



Estimativa da produtividade potencial e real do milho utilizando o Modelo da Zona Agroecológica da FAO

Geraldo Luís Charles de Cangela^{1(*)}, George do Nascimento Araújo Júnior¹, José Ralison Inácio da Silva¹, Ênio Farias de França e Silva¹, Kenny Ruben Montalvo Morales¹, Gonçalves Albino Dauala² e Júlio Lopes Lampião²

¹Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE. Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP 52.171-900 Recife, PE.

E-mails: gerrycangela@gmail.com, georgearaujo.agro@gmail.com, raliuson.silva@ufrpe.br, enio.fsilva@ufrpe.br e montalvokenny@gmail.com

²Universidade Zambeze, Chimoio, Manica, Moçambique. E-mail: goncalvesdauala07@gmail.com e juliolampiao@gmail.com

(*) Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 18 de janeiro de 2021

Aceito em 16 de julho de 2021

Termos para indexação:

Zea mays L.

modelagem matemática

disponibilidade hídrica

Moçambique

RESUMO

O manejo adequado, como a escolha da época de plantio ou o uso da irrigação, permite o maior aproveitamento dos recursos hídricos disponíveis no ambiente. O objetivo do estudo foi estimar a produtividade potencial e real da cultura de milho no município de Chimoio, Moçambique, utilizando o modelo Zona Agroecológica da FAO. No modelo foi calculado a radiação solar extraterrestre, latitude, temperatura e precipitação média local, distância relativa Terra-Sol; número do dia do ano, ângulo horário do pôr e nascer do Sol, declinação solar, fotoperíodo e insolação. Com a radiação solar extraterrestre, foi estimada a produtividade potencial no período de céu nublado e de céu claro. Foi usado uma série de dados meteorológicos de 20 anos (1999-2019) para simular a produtividade em função da fenologia do milho no ciclo de 120 dias, safras de janeiro a abril, e setembro a dezembro de cada ano, meses chuvosos. A produtividade potencial bruta padrão média entre 1999 a 2019 foi de 564,63 kg MS ha⁻¹ d⁻¹, crescendo a cada ano, e a produtividade potencial média da cultura nesse período foi de 5712,30 kg ha⁻¹, sendo maior em 2013 (6522,29 kg ha⁻¹) e menor em 1999 (5351,91 kg ha⁻¹). A técnica de agrupamento mostrou quatro grupos homogêneos de produtividade. O modelo não considera pragas e doenças, mas analisa a produtividade e mudanças climáticas na agricultura, que são cruciais no ambiente agroclimático.

© 2021 SBAgro. Todos os direitos reservados.

Introdução

Moçambique é um país africano que se localiza na costa Sudeste da África, na zona austral do continente. O país situa-se entre os paralelos 10°27' e 26°52' de latitude sul e entre os meridianos 30°12' e 40°51' de longitude leste. O seu clima é, em geral, tropical e úmido. O país possui uma área de aproximadamente 799.380 km² com as seguintes fron-

teiras: a norte com a República da Tanzânia, a noroeste com o Malawi e a Zâmbia, a oeste com o Zimbabwe e a República da África do Sul e a sul com a Suazilândia e também com a África do Sul. A leste é banhado pelo oceano Índico numa extensão de 2470 km (Muchangos, 1999).

Em Moçambique, a produção em pequena escala constitui a principal atividade econômica da população, alcançando mais de 75% dos cidadãos (Mosca, 2017), sendo o mi-

lho (*Zea mays* L.) considerado uma cultura de rendimento e alimento básico, garantindo a segurança e o sustento das famílias rurais, pois é cultivado em cerca de 1/3 da área do país (Uaiene, 2006; Sousa et al., 2016). O cereal é cultivado por 79% das pequenas e médias explorações (áreas menores que 5 ha) que concentram cerca de 99% das unidades agrícolas, em mais de 95% da área cultivada do país (Rosário, 2019), seguido de 31,6% que cultivam amendoim pequeno, 17% Mapira, 13,3% Arroz e 2,6% Mexoeira (MASA, 2015).

O potencial de produção do milho em Moçambique está associado às condições agroecológicas do País (Walker et al., 2006). As regiões agroecológicas de elevadas e frequentes precipitações estão localizadas nas zonas centro e norte do país, apresentando condições suficientemente ótimas para alcançar bons níveis de produção e rendimentos médios acima de 945 e 734 kg ha⁻¹, respectivamente. Além disso, a temperatura média anual nessas regiões é igual a 24°C, com precipitação pluvial que varia entre 800 a 1000 mm ano⁻¹. Os principais tipos de solos destas zonas são argilosos vermelhos profundos, de média fertilidade, com presença de materiais ferralíticos vermelhos acastanhados (MAE, 2005) e Latossolos (MASA, 2014). As regiões agroecológicas da zona sul do país são propensas à baixos níveis de produção com rendimentos na ordem de 400 kg ha⁻¹ (TIA, 2007).

Em função do potencial produtivo, composição química e valor nutritivo, o milho constitui-se em um dos mais importantes cereais consumidos e mais produzido no mundo. Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, nos últimos cinco anos, a produção média foi de 778,8 milhões de toneladas. Com relação à área, o milho ocupa o segundo lugar no panorama mundial, com uma área de 161,9 milhões de hectares plantados (OCDE, 2014).

Os distritos de Gondola, Manica, Mossurize e Sussundenga, localizados na zona centro de Moçambique, entre os anos 2000–2009, foram responsáveis pela produção de 80% de milho (Mabilana et al. 2012). Porém, apesar de ser produzido em larga escala na região, seus potenciais produtivos ainda não foram alcançados, pois estima-se que o potencial da cultura na região seja de 4,5 ton ha⁻¹ (MINAG, 2010). Entre os fatores que influenciam a produção da cultura do milho, o clima e a disponibilidade hídrica destacam-se como os de maior relevância, pois afetam significativamente a produtividade da cultura (Caron et al., 2017; Guo et al., 2017; Shim et al., 2017; Yang et al., 2017). Todavia, a necessidade hídrica da cultura varia com a época, local de cultivo e o genótipo utilizado, que é de 250 a 800 mm ao longo do ciclo de cultivo, chegando a 900 mm no ciclo em locais de alta demanda evapotranspirativa (Abdrabbo et al., 2016).

Para melhorar a adaptação da cultura, primeiro, deve-se conhecer a produtividade potencial, que relaciona as

características climáticas e de solo, as condições de radiação solar, temperatura do ar e do solo, fotoperíodo, nutrição, salinidade e manejo. Em segundo, quando ela for submetida a restrição hídrica, atinge o limite de produtividade real. Nesse processo, também deve-se contabilizar as quebras de produtividade (*yield gap*), que representam as diferenças de defasagem entre a produtividade potencial e a real (Marin et al., 2008; Sentelhas et al., 2015; Andrea et al., 2018; Nóia Júnior & Sentelhas, 2019), já que a cultura do milho é sensível à variabilidade agroclimática (Maldaner et al., 2014) e às condições de manejo.

As quebras de produtividade direcionam estratégias de manejo e auxiliam nas projeções de rendimento e esforços de aumento da produtividade em função de cada localidade (Lobell et al., 2009). Todavia, o aumento da produtividade vai depender também de fatores genéticos de adaptação, nutricionais, climáticos e fitossanitários, que exercem maior influência nos processos metabólicos, interferindo nas taxas de interceptação de luz e assimilação de dióxido de carbono, que estão diretamente relacionadas à temperatura do ambiente e a disponibilidade hídrica, este último, a principal reguladora do desenvolvimento, crescimento e produção (Embrapa, 2011; Zeri et al., 2013).

Para simular o crescimento e prever produtividade das plantas, na literatura, existem vários modelos. Esses modelos levam em consideração a produção de fitomassa seca, nomeadamente, a área foliar, crescimento e fenologia (Oliveira et al., 2011; Martins, 2012). Um dos modelos utilizados para estimar a produtividade potencial da cultura de milho foi desenvolvido por Doorenbos & Kassam (1979), denominado de zoneamento agroclimático da FAO, que tem como finalidade o planejamento agrícola de uma localidade ou região, avaliando as quebras de produtividade e redução dos custos com experimentação e análises (Assad et al., 2007; Andriolli & Sentelhas, 2009). Esse método tem por base a proposição de De Wit (1965) para estimativa da produtividade bruta de matéria seca por uma cultura padrão, que hipoteticamente cobre todo o terreno, utilizando-se a radiação solar local como único fator de restrição.

