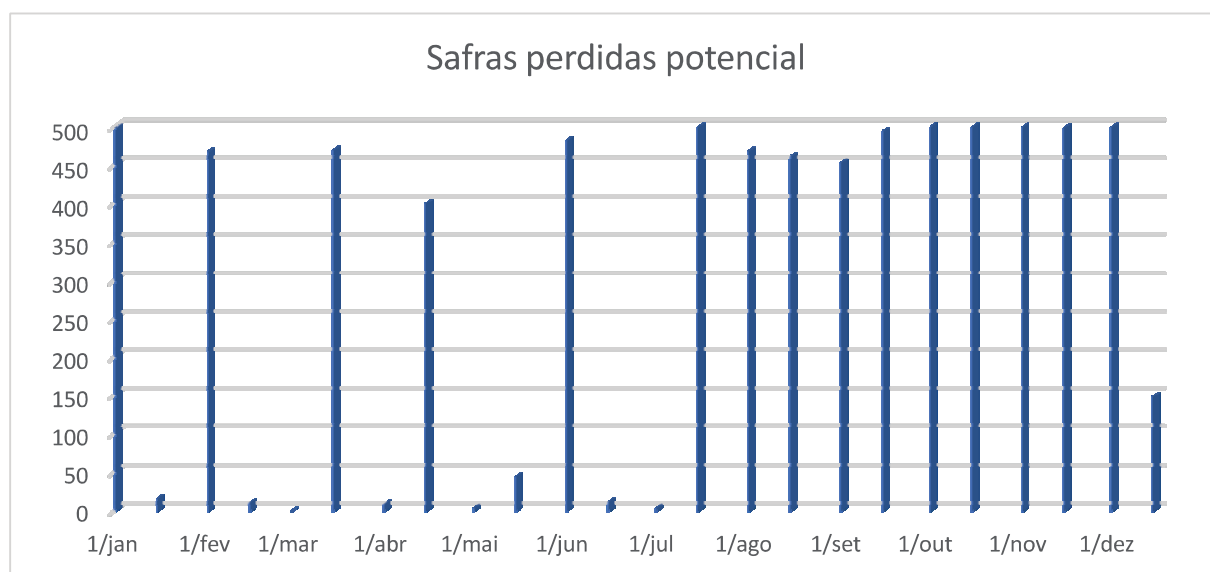
As estimativas de produtividade potencial para a região de Patos – PB (Figura 13) mostram um elevado potencial produtivo desta cultura sob condições irrigadas, além de mostrar o potencial de cultivo durante todo o ano. A maior estimativa de produtividade potencial média foi identificada para o plantio em 01 de setembro (5872,82 kg/ha), enquanto a menor estimativa em 01 de junho (5121,91 kg/ha). Tais oscilações coincidem com as oscilações nos níveis de radiação solar consequentemente influenciando as taxas fotossintéticas das lavouras.

**FIGURA 14** – Produtividade deplecionada média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de Patos – PB.



As estimativas de produtividade deplecionada (Figura 14) mostram uma extrema oscilação no potencial produtivo de feijão caupi em virtude da elevada imprevisibilidade no regime de precipitações. Assim sendo, o cultivo de sequeiro do feijão caupi nesta região pode ser considerada atividade de grande risco, associando baixas produtividades e perdas frequentes de safra. Contudo o plantio em 01 de março apresentou produtividade média de 4398,83 kg/ha associadas a uma produtividade mínima de 2901,21 kg/ha podendo ser considerado neste estudo a única época de plantio recomendada para a região.

**FIGURA 15** – Risco de perda de safras para diferentes épocas de plantio na região de Patos – PB.



A Figura 15 apresenta o risco de perda de safras para a região de Patos – PB, observamos risco de perdas para plantio durante todo o ano, sendo mais intensos entre agosto a dezembro, em função da irregularidade pluviométrica da região.

