



ISSN: XXXX-XXXX

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Modificação do modelo original da zona agroecológica da FAO e aplicação na análise da eficiência produtiva da palma forrageira no estado da Bahia: 1ª aproximação

Ana Virgínia Terranova de Carvalho¹; Thieres George Freire da Silva²; Luciana Sandra Bastos de Souza²; Magna Soelma Beserra de Moura³

¹Mestre em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Vale do São Francisco, UNIVASF, Petrolina - PE e-mail para correspondência: (CARVALHO, A.V.T), ²Professor, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada - PE, e-mail: thiegeoprofissional@hotmail.com, sanddrbastos@yahoo.com.br, ³ Pesquisadora, Embrapa Semiárido, Petrolina - PE, e-mail: magna.moura@embrapa.br

Artigo recebido em 27/02/2017 e aceito em 10/07/2017.

RESUMO

O modelo da Zona Agroecológica (ZAE) da FAO foi elaborado para plantas tipo C₃ e C₄, e até então não foi aplicado para plantas MAC (Metabolismo Ácido das Crassuláceas). O desempenho do modelo ZAE foi testado, no presente estudo, na estimativa da produtividade da palma forrageira no estado da Bahia. O modelo foi parametrizado por meio de dados experimentais. Duas modificações do modelo foram efetuadas: a primeira pela alteração do cálculo do C_{IAC} - coeficiente de correção do índice de área do cladódio e a segunda do C_R - coeficiente de correção da respiração. Avaliou-se o uso das funções de plantas C₃ de inverno, C₃ de verão e C₄ na estimativa da produtividade bruta, em conjunto com e sem a modificação dos parâmetros C_{IAC} e C_R. A partir do modelo calibrado, estimou-se a quebra da produtividade e eficiência produtiva da palma no Estado. O modelo original ZAE apresentou baixo desempenho na simulação da produtividade da palma. A modificação do C_{IAC} e a adoção das funções de plantas C₃ de inverno promoveram os melhores resultados na estimativa da produtividade. Os municípios situados no Centro e Centro Sul da Bahia apresentam as maiores eficiência produtiva (> 6 kg MS m⁻³).

Palavras-chave: Cactáceas, Calibração, Modelagem, *Opuntia sp*, Rendimento.

Modification of the original model of the FAO Agroecological Zone and application in the analysis of the productive efficiency of the cactus forage in the state of Bahia: 1st approach

ABSTRACT

The FAO Agro-Ecological Zone model (ZAE) was developed for C₃ and C₄ plants, and has not been applied to MAC plants (Crassulaceae Acid Metabolism). The performance of the model ZAE was tested in the present study in the estimation of forage cactus productivity in the state of Bahia. The model was parameterized using experimental data. Two modifications of the model were carried out: the first by alteration of the calculation of CCAI - correction coefficient of the cladode area index and the second of the CR - coefficient of correction of respiration. The use of the C₃ winter, summer C₃ and C₄ plant functions in crude productivity estimation was evaluated in conjunction with and without modification of the CCAI and CR parameters. From the calibrated model, it was estimated the productivity and productive efficiency of the palm in the State. The original ZAE model presented low performance in the simulation of palm productivity. The modification of the CCAI and the adoption of the functions of winter C₃ plants promoted the best results in the estimation of productivity. The municipalities located in the Center and Center South of Bahia presents the highest productive efficiency (> 6 kg MS m⁻³).

Key-words: Cactaceae, Calibration, Modelling, *Opuntia sp*, Yield.

Introdução

Espécies adaptadas às condições edafoclimáticas do Nordeste brasileiro são adotadas pelos produtores, visando reduzir as perdas do sistema de produção agropecuário. Dentre as espécies mais escolhidas, a palma, embora tolerante a ambientes áridos e semiáridos,

possui exigências edafoclimáticas e de manejo para um bom desempenho produtivo. Por isso, a sua produtividade varia muito espacialmente (Oliveira et al., 2010).

A resposta das espécies às diferentes condições de cultivo pode ser avaliada por meio de modelos de simulação, que incorporam

simplificações de processos de crescimento e suas interações com o ambiente. Estes modelos associados a dados de campo e parametrizações facilitam o planejamento e tomada de decisão agrícola. Sua utilização é aceita mundialmente como uma ferramenta de pesquisa e de práticas agrônomicas para, posteriormente, prever a produtividade das culturas. Contudo, o sucesso da modelagem depende de calibrações locais, logo, da qualidade dos dados usados em tal procedimento (Lisson et al., 2005).

Os resultados obtidos a partir de modelagem reduzem os custos com experimentação e aumentam a sustentabilidade do sistema, por meio da adequação do uso dos recursos naturais e redução dos impactos ambientais. Quando bem elaborados, podem ser usados na definição das melhores datas de plantios para culturas sob condições irrigadas e em sequeiro; avaliação de estratégias de aplicação de água e nutrientes; previsão de safras; análise do requerimento hídrico regional e avaliação dos impactos dos cenários de mudanças climáticas sobre a produção agrícola, uso da terra e ações políticas (Soler et al., 2007).

Um modelo bastante utilizado para definir áreas de aptidão para as culturas é conhecido como Zona Agroecológica (Doorenbos e Kassam, 1994). Este modelo inicialmente foi desenvolvido para prever o rendimento das culturas em base continental. Porém, quando adotado em nível de detalhamento maior pode ajustar os seus resultados para escala local. O modelo permite estimar a produtividade de uma cultura padrão altamente produtiva e adaptada ao ambiente de cultivo, utilizando características genéticas da espécie, fatores ambientais e considerando a ausência de restrições hídricas, nutricionais e fitossanitárias (Doorenbos; Kassam, 1994). Todavia, esse modelo foi elaborado para espécies com processo fotossintético C3 e C4, e até então não foi aplicado na simulação de plantas MAC (Metabolismo Ácido das Crassuláceas), como a palma forrageira.

A calibração do modelo ZAE para a palma permite estabelecer diferentes diagnósticos para aumento da sua eficiência produtiva. Essa eficiência pode ser avaliada pela razão entre a produtividade de biomassa seca e, ou, produção comercial, e a quantidade de água evapotranspirada (Puppala et al., 2005), denominando-se assim, eficiência do uso de água (EUA). Com a EUA é analisada a resposta produtiva ao suprimento hídrico, visando identificar condições hídricas favoráveis ou limites para o cultivo de uma cultura (Ko e Piccini, 2009).

Objetivou-se avaliar o desempenho do modelo original ZAE da FAO, assim como a proposição de sua modificação para a estimativa da

produtividade potencial e atingível, quebra de produtividade e a eficiência da palma forrageira no estado da Bahia.

Material e métodos

O modelo ZAE foi modificado, no presente estudo, por meio da incorporação de submodelos, com calibração de parâmetros específicos para a palma forrageira. Além disso, foram consideradas as simplificações propostas por Barbieri & Tuon (1992), de modo que, em seguida, fosse estruturado no software Model Maker 3.0.

Descrição do modelo ZAE original

O modelo da Zona Agroecológica (ZAE) possui três principais compartimentos de simulação, que permitem estimar a produtividade potencial, atingível e a quebra de rendimento da cultura, conforme descrito por Doorenbos e Kassam (1979).

O módulo da produtividade potencial da cultura (PP) é calculado por meio da taxa de produtividade bruta de uma cultura padrão corrigida por fatores adimensionais:

$$PP = PB * C_{IAF} * C_R * C_C * C_{UM} * ND \quad (1)$$

em que, PB = produtividade bruta de matéria seca (kg MS ha⁻¹ dia⁻¹); CIAF = coeficiente de correção do índice de área foliar (IAF); CR = coeficiente de correção da respiração; CC = coeficiente de correção da fração colhida (índice de colheita); CUM = coeficiente de correção da umidade da fração colhida; e, ND = número de dias do ciclo.