Visando a maximização dos recursos hídricos e o conhecimento das melhores épocas de produção do milho no município de Chimoio, Moçambique, desenvolveu-se o presente estudo com objetivo de avaliar, através de simulações, a produtividade potencial e real da cultura do milho utilizando o modelo da Zona Agroecológica da FAO.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado no município de Chimoio, localizado no centro de Moçambique, na província de Manica (19°12'S; 33°47'E, 732 m) (Figura 1). O município ocupa uma área de 177,40 km², com uma população de aproximada-

mente 363,3 mil de habitantes, o equivalente a 2048 habitantes por km² (INE, 2019). De acordo com a classificação de Köppen e Geiger, o clima local é do tipo Cwa (Clima subtropical úmido com invernos secos e verões quentes), com a temperatura média do ar de 21,1°C, umidade relativa média do ar de 80% e precipitação pluvial oscilando de 800 a 1000 mm ano⁻¹ (Kottek et al., 2006; Jansen et al., 2008; Harrison et al., 2011) até 1016,63 mm ano⁻¹ (Cangela et al., 2021). O solo da região é classificado como latossolo vermelho distroférico, de característica profunda e textura que tende a argilosa (60 a 70% de argila). A CAD considerada para esse tipo de solo é de 83 mm para o primeiro metro de profundidade (Flumignan et al., 2015).

Dados meteorológicos

Registros diários de precipitação pluvial e de temperatura mínima, média e máxima do ar de 20 anos (1999-2019), foram obtidos junto ao banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique (INAM, 2020). Após serem organizados em planilha eletrônica, os dados foram submetidos a estatística descritiva com auxílio do aplicativo Climap 3.0 (Salvador, 2017), para avaliação das mudanças nos padrões de chuva. Posteriormente as análises, foi possível calcular o total de precipitação mensal e anual; precipitação média e o desvio padronizado da precipitação.

Para as simulações, foi considerada a cultura de milho

com ciclo de 120 dias. A simulação de semeadura do milho foi realizada em escala do desenvolvimento fenológico da cultura, entre o período de janeiro a março e de setembro a dezembro de 1999 a 2019. O intervalo foi adotado considerando atrasos na colheita, devido a possíveis problemas mecânicos ou ocorrência de chuvas. No geral, a estação chuvosa em Moçambique varia de uma região para outra, partindo do final do mês de agosto até o mês de setembro e o término entre os meses de abril e maio.

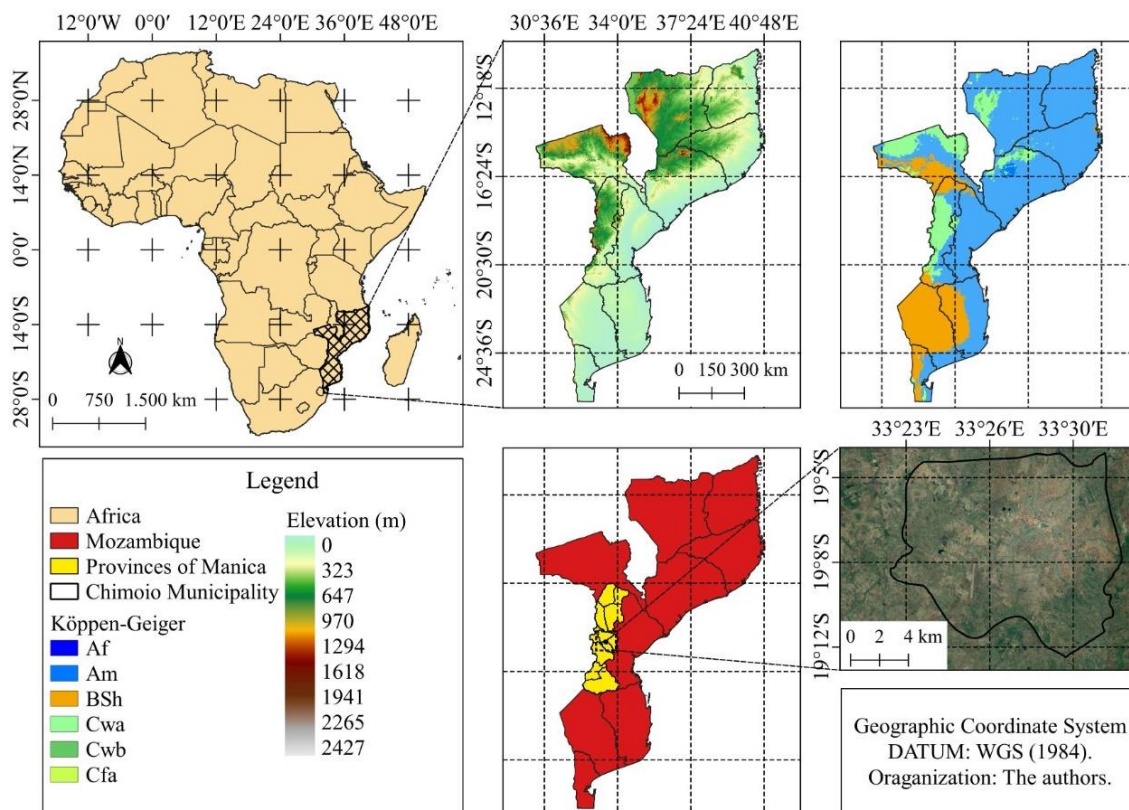
Evapotranspiração de referência (ET_o)

A literatura apresenta uma série de metodologias para estimar a ET_o, dentre eles o de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO (Allen et al., 1998), Hargreaves-Samani, Linacre e de Camargo. Para a estimativa de ET_o, em períodos de 10 ou 30 dias, foi selecionado o método de Camargo (Camargo & Camargo, 1983) por ser relativamente simples, requerendo apenas dados de temperaturas (máxima e mínima) e latitude do local. Para melhor ajuste, o método de Camargo foi adaptado para o de Priestly & Taylor (1972), para períodos diários, segundo Ritchie (1998), conforme equação 1.

$$ET_o = F \cdot \frac{Ra}{\lambda} \cdot 0,36 \cdot (3T_{max} - T_{min}) \cdot NDC \quad (1)$$

Em que: Ra = radiação solar global extraterrestre (MJ m⁻² d⁻¹); T_{max} e T_{min} = temperatura máxima e mínima do

Figura 1. Mapa de localização da área estudo, município de Chimoio, Moçambique.



ao no período; λ = calor latente de vaporização da água (2,45 MJ kg⁻¹) para conversão da radiação em mm d⁻¹; NDC = número de dias do ciclo da cultura; F = fator de ajuste (0,011) proposto por Camargo (1983).

Evapotranspiração da cultura (ETc)

A multiplicação da ETo pelo coeficiente de cultivo (k_c) resulta na obtenção a evapotranspiração da cultura (ETc) (Equação 2), que quantifica a água utilizada pela cultura durante o seu desenvolvimento em condições sem restrição hídrica.

$$ETc = ETo \cdot Kc \quad (2)$$

Os valores de Kc para as principais culturas de interesse agrícola ao longo de seu ciclo foram determinados por Doorenbos & Kassam (1994), sendo utilizados na determinação da ETc quando não se tem dados determinados no local de interesse. Para o milho, os valores de Kc utilizados na fase fenológica foram: 0,40 para a fase da germinação e emergência (da germinação até 10% de cobertura do solo); 0,825 para a fase de crescimento vegetativo (de 10 a 80% de cobertura do solo); 1,125 no período intermediário (de 80% da cobertura do solo até o início de amadurecimento); 0,875 na fase final do ciclo (do início do amadurecimento até a colheita) e 0,575 na colheita.