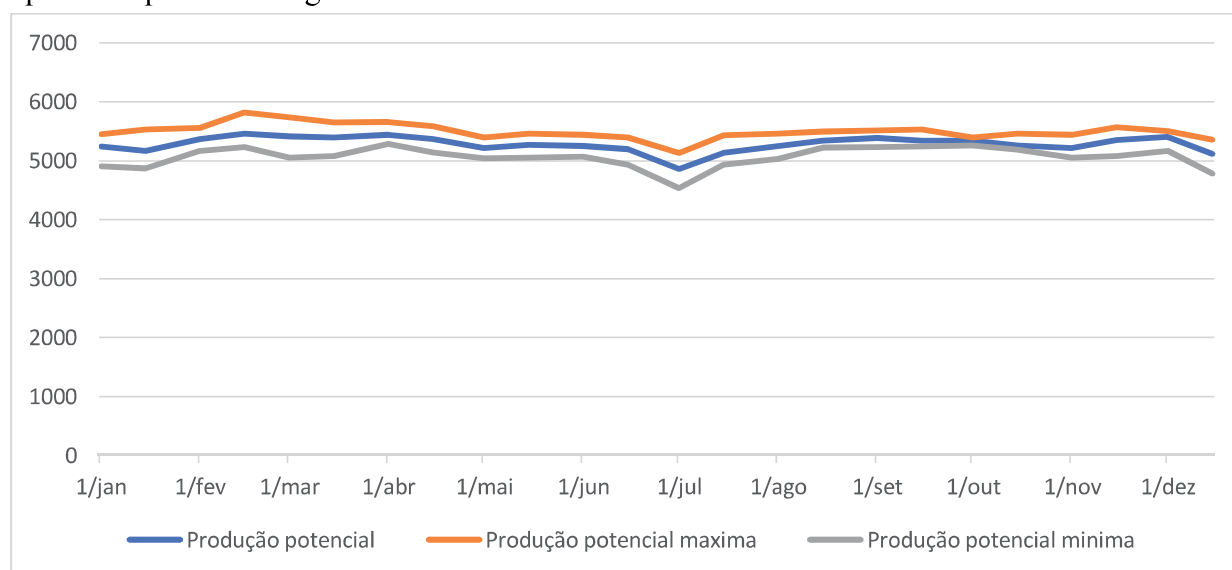
## 5.6. Sousa

A Tabela 6 apresenta a caracterização meteorológica para a região de Sousa – PB podemos observar temperaturas elevadas durante todo o ano, atingindo os maiores níveis para temperatura média entre os meses de setembro a janeiro. Quanto as precipitações, observamos uma concentração de seus níveis entre janeiro e maio, porém com elevada imprevisibilidade nos regimes hídricos, sendo os demais meses caracterizados com baixos níveis de precipitações. Enquanto os níveis de radiação são bastante elevados durante todo o ano, apresentando seus menores níveis entre os meses de abril a agosto.

**TABELA 6** – Estimativa de média (m) e desvio padrão para a temperatura mínima (Tmin), temperatura máxima (Tmax), temperatura média (Tmed), precipitação (Precip) e radiação solar (Rad) para os meses do ano na região de Sousa – PB.

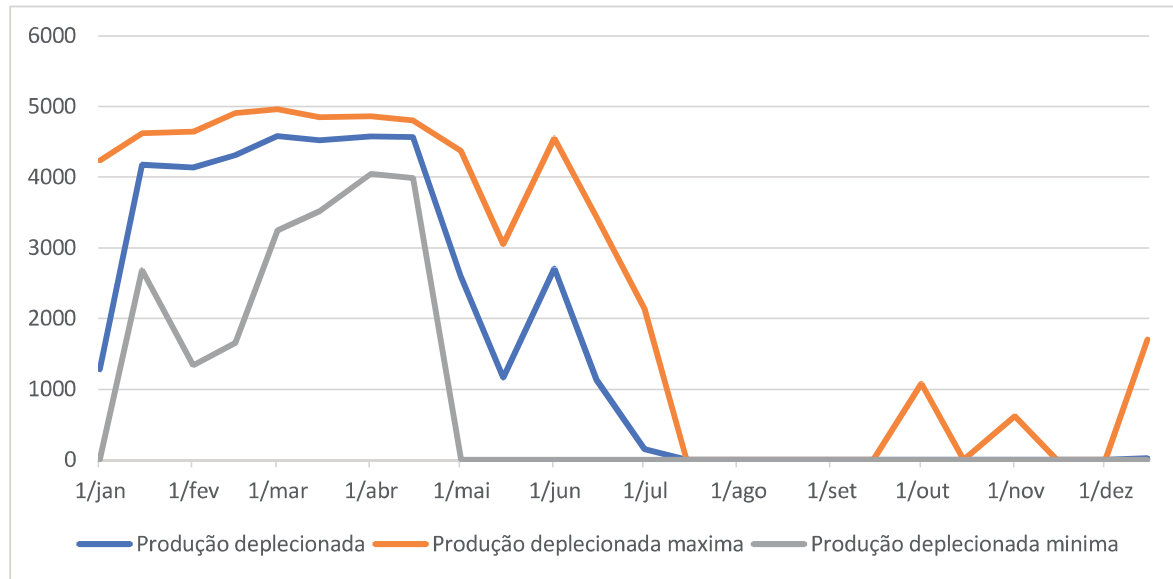
| Mês | Tmin  |      | Tmax  |      | Tmed  |      | Precipitação |        | Radiação |      |
|-----|-------|------|-------|------|-------|------|--------------|--------|----------|------|
|     | m     | dp   | m     | dp   | m     | dp   | m            | dp     | m        | Dp   |
| Jan | 21.94 | 2.52 | 33.57 | 4.82 | 27.76 | 1.97 | 184.00       | 242.15 | 10.79    | 2.96 |
| Fev | 20.95 | 1.76 | 31.50 | 3.17 | 26.22 | 1.45 | 172.09       | 202.93 | 10.40    | 2.60 |
| Mar | 21.78 | 1.84 | 32.26 | 3.45 | 27.01 | 1.51 | 239.75       | 261.45 | 10.51    | 1.99 |
| Abr | 21.69 | 1.67 | 31.96 | 2.20 | 26.82 | 1.03 | 176.99       | 157.43 | 9.82     | 1.25 |
| Mai | 20.85 | 2.67 | 31.43 | 3.17 | 26.14 | 1.81 | 129.68       | 200.83 | 8.79     | 1.26 |
| Jun | 19.49 | 4.48 | 31.45 | 2.83 | 25.46 | 2.13 | 38.02        | 31.46  | 8.38     | 0.91 |
| Jul | 19.06 | 5.72 | 31.98 | 2.99 | 25.52 | 2.29 | 21.10        | 7.57   | 8.63     | 1.19 |
| Ago | 19.48 | 4.69 | 33.39 | 1.76 | 26.43 | 1.71 | 9.22         | 3.31   | 9.93     | 0.86 |
| Set | 20.44 | 3.65 | 34.98 | 1.19 | 27.71 | 1.35 | 0.73         | 0.05   | 11.19    | 0.25 |
| Out | 21.47 | 2.69 | 35.51 | 1.40 | 28.49 | 0.98 | 17.91        | 16.24  | 11.66    | 0.82 |
| Nov | 22.01 | 3.28 | 35.52 | 1.73 | 28.76 | 1.27 | 12.00        | 7.67   | 11.68    | 1.12 |
| Dez | 22.01 | 3.74 | 35.13 | 2.23 | 28.57 | 1.82 | 57.08        | 60.33  | 11.28    | 2.22 |

