



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**JOÃO VITOR DE NÓVOA PINTO**

**ZONEAMENTO DE RISCO CLIMÁTICO DA CULTURA**  
**DO FEIJÃO-CAUPI NO NORDESTE PARAENSE**

**BELÉM, PA**

**2018**

**JOÃO VITOR DE NÓVOA PINTO**

**ZONEAMENTO DE RISCO CLIMÁTICO DA CULTURA  
DO FEIJÃO-CAUPI NO NORDESTE PARAENSE**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do curso de Mestrado em Agronomia: área de concentração Agrometeorologia, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza.

**BELÉM, PA**

**2018**

---

Pinto, João Vitor de Nóvoa

Zoneamento de risco climático da cultura do feijão-caupi no nordeste paraense / João Vitor de Nóvoa Pinto. – Belém, PA, 2018.  
55 f.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2018.

Orientador: Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza.

1. Zoneamento de Risco Climático. 2. Feijão-caupi. 3. Sarra ( *Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatologiques*). 4. Índice de Satisfação das Necessidades de Água (Isna). 5. Janela de semeadura. I. Souza, Paulo Jorge de Oliveira Ponte de (orient.) II. Título

---

CDD – 630.2515

---

**JOÃO VITOR DE NÓVOA PINTO**

**BANCA EXAMINADORA**

**ZONEAMENTO DE RISCO CLIMÁTICO DA CULTURA  
DO FEIJÃO-CAUPI NO NORDESTE PARAENSE**

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do curso de Mestrado em Agronomia: área de concentração Agrometeorologia, para obtenção do título de Mestre.

**Aprovado em julho de 2018**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Alailson Venceslau Santiago**  
**Embrapa Amazônia Oriental**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. João de Athaydes Silva Júnior**  
**Universidade Federal do Pará – UFPA**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva**  
**Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Mapa da região em estudo (destacada em cinza) e localização das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho (pontos pretos). As divisões no mapa delimitam as microrregiões do estado do Pará.....	25
Figura 2. Biomassa observada (pontos) e simulada pelo modelo (linhas) para as quatro lâminas de irrigação. MS – massa seca; MSA – massa seca da parte aérea; MSF – massa seca de folhas; MSC – massa seca de caules; MSG – massa seca de grãos; DAS – dias após a semeadura. Os gráficos A, B, C e D se referem às lâminas de irrigação 1, 2, 3 e 4, respectivamente. ....	27
Figura 3. Comparação entre valores observados de biomassa seca e valores estimados pelo modelo SARRA-H. MSA – massa seca da parte aérea, MSC – massa seca de caules, MSF – massa seca de folhas, MSG – massa seca de grãos. ....	28
Figura 4. Comparação entre os valores observados (pontos) e simulados (linhas) para o conteúdo de água no solo. AD: água disponível na profundidade de 0 cm – 20 cm; DAS: dias após a semeadura. Os gráficos A, B, C e D se referem às lâminas de irrigação L1, L2, L3 e L4, respectivamente. ....	29
Figura 5. Comparação entre valores observados e valores estimados pelo modelo SARRA-H, para o conteúdo de água no solo, no decorrer do experimento de 2016.....	29
Figura 6. Área absoluta ocupada por cada classe de risco climático (i.e., alto, médio ou baixo risco) ao longo do ano, na região de estudo em função da data de semeadura. ....	30
Figura 7. Mapa das classes de risco climático em diferentes datas de semeadura. (A) 10/mai.; (B) 10/jun.; (C) 10/jul.; (D) 20/set.; (E) 20/out.; (F) 20/nov. As primeiras três figuras compreendem a transição do período chuvoso para o período seco, enquanto as três figuras inferiores mostram o período de transição entre o período seco e o período chuvoso. ....	32
Figura 8. Janela de semeadura para diferentes localidades no nordeste do Estado do Pará, em função da latitude, tomando como base o WRSI, conforme resultados da simulação pelo modelo SARRA. ....	32
Figura 9. Médias de precipitação acumulada mensal (mm) em diferentes meses.....	33
Figura 10. Localização das estações utilizadas neste trabalho. ....	41
Figura 11. Comparação entre $R_s$ estimada e observada diária em cada localidade: A – Belém, B – Cametá, C – Conceição do Araguaia, D – Marabá, E – Soure e F – Tucuruí. Somente três modelos são mostrados, visto que S-AP e S-MH normalmente se comportam de forma similar a AP e MH, respectivamente. AP-FAO, por outro lado, tem comportamento intermediário entre AP e AP-LAT. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), índice de concordância ( $d$ ) (WILMOTT et al., 1981), índice de confiança ( $c$ ) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), erro médio ( $me$ ) e erro quadrado médio ( $rmse$ ) para a biomassa aérea, foliar, de caules e de grãos, índice de área foliar, e para a umidade do solo durante a calibração do modelo SARRA-H.....	26
Tabela 2. Variação da área ocupada por cada classe de risco climático ao longo do ano. Os valores são os mesmos usados para construir a Figura 6. ....	30
Tabela 3. Latitude, longitude e período com dados climáticos em ambas as estações (convencional e automática) em cada localidade. ....	41
Tabela 4. Número de dias usados para calibração e validação de AP e MH.....	43
Tabela 5. Coeficientes para AP e MH e seus respectivos intervalos de confiança ( $p < 0,01$ ). .....	44
Tabela 6. Coeficientes para a equação de Angström-Prescott calibrada para cada estação (S-AP) e equação de Hargreaves modificada calibrada para cada estação (S-MH) e seus respectivos intervalos de confiança ( $p < 0,01$ ).....	45
Tabela 7. Indicadores estatísticos de cada modelo em cada localidade. O erro médio de modelos com letras diferentes difere ao nível de 5% de significância pelo teste t. ....	46

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AFE – Área foliar específica

AP – equação de Ångström-Prescott

Assim – assimilação real ou efetiva

AssimPot – assimilação potencial

BiomTot – biomassa total

CPSMV – cowpea severe mosaic virus.

Cstr – coeficiente de estresse

DAS – dias após a semeadura

ETM – evapotranspiração máxima

ETR – evapotranspiração real ou efetiva

EvapPot – evaporação potencial

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

IAF – índice de área foliar.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

ISNA – índice de satisfação das necessidades de água.

ME – erro médio

MH – equação de Hargreaves modificada

NE – nordeste

NO – noroeste

NWP – produtividade nutricional da água.

PAR – radiação fotossinteticamente ativa

R-AP – equação de Ångström-Prescott calibrada para toda a região nordeste paraense

Resp – respiração

R-MH – equação de Hargreaves modificada calibrada para toda a região nordeste paraense

RMSE – raiz do erro quadrado médio

S-AP – equação de Ångström-Prescott calibrada para cada estação

SARRA – Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatologiques.

SARRA-H – SARRA, versão H.

SE – sudeste

S-MH – equação de Hargreaves modificada calibrada para cada estação

SO – sudoeste

TDR – time domain reflectometry

Tr – transpiração real ou efetiva

TrPot – transpiração potencial

UTC – Coordinated Universal Time

ZCIT – zona de convergência intertropical

## LISTA DE SÍMBOLOS

$R_s/R_a$  – Razão de radiação ou radiação solar relativa.

$ET_0$  – Evapotranspiração de referência

$K_c$  – Coeficiente de cultura.

$K_{ce}$  – Coeficiente de evaporação.

$K_{cp}$  – Coeficiente de transpiração.

$R_a$  – radiação extraterrestre

$R_n$  – saldo de radiação.

$R_s$  – radiação solar.

$e_a$  – Pressão parcial do vapor de água no ar.

$e_s$  – Pressão de saturação do vapor de água no ar.

$n/N$  – Razão de insolação ou número de horas de brilho solar relativo.

$r^2$  – coeficiente de determinação

$u_2$  – Velocidade do vento a 2 m de altura.

$\Delta$  – Inclinação da curva de saturação do vapor de água no ar em relação à temperatura.

$G$  – fluxo de calor no solo.

$J$  – dia do ano

$N$  – duração do fotoperíodo

$T$  – temperatura do ar.

$c$  – índice de desempenho de Camargo e Sentelhas.

$d$  – índice de concordância de Willmott et al.

$ltr$  – Fração da luz transmitida ao solo.

$n$  – número de horas de brilho solar efetivo

$r$  – coeficiente de correlação de Pearson

$\gamma$  – coeficiente psicrométrico.

$\varphi$  – latitude

$\omega$  – declinação solar

## **RESUMO**

Foi realizado o zoneamento de risco climático para a cultura do feijão-caupi no nordeste do Estado do Pará. Utilizou-se o modelo SARRA (*Système d'Analyse Régionale des Risques Agro-climatologiques*) calibrado com dados de experimentos conduzidos entre 2013 e 2016 no município de Castanhal, PA. As áreas de baixo risco climático foram definidas como aquelas que apresentaram índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) maior ou igual a 0,5 para pelo menos 80% dos anos onde o plantio foi simulado. Os resultados revelam que o período seguro para a semeadura em toda a região vai do final de dezembro ao final de abril. Além disso, os períodos que vão de meados de outubro ao início de maio, meados de novembro ao final de maio e final de dezembro a meados de junho compreendem, respectivamente, os períodos de menor risco para o cultivo do feijão-caupi nos municípios abaixo de 4° S, entre 2° S e 4° S e acima de 2° S, dentro da região em estudo.

**Palavras-chave:** zoneamento de risco climático. feijão-caupi. sarra. ISNA. janela de semeadura.

## **ABSTRACT**

We carried out the climate risk zoning for cowpea in northeastern Pará. The SARRA crop model was used and calibrated with data from field experiments conducted between 2013 and 2016 in Castanhal, State of Pará. Low climate risk areas were defined as those which show water requirement satisfaction index (WRSI) greater than or equal to 0.5 for, at least, 80% of simulated crops for each date. Results show that the safe growing season for the whole region begins late December and continues until late April. Moreover, the periods ranging from mid-October to early May, mid-November to late May and late December to mid-June comprise, respectively, the periods with the lowest climate risk for cowpea in locations below 4° S, between 2° S and 4° S and above 2° S, in the studied region.

**Keyword:** climate risk. cowpea. sarra. wrsi. sowing date.

## Sumário

1	Contextualização .....	12
	Referências .....	15
2	Zoneamento de risco climático para a cultura do feijão-caupi ( <i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp.) no nordeste paraense.....	18
2.1	Introdução.....	18
2.2	Materiais e métodos.....	20
2.2.1	Experimentos de campo.....	20
2.2.2	Descrição do modelo .....	21
2.2.3	Avaliação do modelo .....	23
2.2.4	Índice de satisfação das necessidades de água .....	24
2.2.5	Simulação do cultivo para diferentes datas .....	24
2.3	Resultados e discussão.....	26
2.3.1	Calibração do modelo.....	26
2.3.2	Simulações de cultivo .....	29
	Conclusão .....	35
	Referências .....	35
	Anexo I – Calibração de métodos para estimar a radiação solar no nordeste paraense .....	39
2.4	Introdução.....	39
2.5	Material e métodos .....	41
2.5.1	Equações calibradas.....	42
2.5.2	Cálculo da radiação solar extraterrestre e duração do dia .....	42
2.5.3	Validação dos resultados e análises estatísticas .....	43
2.6	Resultados e discussão.....	44
	Conclusão .....	49
	Referências .....	49

Anexo II – Código em R utilizado para calibrar os coeficientes gerais e sazonais de AP e MH para estimativa diária de radiação .....	51
ANEXO III – Parâmetros de configuração do modelo SARRA-H.....	56

## 1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) pertence à família Fabaceae – que inclui muitas espécies de interesse econômico, como o feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.), a soja (*Glycine max* (L.) Merr.) e o amendoim (*Arachis hypogaea* L.), entre outras. Visualmente, a semente de *V. unguiculata* se assemelha à de *P. vulgaris*, porém tem coloração mais clara, com uma região de cor escura em torno do hilo, que o torna facilmente distinguível deste. Evidências apontam o leste do continente africano como provável centro de origem da espécie (BA; PASQUET; GEPTS, 2004).

Esta cultura se desenvolve bem em condições de temperatura de 20°C a 35°C (LIMA FILHO; COELHO FILHO; HEINEMANN, 2013) e necessita de um total de água entre 247 mm a 307 mm ao longo de todo o ciclo da cultura (FARIAS et al., 2017).

Com relação ao valor nutricional, o grão de feijão-caupi apresenta um conteúdo proteico variando entre 203 – 394 g kg<sup>-1</sup>, além de um baixo conteúdo de gorduras, quando comparado a outros legumes, como grão-de-bico, lentilha, ervilha, tremoço e feijão-mungo (*Vigna radiata*), além de ser fonte de minerais, em especial o Fe, o Zn e o Ca (GONÇALVES et al. 2016). Em pesquisas visando mensurar a produtividade nutricional da água (nutritional water productivity – NWP) para diferentes espécies leguminosas (amendoim, feijão, feijão-bambara e caupi), o feijão-caupi obteve o maior valor deste indicador para estes elementos minerais (CHIBARABADA; MODI; MABHAUDHI, 2017). NWP indica o quanto de um determinado nutriente (proteínas, gorduras, carboidratos, minerais, entre outros) é produzido por uma cultura em relação à quantidade de água utilizada, logo, a NWP alta para estes nutrientes significa que agricultores cultivando esta espécie em regiões de clima semiárido poderiam usufruir de dietas mais ricas destes nutrientes minerais com menor disponibilidade de água, caso optem por cultivar o feijão-caupi. Destacam-se, ainda, os experimentos conduzidos em Malawi, na África, onde já se demonstrou que a suplementação alimentar de infantes com farinha de feijão-caupi pode reduzir a ocorrência de ganho de peso deficitário (*growth faltering* ou *faltering weight*) (STEPHENSON et al., 2017). Estes são alguns exemplos, entre outros, da importância nutricional da cultura.

Já em relação à resistência à seca, foi observado que determinadas cultivares apresentam uma maior capacidade de manterem alta condutância estomática (MUNJONJI et al., 2017), uma alta taxa de trocas gasosas e regenerarem mais rapidamente a atividade fotossintética normal após um evento de estresse (RIVAS et al., 2016), o que contribui para que as cultivares resistentes mantenham um maior conteúdo relativo de água nas folhas nestas condições (RIVAS et

al., 2016; ZEGAOUI et al., 2017). Em nível molecular, o caupi responde à seca aumentando a expressão de genes relacionados ao estresse, inclusive aqueles envolvidos no metabolismo da prolina (ZEGAOUI et al., 2017). A prolina é um aminoácido que, quando acumulado nos tecidos, funciona como agente de regulação osmótica, contribuindo para a redução do potencial hídrico foliar e favorecendo a retenção de água nos tecidos.

Estas estratégias bioquímicas e fisiológicas de resistência à seca são eficientes de um ponto de vista puramente ecológico, uma vez que podem permitir à planta sobreviver a uma condição de seca moderada e atingir a fase reprodutiva, perpetuando os seus genes, entretanto, de uma perspectiva econômica, a seca, ainda assim, pode trazer um impacto considerável ao produtor de feijão-caupi.

Resultados obtidos por Oliveira et al. (2017) mostram que, sob condições de seca severa, o número de grãos produzidos por planta, bem como a massa de grãos por planta são significativamente impactados. Plantas em estresse severo produziram apenas cerca de 1/8 da massa de grãos de plantas sem estresse. Estes resultados mostram, ainda, que, embora a inoculação com fungos micorrizas arbusculares e rizóbio possa atenuar os efeitos da seca moderada na planta, estas ações surtem pouco efeito em condições de seca severa.

Em diversas cultivares de feijão-caupi, a seca causa redução significativa da fixação biológica de nitrogênio, nodulação, crescimento e do conteúdo de clorofila, entre outros parâmetros da planta (JEMO et al., 2017). Redução similar da nodulação quando do estresse hídrico severo também foi observada por Oliveira et al. (2017). A fixação biológica de nitrogênio é de extrema importância para que se atinja alta produtividade do feijão-caupi. Estudos testando o cultivo com e sem a inoculação com rizóbio no cerrado brasileiro demonstram que a produtividade de grãos é entre 20% e 40% menor em cultivos sem inoculação, entre diferentes cultivares e localidades (SILVA JÚNIOR et al., 2018), em comparação ao cultivo com inoculação do rizóbio.

Portanto, estes efeitos da seca sobre a fixação biológica de nitrogênio podem explicar parte da redução da produção observada no cultivo quando da ocorrência de estresse hídrico. A seca também pode aumentar a incidência de doenças na cultura. Já se comprovou, por exemplo, que plantas submetidas à seca apresentam maior susceptibilidade ao *cowpea severe mosaic virus* (CPSMV) e a infecção por este agente leva à intensificação dos efeitos da seca sobre a cultura. (SILVA, 2016).