Evapotranspiração real (ETr)

A ETr refere-se à evapotranspiração de culturas sob condições ambientais e de manejo que difere das condições padrão, podendo resultar em crescimento limitado da planta (Allen et al., 1998). A ETr resulta da multiplicação de ETc (Equação 3) com ks (coeficiente de estresse hídrico, adimensional, variando de 0 a 1), sendo obtido pela equação 4 de Doorenbos & Kassam (1979).

$$ETr = ETc \cdot ks \quad (3)$$

Para a determinação da ETr, utilizou-se o coeficiente de estresse hídrico (ks) que penaliza o consumo de água pela planta em função do déficit hídrico do solo. Para condições climáticas onde ocorrem poucos eventos de precipitação, o ks será menor que 1 ($Ks < 1$), e em situações onde não exista nenhum estresse hídrico, o ks será igual a 1 ($Ks = 1$). Bernardo (1995) apresenta uma metodologia para o cálculo de ks (Equação 4), em que sua curva apresenta um comportamento logarítmico, com pequena variação de ks enquanto a umidade do solo está próxima da capacidade de campo.

$$Ks = \frac{CAD - D_r}{(1 - f)CAD} = \frac{\ln[LAA + 1]}{\ln[CAD + 1]} = \frac{\ln[(\theta_i - \theta_{pm}) + 1]}{\ln[(\theta_{cc} - \theta_{pm}) + 1]} \quad (4)$$

Em que: CAD = capacidade de água disponível no solo

(mm), D_r = depleção de água na zona radicular (mm), f = fração da CAD que a cultura pode extrair da zona radicular (mm) sem sofrer estresse hídrico, θ_i = umidade do solo antes da irrigação, θ_{cc} = umidade do solo na capacidade de campo, θ_{pm} = umidade do solo no ponto de murcha permanente

Cenários de simulação e características da cultura

Os cenários da simulação foram baseados nas épocas de plantio e na disponibilidade de água para a cultura. Adotou-se como profundidade do sistema radicular da cultura de 15 cm para a fase fenológica I (Inicial), 30 cm na fase II (Crescimento) e 40 cm nas fases III e IV (Intermediária e Final), e uma CAD de 12,5; 24,9 e 33,2 mm, respectivamente. O milho tolera situações onde o armazenamento é rebaixado até 45% da CAD (Allen et al., 1998). Com isso, o fator de depleção de água no solo (f) foi definido como sendo de 0,55; ou seja, nenhuma restrição às taxas de evapotranspiração seria imposta até que 55% da CAD fosse reduzida. Considerando esses valores, definiu-se valores de lâmina de água no solo (LAA) de 5,6 mm para a Fase I; 11,2 mm para a Fase II e 14,9 mm para as Fases III e IV.

Modelo de zona agroecológica

Para a utilização do modelo Zona Agroecológica da FAO foram necessários dados de temperatura média do ar (°C), precipitação (mm), latitude (ϕ , grau) do local, o dia do ano (j , dias) que foram usados, em primeiro lugar, para a determinação da distância Terra-Sol (d_r , adimensional, Equação 5) e declinação solar (δ , grau, Equação 6), seguido de ângulo horário do pôr do sol (ω_s , graus, Equação 6). Com os valores de d_r , δ e ω_s , foi posteriormente determinado o fotoperíodo (N , horas, Equação 8) e a radiação solar extraterrestre ou no topo da atmosfera (R_a , cal cm⁻² d⁻¹, Equação 9).

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360j}{365}\right) \quad (5)$$

$$\delta = 23,45 \sin\left[\frac{360}{365}(284 + j)\right] \quad (6)$$

$$\omega_s = \arcsin[-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)] \quad (7)$$

$$N = \frac{2}{15} \omega_s \quad (8)$$

$$R_a = 37,586 d_r \left[\left(\frac{\pi \omega_s}{180}\right) \sin \omega_s \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega_s \right] \quad (9)$$

Devido a limitação dos dados de insolação (n , horas) no local de estudo, a mesma foi estimada pela combinação das equações de Angström-Prescott (Pereira et al., 2002) e Hargreaves (Allen et al., 1998), resultando na equação 10. Não havendo informações de transmitância global da atmosfera

ra (parâmetros a e b), Angström-Prescott sugerem o uso de $a = 0,29 \cos \phi$ e $b = 0,52$. O K_{RS} assume valores iguais a 0,16 $^{\circ}C^{-0,5}$, para áreas localizadas no interior do continente, ou 0,19 $^{\circ}C^{-0,5}$ para áreas próximas a zonas do litorâneas.

$$n = \frac{N}{b} [(K_{RS} \sqrt{T_{max}} - T_{min}) - a] \quad (10)$$

Estimativa da produtividade potencial bruta padrão

A produtividade potencial bruta padrão (PPBp, kg MS $ha^{-1} d^{-1}$) corresponde a massa seca produzida por uma cultura padrão, cobrindo totalmente o terreno (IAF=5), tendo a radiação solar, o fotoperíodo e a temperatura como fatores limitantes. A determinação da PPBp para a cultura do milho foi feita utilizando a equação 11, do modelo proposto por Doorembos & Kassam (1979). Os valores de PPBc e PPBn foram estimados de acordo com as equações (12) e (13), respectivamente.

$$PPB_p = PPB_n + PPB_c \quad (11)$$

$$PPB_n = (31,7 + 0,219 Ra) cTn \left(1 - \frac{n}{N}\right) \quad (12)$$

$$PPB_c = (107,2 + 0,36 Ra) cTn \left(\frac{n}{N}\right) \quad (13)$$

Em que: PPBc = produtividade potencial bruta de matéria seca durante o período de céu claro (kg MS $ha^{-1} d^{-1}$); PPBn = produtividade potencial bruta de matéria seca durante o período com nebulosidade (kg MS $ha^{-1} d^{-1}$); cTc = coeficiente de correção devido à temperatura relativa ao período de dia de céu claro; cTn = coeficiente de correção devido à temperatura relativa ao período de dia nublado; Ra = radiação solar extraterrestre ou no topo da atmosfera (Ra, $cal\ cm^{-2}\ d^{-1}$).

Os coeficientes cTc e cTn das equações 12 e 13 variam de acordo com o grupo da cultura, mecanismo de fixação de carbono e do clima da região de origem da espécie. No caso do milho (Grupo 3, Ciclo C_4), os coeficientes foram estabelecidos pelas equações (14) e (15) (Barbieri & Tuon, 1992).

$$\text{Se } T \geq 16,5^{\circ}C \quad cTn = -1,064 + 0,173T - 0,0029T^2 \quad (14a)$$

$$cTc = -4,16 + 0,4325T - 0,00725T^2 \quad (14b)$$

$$\text{Se } T < 16,5^{\circ}C \quad cTn = -4,16 + 0,4325T - 0,00725T^2 \quad (15a)$$

$$cTc = -9,32 + 0,865T - 0,0145T^2 \quad (15b)$$

Estimativa da produtividade potencial da cultura

A produtividade potencial da cultura (PPc) foi calculada

da segundo o modelo da Zona Agroecológica da FAO (Equação 16), descrita por Doorembos & Kassam (1979) que considera PPBp corrigida por elementos da planta e do clima (De Wit, 1965) ainda com adaptações propostas por Barbieri e Tuon (1992).

$$PPc = PPBp \times C_{IAF} \times C_{RESP} \times C_{COL} \times NDC \times C_{CUM} \quad (16)$$

Em que: PPBp = produção bruta de matéria seca da cultura padrão (Kg ha^{-1}); C_{IAF} = correção para o índice de área foliar máxima da cultura; C_{RESP} = correção para as perdas por respiração; C_{COL} = correção para a produção de matéria seca em função da umidade; NDC = número de dias do ciclo da cultura; C_{UM} = correção para considerar a umidade da parte colhida.

A correção para área foliar é necessária uma vez que seus valores variam durante o ciclo da cultura estudada e atinge valor máximo de 5. Então a mesma foi calculada pela equação 17. O IAF ideal para a cultura do milho, situa-se ao redor de 5, no entanto, pode variar em função da variedade e do ambiente entre 3 e 8 (Andrade, 1991; Manfron, et al., 2003).

$$C_{IAF} = 0,0093 + 0,185IAF - 0,0175IAF^2 \quad (17)$$

$$IAF \geq 5, C_{IAF} = 0,5$$

As correções das perdas por respiração (C_{RESP}) foram estimadas em função da temperatura média, em que, para $T_{med} < 20^{\circ}C$; C_{RESP} é igual a 0,6; e para $T_{med} > 20^{\circ}C$, C_{RESP} é igual a 0,5. As correções para a parte da planta efetivamente colhida, consideram apenas a matéria seca total, que para o caso do grau de milho (C_{COL}) correspondeu a 0,35, e a correção considerando a umidade da parte colhida (C_{UM}), para um teor de umidade (UM) foi de 13% (Equação 18) (Doorembos & Kassam, 1994).