**FIGURA 16** – Produtividade potencial média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de Sousa – PB.



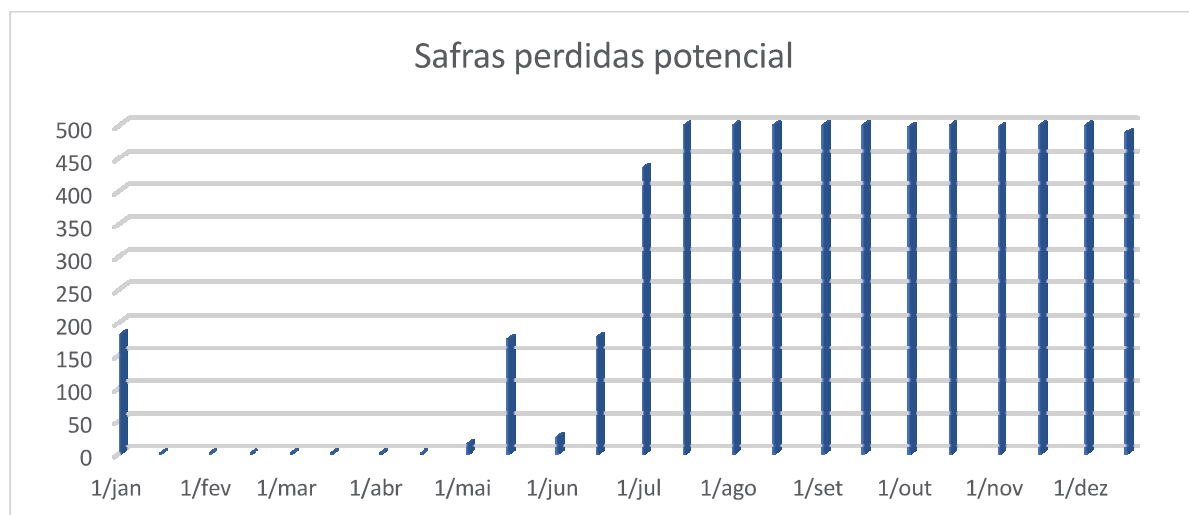
A produtividade potencial em Sousa – PB (Figura 16) demonstra a viabilidade do cultivo irrigado durante todo o ano, porém ao mesmo tempo que níveis mais altos de radiação solar favoreçam a produtividade, temperaturas muito elevadas podem ser prejudiciais. Assim sendo, o maior potencial produtivo foi observado para 15 de fevereiro (5461,66 kg/ha). Enquanto a menor produtividade estimada para 01 de julho (4855,66 kg/ha), período com os menores níveis de radiação solar.

**FIGURA 17** – Produtividade deplecionada média, máxima e mínima de feijão-caupi para diferentes épocas de plantio na região de Sousa – PB.



Na Figura 17 são apresentadas as produtividades deplecionada para a região de Sousa - PB, podemos verificar uma redução acentuada no potencial produtivo médio da cultura (69,5%) em relação ao cultivo irrigado. O período entre a segunda quinzena de janeiro e a primeira quinzena de abril são os mais favoráveis para o cultivo com as maiores produtividades médias observadas e sem estimativas de safras perdidas, podendo ser considerada uma janela de cultivo favorável para o cultivo nesta região.