No Brasil, embora diferentes estudos indiquem que a produtividade potencial para o feijão-caupi podem superar bastante os 1500 kg ha<sup>-1</sup> (SILVA et al., 2016; MACHADO et al., 2008; ALMEIDA et al., 2010; ZILLI et al., 2009), dados estatísticos oficiais apontam que a

produtividade média é inferior a 1000 kg ha<sup>-1</sup> na maior parte das áreas onde esta cultura é cultivada, com exceção do estado do Tocantins e das regiões Centro-Oeste e Centro-Sul (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2017, p. 92). Embora os dados disponíveis não permitam saber precisamente as causas que contribuem para esta baixa produtividade, a safra 2016/2017 teve um aumento na produção em relação à safra anterior, o que os autores do levantamento atribuem à “melhoria das condições climáticas, que elevaram a estimativa de produtividade em 16,1%” (ibid., p. 90).

Em um experimento onde o modelo CROPGRO foi utilizado para simular a produtividade do feijão-caupi na região do recôncavo baiano e para determinar a data mais propícia para a semeadura, a produtividade simulada pelo modelo apresentou alta variabilidade entre os anos, nos meses de menor precipitação. O modelo fora previamente calibrado e validado com experimentos de campo conduzidos na região. Esta alta variabilidade foi reflexo principalmente da variação da quantidade e intensidade das chuvas entre diferentes anos, o que reforça os efeitos prejudiciais que as condições climáticas desfavoráveis podem ter sobre a cultura (LIMA FILHO; COELHO FILHO; HEINEMANN, 2013).

É claro que, além do clima, outros fatores podem contribuir com a baixa produtividade desta cultura em algumas regiões. Por exemplo, Felema, Raiher e Ferreira (2013) estudaram as disparidades da produtividade da terra e da produtividade do trabalho agropecuário entre diferentes regiões brasileiras e encontraram resultados que, segundo eles, corroboram com a hipótese de que a baixa produtividade da região nordeste se deve ao baixo emprego de tecnologias. Estes autores observaram ainda maior produtividade média do trabalho em regiões mais mecanizadas.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo a avaliação do impacto da variabilidade climática sazonal sobre as áreas com potencial para o cultivo do feijão-caupi no nordeste paraense. No anexo I, equações para a estimativa da radiação solar incidente a partir de diferentes variáveis meteorológicas foram calibradas em vários municípios no Estado do Pará, a fim de se obter estimativas precisas para o cálculo da radiação solar incidente e posterior cálculo da evapotranspiração de referência pelo modelo SARRA-H. Convencionou-se necessário a calibração destas equações com base na observação de que, na região em estudo, as estações meteorológicas que possuem o maior número de registros são as estações convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia, sendo que estas apenas medem apenas insolação. A radiação solar incidente é uma importante variável na determinação da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith FAO 56, e por isso é importante que se disponha de valores precisos de radiação solar incidente. No segundo capítulo, foi realizado o zoneamento

de risco climático do feijão-caupi para todo o nordeste do Estado do Pará utilizando o modelo SARRA-H, a partir de dados dos últimos 30 anos das estações convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia. Com isso, pretende-se avaliar os efeitos da variação sazonal da precipitação para esta cultura na região, que é uma das principais produtoras do feijão-caupi no estado.

### Referências

- ALMEIDA, A. L. G. et al. Produtividade do feijão-caupi cv BR 17 Gurguéia inoculado com bactérias diazotróficas simbióticas no Piauí. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 5, n. 3, p. 364-369, jul. – set. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v5i3a795>>. Acesso em: 24 abr. 2018.
- BA, F. S.; PASQUET, R. S.; GEPTS, P. Genetic diversity in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] as revealed by RAPD markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, v. 51, n. 5, p. 539-550, ago. 2004. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1023/B%3AGRES.0000024158.83190.4e>>. Acesso em: 09 abr. 2018.
- CHIBARABADA, T. P. ; MODI, A. T.; MABHAUDIHI, T. Nutrient content and nutritional water productivity of selected grain legumes in response to production environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 14, n. 11, nov. 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1660-4601/14/11/1300>>. Acesso em: 12 abr. 2018.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Acompanhamento da Safra Brasileira*. Brasília: 2017, v.4, n. 11, 171 p. Disponível em: <[https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/safra/gaos/boletim-da-safra-de-gaos/item/download/1316\\_fd96602705a70b5dab263909b0209ad4](https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/safra/gaos/boletim-da-safra-de-gaos/item/download/1316_fd96602705a70b5dab263909b0209ad4)>. Acesso em: 24 abr. 2018.
- FARIAS, V. D. S. et al. Water demand, crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the Eastern Amazon. *Revista Caatinga*, v. 30, n. 1, mar. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n121rc>>. Acesso em 24 abr. 2018.
- FELEMA, J.; RAIHER, A. P.; FERREIRA, C. R. Agropecuária brasileira: desempenho regional e determinantes de produtividade. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, v. 51, n. 3, p. 555-573, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-20032013000300008>>. Acesso em: 22 abr. 2018.
- GONÇALVES, A. et al. Cowpea (*Vigna unguiculata* L.Walp), a renewed multipurpose crop for a more sustainable agri-food system: nutritional advantages and constraints. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 96, n. 9, p. 2941-2951, jul. 2016. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jsfa.7644>>. Acesso em: 22 abr. 2018.
- JEMO, M. et al. Comparative analysis of the combined effects of different water and phosphate levels on growth and biological nitrogen fixation of nine cowpea varieties. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, n. 19, dez. 2017. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.02111/full>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMANN, A. B. Determinação de épocas de semeadura do feijão caupi no Recôncavo Baiano através do modelo CROPGRO. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 12, p. 1294-1300, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013001200007>>. Acesso em: 24 abr. 2018.

MACHADO, C. F. et al. Identificação de genótipos de feijão-caupi quanto à precocidade, arquitetura da planta e produtividade de grãos. *Revista Ciência Agronômica*, v. 39, n. 1, p. 114-123, 2008. Disponível em: <<http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/34>>. Acesso em: 24 abr. 2018.

MUNJONJI, L. et al. Stomatal behavior of cowpea genotypes grown under varying moisture levels. *Sustainability*, v. 10, n. 1, p. 1-16, dez. 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/12>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

OLIVEIRA, R. S. et al. Improved grain yield of cowpea (*Vigna unguiculata*) under water deficit after inoculation with *Bradyrhizobium elkanii* and *Rhizophagus irregularis*. *Crop and Pasture Science*, v. 68, n. 11, p. 1052-1059, 2017. Disponível em: <<http://www.publish.csiro.au/cp/CP17087>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

RIVAS, R. Drought tolerance in cowpea species is driven by less sensitivity of leaf gas exchange to water deficit and rapid recovery of photosynthesis after rehydration. *South African Journal of Botany*, v. 103, p. 101-107, mar. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254629915003920>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

SILVA, G. C. et al. Rendimento de grãos secos e componentes de produção de genótipos de feijão-caupi em cultivo irrigado e de sequeiro. *Revista Agro@ambiente On-Line*, v. 10, n. 4, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v10i4.3385>>. Acesso em: 24 abr. 2018.

SILVA JÚNIOR, E. B. et al. Rhizobium inoculation of cowpea in Brazilian cerrado increases yields and nitrogen fixation. *Agronomy Journal*, v. 110, n. 2, p. 722-727, abr. 2018. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/aj/abstracts/110/2/722>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

STEPHENSON, K. B. et al. Complementary feeding with cowpea reduces growth faltering in rural Malawian infants: A blind, randomized controlled clinical trial. *American Journal of Clinical Nutrition*, v. 106, n. 6, dez. 2017. Disponível em: <<https://academic.oup.com/ajcn/article/106/6/1500/4823162>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

ZEGAUI, Z. et al. Variation in relative water content, proline accumulation and stress gene expression in two cowpea landraces under drought. *Journal of Plant Physiology*, v. 218, p. 26-34, nov. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0176161717301918>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

ZILLI, J. E. et al. Contribuição de estirpes de rizóbio para o desenvolvimento e produtividade de grãos de feijão-caupi em Roraima. *Acta Amazônica*, v. 39, n. 4, p. 749-757, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672009000400003>>. Acesso em: 24 abr. 2018.



## 2 ZONEAMENTO DE RISCO CLIMÁTICO PARA A CULTURA DO FEIJÃO-CAUPI (*VIGNA UNGUICULATA* (L.) WALP.) NO NORDESTE PARAENSE

**Resumo:** Foi realizado o zoneamento de risco climático para a cultura do feijão-caupi no nordeste do Estado do Pará. Utilizou-se o modelo SARRA (*Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatologiques*) calibrado com dados de experimentos conduzidos entre 2013 e 2016 no município de Castanhal, PA. As áreas de baixo risco climático foram definidas como aquelas que apresentaram índice de satisfação das necessidades de água (ISNA – *water requirement satisfaction index*) maior ou igual a 0,5 para pelo menos 80% dos anos onde o plantio foi simulado. Os resultados revelam que o período que se estende do final de dezembro ao final de abril é de baixo risco para a semeadura em toda a região. Ademais, os períodos que vão de meados de outubro ao início de maio, meados de novembro ao final de maio e final de dezembro a meados de junho compreendem, respectivamente, os períodos de menor risco para o cultivo do feijão-caupi nos municípios abaixo de 4° S, entre 2° S e 4° S e acima de 2° S, dentro da região em estudo.

**Palavras-chave:** zoneamento de risco climático. feijão-caupi. sarra. ISNA. janela de semeadura.

**Abstract:** The climate risk zoning was carried out for cowpea cultivated in northeastern Pará. The SARRA (*Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatologiques*) crop model was calibrated from data obtained in field experiments conducted between 2013 and 2016 in Castanhal, State of Pará. Low climate risk areas were defined as those with Water Requirement Satisfaction Index (WRSI) greater than or equal to 0.5 for, at least, 80% of simulated crops. Results show that safe sowing dates for the whole region range from late December to late April. Moreover, the periods ranging from early October to mid-May, mid-November to late May, and late December to mid-June have the lowest climate risk for cowpea in locations below 4° S, between 2° S and 4° S, and above 2° S, respectively, in the studied region.

**Keywords:** climate risk zoning. cowpea. sarra. wrsi. growing season.

### 2.1 Introdução

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) é uma espécie pertencente à família Fabaceae que se originou no leste do continente africano, e depois se difundiu ao oeste e ao sul do continente, com redução da variabilidade genética obtida por introgressão com subespécies perenes locais (BA; PASQUET; GEPTS, 2004). No Brasil foi introduzida por colonizadores,

tornando-se uma cultura importante para pequenos produtores na região Norte e Nordeste do Brasil, e atualmente se expande para a região Centro-Oeste (FREIRE FILHO et al., 2011). De acordo com o último levantamento da safra de grãos no Brasil, o feijão-caupi é o tipo de feijão mais cultivado na segunda safra, sendo o Nordeste a principal região produtora. A partir da segunda safra de feijão, o feijão-caupi é também cultivado na região Norte, e no estado do Pará, a produção se concentra no nordeste do estado (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2018).

A produtividade do feijão-caupi, assim como outros grãos, é severamente impactada pelo déficit hídrico, conforme evidenciam alguns dados oficiais (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2018). No Brasil, embora diferentes estudos indiquem que a produtividade potencial para o feijão-caupi pode superar os 1500 kg ha<sup>-1</sup> (ALMEIDA et al., 2010; MACHADO et al., 2008; ZILLI et al., 2009), dados estatísticos oficiais apontam que a produtividade média é inferior a 1000 kg ha<sup>-1</sup> na maior parte das áreas onde esta cultura é cultivada (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2018). Parte desta baixa produtividade pode ser atribuída à falta de quantidades adequadas de água durante o desenvolvimento da cultura (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2018).

De acordo com Daryanto et al. (2017) as leguminosas e tuberosas são mais susceptíveis a reduções de produtividade devido à seca do que os cereais, provavelmente devido à maior profundidade dos sistemas radiculares destes últimos. Além disso, segundo estes autores, com poucas exceções, a maioria das culturas anuais são mais susceptíveis à seca durante a fase reprodutiva do que na fase vegetativa e os danos causados pela seca na fase reprodutiva podem ser irreparáveis quando ocorrem nos órgãos reprodutivos.

Lima Filho, Coelho Filho e Heinemann (2013) conduziram um experimento onde o modelo CROPGRO foi utilizado para simular a produtividade do feijão-caupi na região do recôncavo baiano e determinar a data mais propícia para a semeadura, a produtividade simulada pelo modelo apresentou alta variabilidade entre os anos, nos meses de menor precipitação. Esta alta variabilidade, argumentam, foi reflexo principalmente da variação da quantidade e intensidade das chuvas entre diferentes anos, o que reforça os efeitos prejudiciais que as condições climáticas desfavoráveis podem ter sobre a cultura.

É claro que, além do clima, outros fatores podem contribuir com a baixa produtividade desta cultura em algumas regiões. Por exemplo, Felema, Raiher e Ferreira (2013) afirmam que a baixa produtividade da terra e do trabalho agrícola em partes da Região Nordeste do Brasil se deve ao baixo emprego de tecnologias. Estes autores observaram ainda maior produtividade média do trabalho em regiões mais mecanizadas.

Para a região do Nordeste Paraense, principal produtora de feijão-caupi do estado, supõe-se que determinadas localidades e datas de semeadura resultem em condições climáticas favoráveis para o desenvolvimento da cultura, com baixo risco climático. Diante disto, este trabalho tem como objetivo calibrar o modelo SARRA-H e realizar o zoneamento de risco climático desta cultura para a referida região, permitindo a identificação destas localidades e datas de semeadura favoráveis.

## 2.2 Materiais e métodos

### 2.2.1 Experimentos de campo

Foram conduzidos experimentos de campo na Fazenda Escola da Universidade Federal Rural da Amazônia, no município de Castanhal (1°19'14,7"S; 47°57'33,5"W) nos anos de 2013, 2014, 2015 e 2016, por meio dos quais foram obtidos dados para calibração e validação do modelo SARRA. O ano de 2015 até meados de 2016 foi marcado pela ocorrência de El Niño de intensidade forte. Nestes experimentos, o feijão-caupi foi submetido a distintas lâminas de irrigação, e cultivado com espaçamento de 0,5 m entre linhas e 0,1 m entre plantas na mesma linha, totalizando 200 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

A necessidade de irrigação foi estimada por meio da evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>), calculada conforme Allen et al. (2011) (equação 1), com os coeficientes de cultura (K<sub>c</sub>) obtidos primeiramente por BASTOS et al. (2008), até 2015, e posteriormente de acordo com os coeficientes de cultura obtidos no próprio experimento por FARIAS et al. (2017).

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) - \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

onde: ET<sub>0</sub>, evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>); Δ, derivada da curva de saturação do vapor de água (kPa °C<sup>-1</sup>); R<sub>n</sub>, saldo de radiação (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); G, fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); γ, coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>); u<sub>2</sub>, velocidade do vento a 2 m de altura em relação ao solo (m s<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> e e<sub>a</sub>, pressão de saturação e pressão parcial do vapor de água no ar (kPa); T, temperatura média do ar (°C).

Para o cálculo da evapotranspiração, foram utilizados dados meteorológicos provenientes de uma estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada a 3 km do experimento. No centro da área do experimento foi também instalada uma torre com sensores meteorológicos, medindo as seguintes variáveis: temperatura média do ar (°C), umidade relativa do ar (%), temperatura do solo (°C), umidade do solo (*time domain reflectometry* – TDR) (m<sup>-3</sup> m<sup>-3</sup>), radiação global (W m<sup>-2</sup>), saldo de radiação (W m<sup>-2</sup>), fluxo de calor no solo (W m<sup>-2</sup>), precipitação (mm), velocidade (m s<sup>-1</sup>) e direção do vento a 2 m de altura em relação ao solo.

O experimento foi realizado seguindo-se um delineamento em blocos ao acaso representados por 6 parcelas de 3 m de largura e 10 m de comprimento. A partir do início da floração, as plantas foram divididas em quatro tratamentos (L1, L2, L3 e L4), que correspondem a diferentes intensidades de déficit hídrico. Plantas em L1 (controle) continuaram a receber irrigação de forma a repor 100% da necessidade de água da cultura (100% da ETc), enquanto em L2 e L3 as plantas receberam apenas 50% e 25% da sua necessidade de água. Por fim, em L4, as plantas deixaram de receber irrigação a partir do início da fase reprodutiva.