$$C_{UM} = [1 - (0,01UM\%)]^{-1} \quad (18)$$

Efeito do déficit hídrico na produtividade real da cultura

Com os dados de produtividade potencial (PPc) obtidos, este foram multiplicados aos coeficientes de resposta da cultura ao déficit hídrico (Ky). Os valores de Ky utilizados para a cultura de milho foram de 0,4 para a fase do crescimento vegetativo; 1,5 para a fase de floração; 0,5 para a fase de frutificação e 1,25 para a fase de maturação (Doorembos & Kassam, 1994). A produtividade real da cultura (PR) foi determinada pela equação 19, que levou em consideração a PPc e o déficit hídrico relativo ($1 - E_{Tr}/E_{Tc}$) (Doorembos & Kassam, 1979).

$$PR = PPc \left[1 - Ky \left(1 - \frac{ETr}{ETc} \right) \right] \quad (19)$$

Análise de agrupamento

Na posse dos dados, realizou-se a análise de agrupamento (clusters) da série histórica em função da produtividade potencial e real. Para isso, foi utilizada a distância euclidiana, baseado na hierarquia aglomerativa de Ward (1963), que por sua vez, calcula a distância entre os grupos pela soma dos quadrados entre os dois agrupamentos sobre a variável estudada. A análise de agrupamento foi realizada com o auxílio do programa R (R CORE TEAM, 2021). No método de Ward (1963), a distância entre dois clusters é a soma dos quadrados entre eles considerando todas as variáveis. Neste método, a dissimilaridade é minimizada, ou a soma total dos quadrados dentro dos grupos é minimizada, ou seja, a homogeneidade dentro de cada grupo e heterogeneidade fora de cada grupo são dadas (Lyra et al., 2014; Brito et al., 2016).

Resultados e discussão

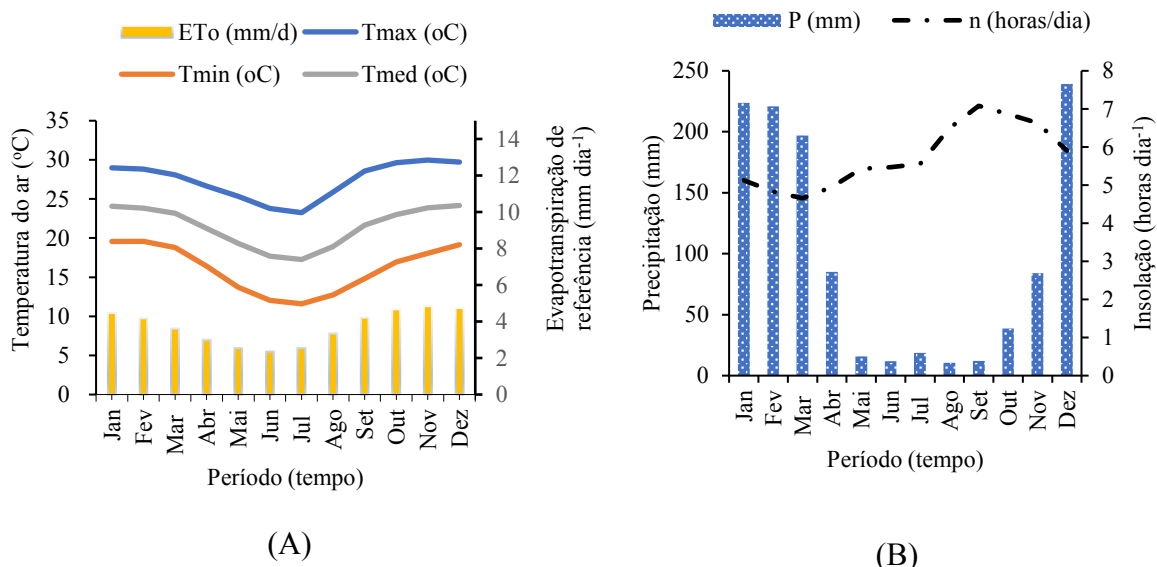
Nas Figuras 2A e 2B pode-se observar as médias mensais de temperatura do ar (°C), precipitação (mm), insolação (horas) e ETo (mm d⁻¹) para a cidade de Chimoio, no período estudado. As temperaturas máximas apresentaram tendência crescente durante a estação chuvosa com variações de 28,1 a 30,0 °C. Já as temperaturas mínimas apresentaram oscilações entre 11,6 °C e 13,7 °C na época de seca, com maiores valores iguais a 19,6°C na época chuvosa. As temperaturas médias variaram de 17,3 °C e 24,2 °C ao longo do ano. As precipitações pluviais mensais atingiram

239,3 mm na época chuvosa, enquanto nos meses de junho e agosto, os níveis pluviométricos foram em torno de 10,0 mm (Figura 2B). Os valores médios diários de insolação atingem 7,2 horas em setembro e 4,5 em março. Na estação chuvosa, a variação foi de 4,8 a 6,6 horas, em função da nebulosidade.

A temperatura controla e afeta a atividade fotossintética e a velocidade de crescimento e desenvolvimento da planta de milho nos diferentes processos morfofisiológicos, sendo a ideal entre 25 e 30 °C (diurno) e 19 °C (noturno) (Sangoi et al., 2010). O milho possui temperaturas bases inferiores e superiores em torno de 8 °C e 30 °C, respectivamente, a depender do híbrido e/ou cultivar (Monteiro, 2009). Nos processos de modelagem, em associação com o desenvolvimento fenológico da cultura do milho, o limiar de temperaturas mínimas utilizadas tem sido em torno de 8 a 10 °C e máximas em torno de 30 °C (Tojo et al., 2005; Kumudini et al., 2014). Temperaturas acima de 30 °C, afetam a eficiência de uso da radiação, assim como o acúmulo de matéria seca e a partição de fotoassimilados (Edreira et al., 2012). Por outro lado, no momento da semeadura, temperaturas mínimas, próximas de 10°C, tendem a acarretar em uma temperatura do solo ainda mais inferior, prejudicando a germinação e, conseqüentemente, a taxa de crescimento da cultura, o que influencia no tamanho da raiz (redução de síntese de citocinina), o aparecimento de folhas, IAF e a interceptação da radiação (Fancelli, 2014).

Na Figura 2B observa-se que, os meses de janeiro, fevereiro, março e dezembro apresentam os maiores valores de aproveitamento de fotoperíodo e chuvas, mostrando um aumento gradativo na quantidade de radiação incidida sobre a cultura. Desta forma, com aumento da quantidade

Figura 2. Variação das temperaturas máxima, média e mínima do ar (A), precipitação pluvial e insolação (B) na cidade de Chimoio. (Dados históricos de 1999 a 2019, adquiridos no INAM, agrupados e transformados em média diária para um ano). Município de Chimoio, Moçambique.



de radiação ao longo do crescimento da cultura, verifica-se uma máxima conversão de energia luminosa em energia química, possibilitando o aumento dos índices de produtividade, justificando a semeadura. Com isso, há um aproveitamento da radiação solar pela cultura é maximizado nas fases de pré-floração, floração e início do enchimento de grãos, que coincidem com o período de maior disponibilidade de radiação, que ocorre em meados de dezembro e janeiro no hemisfério sul (Sangoi et al., 2010).

A produtividade potencial bruta padrão (PPBp) média da cultura do milho para o período de 1999 a 2019 foi de 564,63 kg MS ha⁻¹ d⁻¹, apresentando um comportamento crescente a cada ano (Figura 3). O ano de 2013 apresentou a maior produtividade média, 644,35 kg MS ha⁻¹ d⁻¹, enquanto, o ano de 1999 apresentou uma produtividade média igual a 528,22 kg MS ha⁻¹ d⁻¹, a menor observada entre os anos estudados. A produtividade potencial é dependente da radiação solar fotossinteticamente ativa, temperatura, pressão parcial de CO₂ e fotoperíodo, que por sua vez, depende da latitude e da época do ano.