**FIGURA 18** – Risco de perda de safras para diferentes épocas de plantio na região de Sousa – PB.



O risco de perda de safras apresentadas na Figura 18 mostra o risco acentuado de perdas de safras entre maio e janeiro, colaborando com os resultados apresentados anteriormente para a

produtividade deplecionada e confirmando o período mencionado como uma janela de plantio mais favorável para a região.



## 6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados podemos concluir que:

- i) o modelo de simulação das variáveis climáticas e do crescimento da cultura do feijão caupi mostrou-se satisfatório na predição dos resultados de produtividade potencial e deplecionada no Estado da Paraíba.
- ii) a produtividade potencial estimada demonstrou a viabilidade do cultivo de feijão caupi para todas épocas de plantio em todas as mesorregiões da Paraíba.
- iii) As estimativas das produtividades deplecionada permitiram identificar janelas de plantio que associam as maiores produtividades e o menor risco de perda de safras para o cultivo de sequeiro nas diferentes mesorregiões da Paraíba.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, R. S.; MODA-CIRINO, V.; FARIA, R. T.; VIDAL, L. H. I. Avaliação de linhagens promissoras de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerantes ao déficit hídrico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 1, p. 1-14, 2008.
- ALEXANDROV, V.A.; HOOGENBOOM, G. Vulnerability and adaptation assessments of agricultural crops under climate change in the southeastern USA. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 67, n. 1/2, p. 45-63, 2000.
- ALFONSI, E. L. **Uso de índices fenológicos em modelos de previsão de produtividade do cafeeiro**. Tese (Doutorado – Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2008. 104 p.
- ALMEIDA, F. S.; SANTANA, M. J.; MINGOTTE, F. L.C.; LEMOS, L. B. Estimativa de evapotranspiração, exigência térmica e produtividade de cultivares de feijão-caupi em função da época de semeadura. In: **XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola CONBEA**, 2015, São Pedro-SP, Brasil.
- ANDRADE, A. J. P.; SILVA, N. M.; SOUZA, C. R. **As percepções sobre as variações e mudanças climáticas e as estratégias de adaptação dos agricultores familiares do Seridó Potiguar**. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 31, p. 77-96, ago. 2014.
- ANDRADE, F. N.; ROCHA, M. M.; GOMES, R. L. F.; FREIRE FILHO, F. R. RAMOS, S. R. R. Estimativas de parâmetros genéticos de feijão-caupi avaliados para feijão fresco. **Ciência agronômica**, Fortaleza, v.41, n.2, p. 253-258, 2010.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B.; LIMA, M. G. **Cultivo do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)**. Teresina: Embrapa Meio Norte, 2002. p.1008, (Embrapa Meio-Norte. Sistema de Produção: 2).
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; RODRIGUES, B. H. N.; FRIZZONE, J. A.; CARDOSO, M. J. BASTOS, E. A.; MELO, F. de B. Níveis de irrigação na cultura do feijão caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 17-20, 2002.
- ARAÚJO, J. P. P. de; SANTOS, A. A. dos; CARDOSO, M. J.; WATT, E. E. Nota sobre a ocorrência de uma inflorescência ramificada em caupi *Vigna unguiculata*(L.) Walp. Subsp, *unguiculata*no Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.12, n.1/2, p.187 - 193, 1981.

AURAS, N. E.; AMANCIO, C. O. G. **Cultivo de feijão-caupi em municípios dos estados do Norte, Nordeste e Centro-oeste, conforme a área colhida e a produtividade.** Embrapa Agrobiologia-Documentos (INFOTECA-E), 2015.

BASTOS, E. A. **Adaptação do modelo CROPGRO para simulação do crescimento e desenvolvimento do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) sob diferentes condições hídricas, no Estado do Piauí.** Piracicaba: ESALQ/USP, 1999. 91p. Tese Doutorado.

BEEG, I. E.; TURNER, N. C. Crop water deficits. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 28, p. 161-217, 1976.

BEURLEIN, J. E.; PENDLETON, J. W. Photosynthetic rates and light saturation curves of individual soybean leaves under field condition. **Crop Science**, Madison, v. 11, n. 2, p. 217-219, 1971.

BEZERRA, A. A. C. **Variabilidade e diversidade genética em caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] precoce, de crescimento determinado e porte ereto e semi-ereto.** 1997. 105 f. Dissertação (Mestrado em Botânica)-Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 1997.

BLAD, B. L.; BACKER, D. G.; Reflected radiation from a soybean crop. . **Agronomy Journal**, Madison, v. 64, p. 277-280, 1972.

BOERMA, H. R.; ASHLEY, D. A.; Irrigation, row spacing and genotypic effects on late and ultra-late planted soybeans. **Agronomy Journal**, v. 74, n.6, p. 995-999, 1982.