Semanalmente, durante o desenvolvimento da cultura, foram amostradas três plantas no centro de cada parcela para a determinação da biomassa total da parte aérea. As plantas foram divididas uma a uma em folhas, caules, flores, pecíolos, pedúnculos, vagens e grãos, que foram acondicionadas em sacos de papel, identificadas e então colocadas em estufa a 70°C até a estabilização do peso. A biomassa seca de cada planta foi então convertida para biomassa por hectare em função da densidade de semeadura supracitada. Durante a divisão das plantas, foram retirados três discos de 2 cm de diâmetro de diferentes folhas, para o cálculo da massa foliar específica e do índice de área foliar.

### 2.2.2 Descrição do modelo

O modelo SARRA (*Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatologiques*) integra três processos: o balanço hídrico, o balanço de carbono e o desenvolvimento fenológico da cultura.

No modelo, o ciclo de carbono se inicia com a semeadura. O modelo considera que uma parte dos assimilados da semente é distribuída entre os diferentes compartimentos de biomassa da plântula, de acordo com parâmetros de partição de biomassa. A partir deste momento, conhecendo a área foliar específica (AFE) e sua variação ao longo do ciclo, o modelo calcula o índice de área foliar da cultura, e então utiliza o coeficiente de extinção de radiação para estimar a fração da radiação fotossinteticamente ativa total incidente que é interceptada pela planta. A assimilação potencial da cultura é então calculada a partir da eficiência do uso de radiação definida para cada fase do desenvolvimento fenológico. A eficiência de uso de radiação utilizada pelo modelo é maior, até mais que o dobro, do que aquela apresentada em pesquisas científicas sobre o tema, pois estas consideram apenas a eficiência calculada com base na biomassa da parte aérea, já desconsiderada a biomassa perdida por respiração. O modelo SARRA-H, por sua vez, considera a biomassa da planta inteira (BiomTot) e desconta uma fração da biomassa assimilada diariamente para simular a respiração (Resp). A forma geral como o modelo calcula a evolução da biomassa é descrita na equação 3. A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é calculada a partir da radiação global ( $R_s$ ) incidente no dia. Por padrão, o modelo considera que

50% de  $R_s$  é PAR. A assimilação potencial é restringida, no caso de déficit hídrico, por meio de um coeficiente de estresse ( $C_{str}$ ) (equação 2) definido como a razão entre transpiração efetiva ( $Tr$ ) e transpiração potencial ( $TrPot$ ).

$$Assim_i = C_{str}_i \times AssimPot_i = \frac{Tr_i}{TrPot_i} \times AssimPot_i \quad (2)$$

$$BiomTot_i = BiomTot_{i-1} + Assim_i - Resp_i \quad (3)$$

O solo é considerado como um conjunto de reservatórios de água, que podem ser enchidos até a sua capacidade máxima, a capacidade de campo. Três reservatórios distintos são utilizados: (I) o reservatório superficial, que compreende os primeiros centímetros do solo (personalizável) e permite a evaporação (II) o reservatório profundo, que representa a porção de solo abaixo da camada superficial, onde a água não é perdida por evaporação para a superfície, e no qual é simulada a evolução da frente molhante e (III) o reservatório radicular, que varia diariamente de acordo com o aprofundamento do sistema radicular ao longo do desenvolvimento da cultura. Este compreende o reservatório superficial e adicionalmente uma parte do reservatório profundo. Este reservatório também permite simular o abastecimento de água para o processo de transpiração da planta.

A água no reservatório do solo, conforme calculado pelo modelo, é dada pela soma de precipitação e irrigação, descontada a fração correspondente ao escoamento superficial e à drenagem profunda. O escoamento superficial é calculado como um percentual da água de precipitação + irrigação acima de um determinado limite, personalizável para cada solo. A água que excede a capacidade do reservatório superficial é depositada no reservatório profundo, e o que exceder o reservatório profundo é considerado água drenada.

O modelo divide a evapotranspiração da cultura em dois componentes: a evaporação e a transpiração. A evaporação potencial ( $EvapPot$ ) (Equação 4) é restringida pela água disponível na camada superficial, enquanto a transpiração potencial (Equação 5) é restringida pela água disponível no reservatório radicular.

$$EvapPot = K_{ce} \times ET_0 \quad (4)$$

A evapotranspiração de cultura (Equação 6) é restringida pelo  $K_c$  máximo, sendo este um parâmetro de cultura. No modelo,  $K_{ce}$  uma variável dependente da taxa de transmissão de radiação ao solo ( $I_{tr}$ ): quando o solo está completamente coberto por vegetação, não há incidência de luz e, portanto,  $K_{ce}$  é reduzido a zero, não ocorrendo perda de água por evaporação. A transpiração potencial, por sua vez, é calculada a partir do índice de consumo ( $K_{cp}$ ), sendo  $K_{cp}$  função de  $(1 - I_{tr})$ , e limitado pelo coeficiente de cultura máximo.

$$\text{TrPot} = K_{cp} \times ET_0 \quad (5)$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 = (K_{cp} + K_{ce})ET_0 \quad (6)$$

A evapotranspiração de referência é calculada para cada dia com base nos registros meteorológicos, de acordo com a metodologia descrita por Allen et al. (2011) (Equação 1). Para tal, o modelo utiliza dados de temperatura máxima, média, e mínima diárias, umidade relativa média, precipitação, insolação, radiação solar global e velocidade do vento a 2 m de altura em relação ao solo. Nas estações convencionais, a radiação solar global foi calculada por meio da equação de Angström-PreScott com os coeficientes gerais calculados no anexo I, quando disponível, ou com os coeficientes  $a = 0,25$  e  $b = 0,50$ , quando coeficientes ajustados não estão disponíveis.

### 2.2.3 Avaliação do modelo

Os resultados da simulação de biomassa foliar, biomassa de caules, rendimento de grãos, biomassa aérea total, índice de área foliar, e conteúdo de água no solo foram comparados aos dados observados nos experimentos de campo por meio do coeficiente de correlação de Pearson (Equação 7), índice de concordância (WILLMOTT, 1981) (Equação 8), índice de desempenho ou confiança (CAMARGO; SENTELHAS, 1997) (Equação 9), erro médio (Equação 10) e raiz do erro quadrado médio (Equação 11). Foram utilizados dados de experimentos de 2013, 2014 e 2015 para calibração, enquanto a validação foi realizada com dados do experimento de 2016.

$$r = \frac{n(\sum P_i O_i) - (\sum P_i)(\sum O_i)}{\sqrt{[n \sum O_i^2 - (\sum O_i)^2][n \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2]}} \quad (7)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (8)$$

$$c = rd \quad (9)$$

$$me = \frac{(P_i - O_i)}{n} \quad (10)$$

$$rmse = \sqrt{\frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (11)$$

onde:  $r$ , coeficiente de correlação de Pearson;  $d$ , índice de concordância (WILLMOTT, 1981);  $c$ , índice de desempenho ou confiança (CAMARGO; SENTELHAS, 1997);  $P_i$  – valores previstos no dia  $i$ ;  $O_i$  – valores observados no dia  $i$ ;  $\bar{O}$  – média dos valores observados e  $n$  – número de observações.

Para a avaliação do modelo, o conteúdo de água no solo, medido com o TDR ( $\text{m}^{-3} \text{m}^{-3}$ ) foi convertido em lâmina de água (mm) considerando a umidade na capacidade de campo  $0,252 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-3}$  e no ponto de murcha permanente  $0,076 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-3}$ , obtidas em campo, e depois multiplicando pela profundidade do solo para o qual o balanço hídrico foi realizado em mm. Tanto os dados simulados quanto os dados observados se referem apenas à camada superficial do solo (primeiros 20 cm).

#### 2.2.4 Índice de satisfação das necessidades de água

O índice de satisfação das necessidades de água (ISNA) (equação 12) é definido como a razão entre a evapotranspiração efetiva ou real da cultura (i.e., a evapotranspiração da cultura nas condições de disponibilidade de água a que está submetida) – ETR – e a evapotranspiração máxima (i.e., a evapotranspiração da cultura quando plenamente suprida de água) – ETM. O ISNA varia de 0 a 1, e é classificado de acordo com a cultura adotada e a fase fenológica em questão. Para o feijão-caupi foi adotada a seguinte classificação de limites para o estresse hídrico ocorridos na fase reprodutiva:  $\text{ISNA} \geq 0,5$  – baixo estresse hídrico –  $0,5 > \text{ISNA} \geq 0,4$  – estresse hídrico moderado – e  $\text{ISNA} < 0,4$  – estresse hídrico severo (SILVA et al., 2010).

$$\text{ISNA} = \frac{\text{ETR}}{\text{ETM}} \quad (12)$$

A ideia central por trás do conceito do ISNA é que uma cultura submetida a déficit hídrico irá experimentar redução na evapotranspiração, ocasionada tanto pela menor disponibilidade de água no solo, quanto pela ativação de mecanismos fisiológicos e bioquímicos como o fechamento estomático ou a acumulação de , o que, ainda que possa permitir a sobrevivência da cultura nesta condição, representa uma situação de estresse onde a planta irá reduzir a sua assimilação potencial devido à redução nas trocas gasosas.

#### 2.2.5 Simulação do cultivo para diferentes datas

Foram utilizados dados de 30 estações do Instituto Nacional de Meteorologia, entre estações automáticas e convencionais (Figura 4). Os dados foram limitados ao período de 1987 a 2016 (30 anos de dados). Os dados foram submetidos a uma rotina de validação, onde foram removidos os registros de radiação solar ( $R_s$ ) maiores que a 85% da radiação solar extraterrestre incidente no dia ( $R_a$ ) e razão de insolação ( $n/N$ )  $> 1$ , os mesmos critérios usados por Sabziparvar et al. (2013). Também foram removidos registros incoerentes de temperatura e umidade do ar (exemplo: temperatura máxima menor que a mínima diária). Os demais dados foram mantidos. Os dados faltantes, bem como os valores removidos pelo processo de validação, para qualquer variável climática, foram estimados por interpolação utilizando o método da média ponderada pelo inverso do quadrado da distância (*inverse distance weighting* – IDW).

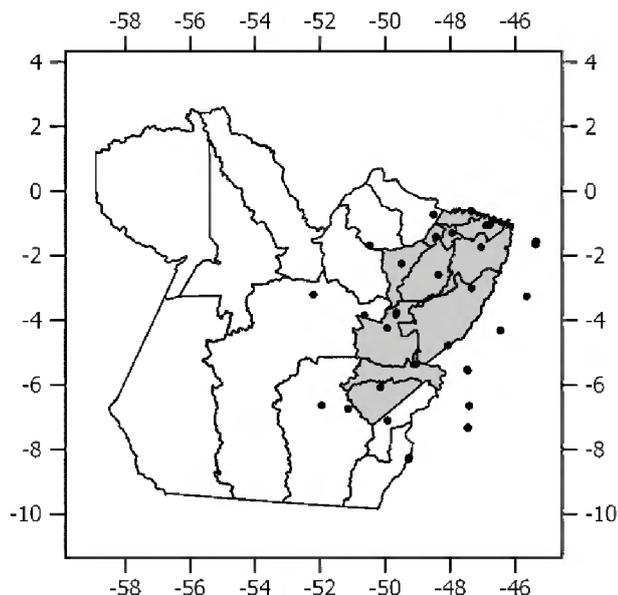


Figura 1. Mapa da região em estudo (destacada em cinza) e localização das estações meteorológicas utilizadas neste trabalho (pontos pretos). As divisões no mapa delimitam as microrregiões do estado do Pará.

Para cada uma das 30 localidades supracitadas, a textura do solo predominante foi obtida a partir do mapa de solos do estado do Pará (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2008) e do Maranhão (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2011). Após a determinação da textura predominante em cada localidade, a reserva útil do solo (água disponível entre o ponto de murcha permanente e a capacidade de campo) foi atribuída para cada local baseado na textura predominante. As classes texturais utilizadas e suas respectivas reservas úteis utilizadas foram: muito arenoso ( $80 \text{ mm m}^{-1}$ ), arenoso ( $120 \text{ mm m}^{-1}$ ), média ( $150 \text{ mm m}^{-1}$ ), argiloso ( $180 \text{ mm m}^{-1}$ ) e muito argiloso ( $150 \text{ mm m}^{-1}$ ).

O cultivo do feijão caupi foi simulado pelo modelo SARRA-H para cada uma das 70 estações nos dias 1, 10 e 20 de cada mês de cada ano, totalizando 36 simulações para cada estação e ano com dados meteorológicos disponíveis e 16.459 simulações no geral. Foi calculada a média do índice de satisfação da necessidade de água (ISNA) para a fase reprodutiva, correspondendo ao período entre a floração e período de crescimento das vagens e a probabilidade de ocorrência de  $\text{ISNA} \geq 0,5$ , definido como a razão entre a quantidade de anos simulados para uma determinada data de semeadura onde  $\text{ISNA} \geq 0,5$  sobre a quantidade total de anos com simulações para aquela data de semeadura, escrito em forma de percentual.

O risco climático é considerado baixo quando há mais de 80% de probabilidade de ocorrência de  $\text{ISNA} \geq 0,5$ . A categoria de médio risco climático corresponde à frequência de ocorrência de  $\text{ISNA} \geq 0,4$  de pelo menos 80% que não atenda o critério para baixo risco climático. Por fim, quando nenhum destes critérios é atingido, o risco climático é considerado alto. Os

valores limites de ISNA para cada classe de risco climático são os mesmos adotados por Silva et al. (2010).

## 2.3 Resultados e discussão

### 2.3.1 Calibração do modelo

O modelo SARRA-H se mostrou capaz de simular a evolução da biomassa da cultura com grande precisão e exatidão (Tabela 1), embora os resultados para a simulação do conteúdo hídrico do solo tenham apresentado menor precisão, ainda que satisfatória, quando simulando L2 e L3. Em L1 (controle) e L4, tanto a precisão quanto a exatidão do modelo foram muito boas.

Tabela 1. Coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de concordância (d) (WILMOTT et al., 1981), índice de confiança (c) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), erro médio (me) e erro quadrado médio (rmse) para a biomassa aérea, foliar, de caules e de grãos, índice de área foliar, e para a umidade do solo durante a calibração do modelo SARRA-H.

Lâmina de irrigação	Variável	r	d	c	$r^2$	me	rmse
L1	Biomassa aérea	0,99	0,99	0,98	0,98	-112,11	440,22
	Biomassa de folhas	0,95	0,96	0,91	0,90	-169,00	268,95
	Biomassa de caules	0,97	0,98	0,96	0,95	-138,54	350,43
	Biomassa de grãos	0,93	0,88	0,82	0,87	221,76	387,29
	Índice de área foliar	0,85	0,89	0,75	0,72	-0,23	0,41
	Umidade do solo	0,97	0,97	0,94	0,94	-0,56	2,00
L2	Biomassa aérea	0,99	0,99	0,98	0,99	178,84	499,53
	Biomassa de folhas	0,96	0,97	0,94	0,93	-97,14	198,16
	Biomassa de caules	0,98	0,99	0,97	0,96	85,90	288,90
	Biomassa de grãos	0,95	0,88	0,84	0,89	212,68	361,76
	Índice de área foliar	0,85	0,90	0,76	0,72	-0,12	0,36
	Umidade do solo	0,91	0,95	0,86	0,82	-0,89	2,95
L3	Biomassa aérea	0,99	0,99	0,97	0,98	209,50	481,27
	Biomassa de folhas	0,98	0,98	0,95	0,95	24,37	164,60
	Biomassa de caules	0,95	0,97	0,93	0,90	59,92	392,45
	Biomassa de grãos	0,91	0,90	0,82	0,83	141,97	259,98
	Índice de área foliar	0,73	0,84	0,61	0,53	-0,06	0,43
	Umidade do solo	0,82	0,87	0,71	0,67	-2,01	5,24
L4	Biomassa aérea	0,98	0,99	0,97	0,96	90,87	367,93
	Biomassa de folhas	0,98	0,94	0,92	0,96	130,32	239,38
	Biomassa de caules	0,97	0,99	0,96	0,95	-6,39	223,52
	Biomassa de grãos	0,93	0,95	0,88	0,87	-20,53	138,15
	Índice de área foliar	0,95	0,89	0,84	0,90	0,18	0,29
	Umidade do solo	0,96	0,98	0,95	0,93	0,51	3,00

Uma observação mais atenta dos dados de biomassa revela que o modelo superestimou a produtividade de grãos para L1, L2 e L3 e subestimou em L4, sendo as superestimativas, em

média, de até 221,76 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 1). Apesar disso, a superestimativa da produtividade de grãos ocorre principalmente no período de enchimento das vagens (Figura 2), enquanto no período da colheita os valores estimados pelo modelo foram próximos à média dos valores observados nos experimentos, conforme se pode observar na Figura 2. Em L1, o rendimento médio de grãos simulado pelo modelo foi de 1556 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto o rendimento observado foi de 1338 ± 724 kg ha<sup>-1</sup> (média ± intervalo de confiança, p = 0,05), demonstrando que a produtividade simulada não difere estatisticamente do rendimento médio observado para este tratamento.