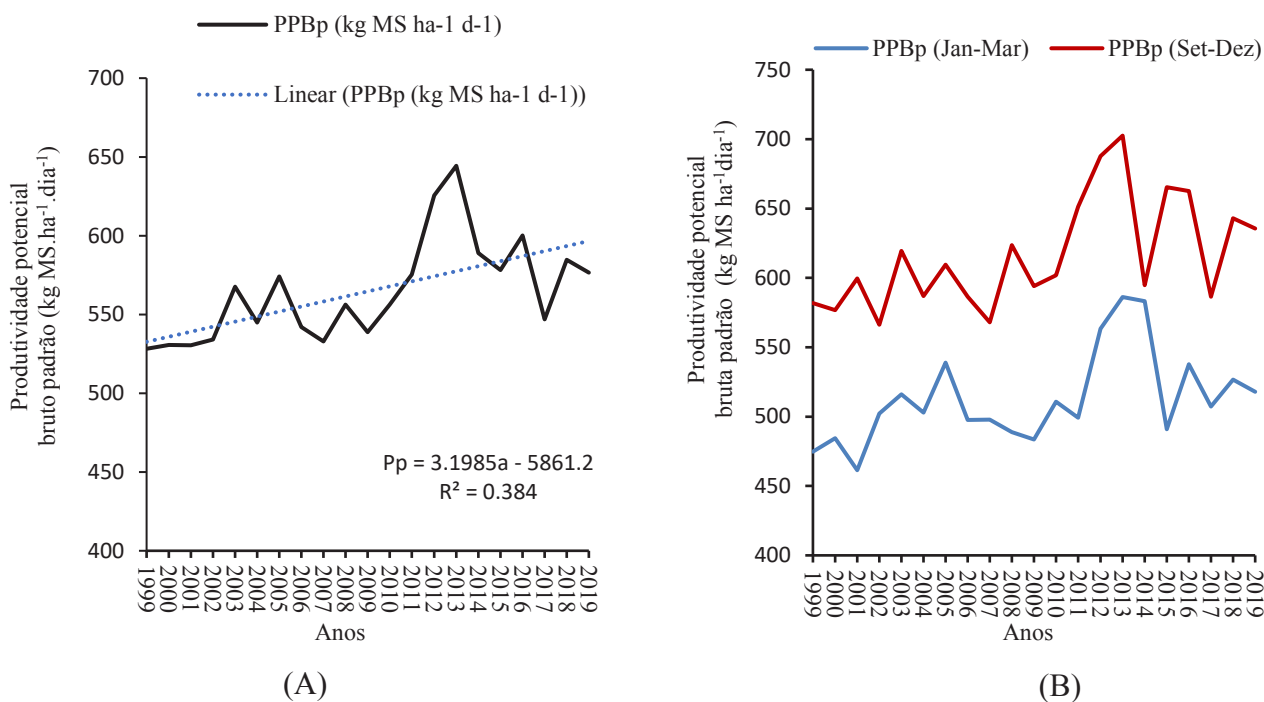
Ao considerar as simulações de semeadura em janeiro, a produtividade média no ciclo foi de 512,93 kg MS ha⁻¹ d⁻¹ e para a semeadura em setembro foi de 616,33 kg MS ha⁻¹ d⁻¹. A diferença na segunda safra pode ser explicada pelo fato do solo estar bastante úmido, resultante do excedente hídrico dos meses anteriores, maior fotoperíodo (Figura 3B), o que melhora o processo de absorção de nutrientes pelas raízes da planta, e favorece a fotossíntese e crescimento.

A produtividade potencial média da cultura de milho

em 20 anos foi de 5712,30 kg ha⁻¹, sendo o ano de 2013 o que apresentou a maior produtividade (6522,29 kg ha⁻¹), e o ano de 1999 o que apresentou menor produtividade (5351,91 kg ha⁻¹). Considerando as simulações de semeadura que começam em janeiro, a produtividade potencial média da cultura no ciclo foi de 4220,19 kg ha⁻¹, sendo o ano de 2013 o de maior produtividade (5049,34 kg ha⁻¹), e ano de 2011 o ano com menor produtividade (3974,32 kg ha⁻¹). Já para a semeadura realizada em setembro, a produtividade média foi de 7004,41 kg ha⁻¹, sendo o ano de 2013 com maior produtividade (7995,23 kg ha⁻¹), e o ano 2002 o de menor produtividade (6444,23 kg ha⁻¹) (Figura 3). Tais diferenças foram causadas, principalmente, pelas diferenças na temperatura do ar, pois, quando mais altas têm, como consequência, menor assimilação de carbono pela planta, decorrente do encurtamento das fases fenológicas e aumento na taxa de respiração de manutenção. Futuramente, a produtividade pode ser melhorada adotando sistemas de regas. A MASA (2014) verificou, entre 2012-2014, o uso da rega em 14,4% em pequenas e médias explorações na província de Manica.

Eventos extremos, como inundações ou secas, induzem a impactos sobre as culturas. Os anos de baixa produtividade potencial da cultura do milho, foram ocasionados pela baixa precipitação em Moçambique, que é influenciado pelos seguintes fenômenos atmosféricos: ciclones tropicais formados na bacia do sudoeste do oceano Índico, durante o verão, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a Monção Indiana, os sistemas de baixa pressão sobre o continen-

Figura 3. Linha de tendência da produtividade potencial bruta padrão média (A); Variação da produtividade potencial bruta padrão em função da época de plantio (B). Cultura de milho, município de Chimoio, Moçambique.



te, anticiclones do Atlântico e do Índico, El Niño - Oscilação Sul (ENOS) e frentes frias. A baixa produtividade nos anos de 2000 e 2001 pode ser explicada pelas inundações ocorridas na região central e sul do país (MICOA, 2002).

A produtividade real média da cultura do milho em 20 anos foi de 5022,40 kg ha⁻¹, sendo o ano de 2013 o ano que apresentou maior produtividade real (5737,17 kg ha⁻¹), e o ano de 1999 o que apresentou menor valor de produtividade real (4706,68 kg ha⁻¹). Considerando as simulações de semeadura iniciadas em janeiro, o rendimento máximo médio da cultura durante o ciclo foi de 3826,08 kg ha⁻¹. Para essa simulação, o ano de 2013 apresentou maior produtividade (4371,93 kg ha⁻¹) quando comparado aos demais, enquanto, o ano de 2011 foi detentor do menor rendimento observado (3441,13 kg ha⁻¹). Já para a simulação de semeadura em setembro, o rendimento máximo médio foi de 6218,72 kg ha⁻¹, sendo maiores e menores rendimentos observados nos anos de 2013 e 2002, respectivamente, com valores médio iguais a 7098,4 kg ha⁻¹ e 5721,38 kg ha⁻¹ nessa ordem (Figura 4).

De acordo com a análise feita, quanto maior a duração do ciclo, espera-se um aumento na produtividade potencial. Essa situação acontece pelo fato do modelo levar em consideração a massa seca produzida durante o ciclo da cultura. Com isso, quanto mais longo for o ciclo, maior será a quantidade de maior radiação recebida e, conseqüentemente, maior quantidade de fotossimilados, resultando em maior produtividade estimada. Todavia, os caracteres morfológicos também afetam consistentemente a produtividade, bem como sua estimativa, pois o índice de colheita é a proporção da matéria seca acumulada pela planta que será convertida em grãos (Moser et al., 2006), estando associada diretamente ao tamanho da planta (altura e diâmetro do

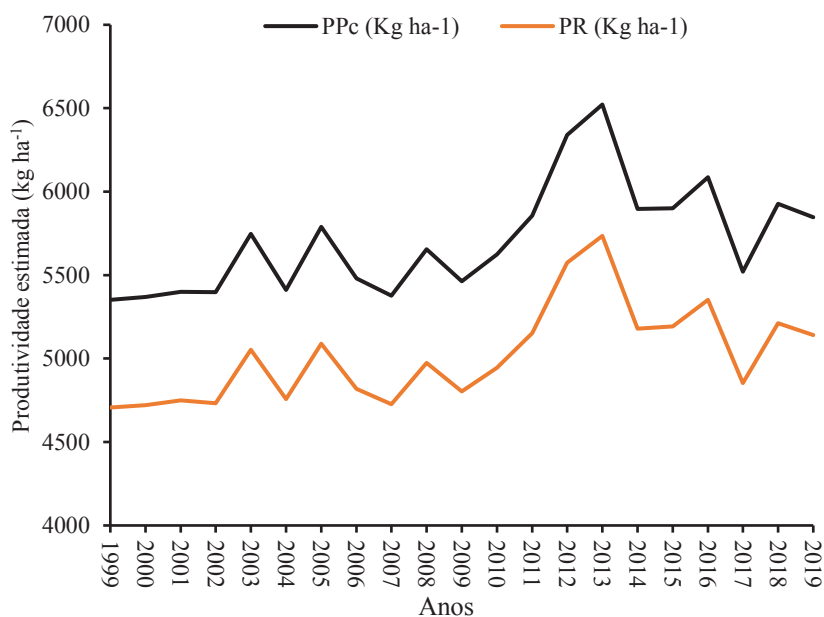
colmo). Lobell et al. (2009) afirmam que 80% da produtividade potencial pode ser alcançada com melhorias no manejo da cultura e com o uso de irrigação.