A PB no modelo ZAE considera um componente relativo ao período nublado (PB_n, kg MS ha⁻¹ dia⁻¹) e outro ao período de céu claro (PB_c, kg MS ha⁻¹ dia⁻¹), os quais são estimados em função da razão de insolação (n/N):

$$PB = PB_n + PB_c \quad (2)$$

Os valores de PB_n e PB_c foram estimados pelas expressões:

$$PB_n = (a + b * Q_o) * cT_n * [1 - (n/N)] \quad (3)$$

$$PB_c = (c + d * Q_o) * cT_c * [(n/N)] \quad (4)$$

sendo, Q_o = radiação solar extraterrestre, calculada utilizando as expressões citadas por Allen et al. (1998), cT_n = correção relativa à temperatura do

período nublado; N = fotoperíodo (em horas); e, cTc = correção relativa à temperatura do período de céu claro.

Os coeficientes cTn e cTc variam de acordo com a capacidade de acúmulo de matéria seca da espécie, que depende do tipo de mecanismo de fixação de carbono e da temperatura do ambiente de cultivo. Assim, os seus valores são obtidos pelas equações:

$$cTn = \begin{cases} 15^{\circ}C < t < 20^{\circ}C; e + f * t_{méd.} + \\ g * t_{méd.}^2 + h * t_{méd.}^3 \\ t < 15^{\circ}C \text{ ou } t > 20^{\circ}C; i + j * t_{méd.} + \\ k * t_{méd.}^2 + l * t_{méd.}^3 \end{cases} \quad (5)$$

$$cTc = \begin{cases} 15^{\circ}C < t < 20^{\circ}C; i + j * t_{méd.} + \\ k * t_{méd.}^2 + l * t_{méd.}^3 \\ t < 15^{\circ}C \text{ ou } t > 20^{\circ}C; m + n * t_{méd.} + \\ o * t_{méd.}^2 + p * t_{méd.}^3 \end{cases} \quad (6)$$

Os fatores adimensionais (CIAF, CR, CC e CUM) são determinados, nessa ordem, considerando os dados relativos ao índice de área foliar máxima da cultura (IAFmáx.), a temperatura do ar no ambiente de cultivo (t, oC), a capacidade de produção de matéria seca economicamente rentável (MSR) em relação à massa seca total produzida (MST), ou seja, do índice de colheita (adimensional), e em função da umidade residual retida na matéria seca da parte rentável (U%). Matematicamente, os coeficientes acima são obtidos pelas equações:

$$C_{IAF} = \begin{cases} IAF_{máx.} < 5; q + r * IAF_{máx.} - \\ s * IAF_{máx.}^2 \\ IAF_{máx.} \geq 5; 0,5 \end{cases} \quad (7)$$

$$C_R = \begin{cases} t < 20; 0,6 \\ t \geq 20; 0,5 \end{cases} \quad (8)$$

$$C_C = MSR / MST \quad (9)$$

$$C_{UM} = (1 - 0,01 * U\%)^{-1} \quad (10)$$

O módulo da produtividade atingível (PA) é função da PP e da penalização por estresse hídrico; essa última obtida pelo déficit hídrico relativo, que ocorre em cada fase fenológica ou para o ciclo da cultura em função da sua sensibilidade,

representada pelo coeficiente de resposta relativa da produtividade ao déficit de água no solo (Ky). Assim, aplica-se:

$$PA = PP * \{1 - Ky * [1 - (ETr / ETm)]\} \quad (11)$$

em que, ETr = evapotranspiração real da cultura; e, ETm = evapotranspiração máxima da cultura.

A evapotranspiração máxima da cultura (ETm) é calculada por:

$$ETm = Kc * ETo \quad (12)$$

em que, ETo = evapotranspiração de referência; e, Kc = coeficiente de cultura.

Por sua vez, a evapotranspiração real da cultura (ETr) é quantificada pelo balanço hídrico sequencial da cultura, pelo método de Thornthwaite & Mather (1955), assumindo uma capacidade de água disponível no solo de 100 mm (CAD, mm).

O módulo da quebra de rendimento Q(%) é obtido a partir dos dados de PP e PA:

$$Q(\%) = [1 - (PA / PP)] * 100 \quad (13)$$

Parametrização do Modelo ZAE para a palma forrageira

A parametrização do modelo foi realizada a partir de dados coletados em experimento conduzido em condições irrigadas, conforme descrito por Queiroz et al. (2016). O clone Orelha de Elefante Mexicana foi cultivado em espaçamento 1,6 x 0,2 m em um Argissolo Vermelho-Amarelo, submetido a cinco lâminas de água (976, 1048, 1096, 1152 e 1202 mm ano⁻¹). Em intervalos de 30 dias foram registrados dados biométricos, e na ocasião da colheita foi obtido o rendimento de matéria fresca e seca. Os dados meteorológicos ao longo do experimento foram adquiridos de uma estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia, situada a 1400 m da área experimental. Dados do coeficiente de cultura (Kc) foram usados conforme publicados por Queiroz et al. (2016) e de resposta relativa da produtividade ao déficit de água (Ky) foi calculada de acordo procedimentos citados por Posse et al. (2009). Além disso, obteve-se os coeficiente de colheita (Cc) e de correção da umidade da fração colhida (CUM). Os demais parâmetros do Modelo ZAE foram estabelecidos por meio das suas modificações, conforme proposto no presente estudo.

Modificação do modelo ZAE

1ª Modificação (CIAF): CIAF é utilizado na caracterização do desenvolvimento da cultura, atingindo um valor máximo ao final do ciclo, logo que para a cultura padrão do modelo, o IAF é igual a 5 e constante ao longo do tempo. Acima desse valor, o CIAF é igual a 0,5, conforme a Equação 5, representando que 50% o IAF é efetivamente responsável pela a produtividade bruta. Para a *Opuntia ficus-indica* Mill., Nobel (2001) cita que os cultivos muito adensados, ou seja, com magnitudes de IAC elevadas, ocorre uma rápida redução da assimilação de CO₂ pela planta, em decorrência do auto sombreamento dos cladódios. A máxima assimilação de CO₂ por unidade de água, ou seja, a maior produtividade ocorre quando o IAC é de 4 a 6 m² m⁻² (considerando os dois lados dos cladódios como área fotossintetizante) (García de Cortázar; Nobel, 1991), havendo aumento da capacidade máxima na proporção de 35%, 62% e 85% quando o IAC é 1,0, 2,0 e 3,0 m² m⁻² (Nobel, 1991). É de grande relevância o conhecimento da variação do IAC ao longo do ciclo da cultura como variável de entrada nos modelos agrônômicos (Doraiswamy et al., 2004).

2ª Modificação (CR): CR reflete a relação da respiração da planta com a temperatura do ambiente. No modelo ZAE, o valor térmico de referencia é 20°C, podendo o valor de CR ser igual a 0,6 (temperatura menores) e 0,5 (temperaturas maiores), o que representa que 40% ou 50% dos fotoassimilados estão sendo utilizados no processo de respiração. Nobel e Hartsock (1984) relatam essa relação para a palma, que possui máxima taxa de assimilação de CO₂ por unidade de água em temperaturas diárias em torno de 20°C (25°C/15°C, diurna/noturna), e mínimo gasto com o processo de respiração, de tal modo que, de maneira análoga abaixo ou acima desse valor, a proporção de redução depende da temperatura. Por meio dos dados de assimilação de CO₂ e temperatura, citados por Nobel e Hartsock (1984), foi elaborado um modelo matemático para estimativa do CR.

Análises

Na análise do modelo ZAE para a estimativa da produtividade da palma forrageira foram realizadas doze simulações, a partir dos cálculos da PB_n e PB_c, considerando os coeficientes: a = 31,7; b = 0,219; c = 107,2; d = 0,36 nas equações 3 e 4, e os valores de cTn e cTc, com base no agrupamento e de acordo com o processo fotossintético (plantas C3 cultivadas no inverno,

C3 cultivadas no verão e C4 cultivada em ambas as estações).