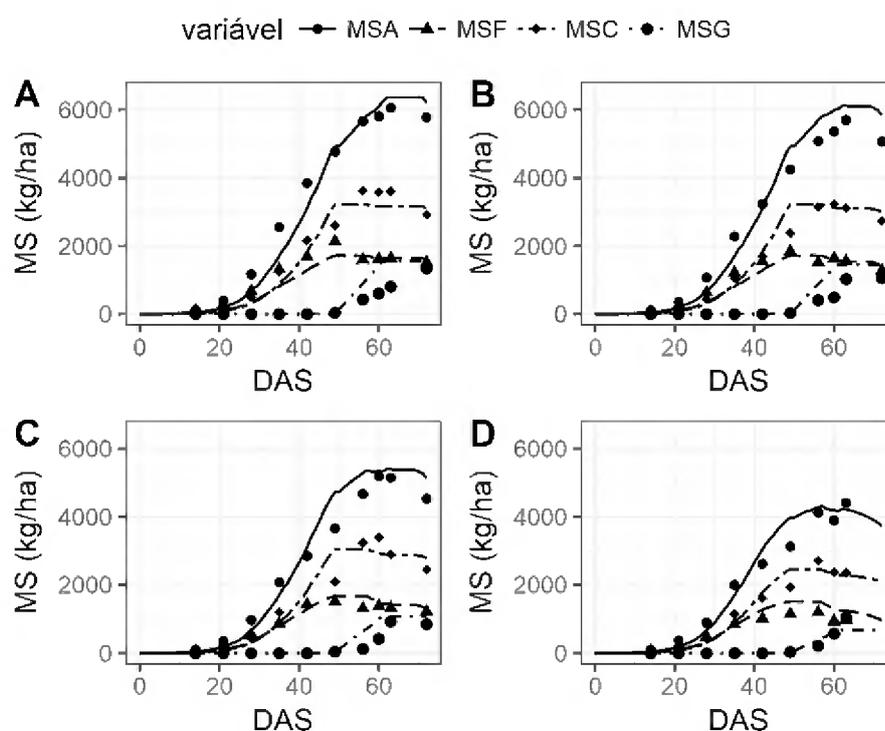


Figura 2. Biomassa observada (pontos) e simulada pelo modelo (linhas) para as quatro lâminas de irrigação. MS – massa seca; MSA – massa seca da parte aérea; MSF – massa seca de folhas; MSC – massa seca de caules; MSG – massa seca de grãos; DAS – dias após a semeadura. Os gráficos A, B, C e D se referem às lâminas de irrigação 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

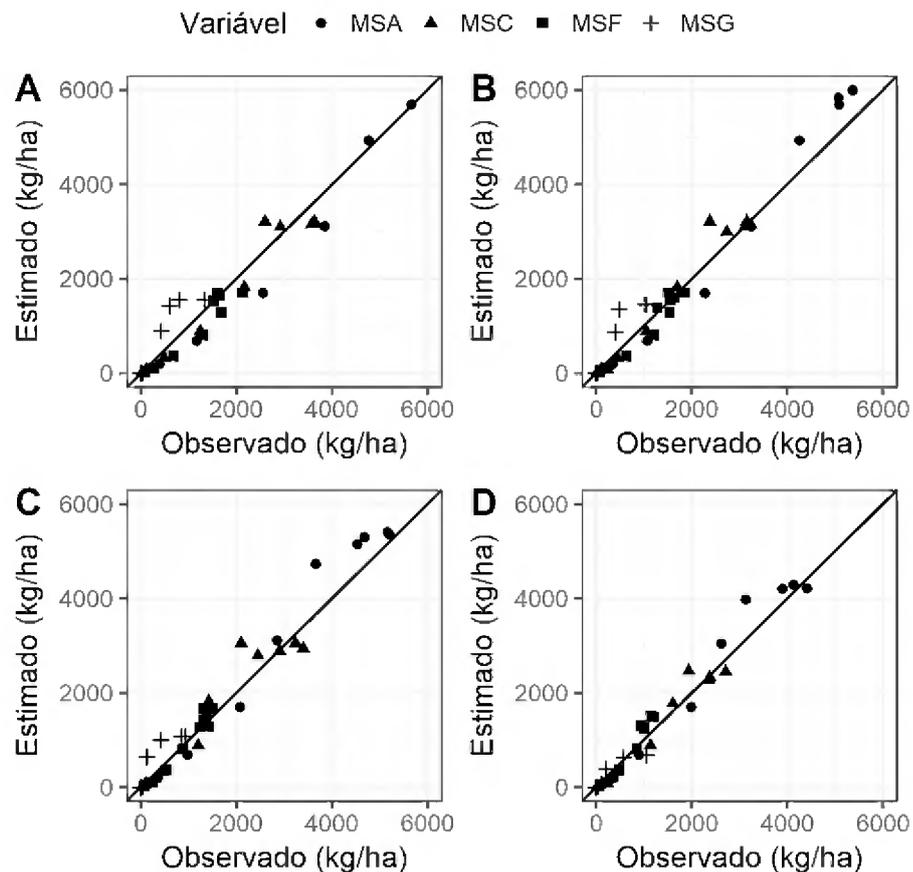


Figura 3. Comparação entre valores observados de biomassa seca e valores estimados pelo modelo SARRA-H. MSA – massa seca da parte aérea, MSC – massa seca de caules, MSF – massa seca de folhas, MSG – massa seca de grãos.

Embora os dados de biomassa não sejam efetivamente utilizados neste trabalho, é importante que estejam corretamente calibrados, pois o modelo SARRA-H limita a produção de biomassa em função da razão entre a transpiração efetiva e a transpiração potencial, as quais não foram diretamente medidas no campo. Se o modelo se mostra capaz de simular corretamente a produção de biomassa e a umidade do solo, supõe-se que esteja simulando corretamente também a redução da transpiração da cultura como resposta ao déficit hídrico experimentado.

A Figura 4 apresenta a simulação da água armazenada no solo no processo de validação. Com exceção de L3 (tratamento com 25% da demanda hídrica), a variabilidade temporal da água no solo foi simulada com elevada precisão pelo modelo, inclusive e principalmente, durante a fase de limitação hídrica onde o consumo hídrico do feijão-caupi proporcionou a redução do armazenamento de água ao longo do período reprodutivo. Percebe-se uma superestimativa do consumo hídrico entre 38 e 55 DAS, aproximadamente, em L3 (Figura 4C) levando a um nível mais baixo de água no solo quando comparado ao observado em campo, mas a julgar

pelos resultados da simulação de produção de biomassa (Figura 2C e Figura 3C) e da simulação de água no solo nos demais tratamentos (Figura 4 e Figura 5), o modelo conseguiu reproduzir com eficiência esta variável, a qual é de suma importância para a obtenção do ISNA, uma vez que a evapotranspiração real depende do conteúdo de água no solo.

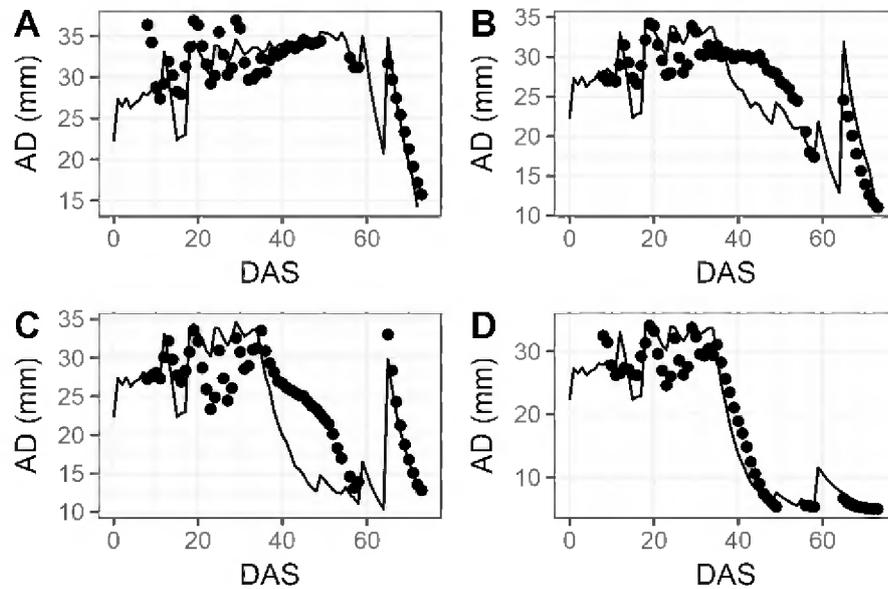


Figura 4. Comparação entre os valores observados (pontos) e simulados (linhas) para o conteúdo de água no solo. AD: água disponível na profundidade de 0 cm – 20 cm; DAS: dias após a semeadura. Os gráficos A, B, C e D se referem às lâminas de irrigação L1, L2, L3 e L4, respectivamente.

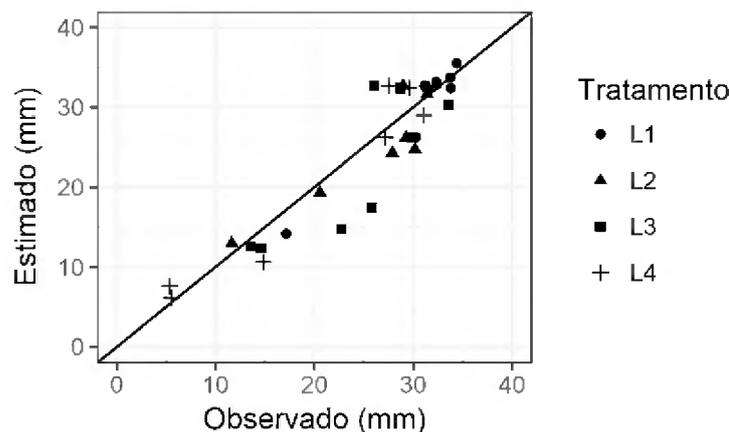


Figura 5. Comparação entre valores observados e valores estimados pelo modelo SARRA-H, para o conteúdo de água no solo, no decorrer do experimento de 2016.

### 2.3.2 Simulações de cultivo

Os resultados da simulação mostraram que o risco climático na fase reprodutiva é baixo quando a semeadura é realizada a partir do final de dezembro (20/dez.) até o final de abril (20/abr.) (Figura 6 e Tabela 2). No extremo oposto, o maior risco climático é enfrentado por produtores que optarem por semear entre o primeiro decêndio de julho e o primeiro decêndio

de setembro, inclusive, onde mais de 70% da região é classificada como área de alto risco climático (Tabela 2), o que torna o cultivo sem irrigação impraticável nestas datas.

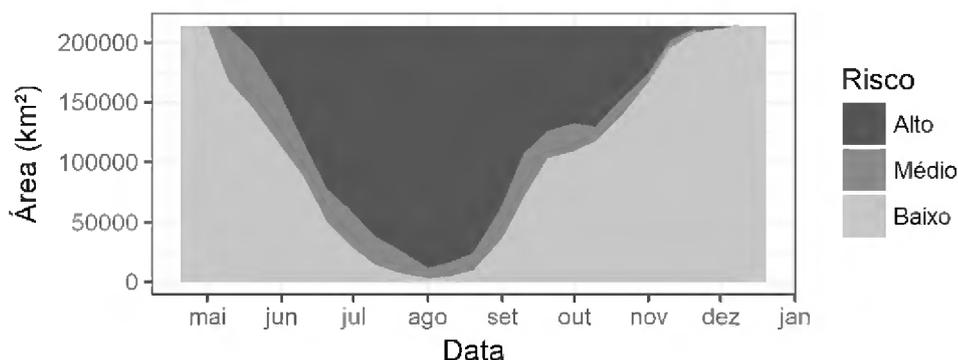


Figura 6. Área absoluta ocupada por cada classe de risco climático (i.e., alto, médio ou baixo risco) ao longo do ano, na região de estudo em função da data de semeadura.

Tabela 2. Variação da área ocupada por cada classe de risco climático ao longo do ano. Os valores são os mesmos usados para construir a Figura 6.

Data de semeadura	Área ocupada (1.000 km <sup>2</sup> ) por classe de risco			Percentual da área total da região (%) ocupada por classe de risco		
	Alto	Médio	Baixo	Alto	Médio	Baixo
20-abr.	0,0	0,0	214,0	0,0%	0,0%	100,0%
01-mai.	0,0	0,5	213,5	0,0%	0,2%	99,8%
10-mai.	2,1	44,0	167,9	1,0%	20,6%	78,5%
20-mai.	21,4	47,1	145,5	10,0%	22,0%	68,0%
01-jun.	59,4	41,8	112,8	27,8%	19,5%	52,7%
10-jun.	96,6	29,0	88,5	45,1%	13,5%	41,3%
20-jun.	136,6	27,4	50,0	63,8%	12,8%	23,4%
01-jul.	156,7	29,1	28,3	73,2%	13,6%	13,2%
10-jul.	176,2	23,6	14,2	82,3%	11,0%	6,6%
20-jul.	187,4	19,4	7,3	87,5%	9,1%	3,4%
01-ago.	202,4	8,6	3,0	94,6%	4,0%	1,4%
10-ago.	198,0	11,5	4,4	92,5%	5,4%	2,1%
20-ago.	190,0	14,2	9,8	88,8%	6,6%	4,6%
01-set.	150,6	27,0	36,4	70,4%	12,6%	17,0%
10-set.	106,9	36,6	70,5	50,0%	17,1%	32,9%
20-set.	88,2	22,4	103,3	41,2%	10,5%	48,3%
01-out.	81,7	23,2	109,1	38,2%	10,9%	51,0%
10-out.	84,5	11,9	117,6	39,5%	5,6%	55,0%
20-out.	63,2	13,9	137,0	29,5%	6,5%	64,0%
01-nov.	39,7	7,6	166,7	18,6%	3,5%	77,9%
10-nov.	12,7	6,2	195,2	5,9%	2,9%	91,2%
20-nov.	2,7	3,9	207,4	1,3%	1,8%	96,9%
01-dez.	2,3	0,0	211,7	1,1%	0,0%	98,9%
10-dez.	0,0	0,2	213,9	0,0%	0,1%	99,9%
20-dez.	0,0	0,0	214,0	0,0%	0,0%	100,0%

O período que se estende de meados de maio ao início de julho marca a transição entre a época de menor e maior risco climático para a cultura. Durante este período, ocorre uma redução média de aproximadamente 30,9 mil km<sup>2</sup> (o que equivale a uma redução percentual média de -25,7%) na área de baixo risco climático a cada decêndio de atraso na semeadura. Já o período que se estende do início de setembro a meados de novembro marca a transição entre o período de alto e baixo risco climático. Neste período ocorre um aumento médio de 23,2 mil km<sup>2</sup> (o que equivale a um aumento percentual médio de 23,4%) na área de baixo risco ao cultivo do feijão-caupi a cada decêndio.

A transição do período de alto risco climático para o de baixo risco climático ocorre em dois momentos: primeiramente ocorre um rápido aumento das áreas aptas à semeadura (aumento de 31,2 mil km<sup>2</sup> [41,7%] por decêndio) durante todo o mês de setembro, que é seguido por uma estabilização durante o mês de outubro, e, a partir do final de outubro, um segundo período de aumento da área de baixo risco climático ocorre (aumento de 25,8 mil km<sup>2</sup> [12,5%] por decêndio) até meados de novembro (ver Figura 6). Uma área relativamente pequena ao noroeste da região, que corresponde aproximadamente à Microrregião de Belém, permanece com baixo risco climático ao longo de todo o ano, entretanto esta não é uma região produtora.

A Figura 7 mostra a sazonalidade do risco climático para o feijão-caupi no nordeste do Estado do Pará. Pelos mapas se pode perceber que, a partir de meados de maio, a zona de risco climático médio a alto começa a avançar no sentido SE-NO (Figura 7A-C), até que, a partir de meados de julho, apenas uma região relativamente pequena ao NO se mantém viável para o cultivo. Na Figura 7C, esta região corresponde aproximadamente à Mesorregião Metropolitana de Belém e parte da Microrregião de Cametá. Posteriormente, a partir do início de setembro, até meados de dezembro, a zona de baixo risco climático avança no sentido SO-NE (Figura 7D-F). Os municípios de Tracuateua e Bragança, localizados na porção mais ao nordeste da região, apresentam a janela de semeadura com início mais tardio, já no final de dezembro (Figura 7F). Grosso modo, se pode afirmar que, para as localidades entre 0° e 2°S, o período de baixo risco climático se estende do final de dezembro a meados de junho; para localidades entre 2°S e 4°S o período de baixo risco vai de meados de novembro a meados de maio e, finalmente, para

localidades entre as latitudes 4°S e 8°S, período de baixo risco vai de meados de outubro até o primeiro decêndio de maio (Figura 8).