BOOKER, F. L.; REID, C.D.; BRUNSCHON-HARTI, S.; FISCUS, E. L.; MILLER, J. E. Photosynthesis and photorespiration in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] Chonically exposed to elevated carbon dioxide and ozone. **Journal of Experimental Botany**, Berlin, V. 48, n. 315, p. 1843-1853, 1997.

BOOTE, K. J.; JONES, J. W.; PICKERING, N. B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, 88:704-716, 1996.

BOX, G. E. P.; MULLER, M. E. A note on the generation of randon normal derivates. **The annals of Mathematical Statistics**, Baltimore, v.29, p. 610-611, 1958.

CÂMARA, G.M.S. **Soja: tecnologia da produção II.** Gil Miguel de Sousa Câmara (editor). Piracicaba: G.M.S. Câmara, 2000. 450 p.

CARON, B. O.; MANFROM, P. A.; Lúcio, A. D.; Schmidt, D.; Medeiros, S. L. P.; Bonnacarrère, R. A. G.; Dourado Neto, D. Equações de estimativa da fitomassa aérea da alface. **Ciência Rural**, v.37, p.1248-1254, 2009.

CARVALHO, H.W.L., BRITO NETO, J., FREIRE FILHO, F.J. Desempenho de linhagens avançadas de feijão caupi no Nordeste brasileiro. **Revista Científica Rural**, v.13, n.1, p.126-138, 2011.

CASTRIGNANO, A., KATERJI, N., KARAM, F., MASTRORILLI, M., HAMDY, A. A modified version of CERES-Maize model for predicting crop response to salinity stress. **Ecological Modelling** v.111, p.107-120, 1998.

COELHO, A. M.; PAULO FILHO, I. A.; CRUZ, J. C. Rendimento do milho no Brasil: Chegamos ao máximo? **Informações Agrônomicas**. Piracicaba, n.101, p. 12, 2003.

COOPER, R.L. A delayed flowering barrier to higher soybean yields. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 82, p. 27-35, 2003.

CORAL, A. et al. **Utilização de um modelo agrometeorológico na estimativa de produtividade da cultura da soja no Estado do Paraná**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas, SP. Anais... Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2005.

COX, P. M.; BETTS, R. A.; JONES, C. D.; SPALL, S. A.; TOTTERDELL, I. J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. **Nature**, London, v. 408, p. 184- 187, 2000.

DAMATTA, F. M. Ecophysiology of tropical tree crops: an introduction. **Brazilian Journal of Plant Physiology** , v. 19, n. 4, p. 239-244, 2007.

DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS III, W.W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.43, p.599-626, 1992.

DORNHOFF, G. M.; SHIBLES, R. M. Varietal differences in net photosynthesis of soybean leaves. **Crop Science**, Madison, v. 10, p. 42-45, 1970.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Food and agriculture organization of the United Nations, Roma: 1979, 193p.

DRIESSEN, P. M.; KONIJN, N. T. **Land-use systems analysis**. Wageningen: Wageningen agricultural university, 1992, 230p.

ETHERIDGE, D. M.; STELLE, L. P.; LANGENFELDS, R. L.; FRANCEY, R. J.; BARNOLA, J. M.; MORGAN, V. I. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and fir. **Journal Geophysical Research**, Washington, v.101, p. 4115-4128, 1996.

EVANS, L.T. **Crop evolution, adaptation and yield**. Cambridge: Cambridge University Press, 1993. 500 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION THE UNITED NATION (FAO). Base de dados Faostat. Disponível em: <http://faostat.fao.org> >. Acesso em: março de 2018.

FRANCELLI, A. L. DOURADO, N.D **Cultura de feijão: Estresse e produtividade**. In: FRANCELLI, A. L. DOURADO, N.D (org.). Feijão irrigado: Tecnologia e produção. 1.ed. Piracicaba: Publique, v.1, 2000. p.100-113.

FREIRE FILHO, F.R; RIBEIRO, V.Q.; ROCHA, M.M; SILVA, K.J.D.; NOGUEIRA, M.S.R; RODRIGUES, E.V. In: **Feijão-caupi no Brasil : produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. Teresina : Embrapa Meio-Norte, 2011.

FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q.; BARRETO, P. D.; SANTOS, A. A. **Melhoramento Genético**. In: FREIRE FILHO, F.R.; LIMA, J. A. A.; RIBEIRO, V. Q (Eds.) Feijão-caupi: Avanços Tecnológicos. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológicas. cap. 1, pp.29-92, 2005.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; SANTOS, A. A. **Cultivares de caupi para região Meio-Norte do Brasil**. In: CARDOSO, M. J. (Org.). A cultura do feijão caupi no Meio-Norte do Brasil. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2000. p. 67-88. (Embrapa Meio-Norte. Circular Técnica, 28).