Nas três primeiras foram considerados os parâmetros originais (e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p) das equações cTn e cTc (Equações 5 e 6) para culturas C3 de inverno (0,7; 0,035; -0,001; 0,0; 0,25; 0,0875; -0,0025; 0,0; -0,5; 0,175; -0,005; 0,0), C3 de verão (0,585; 0,014; 0,0013; -0,000037; -0,0425; 0,035; 0,00325; -0,0000925; -1,085; 0,07; 0,0065; -0,000185) e C4 (-1,064; 0,173, -0,0029; 0,0; -4,16; 0,4325; -0,00725; 0,0; -9,32; 0,865; -0,0145; 0,0), conforme os polinômios elaborados por Barbieri & Tuon (1992), a partir dos dados definidos por Doorenbos e Kassam (1994).

Nas três próximas simulações, acrescentou-se a modificação da estimativa dos valores de C_R, mantendo o cálculo original de C_{IAC}, para os três agrupamentos de acordo com o tipo de processo fotossintético. Em seguida, o cálculo original de C_R foi mantido e inseriu-se a modificação de C_{IAC}.

Finalmente, as modificações de C_R e C_{IAC} foram contempladas nas simulações. Para a análise estatística, foi considerado o erro relativo (%) a partir da produtividade de experimento conduzido entre fevereiro de 2010 e março de 2012 (25 meses). Mais detalhes experimentais podem ser obtidos em Silva et al. (2014).

Regionalização

A aplicabilidade do modelo ZAE foi feita mediante a extrapolação de seus resultados em escala regional, a fim de se estimar a produtividade potencial e atingível da palma forrageira, a quebra de produtividade e a eficiência produtiva da cultura nas diferentes regiões do estado da Bahia.

As informações regionalizadas foram previamente processadas em planilha eletrônica, que permitiu a realização do Balanço Hídrico Climatológico e, posteriormente, a sua inserção em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Nesta planilha, foram incorporadas as equações do modelo ZAE parametrizado e modificado para a palma forrageira, além das variáveis climáticas de entrada.

Os dados climáticos, compostos pela precipitação, temperatura do ar, radiação solar global e brilho solar, foram elaborados em escala mensal para 437 postos de observação distribuídos ao longo do Estado, com seus respectivos dados geográficos (latitude, longitude e altitude). Deste total, 33 estações meteorológicas são pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia e 404 postos pluviométricos são oriundos do banco de dados da Agência Nacional das Águas (www.hidroweb.ana.gov.br). Nos postos pluviométricos, os valores de temperatura do ar

(mínima, média e máxima) foram estimados ao longo do ano por meio de equações matemáticas propostas por Alvarez et al. (2013), que utilizam dados geográficos e coeficientes de regressão para quantificar os valores mensais para todo o território brasileiro. Os valores de radiação solar global foram estimados pela equação de Bristow e Campbell (1984), que depende da radiação solar extraterrestre e da amplitude térmica (temperatura máxima menos a mínima). Esses foram calculados conforme sugerido por Pereira *et al.* (2002). Para o brilho solar, foi realizada a inversão da equação de Angstrom & Prescott, citada por Pereira et al. (2002).

Por meio da temperatura máxima e mínima do ar foram estimados os valores da temperatura efetiva para a correção do cálculo da evapotranspiração potencial mensal (ETP) pelo método de Thornthwaite (1948), conforme sugerido por Pereira et al. (2002). A ETP foi usada no cálculo da evapotranspiração da palma forrageira (ET_c), a partir de seu produto com o coeficiente de cultura, que segundo Queiroz et al. (2016) é de 0,52. Em conjunto com os dados de precipitação, a ET_c foi usada na quantificação do balanço hídrico climatológico, assumindo uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm. A partir desses dados, foram estimados os valores da evapotranspiração real da palma forrageira (ET_r).

A eficiência produtiva da palma forrageira (EP_{PF} , em $kg\ MS\ m^{-3}$) foi estimada assumindo a relação entre os valores da produtividade atingível e a evapotranspiração real da cultura, conforme equação abaixo:

$$EP_{PF} = \left[\frac{PA}{ET_r} \right] * 100 \quad (14)$$

O método de interpolação krigagem ordinária foi adotado na regionalização.

Resultados e Discussão

Avaliação da modificação do modelo ZAE

Os parâmetros C_{COL} e C_{UM} são específicos do clone e do gênero de palma forrageira, de tal modo que deve ser sempre ajustado na ocasião da simulação. O C_{COL} reflete o índice de colheita e é modificado a depender do tipo de sistema adotado, quando se deixa os cladódios basais, primários ou secundários. Nessa primeira aproximação de parametrização foi considerada a colheita de todos os cladódios da planta, mantendo-se apenas os basais. Assim, o dado de C_{COL} utilizado no modelo foi definido como sendo igual a 0,93, ou seja, na colheita, em base seca, é considerado que 93% na produtividade da cultura é provenientes da parte aérea da planta. Por sua vez, C_{UM} que reflete a umidade residual foi estimado a partir da umidade retida pelo cladódio da planta ($U = 90,4\%$), resultando em um valor de 9,6%. Os outros dois parâmetros do modelo ZAE (C_{IAC} e C_R), que originalmente eram dependentes apenas da evolução do IAC da cultura e dos valores de temperatura do ar, passam a responder pela capacidade de assimilação de CO_2 por unidade de área do cladódio, conforme Nobel (1991). Com base na teoria desse autor, como demonstrado na Figura 1, observa-se que a capacidade de assimilação da cultura depende do seu IAC, sendo um parâmetro chave na avaliação do crescimento da planta. Porém, quando o mesmo diminui, a proporção de assimilação de CO_2 também será reduzida. Após o IAC alcançar valores superiores a $3,0\ m^2\ m^{-2}$, a assimilação de CO_2 tende a reduzir. Todavia, com o incremento de IAC, uma lenta evolução dessa proporção é verificada, apresentando um menor aumento após $2,0\ m^2\ m^{-2}$. Com relação ao aumento do número de estômatos, Almeida et al. (2004) relatam que plantas adaptadas a climas áridos e semiáridos possuem folhas mais espessas, caracterizadas pela resistência estomática. O aumento no número de estômatos/ mm^2 nas folhas, geralmente, está associado à exposição das plantas ao sol, podendo ser um indicativo de um mecanismo de adaptação das plantas às condições de baixa disponibilidade hídrica no solo.