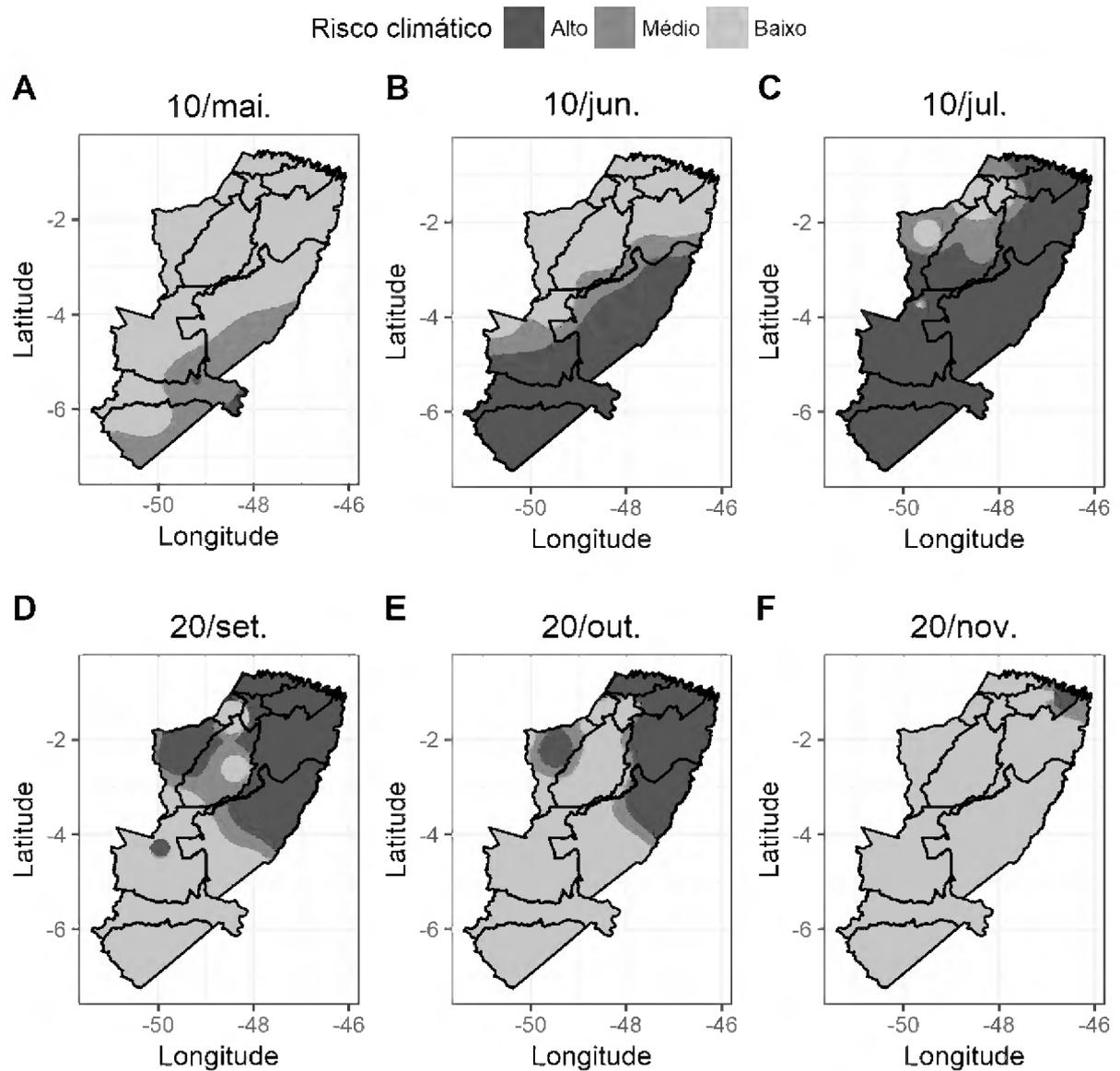


Figura 7. Mapa das classes de risco climático em diferentes datas de semeadura. (A) 10/mai.; (B) 10/jun.; (C) 10/jul.; (D) 20/set.; (E) 20/out.; (F) 20/nov. As primeiras três figuras compreendem a transição do período chuvoso para o período seco, enquanto as três figuras inferiores mostram o período de transição entre o período seco e o período chuvoso.

Lat.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.
0° – 2°S												
2°S – 4°S												
4°S – 8°S												

Figura 8. Janela de semeadura para diferentes localidades no nordeste do Estado do Pará, em função da latitude, tomando como base o WRSI, conforme resultados da simulação pelo modelo SARRA.

A grande incidência de chuvas ao noroeste da região de estudos, que levou ao baixo risco climático neste local ao longo de todo o ano (ver figura 7), pode estar associado à ocorrência de linhas de instabilidade que se formam ao longo do litoral e se propagam em direção ao oeste, podendo se deslocar por distâncias superiores a 400 km (ALCÂNTARA et al., 2011, p. 40). A formação destas linhas de instabilidade é frequente durante o primeiro semestre do ano, sendo estas responsáveis por uma parte bastante significativa – em torno de 40% – da precipitação observada na região (ALCÂNTARA et al., 2011).

No início do segundo semestre, o rápido aumento do risco climático observado em quase toda a região pode estar associado à mudança na posição da zona de convergência intertropical (ZCIT), que avança para o hemisfério norte. A ZCIT é o principal sistema gerador de chuvas na Amazônia oriental, mais especificamente no Maranhão e no nordeste do Pará, durante o período chuvoso (FERREIRA et al., 2015). Ao deslocamento da ZCIT está relacionado, também, um deslocamento de sazonalidade anual da atividade convectiva, no sentido NO-SE, que causa maior precipitação sobre a Amazônia no primeiro trimestre e, posteriormente, maior precipitação sobre a América Central, no terceiro trimestre (HOREL; HAHMANN; GEISLER, 1989).

O já descrito deslocamento da zona de baixo risco climático ao longo do eixo SE-NO e, posteriormente no eixo SO-NE está associado, principalmente, à quantidade e distribuição da precipitação anual ao norte e ao sul da região. A Figura 9 apresenta os valores médios de precipitação e de evapotranspiração de referência para dois municípios: Marabá (Figura 9A), localizado ao sul da região de estudo, apresentando risco climático alto do final de maio ao início de setembro e Tracuateua (Figura 9B), localizado na região litorânea, ao norte.

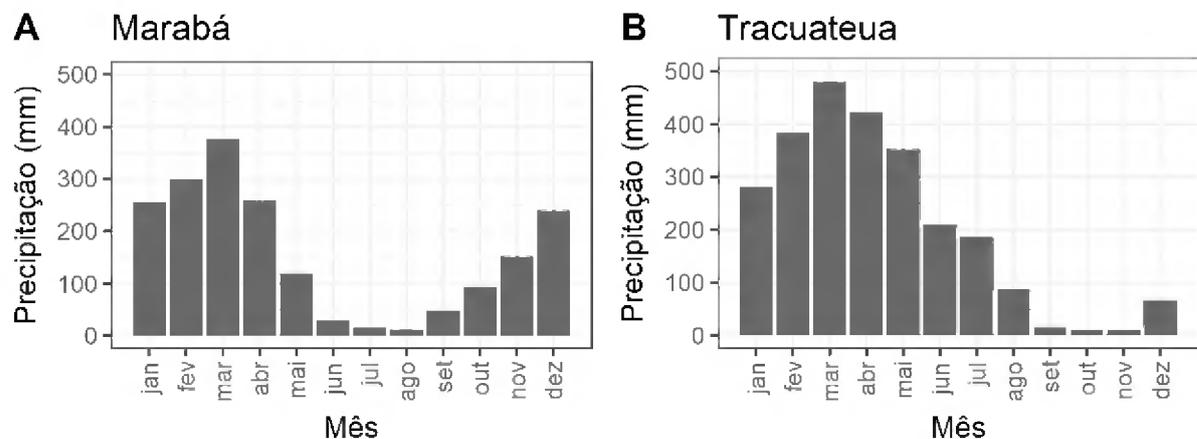


Figura 9. Médias de precipitação acumulada mensal (mm) em diferentes meses.

Nos gráficos fica clara a diferença entre as duas localidades com relação ao período de menor precipitação, que se estende de junho a setembro em Marabá, e de setembro a novembro

em Tracuateua, diferença que pode explicar o final mais tardio do período de baixo risco climático nas localidades ao norte.

A duração média do ciclo da cultura, calculada pelo modelo com base no conceito de graus-dia, para os municípios dentro da região estudada, foi de  $77,9 \pm 4,2$  dias (média  $\pm$  desvio padrão) para semeadura no último decêndio de janeiro e  $72,6 \pm 3,9$  (média  $\pm$  desvio padrão) dias para semeadura realizada no primeiro decêndio de setembro.

Como se pode observar na Figura 9, levando em consideração a duração do ciclo da cultura supracitada, a semeadura realizada nas latitudes abaixo de  $4^\circ$  S nos meses de novembro a janeiro ocorrerão muito provavelmente nos meses com maior precipitação acumulada. O mesmo ocorre, nas latitudes acima de  $4^\circ$  S, com a semeadura realizada nos meses de dezembro a fevereiro, que terão colheita no período de maior precipitação. Embora estes períodos apresentem baixo risco climático, considerando apenas o ISNA, o excesso de chuvas durante a colheita é prejudicial, pois cria um ambiente propício ao desenvolvimento da podridão das vagens (WENDT; ATEMKENG, 2004). A alta umidade no solo também aumenta a incidência de podridão dos caules e tombamento provocado por *Sclerotium* spp. (ADANDONON et al., 2005). A chuva facilita a propagação de doenças porque, ao atingir o solo, as gotículas de água da chuva produzem respingos que podem disseminar o inóculo do solo para as folhas e grãos ou de órgãos afetados para órgãos saudáveis em uma mesma planta ou mesmo para plantas vizinhas (BEDENDO; AMORIM, 2011).

A janela de semeadura apresentada aqui é maior que a definida em outros trabalhos conduzidos no Brasil. Andrade Júnior et al. (2007), por exemplo, definiram 15/dez. a 25/mar. como o período ótimo para o cultivo do feijão-caupi no Estado do Ceará. Lima Filho, Coelho Filho e Heinemann (2013) definiram o período que vai de meados de junho a meados de julho para Cruz das Almas, no Recôncavo Baiano. Entretanto, destaca-se que a precipitação em todos estes locais é bastante inferior à precipitação no nordeste do Estado do Pará. Para fins comparativos, a precipitação acumulada anual em Cruz das Almas, BA, é de 1117,4 mm (RAMOS; SANTOS; FORTES, 2009). No Ceará, em Fortaleza e Guaramiranga, municípios com maior precipitação entre os que se têm registros, a precipitação é, respectivamente, de 1668,9 mm e 1668,0 mm anuais, e em Barbalha e em Campos Sales, localizados ao sul do Estado do Ceará, a precipitação é, respectivamente, 1059,9 mm e 599,1 mm anuais (RAMOS; SANTOS; FORTES, 2009). Na região em estudo, os municípios de Tracuateua, Belém e Marabá, possuem precipitação anual de 2510,0 mm, 3084,0 mm e 1899,2 mm anuais (RAMOS; SANTOS; FORTES, 2009), respectivamente.

## Conclusão

- para as localidades entre 0° e 2°S dentro da região em estudo, o período de baixo risco climático se estende do final de dezembro a meados de junho;
- para localidades entre 2°S e 4°S dentro da região em estudo o período de baixo risco vai de meados de novembro a meados de maio;
- para localidades entre as latitudes 4°S e 8°S dentro da região em estudo, o período de baixo risco vai de meados de outubro até o primeiro decêndio de maio

## Referências

ADANDONON, A. et al. Etiology of and effect of environmental factors on damping-off and stem rot of cowpea in Benin. **Phytoparasitica**, v. 33, n. 1, p. 65–72, mar. 2005. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF02980927>>. Acesso em: 2 abr. 2018

ALCÂNTARA, C. R. et al. Verification of the role of the low level jets in Amazon squall lines. **Atmospheric Research**, v. 100, n. 1, p. 36–44, 1 abr. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809510003704>>. Acesso em: 27 mar. 2018

ALLEN, R. G. et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 899–920, abr. 2011. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378377411000023>>. Acesso em: 2 abr. 2018

ALMEIDA, A. L. G. et al. Produtividade do feijão-caupi cv BR 17 Gurguéia inoculado com bactérias diazotróficas simbióticas no Piauí. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 5, n. 3, p. 364–369, 9 set. 2010. Disponível em: <[http://www.agraria.pro.br/ojs-2.4.6/index.php?journal=agraria&page=article&op=view&path%5B%5D=agraria\\_v5i3a795](http://www.agraria.pro.br/ojs-2.4.6/index.php?journal=agraria&page=article&op=view&path%5B%5D=agraria_v5i3a795)>. Acesso em: 2 abr. 2018

ANDRADE JÚNIOR, A. S. et al. Zoneamento de risco climático para a cultura do feijão-caupi no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 38, n. 1, p. 109–117, 2007. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/69210/zoneamento-de-risco-climatico-para-a-cultura-do-feijao-caupi-no-estado-do-ceara>>. Acesso em: 2 abr. 2018

BA, F. S.; PASQUET, R. S.; GEPTS, P. Genetic diversity in cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] as revealed by RAPD markers. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 51, n. 5, p. 539–550, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/B:GRES.0000024158.83190.4e>>. Acesso em: 2 abr. 2018

BASTOS, E. A. et al. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do feijão-caupi no vale do Gurguéia, Piauí. **Irriga**, v. 13, n. 2, p. 182–190, 2008. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Aderson\\_Andrade\\_Junior/publication/266242411\\_EVAPOTRANSPIRACAO\\_E\\_COEFICIENTE\\_DE\\_CULTIVO\\_DO\\_FEIJAO-CAUPI\\_NO\\_VALE\\_DO\\_GURGUEIA\\_PIAUI/links/543bdcb00cf24a6ddb97b6b2.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Aderson_Andrade_Junior/publication/266242411_EVAPOTRANSPIRACAO_E_COEFICIENTE_DE_CULTIVO_DO_FEIJAO-CAUPI_NO_VALE_DO_GURGUEIA_PIAUI/links/543bdcb00cf24a6ddb97b6b2.pdf)>. Acesso em: 2 abr. 2018

BEDENDO, I. P.; AMORIM, L. Ambiente e Doença. In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; FILHO, A. B. (Eds.). **Manual de Fitopatologia**. 4. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2011. p. 133–148.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CAMPOS, J. H. B. DA C.; SILVA, M. T.; SILVA, V. DE P. R. DA. Impacto do aquecimento global no cultivo do feijão-caupi, no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 396–404, abr. 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662010000400008&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000400008&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 2 abr. 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira** Brasília, 2018. Disponível em: <[https://www.conab.gov.br/index.php/component/k2/item/download/16780\\_e7a4a52ee1db76ad1a8cfda9b2343c48](https://www.conab.gov.br/index.php/component/k2/item/download/16780_e7a4a52ee1db76ad1a8cfda9b2343c48)>. Acesso em: 2 abr. 2018.

DARYANTO, S.; WANG, L.; JACINTHE, P.-A. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review. **Agricultural Water Management**, v. 179, p. 18–33, 1 jan. 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377416301470>>. Acesso em: 23 mar. 2018

FARIAS, V. D. D. S. et al. WATER DEMAND, CROP COEFFICIENT AND UNCOUPLING FACTOR OF COWPEA IN THE EASTERN AMAZON. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 190–200, mar. 2017. Disponível em: <<http://ref.scielo.org/7cfcmy>>. Acesso em: 2 abr. 2018.

FELEMA, J.; RAIHER, A. P.; FERREIRA, C. R. Agropecuária brasileira: desempenho regional e determinantes de produtividade. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 51, n. 3, p. 555–573, set. 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-20032013000300008&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032013000300008&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 2 abr. 2018.

FERREIRA, D. B. S. et al. Spatial and Temporal Variability of Rainfall in Eastern Amazon during the Rainy Season. **The Scientific World Journal**, v. 2015, n. 1, p. 1–9, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2015/209783>>. Acesso em: 2 abr. 2018

FREIRE FILHO, F. R. et al. **Feijão-Caupi no Brasil: Produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011.