FREIRE FILHO F. R.; RIBEIRO, V. Q.; BARRETO, P. D.; SANTOS, C. A. F. **Melhoramento genético de caupi (Vigna unguiculata (L.) Walp.) na região do Nordeste**. In: QUEIROZ, M. A. de; GOEDERT, C. O.; RAMOS, S. R. R. (Ed.). Recursos genéticos e melhoramento de plantas no Nordeste brasileiro. (on-line). Versão 1.0. Petrolina: Embrapa Semi-Árido; Brasília, DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, nov. 1999.

FREITAS, R. M. O. **Crescimento e produção de feijão-caupi sob efeito de veranico nos sistemas de plantio direto e convencional**. Dissertação de mestrado. UFRSA. Mossoró, 2012.

FRITCHE-NETO, R.; BORÉM, A. Melhoramento de plantas para condições de estresse abióticos. Viçosa: **Suprema**, 2011. 250 p.

FRIZZONE, J.A. et al. **Funções de produção água-cultura**. In: FRIZZONE, J.A. et al. et al. (Ed.). Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimento. Brasília: Embrapa, 2005. p.283-314.

FROTA, A. A. A.; PEREIRA, P. R. **Caracterização do feijão-caupi na região meio-norte do Brasil**. CARDOSO, M. J. (Org.). A cultura do feijão-caupi no meio-norte do Brasil. EMBRAPA Meio-Norte, 2000. 264p. (Circular Técnica, 28).

GOUDRIAAN, J.; VANLAAR, H.H. Modeling potential crop growth processes: Textbook with exercises. Dordrecht, **Kluwer Academic Press**, 1994, 238p.

GOUDRIAAN, J. Crop micrometeorology: a simulation study. **Wageningen**: PUDOC, 1977. 249p.

GUERRENÃ, A. Assessment of climate change and agriculture in Spain using climate models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 237-249, 2001.

HANSEN, J.; SATO, M.; RUEDY, R.; LACIS, A.; OINAS, V. Global warming in the twenty-first century: an alternative scenario. **Proceedings of the National Academy of Science**, New York, v. 97, p. 9875- 9880, 2000.

HOFSTRA, G.; HESKETH, J. D. Effects of temperature on the gas exchange of leaves in the light and dark. **Planta**, Berlin, n. 85, p. 228-237, 1969.

HOGG, R. V.; CRAIG, A. T. **Introduction to Mathematical Statistics**. 4 ed. New York: Macmillan, 1978, 438 p.

HOOGENBOOM, G. **Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) Version 4.5**. Honolulu: University of Hawaii, 2010.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; WILKENS, P. W.; PORTE, C. H.; BOOTE, K. J.; LIZASO, J. L.; WHITE, J. W.; HUNT, L. A.; SINGH, U.; URYASEV, O.; OGOSHI, R.; KUO, J.; SHEILIA, V.; TSUJI, G. Y. **Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) VERSION 4.6**. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 2015.

HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using soygro, pnutgro, and beangro: a review. **Transactions of the ASAB**, St Joseph, v.35, n.6, p. 2043-2055, 1992.

HOWELL, T.A. et al. Crop yield response. In: HOFFMAN, G.J. et al. (Ed.). **Management of farm irrigation of agricultural systems**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1992. p.93-122.

JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H. BOOTE, K. J.; BATCHEALOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, V.; GIJSMAS, A. J.; RITCHIE, J. T.; The DSSAT cropping systems model. **European Journal of Agronomy**. V.18; p. 235-265, 2003.

KEELING, C.D.; WHOFR, T.P. **AtmosphericCO2 records from the SIO air-sampling network**. In: (KEELING, C.D.; WHOFR, T.P). Trends: A compendium of data on global change. Carbon dioxide information analysis center. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2000, 245p. Oxford.

KORTE, L. L. et a. Irrigation of soybean genotypes during reproductive ontogeny i: agronomic responses. **Crop Science**, v.23, n.3, p. 521-527, 1983.

KUBINS, S. **Measurement of radiant energy**. In: SESTAK, Z.; CATSKY, J.; JARVIS, P. G. Plant photosynthetic production, manual of methods. Hague: W. Junk, 1971, p. 702-765.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2000, 531p.

LEHNINGER, A. L. **Bioquímica**. 2 ed. Tradução de J. R. Magalhães. São Paulo: Edgard Blucher, 1976, 2v, 134p.

LIMA, A. A. F. **Respostas fisiológicas de feijão [*phaseolus vulgares* (L) e *vigna unguiculata* (L) walp] submetidas a deficiência hídrica: um alternativa para a agricultura familiar do semiárido sergipano**. IN: Dissertação, Universidade Federal de Sergipe (área de concentração: desenvolvimento e meio ambiente) São Cristovão-SE, 2008, 112 P.

LOOMIS, R, S.; WILLIAMS, W.A. 1963. Maximum crop productivity: An estimate. **Crop Science**. V.3, p.67-72, 1963.

MAGALHÃES, A. C. N. **Fotossíntese**. In.: FERRI, M. G. (Coord.) Fisiologia vegetal, São Paulo, EPU, 1985, V.1, 362p.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J. L.; PALLONE FILHO, W. J.; NASSIF, D. S. P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for sugarcane Brazilian production systems. **Agronomy Journal**, v.103, p.100-110, 2011.