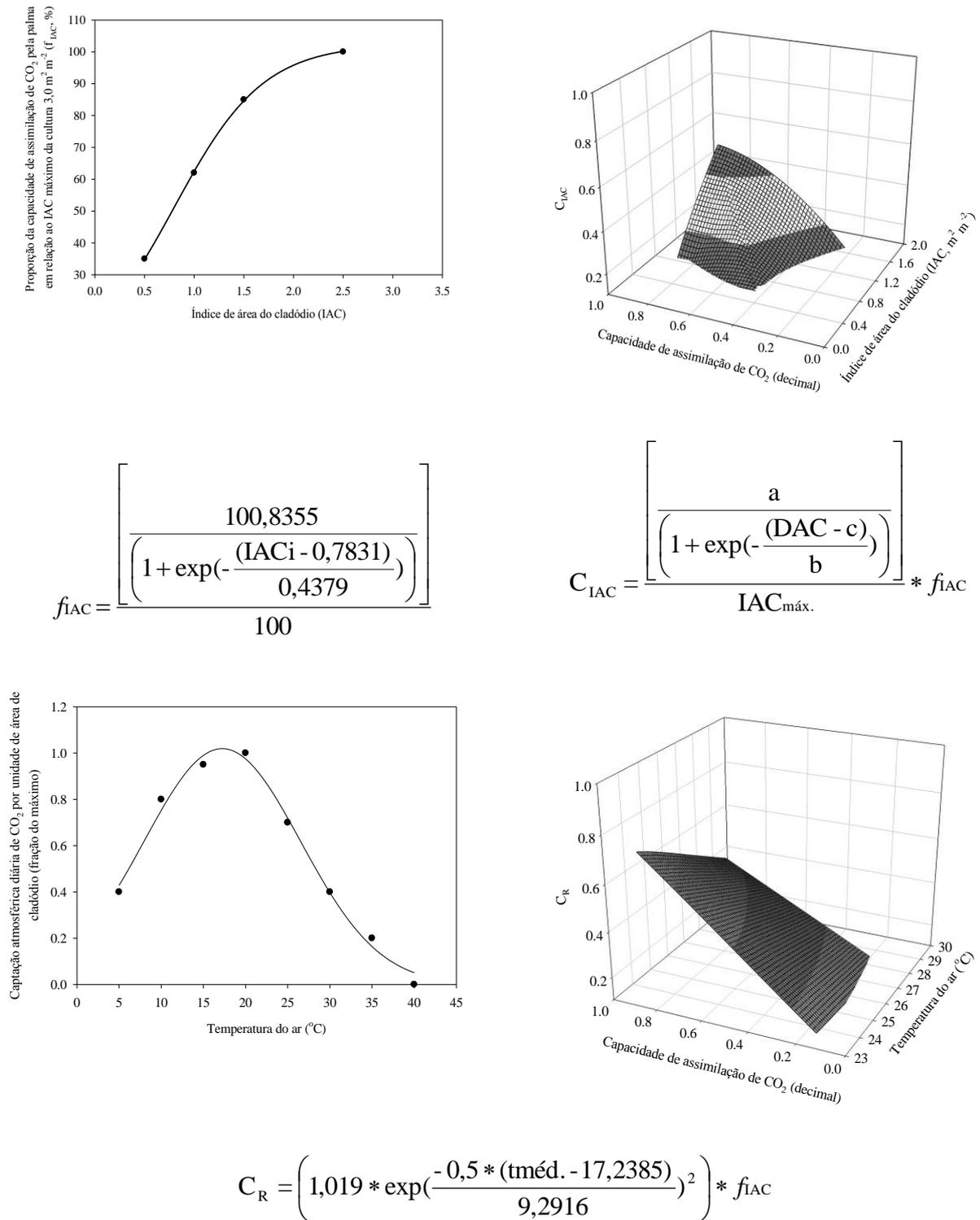


Figura 1. (A) Relação entre a proporção da capacidade de assimilação de CO₂ pela palma em relação ao IAC da cultura, de acordo com a teoria de Nobel (1991). (B) Relação do C_{IAC} com a capacidade de assimilação de CO₂ (f_{IAC}) e o índice de área do cladódio da palma forrageira. (C) Relação da captação atmosférica diária de CO₂ por unidade de área de cladódio da palma forrageira com a temperatura do ar, de acordo com Nobel e Hartsock (1984). (D) Relação do parâmetro C_R com a capacidade de assimilação de CO₂ (f_{IAC}) pela palma forrageira e com a temperatura do ar.

De acordo com Nobel et al. (2001), a produtividade depende da captação atmosférica diária do CO₂ e é um indicativo dos efeitos integrados do ambiente sobre o crescimento. Os fatores ambientais individuais que afetam a captação atmosférica do CO₂ da *Opuntia ficus-indica* interagem multiplicativamente para determinar essa captação.

Além de sua inserção no cálculo do C_{IAC}, foi substituída a função de estimativa do IAC no transcorrer do tempo, que passa a ser uma função sigmoideal em vez de uma equação polinomial quadrática, conforme proposto originalmente por Barbieri e Tuon (1992). Na Figura 1 é demonstrada a relação entre os parâmetros C_{IAC}, f_{IAC} e IAC, onde se verifica que os maiores valores de C_{IAC}, ou seja, a fração do IAC que contribui efetivamente para o incremento produtivo da cultura deixa de depender apenas do estágio de desenvolvimento, mas também da sua capacidade de assimilação de CO₂. Baixos valores de IAC ou de f_{IAC} resultam em reduções abruptas do rendimento. Matematicamente, essa relação foi estabelecida por duas funções sigmoideais (uma na estimativa do IAC e outra para o cálculo de f_{IAC}) e pelo valor máximo teórico de IAC da cultura (IAC_{máx.}), assumido igual 3,0 m² m⁻². O IAC real é estimado a partir da idade da cultura, representada pelos dias após o corte ou plantio (DAC), usando três parâmetros (a = 1,7144; b = 77,7549; c = 426,9959). A função de estimativa do C_{IAC} pode ser vista na Figura 1.

Semelhante a essa variável, a estimativa do C_R também contempla a junção de duas equações, porém uma sigmoideal e a outra gaussiana. A primeira devido o C_R também depender do f_{IAC}, logo que a magnitude da respiração da cultura é afetada pelo seu estágio de desenvolvimento e, conseqüentemente, pela sua capacidade de assimilação de CO₂. A segunda função reflete a influência da temperatura nesse processo de

respiração, que é considerado fixo pelo método original do modelo ZAE, todavia propõem a sua variação. Na Figura 1, percebe-se que, de acordo com Nobel e Hartsock (1984), a captação atmosférica diária de CO₂ depende da temperatura do ar, de tal maneira que valores baixos ou elevados reduzem a atividade fotossintética da planta. Por outro lado, quanto maior for a temperatura, maior será a perda respiratória e, assim ocorrerá a diminuição da assimilação de CO₂ pela cultura. Originalmente, no modelo ZAE, assume-se que o aumento da temperatura reduz os valores de C_R, elevando a penalização no incremento de produtividade, em decorrência do gasto de CO₂ na respiração; todavia, não considera que a redução da captação de CO₂ também tende a diminuir a atividade da respiração. Com isso, pela Figura 1, é notável a variação dos dados de C_R, apresentando menores magnitudes quando a capacidade de assimilação de CO₂, ou seja, f_{IAC}, é maior, e as temperaturas são menores. Os valores de C_R podem ser obtidos por meio de equação demonstrada na Figura 1.

Nas Tabelas 1 e 2 são demonstradas as análises do desempenho do modelo ZAE, assumindo os três agrupamentos quanto ao tipo de processo fotossintético, e a modificação de estimativa dos parâmetros C_{IAC} e C_R em relação ao modelo original. Com base nos resultados obtidos, percebe-se que a estimativa da produtividade da palma forrageira, usando o modelo ZAE original, promove erros relativos elevados, independente das funções dos agrupamentos. Os maiores erros são verificados com as funções das plantas C4, mesmo com a modificação dos parâmetros C_{IAC} e C_R. As melhores estimativas foram obtidas com as modificações desses parâmetros, sendo encontrados erros relativos inferiores a 5%. Porém, a modificação apenas do parâmetro C_{IAC} resultou em erros ainda menores.