HOREL, J. D.; HAHMANN, A. N.; GEISLER, J. E. An investigation of the Annual Cycle of Convective Activity over the Tropical Americas. **Journal of Climate**, v. 2, n. 11, p. 1388–1403, nov. 1989. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002%3C1388:AIOTAC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002%3C1388:AIOTAC%3E2.0.CO;2)>. Acesso em: 18 mar. 2018

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estado do Pará pedologia mapa esquemático de solos** Brasília, DF INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, , 2008. Disponível em: <[ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/pedologia/mapas/unidades\\_da\\_federacao/p](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/unidades_da_federacao/p)>

a\_pedologia.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estado do Maranhão pedologia mapa exploratório de solos** Brasília, DF INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2011. Disponível em:

<[ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/pedologia/mapas/unidades\\_da\\_federacao/m\\_a\\_pedologia.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/mapas/unidades_da_federacao/m_a_pedologia.pdf)>. Acesso em: 2 abr. 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Central and South America. In: BARROS, V. R. et al. (Eds.). **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. p. 1499–1566.

LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMANN, A. B. Determinação de épocas de semeadura do feijão caupi no Recôncavo Baiano através do modelo CROPGRO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1294–1300, dez. 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43662013001200007&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662013001200007&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 2 abr. 2018.

MACHADO, C. DE F. et al. Identificação de genótipos de feijão-caupi quanto à precocidade, arquitetura da planta e produtividade de grãos. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 39, n. 1, p. 114–123, 2008. Disponível em: <<http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/34>>. Acesso em: 30 abr. 2008.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 83–96, 2008. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142008000200006&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200006&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 2 abr. 2018.

RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R. DOS; FORTES, L. T. G. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 Versão revista e ampliada**. rev. e amp ed. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 2009.

SABZIPARVAR, A. A. et al. An Improved Estimation of the Angstrom–Prescott Radiation Coefficients for the FAO56 Penman–Monteith Evapotranspiration Method. **Water Resources Management**, v. 27, n. 8, p. 2839–2854, 8 jun. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11269-013-0318-z>>. Acesso em: 2 abr. 2018.

SILVA, V. DE P. R. et al. Impact of global warming on cowpea bean cultivation in northeastern Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 11, p. 1760–1768, 1 nov. 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377410002039?via%3Dihub>>. Acesso em: 23 mar. 2018

SOUZA, E. B. et al. SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO SOBRE A AMAZÔNIA LEGAL BRASILEIRA: CLIMA ATUAL E PROJEÇÕES FUTURAS USANDO O MODELO REGCM4 (SEASONAL PRECIPITATION OVER THE BRAZILIAN LEGAL AMAZON: CLIMATE CURRENT AND FUTURE PROJECTIONS USING REGCM4 MODEL). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, 15 jul. 2016. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/43711>>. Acesso em: 2 abr. 2018.

SOUZA, P. J. O. P. et al. Impactos das mudanças climáticas na cultura da soja no nordeste do estado do Pará. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 2, 2018.

WENDT, J. W.; ATEMKENG, M. F. Soybean, cowpea, groundnut, and pigeonpea response to soils, rainfall, and cropping season in the forest margins of Cameroon. **Plant and Soil**, v. 263, n. 1, p. 121–132, jun. 2004. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1023/B:PLSO.0000047731.35668.e0>>. Acesso em: 2 abr. 2018.

WILLMOTT, C. J. ON THE VALIDATION OF MODELS. **phys. Geogr.**, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02723646.1981.10642213>>. Acesso em: 2 abr. 2018.

ZILLI, J. É. et al. Contribuição de estirpes de rizóbio para o desenvolvimento e produtividade de grãos de feijão-caupi em Roraima. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 4, p. 749–757, 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0044-59672009000400003&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672009000400003&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 2 abr. 2018.

## ANEXO I – CALIBRAÇÃO DE MÉTODOS PARA ESTIMAR A RADIAÇÃO SOLAR NO NORDESTE PARAENSE

**Resumo:** Dois modelos destinados a estimar a radiação solar incidente na superfície terrestre foram calibrados em seis localidades no nordeste do Pará. O primeiro é a equação de Angström- Prescott (AP), que requer observações do número de horas de brilho solar. O segundo modelo é uma versão modificada da fórmula de radiação de Hargreaves (MH), que requer observações da temperatura máxima e mínima diárias. Ambos os modelos foram calibrados para estimar a radiação solar diária. A calibração de ambas as equações para cada estação (i.e., estação menos chuvosa e estação chuvosa) em cada localidade foi também realizada. O modelo AP apresentou melhor desempenho que o modelo MH. O uso de equações calibradas para cada estação aumenta ligeiramente o desempenho de AP e MH na maior parte das localidades, nas estimativas de radiação solar diária. Por outro lado, a utilização de uma equação calibrada para todas as localidades diminui significativamente o desempenho de AP e MH.

**Palavras-chave:** radiação global, evapotranspiração, Angström- Prescott, temperatura, horas de brilho solar.

**Abstract:** Two models aimed to estimate solar irradiance were calibrated in six locations in Northeastern Pará. The first one is the equation of Angström- Prescott (AP), which requires observations of sunshine duration hours. The second model is a modified version of Hargreaves' radiation formula (MH), which requires observations of daily maximum and daily minimum air temperatures. Both models were calibrated to estimate daily solar radiation. The calibration of both equations for each season (i.e., dry season and wet season) in each location was also tested. AP model has better performance than MH. The use of seasonally calibrated equations slightly improves the performance of AP and MH in most locations, when estimating daily solar radiation. On the other hand, using a single equation calibrated for the whole region significantly reduces the performance of both AP and MH.

**Keyword:** global radiation, evapotranspiration, Angström- Prescott, temperature, sunshine duration hours.

### 2.4 Introdução

A radiação solar tem uma grande influência na evapotranspiração calculada pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998), conforme demonstrado por Carvalho et al. (2011), portanto, quando medições diretas de radiação solar global não estão disponíveis,

esta deve ser estimada de forma tão precisa quando possível. Em tais condições, esta pode ser estimada a partir da insolação, conforme descrito pela equação de Angström-Prescott (AP).

Um problema com a utilização de AP é que o coeficiente linear ( $a_s$ ) e o coeficiente angular ( $b_s$ ) desta equação precisam ser calibrados, de forma a oferecerem estimativas confiáveis (ALLEN et al., 1998). A calibração é realizada por meio de regressão linear e requer medições diretas e simultâneas de radiação solar global e insolação. Além disso, Allen et al. (1998) recomendam a fórmula de radiação de Hargreaves para estimar a fração da radiação solar extraterrestre que atinge a superfície terrestre quando medições de insolação não estão disponíveis. Esta fórmula pode ser útil, uma vez que requer apenas a diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima diárias, ambos os quais são dados amplamente disponíveis. Como um contraponto, a fórmula de Hargreaves também requer calibração.

Quando não há coeficientes calibrados para AP e nenhuma calibração pode ser conduzida, Allen et al. (1998) recomendam  $a_s = 0,25$  e  $b_s = 0,50$ . Glover e McCulloch (1958) encontraram valores de  $a_s = 0,29 \cos(\varphi)$  – onde  $\varphi$  é a latitude – e  $b_s = 0,52$ , valores que estes autores demonstram serem válidos para uma variedade de locais. Não foram encontrados estudos conduzidos com o objetivo de calibrar ou mesmo de validar estes coeficientes, que são muito utilizados, para muitas localidades no nordeste do Pará. Alguns trabalhos (CARVALHO et al., 2011; SILVA, 2014; MEDEIROS; SILVA; BEZERRA, 2017) que foram conduzidos para outras localidades no Brasil têm demonstrado que os coeficientes calibrados para AP são, na maioria das vezes, diferentes dos coeficientes recomendados por Allen et al. (1998) e por Glover e McCulloch (1958).

Neste trabalho, os coeficientes  $a_s$  e  $b_s$  de AP foram ajustados para seis localidades no nordeste do Pará. Os coeficientes ajustados foram comparados aos coeficientes recomendados por Allen et al. (1998) e por Glover e McCulloch (1958). Uma versão modificada da fórmula de Hargreaves (MH), que inclui um coeficiente linear, foi também calibrada. Com isto, o objetivo deste trabalho é determinar se: (I) coeficientes calibrados para AP diferem dos coeficientes recomendados por Allen et al. (1998) e por Glover e McCulloch (1958); (II) o uso de coeficientes calibrados para a estação menos chuvosa e para a estação mais chuvosa aumenta o desempenho de AP e de MH para estimativas da radiação global diária e (III) a calibração das equações de Angström-Prescott e de Hargreaves modificada para toda a região, em vez de calibrar para cada localidade individualmente, resulta em boas estimativas de radiação solar global.

## 2.5 Material e métodos

Dados meteorológicos de 12 estações pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram utilizados. Os dados compreendem seis localidades (Figura 10 e Tabela 3): Belém (BEL), Cametá (CAM), Conceição do Araguaia (COM), Marabá (MAR), Soure (SOU) e Tucuruí (TUC). Em cada uma das localidades listadas há uma estação convencional e uma estação automática.

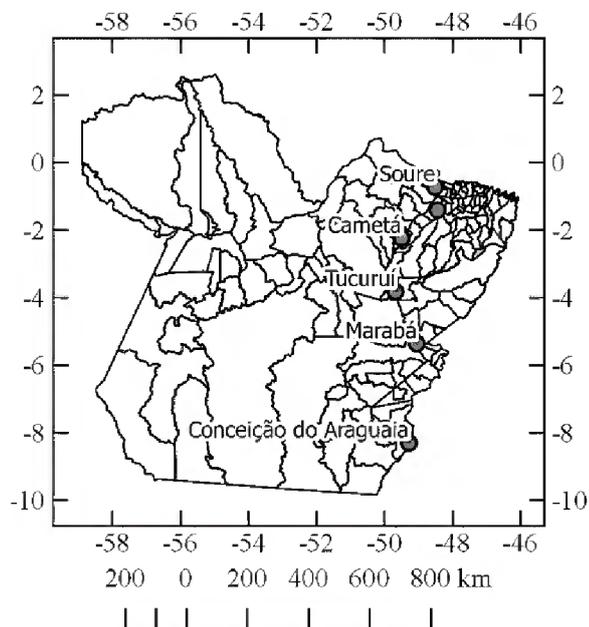


Figura 10. Localização das estações utilizadas neste trabalho.

Tabela 3. Latitude, longitude e período com dados climáticos em ambas as estações (convencional e automática) em cada localidade.

Localidade	Abrevia- tura	Lati- tude	Longi- tude	Período	Período menos chuvoso
Belém	BEL	-1,4112	-48,4395	20/01/2003 a 31/12/2016	agosto a novembro
Cametá	CAM	-2,2397	-49,4998	22/06/2008 a 31/12/2016	agosto a novembro
Conceição do Araguaia	CON	-8,3036	-49,2828	04/09/2008 a 31/12/2016	maio a setembro
Marabá	MAR	-5,3664	-49,0512	25/06/2009 a 31/12/2016	maio a outubro
Soure	SOU	-0,7278	-48,5158	27/04/2008 a 31/12/2016	agosto a dezembro
Tucuruí	TUC	-3,8228	-49,6750	01/03/2008 a 31/12/2016	junho a novembro

Dados de radiação global incidente horária bem como dados de temperatura do ar máxima e mínima diárias foram obtidos das estações automáticas. A radiação total de cada dia foi obtida pelo somatório dos registros horários de radiação de 9:00h às 21:00h UTC, que corresponde ao período diurno nestas localidades. Dias com dados não registrados em uma ou mais horas durante o período diurno foram descartados. Registros diários de insolação ( $n$ ) foram obtidos das estações convencionais em cada localidade.

### 2.5.1 Equações calibradas

Dois modelos destinados a estimar a radiação solar global foram calibrados: (I) a equação de Angström-Prescott (equação 13), que requer medidas de insolação diária, e (II) uma versão modificada da fórmula de radiação de Hargreaves (equação 14), que requer a diferença entre a máxima e a mínima temperatura do ar no dia ( $\Delta T$ )

$$\frac{R_s}{R_a} = a_s + b_s \frac{n}{N} \quad (13)$$

$$\frac{R_s}{R_a} = a_h + b_h \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (14)$$

onde:  $R_s$  – radiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2}$ );  $R_a$  – radiação solar extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2}$ );  $n$  insolação (h);  $N$  duração potencial do dia (h);  $T_{max}$  – temperatura máxima do dia ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{min}$  – temperatura mínima do dia;  $a_s$ ,  $b_s$ ,  $a_h$  e  $b_h$  – parâmetros de calibração, sendo que  $a_s$  e  $a_h$  são os coeficientes lineares e  $b_s$  e  $b_h$  são os coeficientes angulares.

Ambos os coeficientes foram calibrados para estimativas da radiação solar global diária. Também foi testada a calibração de coeficientes sazonais (i.e., coeficientes para a estação chuvosa e para a estação menos chuvosa) para a equação de Angström-Prescott (S-AP) e para a equação de Hargreaves (S-MH). Os períodos que compreendem a estação mais chuvosa e a estação menos chuvosa foram determinados a partir do balanço hídrico climatológico de cada localidade.

Adicionalmente, a equação de Angström-Prescott, bem como a equação de Hargreaves foram calibradas utilizando dados de todas as localidades conjuntamente, de forma a obter uma equação geral válida para toda a região. Estas são abreviadas como R-AP e R-MH, respectivamente.

Os coeficientes recomendados por Allen et al. (1998),  $a_s = 0,25$  e  $b_s = 0,50$  (AP-FAO) e por Glover e McCulloch (1958),  $a_h = 0,29 \cos(\varphi)$  e  $b_h = 0,52$  (AP-LAT) foram também testados e comparados às equações calibradas.

### 2.5.2 Cálculo da radiação solar extraterrestre e duração do dia

A radiação solar extraterrestre (equação 3) foi calculada para cada dia com registros de radiação solar global e insolação conforme Allen et al. (1998):

$$R_a = \frac{118,08}{\pi} dr [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (15)$$

onde:  $dr$  – distância relativa inversa da Terra ao Sol (equação 4);  $\delta$  – declinação solar (equação 5);  $\omega_s$  – ângulo horário ao nascer do sol (equação 6) e  $\varphi$  – latitude.

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (16)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,39\right) \quad (17)$$

$$\omega_s = \text{acos}[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (18)$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (19)$$

onde:  $J$  – dia juliano;  $N$  – duração do dia. Baseado nestas variáveis calculadas e nos dados meteorológicos registrados, a razão de radiação ( $R_s/R_a$ ) e a razão de insolação ( $n/N$ ) foram, então, calculadas.

### 2.5.3 Validação dos resultados e análises estatísticas

Os dados meteorológicos foram divididos em dois grupos: dados de calibração e dados de validação. As equações foram ajustadas por regressão linear utilizando os dados de calibração e foi realizada uma análise de regressão com estes dados. Em seguida, as equações ajustadas foram utilizadas para estimar a radiação para os dias e meses selecionados para validação. Do total de dias ou meses com dados, 30% foram utilizados para validação e 70% foram utilizados para calibração. Estes 30% de dados para validação foram escolhidos aleatoriamente.

Tabela 4. Número de dias usados para calibração e validação de AP e MH.

Local	Estação	AP -----			MH -----		
		Calibração	Validação	Total	Calibração	Validação	Total
BEL	Chuvosa	1339	540	1879	1287	576	1863
	Menos chuvosa	672	324	996	697	291	988
CAM	Chuvosa	1145	459	1604	1139	476	1615
	Menos chuvosa	688	298	986	663	276	939
CON	Chuvosa	1020	416	1436	1038	435	1473
	Menos chuvosa	738	321	1059	806	371	1177
MAR	Chuvosa	710	289	999	771	324	1095
	Menos chuvosa	771	340	1111	935	397	1332
SOU	Chuvosa	1185	518	1703	1155	489	1644
	Menos chuvosa	768	344	1112	844	370	1214
TUC	Chuvosa	1006	451	1457	1101	474	1575
	Menos chuvosa	970	419	1389	1081	457	1538
Total	-	11012	4719	15731	11516	4937	16753

O desempenho de cada modelo foi avaliado por meio dos seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de correlação de Pearson ( $r$  – equação 20), índice de concordância de Willmott ( $d$  – equação 21), índice de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997) ( $c$  – equação 22), erro médio ( $me$  – equação 23) e raiz do erro quadrado médio ( $rmse$  – equação 24). Todas as regressões, comparações e análises foram realizadas em R (o script em linguagem R utilizado se encontra no anexo II). Estes índices foram calculados comparando a radiação estimada pelos

modelos descritos anteriormente (AP, S-AP, AP-FAO, AP-LAT, MH e S-MH) com os valores observados, utilizando os dados de validação.

$$r = \frac{n(\sum P_i O_i) - (\sum P_i)(\sum O_i)}{\sqrt{[n \sum O_i^2 - (\sum O_i)^2][n \sum P_i^2 - (\sum P_i)^2]}} \quad (20)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (21)$$

$$c = rd \quad (22)$$

$$me = \frac{(P_i - O_i)}{n} \quad (23)$$

$$rmse = \sqrt{\frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (24)$$

onde:  $P_i$  é o valor de radiação estimada no dia ou mês  $i$ ;  $O_i$  é o valor medido de radiação no dia ou mês  $i$ ;  $\bar{P}$  é a média dos valores estimados de radiação;  $\bar{O}$  é a média dos valores observados;  $N$  é o número de amostras.