MARTIN, T. N. **Modelo estocástico para estimação da produtividade de soja no estado de São Paulo utilizando simulação normal bivariada**. Tese (Doutorado em agronomia). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2007.

MATOS FILHO, C. H. A.; GOMES, R. L. F.; ROCHA, M. M.; FREIRE FILHO, F. R.; LOPES, Â. C. A. Potencial produtivo de progênies de feijão-caupi com arquitetura ereta de planta. **Ciência Rural**, v. 39, n. 2, p. 348-354, 2009.

MENDES, R. M. S.; TÁVORA, F. J. A. F.; PITOMBEIRA, J. B.; NOGUEIRA, R. J. M. C. Relações fonte-dreno em feijão-de-corda submetidos a déficit hídrico. **Ciência agrônômica**, fortaleza, v.38, n.1, p. 95-103, 2007.

MENDELSON, R.; ROSENBERG, N. J. Framework for integrated assessments of global warming impacts. **Climate Change**, Amsterdam, v. 28, p. 11-44, 1994.

MONTEITH, J. L. The quest balance in crop modeling. **Agronomy journal**, Madison, v.88, p. 69-697, 1996.

MONTEITH, J. L. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. **Agricultural and forestry meteorology**. Amsterdam, v. 68, p. 220-231, 1994.

MÜLLER, A G.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; RADIN, B.; FRANÇA, S.; SILVA, M.I.G. estimativa do índice de área foliar do milho a partir da soma de graus-dia. Santa Maria: **Revista Brasileira Agrometeorologia**, v.13, n.1,p.65-71, 2005.

NASCIMENTO, S. P. do. **Efeito do déficit hídrico em feijão-caupi para identificação de genótipos com tolerância à seca**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Piauí. Teresina-PI, 2009.

NASCIMENTO, J.T.; PEDROSA, M.B.; TAVARES SOBRINHO, J. Efeito da variação de níveis de água disponível no solo sobre o crescimento e produção de feijão-caupi, vagens e grãos verdes. **Horticultura Brasileira**, v. 22, n. 2, p. 174-177, 2004.

NASSIF, D. S. P.; MARIN, F. R.; PALLONE FILHO, W. J.; Resende, R. S.; Pellegrino, G. Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.311-318, 2012.

NASSIF, D. S. P. **Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/CANEGRO para variedades brasileiras de cana-de-açúcar**, 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Física do ambiente agrícola) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2010.

NAVARO JUNIOR, H. M.; COSTA, J. A. Contribuição relativa dos componentes do rendimento para a produção de grãos em soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n.3, p. 264-274, 2002.

NEGM, L. M.; YOUSSEF, M. A.; JAYNES, D. B. Evaluation of DRAINMOD-DSSAT simulated effects of controlled drainage on crop yield, water balance, and water quality for a corn-soybean cropping system in central Iowa. **Agricultural water management**, V.187, p. 57-68, jun. 2017.

OLIVEIRA, E. C. de; COSTA, J. M. N. da; PAULA JÚNIOR, T. J. de; FERREIRA, W. P. M.; JUSTINO, F. B.; NEVES, L. de O. The performance of the CROPGRO model for bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield simulation. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 3, p. 239-246, 2012.

PASSIOURA, J. B. Simulation models: science, snake oil, or engineering? **Agronomy journal**, v.88, p. 690-694. 1996.

ROSA, V.G.C. et al. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.12, p.1478-1488, 2010.

SALEHI-LISAR, S. Y.; BAKHSHAYESHAN-AGDAM, H. **Drought Stress in Plants: Causes, Consequences, and Tolerance**. In.: HOSSAIN, M. A. et al. (Eds.). *Drought Stress Tolerance in Plants: Physiology and Biochemistry*. New York: Springer International Publishing, 2016. v. 1, cap.1, p. 1-16.

SANTOS, M. G. **Calibração e teste do modelo CROPGRO para a cultura do feijão**. Dissertação de mestrado. Unesp, Jaboticabal, p.44, 2015.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SEDIYAMA, T.; PEREIRA, M. G.; SEDIYAMA, C. S.; GOMES, J. L.L. **Cultura de soja**. Viçosa: Universidade federal de Viçosa, 1985, pt1, 96p.

SEGOVIA, R. M.; ANDRADE, E. G. Um modelo de determinação do efeito da precipitação pluviométrica na produtividade agrícola. IN: SEGOVIA, R. M. (Ed). **Determinação do efeito da precipitação pluviométrica na produtividade agrícola**. Brasília: CFP. 1982. P. 10-18. (Coleção Análise e Pesquisa, 24).

SHIBLES, R. M.; ANDERSON, T. C.; GIBSON, A. H.; Soybean. In.: EVANS, L. T. (Ed.) **Crop physiology**. Cambridge: Cambridge University, 1975, p. 151-189.