Tabela 1. Simulações e o erro relativo (%) da estimativa da produtividade da palma forrageira, considerando o modelo original do ZAE, a inserção do parâmetro C_{IAC} modificados e as equações do três agrupamentos quanto ao tipo de processo fotossintético (C3 - inverno; C3 - verão; C4)

Referência	Variável	Medido	Parâmetros originais			Parâmetro modificado (C _{IAC})		
			ZAE C3 Inverno	ZAE C3 Verão	ZAE C4	ZAE C3 Inverno	ZAE C3 Verão	ZAE C4
Produtividade (ton. ha ⁻¹)	em base fresca	163,0	110,6	201,5	288,2	160,52	290,86	416,70
	em base seca	15,6	10,6	19,3	27,7	15,41	27,92	40,00
Erro relativo (%)	em base fresca	-	-32,1%	23,6%	76,8%	-1,5%	78,4%	155,6%
	em base seca	-	-31,9%	24,0%	77,4%	-1,2%	79,0%	156,4%

Tabela 2. Simulações e o erro relativo (%) da estimativa da produtividade da palma forrageira, considerando o modelo modificado com a inserção individual e conjunta dos parâmetros C_{IAC} e C_R e as equações do três agrupamentos quanto ao tipo de processo fotossintético (C3 - inverno; C3 - verão; C4)

Referência	Variável	Medido	Parâmetro modificado (C_R)			Parâmetros modificados (C_{IAC} , C_R)		
			ZAE C3 Inverno	ZAE C3 Verão	ZAE C4	ZAE C3 Inverno	ZAE C3 Verão	ZAE C4
Produtividade (ton. ha ⁻¹)	em base fresca	163,0	108,47	190,74	271,94	170,5	301,4	430,5
	em base seca	15,6	10,41	18,31	26,11	16,4	28,9	41,3
Erro relativo (%)	em base fresca	-	-33,5%	17,0%	66,8%	4,6%	84,9%	164,1%
	em base seca	-	-33,3%	17,4%	67,3%	4,9%	85,5%	165,0%

C_{IAC} = Coeficiente de correção do índice de área do cladódio, C_R = índice de correção da respiração.

Regionalização

Na Figura 2 é demonstrada a variação espacial da precipitação pluviométrica e da temperatura média anual no estado da Bahia. Ampla área central do Estado é caracterizada por níveis pluviométricos abaixo de 900 mm, com destaque para a região mais ao norte, onde são inferiores a 600 mm. O oeste da Bahia possui precipitação entre 1200 e 1500 mm; faixa essa compreendida também nas áreas de transição para o litoral. Nessa última, são verificados valores acima de 1500 mm. De acordo com Queiroz et al. (2015), lâminas acima de 1096 mm causam reduções na produtividade da palma forrageira, logo que o excesso de água é um fator limitante para essa cultura.

Em termos térmicos, a Bahia possui maiores magnitudes no Oeste, Norte e Litoral Sul do Estado. As temperaturas mais amenas são verificadas no Centro e Centro-sul, com valores médios anuais abaixo de 23°C. Conforme estudo climatológico realizado por Moura *et al.* (2011), com as localidades de origem e dispersão da palma forrageira, o limite ideal de temperatura média do ar está entre 16,1°C e 25,4°C. De acordo com Nobel & Hartsock (1984), a temperatura pode afetar bastante a absorção de CO₂. Esses autores, considerando diferentes associações da temperatura noturna e diurna sobre a fotossíntese da palma forrageira, verificaram, em casa-de-vegetação, que a combinação das temperaturas de 25°C durante o dia e 15°C durante a noite permitiu a máxima captação de CO₂.

O modelo ZAE/FAO-33 possibilita estimar a produtividade potencial de uma cultura sem limitações de fatores bióticos e abióticos

(Doorenbos; Kassam, 1994; Pereira *et al.*, 2007), utilizando apenas a disponibilidade de radiação solar e a condição térmica no ambiente. Com base nessas informações, percebe-se que a Bahia possui potencial produtivo de palma forrageira variando entre 200 e 400 t MF ha⁻¹ 2anos⁻¹ (Figura 3A). As maiores produtividades podem ser obtidas, sobretudo nas regiões Centrais e Oeste-Sul do Estado, onde as temperaturas são mais amenas. Os menores valores são constatados no Litoral, em que há menor disponibilidade de radiação, em relação às demais regiões do Estado, devido o efeito da nebulosidade. Em termos de matéria seca, essa produtividade é estimada na ordem de 20 a 36 t MS ha⁻¹ 2anos⁻¹ (Figura 3B).

Com base no efeito da disponibilidade de água, a produtividade atingível da palma forrageira foi estimada variando entre 200 e 300 t MF ha⁻¹ 2anos⁻¹ (Figura 4A) e 30 e 36 t MS ha⁻¹ 2anos⁻¹ (Figura 4B). As maiores produtividades (> 250 t MF ha⁻¹ 2anos⁻¹) são obtidas em áreas do Semiárido, nas transições com o litoral e no Oeste da Bahia. No Norte do Estado, os menores desempenhos produtivos (< 225 t MF ha⁻¹ 2anos⁻¹) estão associados aos altos valores de temperatura do ar. Por sua vez, no Litoral, como o modelo ZAE FAO-33 não contempla as penalizações referente ao excesso de água, as menores produtividades estão associadas ao efeito da nebulosidade, que reduz a disponibilidade de radiação para a cultura.

Segundo Almeida (2011), a área plantada com palma forrageira na Bahia é de 137.953 ha, ou seja, dos 500 mil ha cultivados no Nordeste 28% está na Bahia, e a produtividade média está em 154 t ha⁻¹ 2anos⁻¹, em áreas de produção sem adubação e sem o emprego de nenhuma tecnologia aplicada ao manejo, além de espaçamentos de 1,0 x 1,0 m.

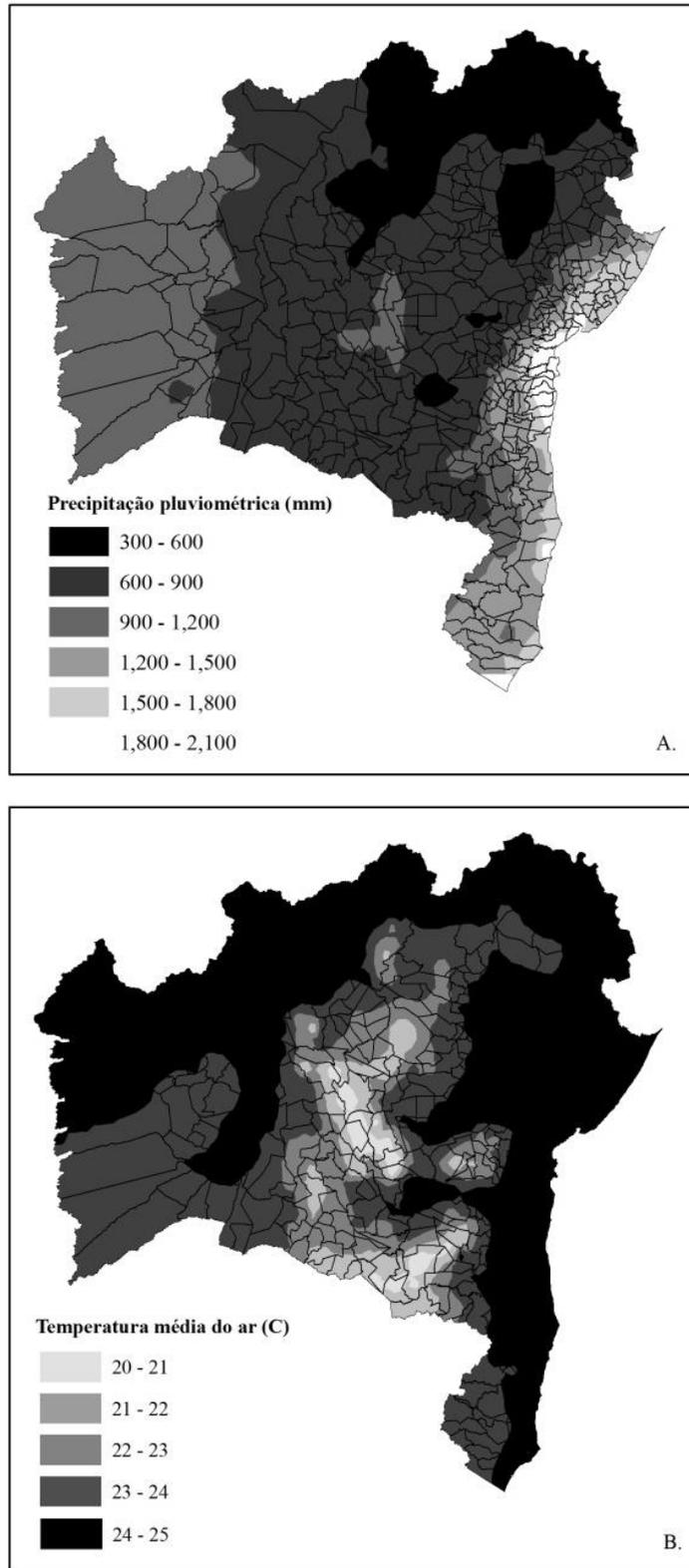


Figura 2. Distribuição espacial da produtividade potencial da palma forrageira (em toneladas por hectares), em base fresca (A) e base seca (B), ambas estimadas para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, parametrizado e modificado para a cultura.