Destaca-se que, para todas as épocas de semeadura, a PPBp e a PPC apresentam maiores variações. Esse padrão é esperado em função das datas de culminações zenitais na região, indicando que, entre essas épocas ocorre pequena variação do ângulo zenital (para um mesmo horário de dias diferentes), que resulta em baixa variação da radiação no topo da atmosfera (variável de entrada do modelo ZAE). Em contrapartida, a radiação global incidente na superfície, para esse período será dependente principalmente da nebulosidade, refletindo nas variações de PR.

O balanço hídrico realizado na região por Cangela et al. (2021) mostrou que, entre abril e novembro há déficit hídrico anual de 240 mm, e entre dezembro e janeiro excesso hídrico (226,4 mm) e reposição de chuva no solo (96,4 mm). A simulação da produtividade potencial, não considerou os períodos de déficit hídrico que possam comprometer significativamente o crescimento e produção da cultura, já que a disponibilidade hídrica da cultura, que é de 250 a 800 mm ao longo do ciclo de cultivo, chegando a 900 mm no ciclo, varia com a época, local de cultivo e a demanda evapotranspirativa (Abdrabbo et al., 2016) para o seu crescimento vegetativo, florescimento e enchimento de grãos, sendo selecionados os meses mais chuvosos para a execução das simulações. Nesses meses, o balanço hídrico sequencial na escala quinquidial manteve-se positivo, havendo apenas pequenos períodos de retirada de água do solo que condicionasse a existência de deficiência hídrica.

O modelo da Zona Agroecológica da FAO utiliza parâmetros de cultura, como o coeficiente de sensibilidade a deficiência hídrica (Ky) e o coeficiente de colheita (cH).

Figura 4. Produtividade potencial e real da cultura de milho ao longo dos anos. Município de Chimoio, Moçambique.



Esses coeficientes são sensíveis a variações climáticas, principalmente a eventos extremos como a ocorrência de eventos El-Niño - Oscilação Sul (ENOS) que podem resultar na diminuição da produtividade real.

A produtividade potencial foi agrupada em anos pelo método de agrupamento hierárquico de Ward que utiliza a dissimilaridade como critério para definição de grupos homogêneos. Com isso, foram formados quatro grupos distintos apresentados na Figura 5. O grupo 1 (em vermelho), foi constituído pelos anos 2003; 2005; 2008 e 2010, representando os anos com média produtividade potencial da cultura de milho no município de Chimoio. O grupo 2 (em verde) foi caracterizado pela baixa produtividade (1999; 2000; 2001; 2002; 2004; 2006; 2007; 2009; 2017) e o grupo 3 (em azul claro) representa a alta produtividade (2011; 2014; 2015; 2016; 2018 e 2019). O grupo 4 (em azul escuro), constituído pelos anos 2012 e 2013, representou as maiores produtividade potencial da cultura de milho na região. A análise pelo do método de Ward mostrou uma similaridade entre os anos com pouca ou altas variações nas chuvas, agrupando os anos com alta e baixa produtividade potencial (Ngongondo et al., 2011b; Lüning et al., 2018; Marumbwa et al., 2019).

Apesar do modelo proposto considerar apenas aspectos como temperatura do ar, a radiação solar, duração do período total de crescimento, necessidades específicas da cultura quanto ao fotoperíodo, é de fundamental importância a seleção da cultura e variedade que que melhor se adaptarem ao ambiente para se obter produção elevada. A maioria dos modelos agrometeorológicos de previsão de safras consideram apenas aspectos hídricos, enquanto o aqui proposto considera também o térmico. Todavia, o modelo não leva em consideração fatores como doenças, pragas, carências nutricionais e o manejo que podem prejudicar a produtividade. Apesar disso, a produtividade potencial pode ser calculada com uma boa confiabilidade, para diferentes condições climáticas, por meio de relações que expressam a eficiência da cultura em converter energia solar em produção de matéria seca.

A produtividade potencial (bruta e da cultura) do milho nas safras é crescente, quando a semeadura é realizada nos períodos de janeiro-abril e setembro-dezembro. Por outro lado, quando a semeadura for realizada fora desses períodos, a produtividade tende a decrescer. A produtividade real estimada pelo modelo ZAE para o milho apresentou comportamento linear crescente, sendo o ano de 2013 o que apresentou melhores produções.

O modelo ZAE apresentou bom desempenho para a estimativa da produtividade do milho, e pode ser indicado como ferramenta de planejamento agrícola para os produtores de Manica, visando menores perdas decorrentes das condições climáticas. No entanto, estudos futuros são encorajados para avaliar o uso de modelos que consideram maiores quantidades de dados de entrada, possibilitando maior assertividade e acurácia dos resultados obtidos.

As técnicas de agrupamento hierárquico e discriminatório apresentaram bons resultados ao serem aplicadas conjuntamente na identificação dos anos homogêneos referentes a produtividade potencial na área de estudo.

Conclusão

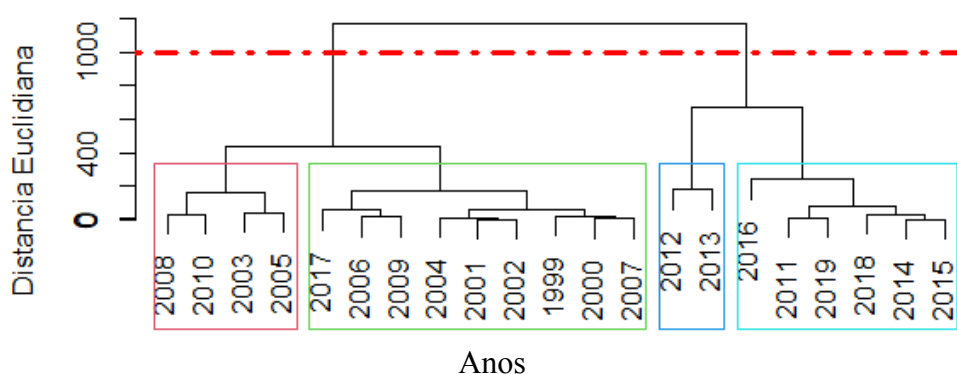
A produtividade potencial (bruta e da cultura) do milho, em Chimoio, Moçambique, é mais elevada quando a semeadura é realizada nos períodos de janeiro-abril e setembro-dezembro.

O modelo ZAE apresenta bom desempenho para a estimativa da produtividade do milho e pode ser indicado como ferramenta de planejamento agrícola.

Contribuições dos autores

G. L. C DE CANGELA, G. N. ARAÚJO JÚNIOR e E.F.F. SILVA concepção, elaboração, aquisição, análise e interpretação de dados, redação e revisão crítica do artigo. A. G. DAUALA aquisição, análise e produção de mapas. K. R. M MORALES e J .R. I. SILVA produção do gráfico de análise de agrupamento.

Figura 5. Análise de agrupamento da produtividade potencial da cultura de milho para os anos do período 1999 – 2019 pelo método de Ward. Município de Chimoio, Moçambique.



Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de Financiamento 001); Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico). À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. Ao Instituto Nacional de Meteorologia de Moçambique (INAM) pela disponibilização dos dados meteorológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDRABBO, M. A. A.; SALEH, S. M.; FARAG, A. A. Water requirements for maize under climate change. *Journal of Applied Sciences Research*, v.12, p.19-28, 2016. Available at: < <https://www.researchgate.net/publication/305656464> > Accessed on: Jun. 10 2021.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage paper*, v.56, p.301, 1998. Available at: <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.HTM>> Accessed on: Jun. 10 2021.
- ANDRADE, L. M. **Efeito de diferentes profundidades freáticas sobre a evapotranspiração e sobre a produção e os componentes da produção do milho doce (*Zea mays* L.)**. 1991. 53p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- ANDREA, M. C. da S.; BOOTE, K. J.; SENTELHAS, P. C.; ROMANELLI, T. L. Variability and limitations of maize production in Brazil: Potential yield, water-limited yield and yield gaps. *Agricultural Systems*, v.165, p.264–273, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.07.004>
- ANDRIOLI, K. G.; SENTELHAS, P. C. Brazilian maize genotypes sensitivity to water deficit estimated through a simple crop yield model. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, v. 44, p. 653–660, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009000700001>
- ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; EVANGELISTA, S. R.; PILAU, F. G.; FARIAS, J. R. B.; PINTO, H. S.; JÚNIOR, J. Z. Sistema de previsão de safra para o Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, v.42, p.615–625, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000500002>
- BARBIERI, V.; TUON, R. L. **Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas**. Departamento de Física e Meteorologia, Piracicaba: ESALQ/USP, 1992, 17p.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 7ª edição. Viçosa, MG; Ed. UFV. 2005. 611p.
- BRITO, T. T.; OLIVEIRA-JUNIOR, J. F.; LYRA, G. B.; GOIS, G.; ZERI, M. Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v.129, p.469–478, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0481-x>
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Teste de uma equação simples da evapotranspiração potencial baseada na radiação solar extraterrestre na temperatura média do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3., Campinas, 1983. *Anais...* Campinas: Fundação Cargil, p.229-244, 1983.
- CANGELA, G. L. C.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; MORAIS, J. E. F.; SILVA, J. R. I.; JARDIM, A. M. R. F.; SILVA, E. F. F.; LAMPIÃO, J. L. Análise Temporal da Chuva e Balanço Hídrico Climatológico para o Município de Chimoio, Moçambique. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.14, n.2, p. 650-660, 2021. Available at: < <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf> > accessed on: Jun 02 2021.
- CARON, B. O.; OLIVEIRA, D. M.; ELLI, E. F.; ELOY, E.; SCHWERZ, F.; SOUZA, V. Q. Elementos meteorológicos sobre características morfológicas e produtivas do milho em diferentes épocas de semeadura. *Científica*, v.45, p.105-114, 2017. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2017v45n2p105-114>
- Agrometeoros, Passo Fundo, v.29, e026874, 2021.
- DE WIT, C. T. **Photosynthesis of leaf canopies**. Wageningen, Pudoc, 1965. 57p. (Agricultural Research Report 663). Available at: < <https://edepot.wur.nl/187115> > accessed on: April 12 2020
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. GHEYI, H. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (FAO: Irrigação e Drenagem, 33).
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. FAO-Irrigation and drainage paper, 33, Rome, FAO, 1979, 193p.
- EDREIRA, J. I. R.; OTEGULI, M. E. Heat stress in temperate and tropical maize hybrids: Differences in crop growth, biomass partitioning and reserves use. *Field Crops Research*, v.130, p.87–98, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.009>
- EMBRAPA. Tecnologias de Produção de Soja - Região Central do Brasil 2012 e 2013. **Sistemas de Produção**, p. 242, 2011. Available at: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/904487/tecnologias-de-producao-de-soja---regiao-central-do-brasil-2012-e-2013>> accessed on: October 10 2020.
- FANCELLI, A. L. **Fisiologia, nutrição e adubação do milho para alto rendimento**. Departamento de Produção Vegetal. ESALQ/USP, Caixa Postal 9, Piracicaba - SP, CEP: 13.418- 900. Available at: < <http://pt.scribd.com/doc/91808691/Anais-Antonio-Luiz-Fancelli-2> > Accessed on September 28, 2020.
- FLUMIGNAN, D. L.; ALMEIDA, A. C. dos S.; GARCIA, R. A. Necessidade de Irrigação Complementar da Soja na Região de Mato Grosso do Sul. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, **Circular Técnica**, 34, 2015. Available at: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1024902/necessidade-de-irrigacao-complementar-da-soja-na-regiao-sul-de-mato-grosso-do-sul>> accessed on: July 20 2020
- GUO, E.; ZHANG, J.; WANG, Y.; ALU, S.; WANG, R.; LI, D.; HA, S. Assessing nonlinear variation of temperature and precipitation for different growth periods of maize and their impacts on phenology in the Midwest of Jim province, China. *Theoretical and Applied Climatology*, v.126, p.1-15, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2097-6>
- HARRISON, L.; MICHAELSEN, J.; FUNK, C.; HUSAK, G. J. Effects of temperature changes on maize production in Mozambique. *Climate Research*, v.46, p.211-222, 2011. <https://doi.org/10.3354/cr00979>
- INAM. Instituto Nacional de Meteorologia. Available at: < <https://www.inam.gov.mz/index.php/pt/> > accessed on: July 20 2020
- INE. Instituto Nacional de Estatística. 2019. Available at: < <https://www.ine.gov.mz> >. > accessed on: 13 jan. 2020.
- JANSEN, L. J. M.; BAGNOLI, M.; FOCACCI, M. Analysis of land-cover/ use change dynamics in Manica Province in Mozambique in a period of transition (1990–2004). *Forest Ecology and Management*, v.254, n.2, p.308-326, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.08.017>
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 3, 259-263, 2006. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- KUMUDINI, S.; ANDRADE, F. H.; BOOTE, K. J.; BROWN, K. J.; DZOTSI, K.; EDMEADES, G. O.; GOCKEN, T.; GOODWIN, M.; HALTER, A.L.; HAMMER, G. L.; HATFIELD, J.; JONES, J. W.; KEMANIAN, A. R.; KIM, S. H.; KINIRY, J. R. Predicting maize phenology: Intercomparison of functions for developmental response to temperature. *Agronomy Journal*, v. 106, n. 6, p. 2087–2097, 2014. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0200>
- LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment and Resources*, v.34, n.1, p.179, 2009. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.041008.093740>
- LÜNING, S.; GAŁKA, M.; DANLADI, I. B.; ADAGUNODO, T. A.; VAHRENHOLT, F. 2018. Hydroclimate in Africa during the medieval climate anomaly. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v.495, p309-322, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.01.025>
- LYRA, G. B., OLIVEIRA-JUNIOR, J. F., ZERI, M. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state. Northeast of Brazil. *International Journal of Climatology*, v.34, p.3546–3558, 2014. <https://doi.org/10.1002/joc.3926>