Além dos indicadores supracitados, a comparação das médias dos resíduos dos diferentes modelos para cada localidade foi realizada por meio do teste t.

## 2.6 Resultados e discussão

A Tabela 5 mostra os coeficientes calibrados para as equações de Angström-Prescott (AP) e equação de Hargreaves modificada (MH). A análise de regressão mostra significância ao nível de 1% para a equação de Angström-Prescott (AP) e equação de Hargreaves modificada (MH) para todas as localidades, com exceção de Soure, onde MH não é significativo. Com relação aos coeficientes calibrados para AP, pode-se notar que, exceto pelos coeficientes lineares de CAM e TUC, todos os coeficientes calibrados diferem dos valores recomendados por Allen et al. (1998) e por Glover e McCulloch (1958) ao nível de 1% de significância, o que reforça a necessidade de calibração destes coeficientes.

Tabela 5. Coeficientes para AP e MH e seus respectivos intervalos de confiança ( $p < 0,01$ ).

Localidade	Angström-Prescott (AP)			Equação de Hargreaves modificada (MH)	
	$a_s$	$b_s$	$a_s + b_s$	$a_h$	$b_h$
BEL	0,224** ± 0,009	0,355** ± 0,015	0,579	-0,317** ± 0,059	0,246** ± 0,020
CAM	0,300** ± 0,009	0,420** ± 0,013	0,720	-0,139** ± 0,071	0,246** ± 0,025
CON	0,255** ± 0,008	0,457** ± 0,012	0,712	-0,186** ± 0,032	0,205** ± 0,009
MAR	0,306** ± 0,009	0,389** ± 0,014	0,695	-0,206** ± 0,035	0,232** ± 0,011
SOU	0,326** ± 0,007	0,390** ± 0,012	0,716	0,543** ± 0,069	0,003 ± 0,029
TUC	0,287** ± 0,008	0,356** ± 0,014	0,643	-0,059** ± 0,048	0,189** ± 0,017

Localidade	Angström-Prescott (AP)			Equação de Hargreaves modificada (MH)	
	$a_s$	$b_s$	$a_s + b_s$	$a_h$	$b_h$
Para toda a região	0,276** ± 0,004	0,407** ± 0,007	0,682	0,270** ± 0,018	0,081** ± 0,006

\* Significativo ao nível de 5%. \*\* Significativo ao nível de 1%.

A Tabela 6 mostra os coeficientes calibrados para a equação de Angström-Prescott calibrada para cada estação (S-AP) e equação de Hargreaves calibrada para cada estação (S-MH). Ambos, S-AP e S-MH, e seus respectivos coeficientes angulares são significativos ao nível de 1% em Soure, enquanto MH não é. Isto indica uma variação sazonal da relação entre a razão de radiação e  $\sqrt{\Delta T}$  nesta localidade.

Os intervalos de confiança para o coeficiente linear e o coeficiente angular são normalmente maiores durante a estação menos chuvosa, o que pode ocorrer devido ao menor número de amostras (dias com dados registrados) durante a estação menos chuvosa. Uma vez que esta é uma região muito chuvosa, a estação menos chuvosa é mais curta que a estação chuvosa.

Tabela 6. Coeficientes para a equação de Angström-Prescott calibrada para cada estação (S-AP) e equação de Hargreaves modificada calibrada para cada estação (S-MH) e seus respectivos intervalos de confiança ( $p < 0,01$ ).

Localidade	Estação	Angström-Prescott sazonal (S-AP)			Equação de Hargreaves sazonal (S-MH)	
		$a_s$	$b_s$	$a_s + b_s$	$a_h$	$b_h$
BEL	Chuvosa	0,225** ± 0,010	0,350** ± 0,017	0,575	-0,318** ± 0,086	0,245** ± 0,029
	Menos chuvosa	0,212** ± 0,028	0,379** ± 0,041	0,592	-0,017 ± 0,167	0,155** ± 0,053
CAM	Chuvosa	0,292** ± 0,010	0,438** ± 0,016	0,731	-0,345** ± 0,101	0,315** ± 0,036
	Menos chuvosa	0,296** ± 0,020	0,417** ± 0,026	0,712	0,386** ± 0,120	0,074** ± 0,041
CON	Chuvosa	0,247** ± 0,010	0,495** ± 0,020	0,742	-0,359** ± 0,066	0,260** ± 0,021
	Menos chuvosa	0,268** ± 0,019	0,429** ± 0,024	0,697	0,078** ± 0,075	0,136** ± 0,019
MAR	Chuvosa	0,291** ± 0,012	0,422** ± 0,025	0,713	-0,467** ± 0,078	0,323** ± 0,027
	Menos chuvosa	0,328** ± 0,015	0,358** ± 0,021	0,685	-0,021 ± 0,061	0,176** ± 0,018
SOU	Chuvosa	0,326** ± 0,009	0,411** ± 0,017	0,737	0,205** ± 0,122	0,125** ± 0,050
	Menos chuvosa	0,327** ± 0,015	0,373** ± 0,019	0,700	0,741** ± 0,077	-0,059** ± 0,034
TUC	Chuvosa	0,292** ± 0,010	0,355** ± 0,021	0,647	-0,241** ± 0,079	0,252** ± 0,029
	Menos chuvosa	0,277** ± 0,015	0,368** ± 0,023	0,645	0,065 ± 0,095	0,152** ± 0,032

\* Significativo ao nível de 5%. \*\* Significativo ao nível de 1%.

Dornelas et al. (2006) observaram maior desvio padrão do coeficiente linear e do coeficiente angular de AP durante a estação seca em Brasília – DF, o que eles atribuem a maior quantidade de poeira e queima de biomassa. Isto também poderia explicar a o maior intervalo de confiança no período menos chuvoso nas localidades citadas acima, em adição ao menor número de amostras. A variação de  $a_s + b_s$  entre as estações mais chuvosa e menos chuvosa também corrobora com esta hipótese.

Como esperado,  $a_s + b_s$  é normalmente maior durante a estação chuvosa que durante a estação menos chuvosa (Tabela 6), exceto para Belém e Tucuruí. A soma de ambos os coeficientes em AP e S-AP representa a máxima fração de radiação solar extraterrestre que poderia, teoricamente, chegar à superfície terrestre em um dia de céu perfeitamente limpo, uma vez que este é o resultado da equação de Angström-Prescott quando a razão de insolação é igual a 1 (ver equação 1). Tal diferença em  $a_s + b_s$  entre estações pode estar relacionado a diferenças nas condições atmosféricas ao longo do ano. De acordo com Guyon et al. (2003), o número de partículas na atmosfera amazônica aumenta de cerca de  $400 \text{ cm}^{-3}$  para cerca de  $4000 \text{ cm}^{-3}$  na transição da estação chuvosa para a estação menos chuvosa.

De acordo com estes autores, este aumento massivo é devido à extensiva queima sazonal de biomassa causada pelo desmatamento e pela limpeza de pastagens. Aumentos na concentração de aerossóis podem levar à redução na transparência atmosférica durante a estação seca e, portanto, a maior  $a_s + b_s$ . Outro fator contribuindo para maior transparência atmosférica durante a estação mais chuvosa é a remoção de aerossóis da atmosfera, que pode ocorrer por diferentes processos, como a remoção por nucleação e por impacto (dentro e abaixo das nuvens). De acordo com Ohata et al. (2016), a remoção por nucleação controla a eficiência de remoção dos aerossóis com diâmetro de aproximadamente  $0,05$  a  $1 \mu\text{m}$ .

A tabela 3 mostra os vários indicadores estatísticos obtidos pela comparação de  $R_s$  observada e  $R_s$  estimada, usando dados de validação. AP-LAT sempre possui o maior erro percentual e erro médio, o que indica uma forte tendência deste modelo a superestimar  $R_s$ . Esta tendência é também observada para AP-FAO em algumas localidades, tais como BEL, CON e TUC, embora em menor intensidade. O desempenho ruim de MH é demonstrado pelo baixo índice de concordância de Willmott ( $d$ ) (WILLMOTT, 1981) e índice de desempenho de Camargo e Sentelhas (1997) ( $c$ ). Em Soure, embora S-MH tenha um baixo desempenho comparado a AP ou S-AP, o aumento do desempenho quando usando S-MH ao invés de MH é notável. Tabela 7. Indicadores estatísticos de cada modelo em cada localidade. O erro médio de modelos com letras diferentes difere ao nível de 5% de significância pelo teste t.

Localidade	Modelo		$r$	$d$	$c$	$me$	$rmse$
BEL	AP	a	0,796	0,877	0,698	-0,067	2,095
	S-AP	a	0,798	0,879	0,702	-0,065	2,083
	MH	a	0,571	0,710	0,406	0,069	2,858
	S-MH	a	0,594	0,735	0,437	0,073	2,804
	R-AP	b	0,796	0,765	0,609	2,770	3,493
	R-MH	c	0,382	0,494	0,189	3,321	4,626
	AP-FAO	c	0,794	0,718	0,570	3,714	4,412
	AP-LAT	d	0,795	0,604	0,480	5,555	6,073

Localidade	Modelo		<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>me</i>	<i>rmse</i>
CAM	AP	c	0,911	0,952	0,867	-0,036	1,490
	S-AP	c	0,913	0,952	0,870	-0,045	1,473
	MH	c	0,484	0,663	0,321	-0,003	3,107
	S-MH	c	0,561	0,726	0,408	0,054	2,942
	R-AP	b	0,911	0,920	0,838	-1,170	1,905
	R-MH	a	0,331	0,475	0,157	-2,262	4,008
	AP-FAO	c	0,911	0,953	0,869	0,047	1,570
	AP-LAT	d	0,911	0,893	0,814	1,932	2,525
CON	AP	ab	0,893	0,938	0,838	-0,060	2,072
	S-AP	b	0,899	0,944	0,849	-0,035	2,009
	MH	ab	0,757	0,851	0,644	-0,058	2,982
	S-MH	b	0,782	0,873	0,683	-0,033	2,852
	R-AP	a	0,894	0,924	0,826	-0,400	2,182
	R-MH	c	0,530	0,563	0,298	1,094	4,069
	AP-FAO	c	0,892	0,938	0,836	0,597	2,175
	AP-LAT	d	0,893	0,884	0,789	2,331	3,141
MAR	AP	b	0,850	0,913	0,776	0,049	2,097
	S-AP	b	0,853	0,915	0,780	0,062	2,082
	MH	b	0,752	0,846	0,636	0,067	2,726
	S-MH	b	0,780	0,870	0,679	0,011	2,589
	R-AP	a	0,852	0,911	0,776	-0,664	2,191
	R-MH	b	0,479	0,499	0,239	0,456	3,701
	AP-FAO	b	0,853	0,920	0,785	0,218	2,299
	AP-LAT	c	0,853	0,869	0,741	1,987	3,086
SOU	AP	d	0,882	0,936	0,825	-0,095	2,081
	S-AP	d	0,888	0,939	0,834	-0,084	2,026
	MH	d	0,013	0,191	0,003	0,136	4,749
	S-MH	d	0,450	0,581	0,262	0,142	4,188
	R-AP	b	0,883	0,907	0,801	-1,577	2,621
	R-MH	a	0,022	0,418	0,009	-3,096	5,671
	AP-FAO	c	0,883	0,929	0,820	-0,549	2,504
	AP-LAT	e	0,883	0,911	0,805	1,302	2,874
TUC	AP	a	0,829	0,896	0,742	0,006	2,019
	S-AP	a	0,830	0,897	0,744	0,006	2,012
	MH	a	0,541	0,705	0,382	-0,055	3,120
	S-MH	a	0,552	0,715	0,395	-0,068	3,094
	R-AP	b	0,826	0,898	0,742	0,522	2,111
	R-MH	b	0,380	0,512	0,194	0,857	3,506
	AP-FAO	c	0,819	0,874	0,716	1,302	2,649
	AP-LAT	d	0,821	0,777	0,638	3,091	3,891

Uma vez que MH não é significativa em Soure, qualquer  $\sqrt{\Delta T}$  resultará em aproximadamente o mesmo  $R_s/R_a$ , portanto, toda a variação em  $R_s$  estimado por MH (em Soure) é devida às variações de  $R_a$  ao longo do ano. Como consequência, obtém-se uma nuvem de pontos quase verticalmente alinhados na Figura 11E.

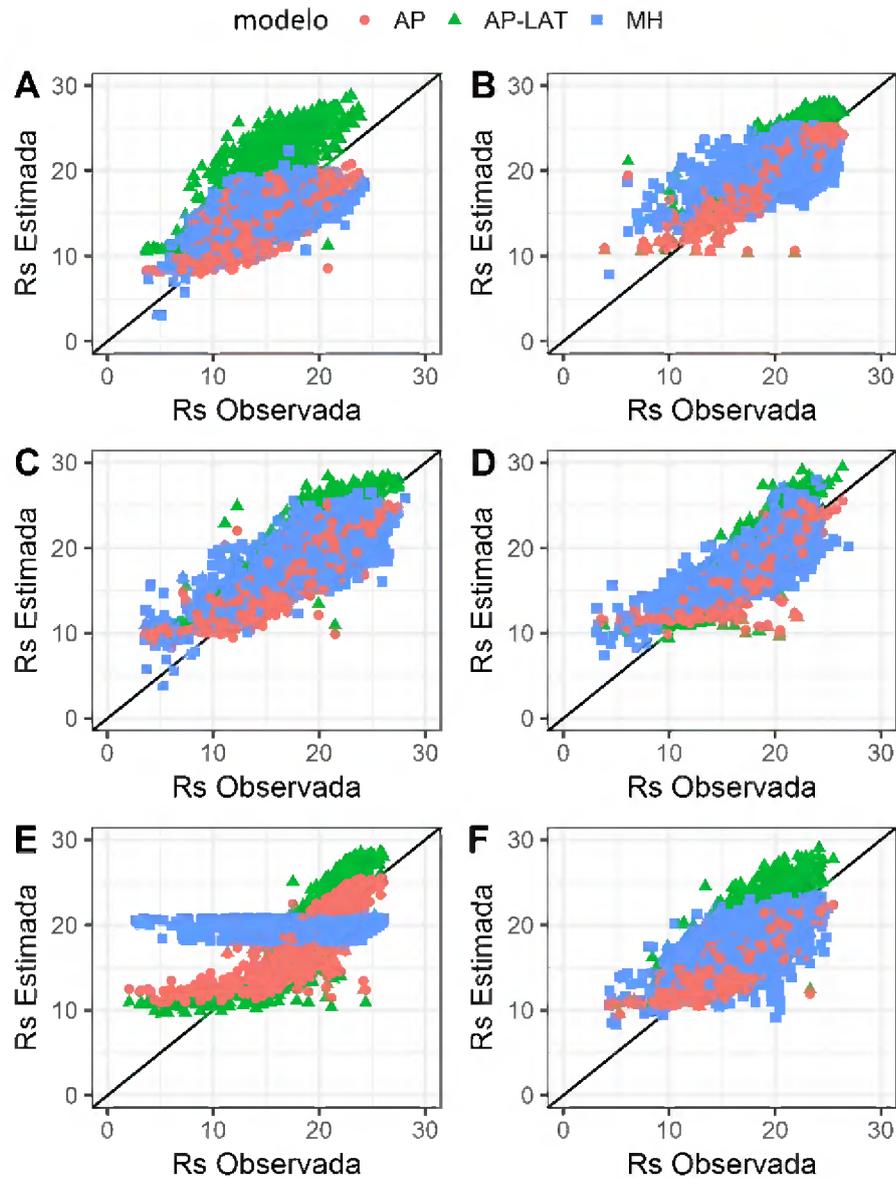


Figura 11. Comparação entre  $R_s$  estimada e observada diária em cada localidade: A – Belém, B – Cametá, C – Conceição do Araguaia, D – Marabá, E – Soure e F – Tucuruí. Somente três modelos são mostrados, visto que S-AP e S-MH normalmente se comportam de forma similar a AP e MH, respectivamente. AP-FAO, por outro lado, tem comportamento intermediário entre AP e AP-LAT.