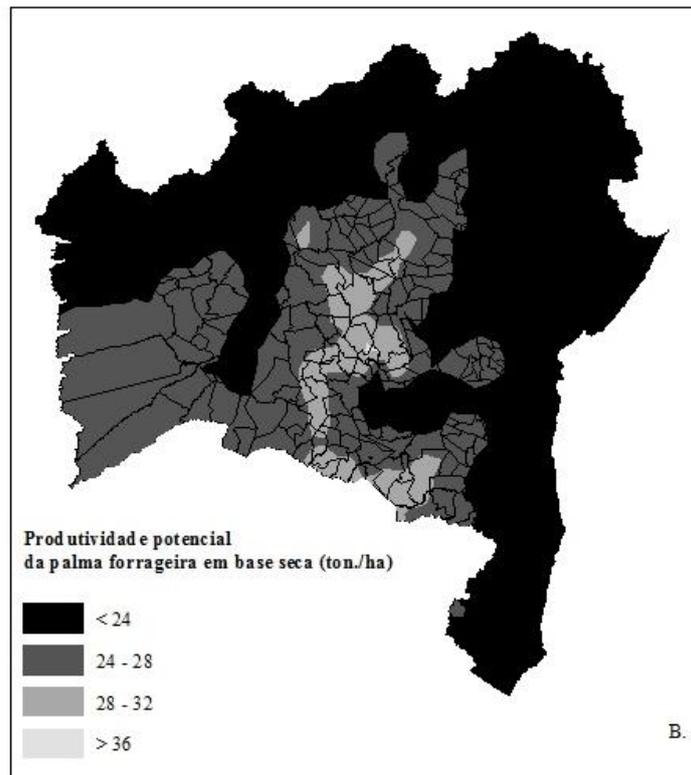
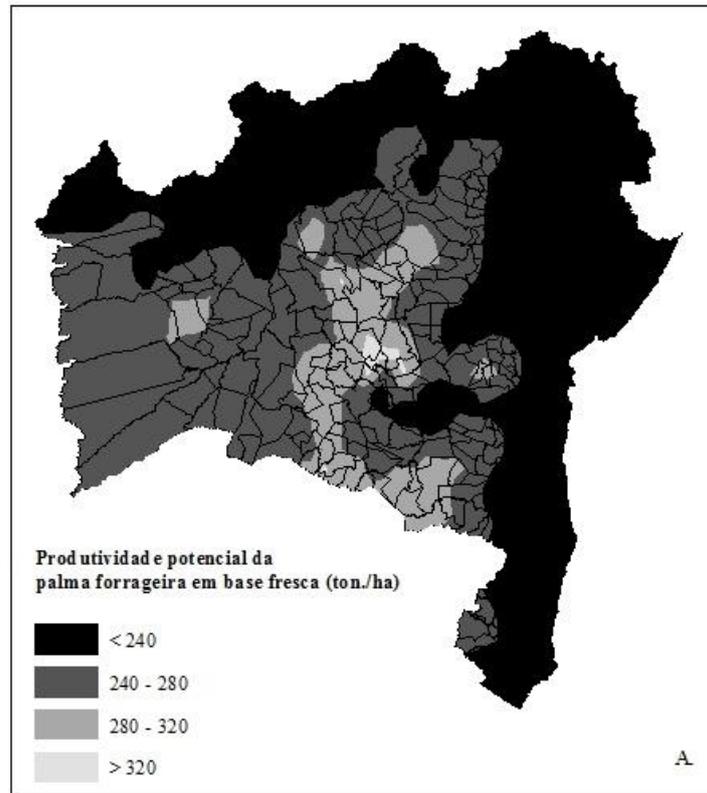


Figura 3. Distribuição espacial da produtividade potencial da palma forrageira (em toneladas por hectares), em base fresca (A) e base seca (B), ambas estimadas para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, parametrizado e modificado para a cultura.

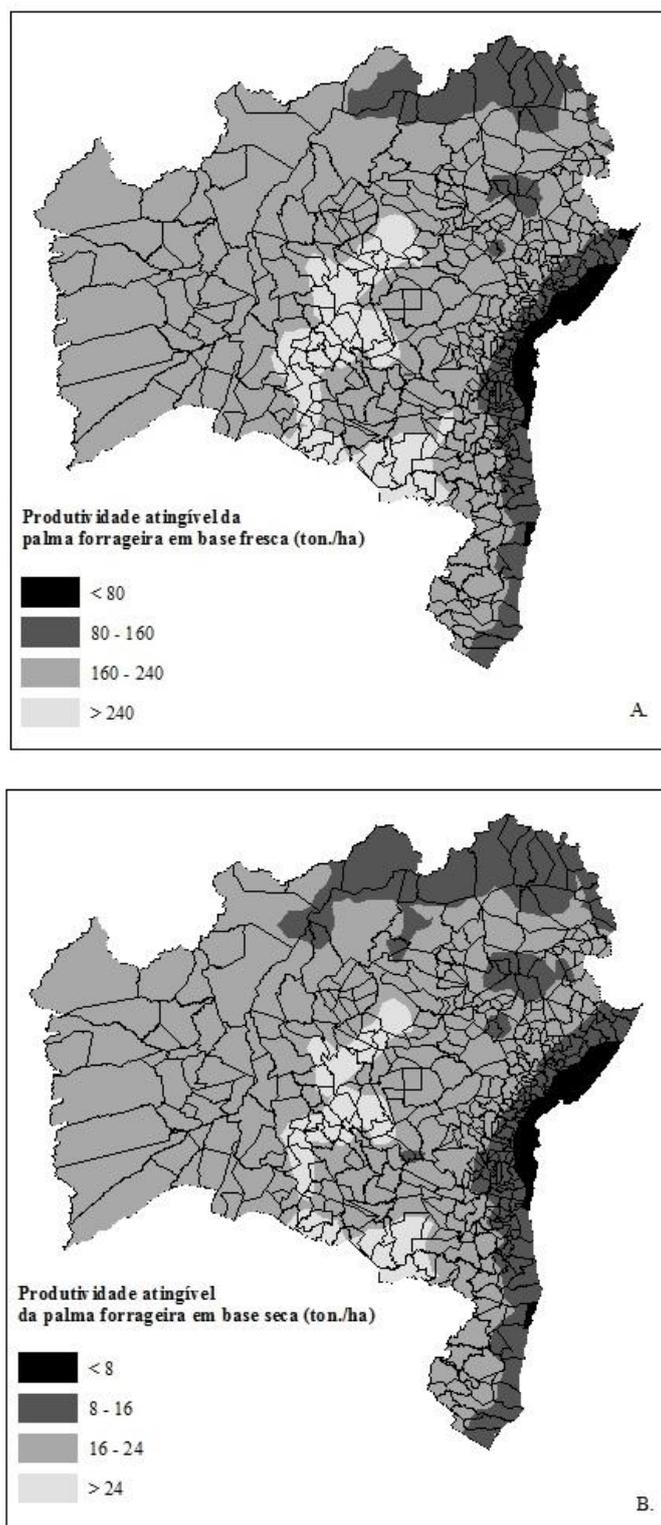


Figura 4. Distribuição espacial da produtividade atingível da palma forrageira (em toneladas por hectares), em base fresca (A) e base seca (B), ambas estimadas para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, parametrizado e modificado para a cultura.