- MABILANA, H. A.; FONTANA, D. C.; FONSECA, E. L. Desenvolvimento de modelo agrometeorológico espectral para estimativa de rendimento do milho na Província de Manica-Moçambique. *Revista Ceres*, v. 59, n.3, p. 337-349. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000300007>
- MAE. MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL DE MOÇAMBIQUE. *Perfil Distrital de Gondola - Chimoio*, Maputo, 2005. Available at: < www.portaldogoverno.gov.mz/por/content/download/2920/23652/.../1/.../Gondola.pdf > accessed on: May. 14 2021.
- MALDANER, L. J.; HORING, K.; SCHNEIDER, J. F.; FRIGO, J. P.; AZEVEDO, K. D.; GRZESIUCK, A. E. Exigência Agroclimática da Cultura do Milho (*Zea Mays*). *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v.3, p.13-23, 2014. Available at: < https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/36915/pdf_11 > accessed on: 05 abr. 2021.
- MANFRON, P. A.; DOURADO NETO, D.; PEREIRA, A. R.; BONNECARRÈRE, R. A. G.; MEDEIROS, S. L. P.; PILAU, F. G. et al. Modelo do índice de área foliar da cultura de milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.11, n.2, p.333-342, 2003.
- MARIN, F. R.; LOPES-ASSAD, M. L.; ASSAD, E. D.; VIAN, C. E.; SANTOS, M. C. Sugarcane crop efficiency in two growing seasons in São Paulo State, Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, n. 1, p. 1449-1455, 2008.
- MARTINS, M. A. *Estimativa de produtividade das culturas do milho e do sorgo a partir de modelos agrometeorológicos em algumas localidades da região nordeste do Brasil*. 2012, 97p. Dissertação (mestrado em Meteorologia) - INEP, São José dos Campos.
- MARUMBWA, F. M.; CHO, M. A.; CHIRWA, P. W. Analysis of spatio-temporal rainfall trends across southern African biomes between 1981 and 2016. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 114, 102808, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.10.004>
- MASA. Ministério da Agricultura e Segurança Alimentar. *Anuário de Estatísticas Agrárias 2013-2014*. Direcção de Planificação e Cooperação Internacional, Maputo, Moçambique, 2014. Available at: < www.masa.gov.mz > accessed on: July 29 2020
- MASA. Ministério da Agricultura e Segurança Alimentar. *Anuário de Estatísticas Agrárias 2015*. Direcção de Planificação e Cooperação Internacional, Maputo, Moçambique, 2015. Available at: < www.masa.gov.mz > accessed on: November 30 2020
- MICOA. Ministério de Coordenação e Ação Ambiental. Plano de acção Nacional de Combate à seca e à desertificação. P. 88, 2002. Available at: <<http://www.unccd.int/ActionProgrammes/mozambique-other2002.pdf>> accessed on: November 30 2020
- MINAG. Ministério da Agricultura. Plano Estratégico Para o Desenvolvimento do Sector Agrário 2010-2019, Maputo, 2010
- MONTEIRO, J. E. B. A. *Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. 1ª Edição. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), 2009, 530p.
- MOSCA, J. Agricultura familiar em Moçambique: ideologias e políticas. *Revista Nera*, v.20, n.38, p.68-105, 2017. Available at: < <https://revista.fct.unesp.br/index.php/nera/article/view/5296> > accessed on: October 30 2020
- MOSER, S. B.; FEIL, B.; JAMPATONG, S.; STAMP, P. Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize. *Agricultural Water Management*, v.81, n.1-2, p.41-58, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.005>
- NGONGONDO, C. S.; XU, C. Y.; TALLAKSEN, L. M.; ALEMAW, B.; CHIRWA, T. Regional frequency analysis of rainfall extremes in Southern Malawi using the index rainfall and L-moments approaches. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v.25, n.7, p.939-955, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00477-011-0480-x>
- MUCHANGOS, A. *Moçambique: Paisagens e regiões naturais*, Maputo, 1999
- NÓIA JÚNIOR, R. de S.; SENTELHAS, P. C. Soybean-maize succession in Brazil: Impacts of sowing dates on climate variability, yields and economic profitability. *European Journal of Agronomy*, v. 103, p.140-151, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2018.12.008>
- OCDE – Organização para a cooperação e desenvolvimento econômico. *Review of agricultural policies: Brazil*. OCDE, 2014
- OLIVEIRA, L. J. C.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. C.; FERREIRA, W. P. M.; OLIVEIRA, M.J. Modelos de estimativa de produtividade potencial para as culturas do feijão e do milho. *Reveng. Engenharia na agricultura*, viçosa - Mg, v.19 n.4, p.304-312, 2011.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Guaíba, RS, Livraria e Editora Agropecuária, 2002, 478 p.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Rev.*, v.100, p81-92, 1972. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- R CORE TEAM. *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021. Available at: < <https://www.R-project.org/> > accessed on: Jan 21 2021
- RITCHIE, J. T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Org.). *Understanding Options for Agricultural Production*. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 41-54, 1998. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4_3
- ROSÁRIO, N. M. Agronegócio em Moçambique: uma breve análise da situação de estrangeirização do agronegócio. *Sociedade e Território*, v.31, n.1, p.183-200, 2019. <https://doi.org/10.21680/8177-8396.2019v31n1ID12862>
- SALVADOR, M. A. CLIMAP–aplicativo para análise de dados climáticos–versão 3.0. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.20, p.349-374, 2017.
- SANGOI, L.; SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G.; RAMBO, L. *Ecofisiologia da cultura do milho para altos rendimentos*. Lages: Graphel, 2010. 87p
- SENTELHAS, P.C.; BATTISTI, R.; CÂMARA, G. M. S.; FARIAS, J. R. B.; HAMPP, A. C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil - Magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. *Journal of Agricultural Science*, v.153, n.8, p.1394-1411, 2015. <https://doi.org/10.1017/S0021859615000313>
- SHIM, D.; LEE, K. J.; LEE, B. W. Response of phenology – and yield-related traits of maize to elevated temperature in a temperate region. *The Crop Journal*, v.5, p.305-316, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.01.004>
- SOUSA, W.; DUCROT, R.; MUNGUAMBE, P.; BJORN LUND, H.; MACHAVA, A.; CHEVEIA, E.; FADUCO, J. Irrigation and crop diversification in the 25 de Setembro irrigation scheme, Mozambique. *International Journal of Water Resources Development*, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/07900627.2016.1262246>
- TIA – Trabalho de Inquérito Agrícola. *Inquérito conduzido em 2007 pela Direcção de Economia*, Departamento de Estatística, Ministério da Agricultura, Maputo, Moçambique.
- TOJO SOLER, C. M.; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Thermal time for phenological development of four maize hybrids grown off-season in a subtropical environment. *The Journal of Agricultural Science*, v.143, n.2-3, p.169-182, 2005. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005198>
- UAIENE, R.N. *Introdução de Novas Tecnologias Agrícolas e Estratégias de Comercialização no Centro de Moçambique*. Série de Relatórios de Pesquisa, Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM), Maputo, Moçambique, 2006.
- WALKER, T.; PITIRO, R.; TOMO, A.; SITO, I.; SALÊNCIA, C.; MAHANZULE, R.; DONOVAN, C.; MAZUZE, F. *Estabelecimento de Prioridades para a Investigação Agrária no Sector Público em Moçambique Baseado nos Dados do Trabalho de Inquérito Agrícola (TIA)*. Relatório de Pesquisa 3E. Maputo, Moçambique: Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM), 2006. Available at: < <https://www.researchgate.net/publication/5180163> > accessed on: September 21 2020
- WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*, v.58, n.301, p.236-244, 1963. <https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- YANG, H.; GRASSINI, P.; CASSMAN, K. G.; AIKEN, R. M. Improvements to the Hybrid-Maize model for simulating maize yields in harsh rainfed environments. *Field Crops Research*, v.204, p.180-190, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.019>

ZERI, M.; HUSSAIN, M. Z.; ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; DELUCIA, E.; BERNACCHI, C. J. Water use efficiency of perennial and annual bioenergy crops in central Illinois. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v.118, n.2, p.581–589, 2013. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20052>

REFERENCIAÇÃO

CANGELA, G. L. C.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA, J. R. I.; SILVA, E. F. F.; MORALES, K. R. M.; DAUALA, G. A.; LAMPIÃO, J. L. Estimativa da produtividade potencial e real do milho utilizando o Modelo da Zona Agroecológica da FAO. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.29, e026874, 2021.



Estimation of the potential and actual productivity of the corn crop using the FAO Agroecological Zone Model

Geraldo Luís Charles de Cangela^{1(*)}, George do Nascimento Araújo Júnior¹, José Raliuson Inácio Silva¹, Ênio Farias de França e Silva¹, Kenny Ruben Montalvo Morales¹, Gonçalves Albino Dauala² and Júlio Lopes Lampião²

¹Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE. Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP 52.171-900 Recife, PE, Brazil.

E-mails: gerrycangela@gmail.com, georgearaujo.agro@gmail.com, raliuson.silva@ufrpe.br, enio.fsilva@ufrpe.br and agromontalvokenny@yahoo.com

²Universidade Zambeze, Chimoio, Manica, Moçambique. E-mail: gonalvesdauala07@gmail.com and juliolampiao@gmail.com

(*)Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 January 2021

Accepted 16 July 2021

Index terms:

Zea mays L.,

mathematical modeling

water availability

Mozambique

ABSTRACT

Appropriate management, such as choosing the planting time or the use of irrigation, allows for greater use of water resources available in the environment. The aim of this study was to estimate the potential and actual productivity of the corn crop in the municipality of Chimoio, Mozambique, using the FAO Agroecological Zone model. On model were calculated extraterrestrial solar radiation, latitude, temperature and average local precipitation, relative distance Earth-Sun; number of the day of the year, hourly angle of sunset and sunrise, solar declination, photoperiod and sunshine. With extraterrestrial solar radiation, potential productivity was estimated in the period of cloudy and clear skies. A series of 20-year (1999-2019) meteorological data was used to simulate productivity according to the phenology of corn in the 120-day cycle, from January to April and from September to December of each year, rainy months. The average standard potential gross productivity between 1999 to 2019 was 564.63 kg DM ha⁻¹d⁻¹, growing each year, and the average potential productivity of the crop in that period was 5712.30 kg ha⁻¹, being higher in 2013 (6522.29 kg ha⁻¹) and lower in 1999 (5351.91 kg ha⁻¹). The grouping technique showed four homogeneous groups of potential productivity. The model does not consider pests and diseases, but assessing productivity and climate change in agriculture are essential in each agroclimatic environment.

© 2021 SBAgro. All rights reserved.

CITATION

CANGELA, G. L. C.; ARAÚJO JÚNIOR, G. N.; SILVA, J. R. I.; SILVA, E. F. F.; MORALES, K. R. M.; DAUALA, G. A.; LAMPIÃO, J. L. Estimativa da produtividade potencial e real do milho utilizando o Modelo da Zona Agroecológica da FAO. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.29, e026874, 2021.