SHIBLES, R. M.; WEBER, C. R.; Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean-planting patterns. **Crop Science**, Madison, v.6, n.1, p. 55-59, 1965.

SHIMELIS, H.; SHIRINGANI, R. Variance components and heritabilities of yield and agronomic trait among cowpea genotypes. **Euphytica**, 2010.

SILVA, J. C. da; HELDWEIN, A. B.; RADONS, S. Z.; MALDANER, I. C.; TRENTIN, G.; GRIMM, E. L. Necessidade de irrigação para o feijoeiro na região central do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1030–1036, 2011.

SOUSA, J. L. M.; ROCHA, M. M.; SILVA, K. J. D.; NEVES, A. C.; SOUSA, R. R. Potencial de genótipos de feijão-caupi para o mercado de vagens e grãos verdes. **Pesquisa agropecuária**. Brasília, v.50, n.5, p.392-398, 2015.

SOUZA, A. P.; RAMOS, C. M. C.; LIMA, A. D.; FLORENTINO, H. O.; ESCOBEDO, J. F. Comparison of methodologies for degree-day estimation using numerical methods. **Acta Scientiarum Agronomy**. v. 33, n. 3, p. 391-400, 2011.

TANNER, C. B.; LEMON, E. R.; Radiant energy utilized in evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, p. 207-212, 1962.

SCAPARE, F. V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST**, 2011, 163p. Tese (Doutorado em ciências)- Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 2011.

STEELE, W. M.; MEHRA, K. L. Structure, evolution, and adaptation to farming systems and environments in Vigna. In: SUMMERFIELD, R. J.; BUNTING, A. H. (Ed.). *Advances in legume science*. Kew: **Royal Botanic Garden**, p. 393-404, 1980.

TAYLOR, K. E.; MACCRACKEN, M. C.; Projected effects of increasing concentrations of carbon dioxide and trace gases on climate. In: KIMBALL, B. A.; ROSENBERG, N. J.; ALLEN JR, L. H. (Ed.), *Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture*. (ASA Special Publication, 53). **American Society of Agronomy Inc**. Madison: 1990, p. 1-17.

TAIZ, L. ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

TAIZ, L. ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Trad. SANTARÉM, E. R., ed. 3, Porto Alegre: Artmed, 2004, p. 719.

TEOFILO, E. M.; MAMEDE, F. B.; SOMBRA, N. S. Híbridação natural em feijão caupi. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.23, n.4, p.1011 - 1012, 1999.

THORNLEY, J. H.M.; JOHNSON, I.R. **Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology**. New Jersey: the Blackburn Press, 2000. 669p.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, R. J. **The water balance**. New Jersey, Laboratory of Climatology, v.8, 1955, 104 p.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, Nova Iorque, v.38, n.1, p.55-94, 1948.

VAN KEULEN, H.; VAN DIEPEN, C.A. **Crop growth models and agro-ecological characterization**. In: CONGRESS OF THE EUROPEAN SOCIETY OF AGRONOMY, 1., 1990, Paris. Proceedings... Paris: CEC; ESA; INRA, 1990. p. 1-16.

VAN WART, J.; VAN BUSSEL, L. G. J.; WOLF, J. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. **Field Crops Research**. V. 143, p.44-55, 2013.

VIEIRA, R.F.; VIEIRA, C. Comportamento do feijão-fradinho na primavera-verão na zona da mata de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**: Caldas, 2000. p. 1359-1365.

VILLA NOVA, N.A.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; PEREIRA, A.R.; OMETTO, J.C. Estimativa de graus-dia acumulado acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas máxima e mínima. **Caderno de Ciências da Terra**, v.30, p.1-7, 1972.

VOSSSEN, P. Comparative statistical validation of two ten-day water-use models and of three yield-reduction hypotheses for yield assessment in Botswana. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.51, p.177-95, 1990.

VRIES, P. F. W. T.; LAAR, H. H.; CHARDON, M. C. M. **Bioenergetics of growth of seeds, fruits and storage organs**. In: Symposium on potential productivity of field crops under different environments. Los Baños, Philippines, IRRI, 1983, p 37-59.

WATSON, R. T.; RODHE, H.; OESCHGER, H. SIEGENTHALER, U. Greenhouse gases and aerosols. In: HOUGHTON, J. T.; JENKINS, G. J.; EPHRAUM, J. J. (Ed.), **Climate change: The IPCC scientific assessment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990, p. 1-40.

XAVIER, G. R.; MARTINS, L. M.; RUNJANECK, N. G.; NEVES, M. C. P. Tolerância de rizóbio de feijão-caupi á salinidade e temperatura em condições *in vitro*. **Revista caatinga**, v. 20, n. 4, p. 1-9, 2007.

ZACHARIAS, A.O. et al. **Modelo agrometeorológico de estimativa do início da florada plena do cafeeiro**. *Bragantia*, v.67, n.1, p.249-256, 2008.