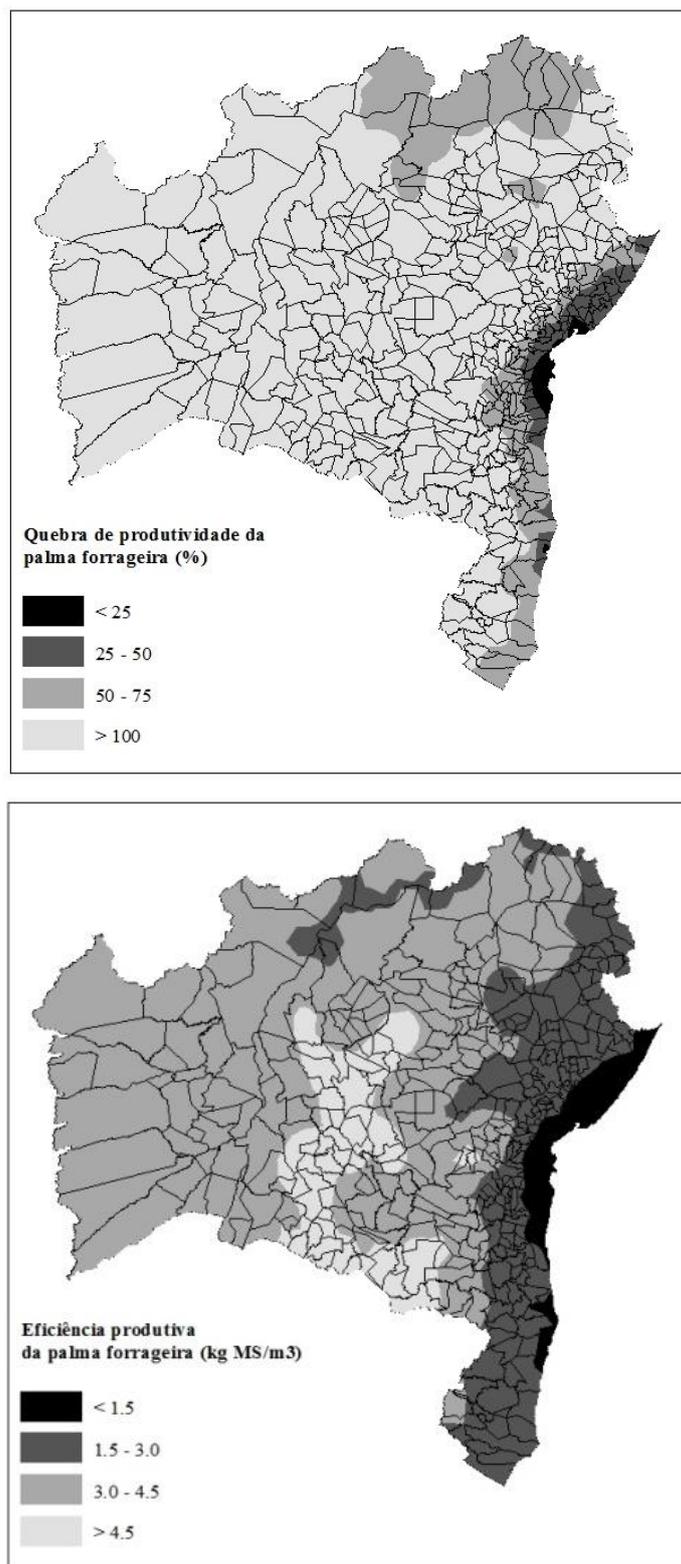


Figura 5. Regionalização da quebra da produtividade (A) e eficiência produtiva (B) da palma forrageira (kg MS m⁻³) estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, parametrizado e modificado.

Donato (2011), conduzindo experimento com palma forrageira, sob diferentes níveis de esterco e espaçamentos, durante 600 dias, entre outubro de 2009 e maio de 2011, encontrou produtividade em torno de 21,5 t MS ha⁻¹ e 18,6 t MS ha⁻¹, para os espaçamentos de 1,0 x 0,5 m (20.000 plantas ha⁻¹) e 2,0 x 0,25 m (20.000 plantas ha⁻¹), respectivamente, e de 14,7 t ha⁻¹ em fileira dupla, com espaçamento de 3,0 x 1,0 x 0,25 m (13.333 plantas ha⁻¹). O experimento foi conduzido sob condições climáticas de Guanambi, BA, onde a normal climatológica da precipitação é de 671,8 mm e da temperatura do ar de 26°C.

O modelo ZAE FAO-33 não considera os efeitos da adubação, e do espaçamento, sendo refletido indiretamente nos valores do índice de área do cladódio, que na sua calibração foi considerado 1,6 x 0,2 m (31.250 plantas ha⁻¹). Apesar das peculiaridades das informações citadas acima e das diferenças de produtividade em relação aos valores estimados pelo modelo ZAE FAO-33, percebe-se a sua capacidade em detectar a variação espacial dentro do estado da Bahia. Estes resultados mostram que o modelo apresenta eficiência para auxiliar no planejamento agrícola. Oliveira *et al.* (2012) também obtiveram bons resultados no uso do modelo para a cana-de-açúcar em macroescala.

Na estimativa da produtividade atingível da cultura, em que se considera a penalização pelo estresse hídrico, percebe-se que a quebra de rendimento da palma forrageira na Bahia não é elevada, atingindo valores até 16% (Figura 5A). A resposta produtiva da cultura ao suprimento de água no solo no modelo ZAE FAO-33 é expressa pelo fator K_y , que relaciona a redução relativa do rendimento ao déficit relativo da evapotranspiração (SHRESTHA *et al.*, 2010), que pode ser classificada como baixa ($K_y < 0,85$); baixa/média ($0,85 < K_y < 1,00$); média/alta ($1,00 < K_y < 1,15$) e alta ($K_y > 1,15$), ou seja, quando o valor de K_y de uma cultura é superior a 1, a mesma é considerada sensível ao déficit hídrico e pelo contrário, quando o valor é inferior a 1, a cultura é resistente ao estresse hídrico (POSSE *et al.*, 2009). No modelo ZAE FAO-33, esse valor é igual a 0,31 para a palma forrageira, demonstrando a sua alta resistência à escassez de água, o que justifica a baixa quebra da produtividade. Essa resistência também está associada à baixa demanda de água pela cultura, representada pelo valor K_c inserido no modelo, o qual é igual a 0,53. Observa-se ainda na Figura 5A, que a redução na produtividade da palma é maior (12-16%) no litoral em direção à região de transição para o interior do Estado. Em

contraste, ao norte a redução é menor, com valores variando entre 0 e 8%. Vale ressaltar que, devido o modelo ZAE FAO-33 não contemplar diretamente as perdas de produtividade pelo excesso de água, os decréscimos no rendimento nas regiões mais chuvosas podem supostamente ser apenas reflexos da redução da disponibilidade de radiação solar, como antes abordado. A redução relativa da evapotranspiração da palma forrageira (ET_r/ET_c) foi superior nas áreas ao Norte, avançando para o Oeste e Centro Sul do Estado, sendo reflexo dos baixos níveis pluviométricos, apesar da redução da exigência hídrica da cultura sendo reduzida.