A tendência antes mencionada de AP-LAT para superestimar  $R_q$  é claramente mostrada na Figura 11A, onde AP-LAT é representado pela nuvem de pontos verdes. Percebe-se que o uso de AP-LAT resulta em estimativas de cerca de  $25 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  quando o  $R_s$  medido é de cerca de  $20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , o que representa uma superestimativa de cerca de 25%.

Com relação às duas equações calibradas para toda a região, R-AP e R-MH, percebe-se um desempenho excepcionalmente ruim desta segunda, enquanto a primeira, R-AP, apresenta, para muitos municípios, um desempenho inferior à equação de Angström-Prescott calibrada para cada município, muitas vezes similar à utilização da equação não calibrada. Para a maioria

das localidades, a comparação do erro médio de cada modelo pelo teste t aponta diferença estatística entre as equações calibradas para toda a região (i.e., R-AP e R-MH) e as equações calibradas para cada localidade (AP, MH, S-AP e S-MH).

### Conclusão

1. A calibração aumenta a precisão das estimativas pela equação de Angström-Prescott nas seis localidades estudadas.
2. Estimativas diárias de radiação solar pela equação de Hargreaves modificada normalmente têm pouca precisão e, portanto, este modelo não é recomendado.
3. Quando coeficientes calibrados para AP não estão disponíveis, o uso de AP-FAO é recomendado no lugar de AP-LAT.
4. A equação de Angström-Prescott calibrada para toda a região apresenta, em muitos casos, desempenho similar ao das equações não calibradas.

### Referências

ALLEN, R. G. et al. *Crop Evapotranspiration*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. v. 300

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CARVALHO, D. F. DE et al. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 8, p. 838–844, Aug. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000800011>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

DORNELAS, K. D. E S.; SILVA, C. L. DA; OLIVEIRA, C. A. DA S. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 8, p. 1213–1219, Aug. 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2006000800001&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2006000800001&lng=pt&tlng=pt)>. Acesso em: 22 abr. 2018.

GLOVER, J.; MCCULLOCH, J. S. G. The empirical relation between solar radiation and hours of bright sunshine in the high-altitude tropics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 84, n. 359, p. 56–60, Jan. 1958. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/qj.49708435907>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

GUYON, P. et al. Physical properties and concentration of aerosol particles over the Amazon tropical forest during background and biomass burning conditions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 3, n. 4, p. 951–967, 8 Jul. 2003. Disponível em: <<http://www.atmos-chem-phys.net/3/951/2003/>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

MEDEIROS, F. J.; SILVA, C. M. S.; BEZERRA, B. G. Calibration of Ångström-Prescott Equation to Estimate Daily Solar Radiation on Rio Grande do Norte State, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, n. 3, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-77863230008>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

OHATA, S. et al. A key process controlling the wet removal of aerosols: new observational evidence. *Scientific Reports*, v. 6, n. 1, p. 34113, 5 Dec. 2016. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/srep34113>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

SILVA, A. O. Coeficientes de Angström-Prescott e sua influência na radiação solar e ETo no perímetro irrigado de bebedouro em Petrolina. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v. 8, n. 4, p. 333, 16 Dec. 2014. Disponível em: <<http://seer.tupa.unesp.br/index.php/BIOENG/article/view/224>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, v. 2, n. 2, p. 184–194, 1981. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02723646.1981.10642213>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

## ANEXO II – CÓDIGO EM R UTILIZADO PARA CALIBRAR OS COEFICIENTES GERAIS E SAZONAIS DE AP E MH PARA ESTIMATIVA DIÁRIA DE RADIAÇÃO

```

require(lubridate)
require(plyr)
require(hydroGOF)

load.weather.data = function(path) {
  # lê a tabela de dados
  df = read.table(path, header = TRUE, sep = ";", dec = ",")

  # elimina os dias com registros de radiação incompletos
  df$rs.total = ifelse(df$rs.count == 24, df$rs.total, NA)
  df$rs.count = NULL

  # converte a string de data em um objeto date
  df$date = as.Date(df$date, "%d/%m/%Y")

  # calcula a radiação extraterrestre e a duração do dia
  delta = 0.409 * sin(yday(df$date) * 2 * pi / 365 - 1.39)
  dr = 1 + 0.033 * cos(yday(df$date) * 2 * pi / 365)
  temp = -tan(df$latitude * pi / 180) * tan(delta)
  omega = ifelse(abs(temp) > 1, acos(sign(temp)), acos(temp))
  df$ra = (118.08 / pi) * dr * (
    omega * sin(df$latitude * pi / 180) * sin(delta) +
    cos(df$latitude * pi / 180) * cos(delta) * sin(omega)
  )
  df$daylength = omega * 24 / pi

  # calcula a razão de radiação e razão de insolação
  df$kt = df$rs.total / df$ra
  df$nn = df$sunshine.hours / df$daylength

  # calcula sqrt(tmax - tmin)
  df$dt = sqrt(df$aws.tmax - df$aws.tmin)

  # atribui uma estação a cada registro
  df$month = month(df$date)
  season = read.table("dados/season.csv", header = TRUE, sep = ";", dec = ",")
  df = merge(df, season, by = c("city", "month"))
  df$month = NULL

  # retorna uma tabela com os dados
  return(df)
}

melt.weather.data = function(df) {
  header = c("city", "latitude", "date", "season", "rs.total", "ra", "x", "y")
  #-----
  # Define quais modelos serão calibrados
  #-----
  # Deve-se informar quais são as variáveis necessárias para o ajuste do modelo
  #-----

  df.ap = df[
    c("city", "latitude", "date", "season", "rs.total", "ra", "nn", "kt")
  ]
  names(df.ap) = header
  df.ap$type = "cal"
}

```

```

df.ap = df.ap[!is.na(df.ap$x) & !is.na(df.ap$y),]
df.ap = df.ap[df.ap$y <= 0.85 & df.ap$x <= 1,]
for (i in levels(df.ap$city)) {
  rows = nrow(df.ap[df.ap$city == i,])
  df.ap[df.ap$city == i,][sample(rows, round(rows * 0.3)),]$type = "val"
}
df.ap$model = "AP"

df.hg = df[
  c("city", "latitude", "date", "season", "rs.total", "ra", "dt", "kt")
]
names(df.hg) = header
df.hg$type = "cal"
df.hg = df.hg[!is.na(df.hg$x) & !is.na(df.hg$y),]
df.hg = df.hg[df.hg$y <= 0.85,]
for (i in levels(df.hg$city)) {
  rows = nrow(df.hg[df.hg$city == i,])
  df.hg[df.hg$city == i,][sample(rows, round(rows * 0.3)),]$type = "val"
}
df.hg[sample(nrow(df.hg), round(nrow(df.hg) * 0.3)),]$type = "val"
df.hg$model = "H"

temp = merge(df.ap, df.hg, all = TRUE)
temp$model = as.factor(temp$model)
return(temp)
}

fit.models = function(df, by) {
  temp = split(df, as.list(df)[by])
  models = list()

  anova.table = data.frame(
    "Group" = character(0),
    "Df" = numeric(0),
    "Sum Sq" = numeric(0),
    "Mean Sq" = numeric(0),
    "F value" = numeric(0),
    "Pr(>F)" = numeric(0),
    "Source" = character(0)
  )

  for (i in names(temp)) {
    models[[i]] = list(
      "AP" = lm(y ~ x, data = temp[[i]][temp[[i]]$model == "AP",]),
      "H" = lm(y ~ x, data = temp[[i]][temp[[i]]$model == "H",])
    )

    anova1 = as.data.frame(anova(models[[i]]$AP))
    anova1$Source = row.names(anova1)
    anova1$model = "AP"
    anova1 = cbind(data.frame("Group" = i), anova1)

    anova2 = as.data.frame(anova(models[[i]]$H))
    anova2$Source = row.names(anova2)
    anova2$model = "H"
    anova2 = cbind(data.frame("Group" = i), anova2)

    anova.table = rbind(anova.table, rbind(anova1, anova2))
  }
}

```

```

    return(list("models" = models, "anova" = anova.table))
  }

predict.models = function(models, df, by) {
  temp = split(df, as.list(df)[by])
  for (i in names(models)) {
    temp[[i]]$rs.est = NA
    for (j in names(models[[i]])) {
      temp[[i]][temp[[i]]$model == j,]$rs.est =
        predict(models[[i]][[j]], temp[[i]][temp[[i]]$model == j,]) *
        temp[[i]][temp[[i]]$model == j,]$ra
    }
  }
  temp = do.call("rbind", temp)
  row.names(temp) = 1:nrow(temp)
  return(temp)
}

coef.models = function(models) {
  temp = data.frame(
    "group" = character(0),
    "model" = character(0),
    "coef" = character(0),
    "estimate" = numeric(0),
    "stderror" = numeric(0),
    "t.value" = numeric(0),
    "p.value" = numeric(0)
  )
  for (i in names(models)) {
    for (j in names(models[[i]])) {
      coefs = as.data.frame(coef(summary(models[[i]][[j]])))
      df = merge(data.frame("group" = i, "model" = j), coefs)
      df$coef = row.names(coefs)
      names(df) = c(
        "group", "model", "estimate", "stderror", "t.value", "p.value", "coef"
      )
      temp = merge(temp, df, all = TRUE)
    }
  }
  return(temp)
}

calculate.statistics = function(df, by, obs, sim) {
  temp = split(df, as.list(df)[by])
  df.res = data.frame(
    "group" = character(0),
    "r" = numeric(0),
    "d" = numeric(0),
    "c" = numeric(0),
    "rsq" = numeric(0),
    "me" = numeric(0),
    "rmse" = numeric(0),
    "pbias" = numeric(0),
    "pbias2" = numeric(0)
  )
  for (i in names(temp)) {
    r = cor(temp[[i]][[obs]], temp[[i]][[sim]])
    d = d(temp[[i]][[sim]], temp[[i]][[obs]])
    temp.res = data.frame(

```

```

    "group" = i,
    "r" = r,
    "d" = d,
    "c" = r * d,
    "rsq" = r * r,
    "me" = me(temp[[i]][[sim]], temp[[i]][[obs]]),
    "rmse" = rmse(temp[[i]][[sim]], temp[[i]][[obs]]),
    "pbias" = pbias(temp[[i]][[sim]], temp[[i]][[obs]]),
    "pbias2" = 100 * sum(temp[[i]][[sim]] - temp[[i]][[obs]]) /
      sum(temp[[i]][[obs]])
  )
  df.res = rbind(df.res, temp.res)
}
return(df.res[order(df.res$group),])
}

set.seed(15913)
df = melt.weather.data(load.weather.data("dados/irradiance.csv"))

cal.df = df[df$type == "cal",]
val.df = df[df$type == "val",]

models = fit.models(cal.df, c("city"))
val.df.general = predict.models(models$models, val.df, c("city"))

models.season = fit.models(cal.df, c("city", "season"))
val.df.season = predict.models(
  models.season$models, val.df, c("city", "season")
)
val.df.season = within(val.df.season, model <- paste(model, "Season", sep='.'))

val.df.fao = val.df[val.df$model == "AP",]
val.df.fao$model = "FAO"
val.df.fao$rs.est = (0.25 + 0.50 * val.df.fao$x) * val.df.fao$ra

val.df.lat = val.df[val.df$model == "AP",]
val.df.lat$model = "LAT"
val.df.lat$rs.est =
  (0.29 * cos(val.df.lat$latitude * pi / 180) + 0.52 * val.df.lat$x) *
  val.df.lat$ra

val.df = list(val.df.fao, val.df.lat, val.df.general, val.df.season)

val.df = do.call("rbind", val.df)

out = merge(
  coef.models(models$models),
  coef.models(models.season$models), all = TRUE
)

write.table(
  val.df, file = "out/val.csv", row.names = FALSE, sep = ";", dec = ",",
)
write.table(
  out, file = "out/coefficients.csv", row.names = FALSE, sep = ";", dec = ",",
)

res = calculate.statistics(
  val.df, by = c("city", "model"), obs = "rs.total", sim = "rs.est"
)

```

```

)
write.table(
  res, file = "out/res.csv", row.names = FALSE, sep = ";", dec = ","
)
write.table(
  rbind(models$anova, models.season$anova), file = "out/anova.csv",
  row.names = FALSE, sep = ";", dec = ","
)

write.table(
  cal.df, file = "out/cal.csv", row.names = FALSE, sep = ";", dec = ","
)

require(ggplot2)

p = list()

cities = levels(val.df$city)

model.abb = c("AP" = "AP", "H" = "MH", "LAT" = "AP-LAT")

temp = val.df[
  val.df$model == "AP" | val.df$model == "LAT" | val.df$model == "H",
]
temp$model = model.abb[temp$model]

for (i in cities) {
  p[[i]] = ggplot(
    data = temp[temp$city == i,],
    aes(x = rs.total, y = rs.est, col = model, pch = model)
  ) +
  geom_abline(intercept = 0, slope = 1) + xlim(0, 30) + ylim(0, 30) +
  xlab("Rs Observada") + ylab("Rs Estimada") +
  geom_point() +
  theme_bw()
}

require(ggpubr)
png(
  filename = "out/daily_rad.png",
  width = 12, height = 16, units = "cm",
  res = 300, type = "cairo"
)
ggarrange(
  plotlist = p,
  ncol = 2, nrow = 3,
  labels = "AUTO", common.legend = TRUE
)
dev.off()

```

### ANEXO III – PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DO MODELO SARRA-H

Variável	Valor	Descrição	Obtenção
SDJLevee	101	Graus-dia para a germinação	Obtido com dados dos experimentos
SDJBVP	506	Graus-dia da fase vegetativa básica	Obtido com dados dos experimentos
SDJRPR	266	Graus-dia do início da fase reprodutiva	Obtido com dados dos experimentos
SDJMatu1	236	Graus-dia do período de enchimento de grãos	Obtido com dados dos experimentos
SDJMatu2	182	Graus-dia do período de maturação fisiológica dos grãos	Obtido com dados dos experimentos
KRdtPotA	0,12	Índice de colheita	Obtido com dados dos experimentos
PPSens	1	Sensibilidade ao fotoperíodo (1 significa insensível)	Valor padrão
TBase	10	Temperatura basal inferior	-
TLim	45	Temperatura basal superior	-
PcReallocFeuille	0,6	Percentual de assimilados alocados pela folha	-
TxConversion	8,3	Eficiência de uso da radiação potencial (considerando a biomassa de toda a planta + respiração)	-
TxAssimBVP	1	Fator que multiplica TxConversion na fase vegetativa	-
TxAssimMatu1	0,6	Fator que multiplica TxConversion na fase de enchimento de grãos	-
TxAssimMatu2	0,5	Fator que multiplica TxConversion na fase de maturação fisiológica dos grãos	-
TxRespMaint	0,01	Fração da biomassa perdida por respiração diariamente	Valor padrão
AeroTotBase	0,65	Razão entre biomassa aérea e biomassa total no início do desenvolvimento da cultura	Valor padrão
AeroTotPente	0	Variação de AeroTotBase ao longo do ciclo da cultura	-
FeuilAeroBase	0,57	Razão entre biomassa de folhas e biomassa aérea no início do desenvolvimento da cultura	Obtido com dados dos experimentos
FeuilAeroPente	-5,70E-05	Variação de FeuilAeroBase ao longo do ciclo da cultura	-

KcMax	1,4	Kc máximo	Obtido com dados dos experimentos
PFactor	0,5	Fator P da FAO	Valor padrão
SeuilCstrMortality	5	Número de dias de estresse hídrico (déficit hídrico) que levam à morte da planta	Valor padrão
Kdf	0,77	Coefficiente de extinção de radiação	Obtido com dados dos experimentos
VRacLevee	5	Velocidade de crescimento da raiz durante a pré-emergência	-
VRacBVP	5	Velocidade de crescimento da raiz durante a emergência	-
VRacPSP	15	Velocidade de crescimento da raiz durante a fase vegetativa após a queda dos cotilédones	-
VRacRPR	15	Velocidade de crescimento da raiz durante a floração	-
VRacMatu1	10	Velocidade de avanço da frente radicular durante o período de enchimento de grãos	-
VRacMatu2	0	Velocidade de avanço da frente radicular durante o período de maturação fisiológica dos grãos	-
SlaMin	0,000804	Área foliar específica inicial	Obtido com dados dos experimentos
SlaMax	0,00119456	Área foliar específica final	Obtido com dados dos experimentos
SlaPente	0,05	Variação da área foliar específica	-