Esses resultados, associados ao potencial produtivo atingível pela cultura, identificaram as áreas Centrais e Centro Sul do Estado como aquelas em que a palma forrageira possui a maior eficiência de conversão de água em biomassa, ou seja, com maior eficiência produtiva ($> 6 \text{ kg MS m}^{-3}$) (Figura 5B). Todavia, uma ampla área situada entre o Norte, Oeste e regiões de transição com o litoral do Estado, apresentou altos valores de eficiência produtiva ($4 - 6 \text{ kg MS m}^{-3}$). O litoral caracterizou-se como uma região em que as condições do ambiente podem limitar a eficiência da cultura. HAN & FELKER (1997) encontraram, nas condições semiáridas de Kingsville, Texas - USA, para a palma *Opuntia ellisiana* L., com produção de biomassa seca na ordem de 14,3 t ha⁻¹, eficiência do uso de água igual a 2,54 Kg MS m⁻³. Por sua vez, no quarto ano produtivo, quando a produção foi de 17,6 t ha⁻¹, a eficiência atingiu 3,51 kg MS m⁻³. Nas condições climáticas de Sicily, Itália, região Mediterrânea, Consoli *et al.* (2013) avaliaram a *Opuntia ficus-indica* L. (Mill.), com plantas de três metros de altura e dez anos de idade, cultivada para fins de produção de fruto, e os autores verificaram eficiência do uso da água de 4,6 kg m⁻³ e 4,4 kg m⁻³, nos respectivos anos avaliados. No Semiárido pernambucano, que possui condições climáticas semelhantes às observadas no Semiárido da Bahia, Araújo Filho (2013) encontrou valor igual a 0,91 kg MS m⁻³.

Conclusões

O modelo original da Zona Agroecológica da FAO (ZAE) apresentou baixo desempenho na simulação da produtividade da palma forrageira, necessitando a modificação dos parâmetros de correção (índice de área foliar, C_{IAC} , e respiração, C_R). A inserção da modificação apenas do parâmetro C_{IAC} às funções do modelo ZAE para plantas tipo C3 de inverno resultou nos menores erros relativos. Pela aplicação da Zona Agroecológica da FAO modificado para a palma forrageira, identificou-se que os municípios

situados no Centro e Centro Sul do Estado apresentaram as maiores eficiências produtivas. Todavia, em uma ampla faixa do Estado, localizada ao Norte, Oeste e áreas de transição com o litoral há plenas possibilidades de cultivo dessa espécie, com a obtenção de ótimos desempenhos produtivos.

Referências

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Disponível: <http://kimberly.uidaho.edu/water/fao56/fao56.pdf>. Acesso: 25 de fev. 2017.
- Almeida, J.de., 2011. A palma forrageira na região semiárida do estado da Bahia: diagnóstico, crescimento e produtividade. Tese (Doutorado). Cruz das Almas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.
- Almeida, L.P., Alvarenga, A.A., Castro, E.M., Zanela, S.M., Vieira, C.V., 2004. Crescimento inicial de plantas de *Cryptocaria aschersoniana* Mez. submetidas a níveis de radiação solar. *Ciência Rural* [online] 34. Disponível:
- Barbieri, V., Tuon, R.L., 1992. Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas culturas. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia.
- Bristow, K., Campbell, G., 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology* [online] 31. Disponível: Acesso:
- Donato, P.E.R., 2011. Avaliação bromatológica, morfológica, nutricional e de rendimento em palma forrageira sob diferentes espaçamentos e doses de esterco bovino. Tese (Doutorado em Zootecnia). Itapetinga-BA, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper* N°. 33, Rome, Italy.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage*.
- Doraiswamy, P.C., Hatfield, J.L., Jackson, B., Akhmedov, B., Prueger, J., Stern, A., 2004. Crop condition and yield simulations using Landsat and Modis. *Remote Sensing of Environment* [online] 92. Disponível:
- García, de. Cortázar, V., Nobel, P.S., 1991. Prediction and measurement of high annual productivity for *Opuntia ficus-indica*. *Agricultural and Forest Meteorology* [online] 56. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(91\)90095-8](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(91)90095-8). Acesso: 25 de fev. 2017.
- Han, H., Felker, P., 1997. Field validation of water-use efficiency of the CAM plant *Opuntia ellisiana* in south Texas. *Journal of Arid Environments* [online] 36. Disponível: 10.1006/jare.1996.0202. Acesso: 13 out. 2016.
- Ko, J., Piccinni, G., 2009. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. *Agricultural Water Management* [online] 96. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2008.10.010>. Acesso: 10 out. 2106.
- Lisson, S.N., Inman-Bamber, N.G., Robertson, M. J., Keating, B.A., 2005. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. *Field Crops Research* [online] 92. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2005.01.010>. Acesso: 12 nov. 2016.
- Moura, M.S.B., Souza, L.S.B., Silva, T.G.F., Silva Sá, I.I., 2011. Zoneamento Agroclimático da Palma Forrageira para o Estado de Pernambuco. Disponível: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/916061/1/SDC242.pdf>. Acesso: 27 fev. 2017.
- Nobel, S.P., Hartsock, T.L., 1984. Physiological response of *Opuntia ficus-indica* to growth temperature. *Physiologia Plantarum*, Copenhagen [online] 60. Disponível: 10.1111/j.1399-3054.1984.tb04257.x. Acesso: 10 jul. 2016.
- Nobel, P.S., 2001. *Biologia ambiental*. In: *Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira*. Traduzido por SEBRAE/PB. João Pessoa: SEBRAE/PB.
- Nobel, P.S., 1991. Environmental productivity indices and productivity for *O. ficus-indica* under current and elevated atmospheric CO₂ levels. *Plant Cell Environmental*, v.14. Disponível: 10.1111/j.1365-3040.1991.tb01536.x. Acesso: 27 fev. 2017.
- Nobel, P.S., 2001. *Biologia ambiental*. In: *Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira*. Traduzido por SEBRAE/PB. João Pessoa: SEBRAE/PB.
- Oliveira, F.T.de., Souto, J.S., Silva, R.P.da; Andrade Filho, F.C.de., Pereira Júnior, E.B., 2010. Palma forrageira: Adaptação e importância para os ecossistemas áridos e semiáridos. *Revista Verde*, v.5, n.4, p.27-37.

- Oliveira, R.A., Santos, R.S.dos., Ribeiro, A., Zolnier, S., Barbosa, M.H.P., 2012. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE I. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [online] 16. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000500011>. Acesso: 10 dez. 2016.
- Pereira, A.R., Angelloci, L.R., Sentelhas, P.C., 2002. *Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações*. Livraria e Editora Agropecuária, Guaíba.
- Posse, R.P., Bernardo, S., Sousa, E.F., Pereira, M.G., Monnerat, P.H., Gottardo, R.D., 2009. Relação entre a produtividade do mamoeiro e o déficit hídrico (Ky) na região Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* [online] 13. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662009000200008>. Acesso: 27 fev. 2017.
- Puppala, N., Fowler, J.L., Jones, T.L., Gutschick, V., Murray, L., 2005. Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of *Lesquerella fendleri* at different growth stages. *Industrial Crops and Products* [online] 21. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.12.005>. Acesso: 10 set. 2016.
- Queiroz, M.G.; Silva, T.G.F.; Zolnier, S.; Siqueira E Silva, S.M.; Lima, L.R.; Alves, J.O. 2015. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 19. Disponível: www.scielo.br/pdf/rbeaa/v19n10/1807-1929-rbeaa-19-10-0931.pdf. Acesso: 10 jan. 2017.
- Queiroz, M.G.; Silva, T.G.F.; Zolnier, S.; Siqueira e Silva, S.M.; Souza, C.A.A.; Carvalho, H.F.S. 2016. Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente Semiárido. *Irriga* 4. Disponível: <http://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/1814>. Acesso: 10 jan. 2017.
- Shrestha, N., Geerts, S., Raes, D., Horemans, S., Soentjens, S., Maupas, F., Clouet, P., 2010. Yield response of sugar beets to water stress under Western European conditions, *Agricultural Water Management* [online] 97. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.10.005>. Acesso: 12 set. 2016.
- Soler, C.M.T., Sentelhas, P.C., Hoogenboom, G., 2007. Application of the CSMCERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal Agronomy* [online] 27. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2007.03.002>. Acesso: 9 set. 2016.
- Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1955. *The water balance*. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology.