



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

ANA VIRGÍNIA TERRANOVA DE CARVALHO

**MODELAGEM DO RENDIMENTO DA PALMA FORRAGEIRA
E A SUA APLICABILIDADE NA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA
PRODUTIVA E DO RISCO CLIMÁTICO NO ESTADO DA
BAHIA**

**JUAZEIRO – BA
2014**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

ANA VIRGÍNIA TERRANOVA DE CARVALHO

**MODELAGEM DO RENDIMENTO DA PALMA FORRAGEIRA
E A SUA APLICABILIDADE NA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA
PRODUTIVA E DO RISCO CLIMÁTICO NO ESTADO DA
BAHIA**

Dissertação apresentada a
Universidade do Vale do São
Francisco - UNIVASF, Campus
Juazeiro, como requisito para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. DSc. Thieres
George Freire da Silva

Co-orientadora: Pesq. DSc. Maria
da Conceição Silva

**JUAZEIRO – BA
2014**

S725m Carvalho, Ana Virgínia Terranova de.
Modelagem do rendimento da palma forrageira e a sua aplicabilidade na análise da eficiência produtiva e do risco climático no estado da Bahia /Ana Virgínia Terranova de Carvalho. -- Juazeiro, 2014.
74 f.: il.; 29 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro-BA, 2014.

Orientador: prof. DSc. Thieres George Freire da Silva.
Co-orientadora: Maria da Conceição Silva

Inclui referências.

1. Palma forrageira - Modelo da Zona Agroecológica da FAO. 2. Produtividade Atingível da cultura. I. Título. II. Thieres George Freire da Silva. III. Universidade Federal do Vale do São Francisco.

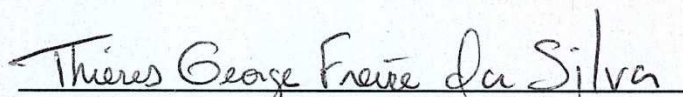
CDD 639.3758

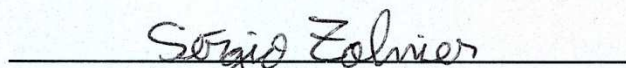
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

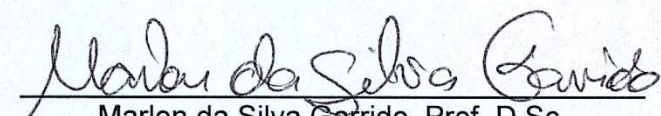
FOLHA DE APROVAÇÃO

ANA VIRGÍNIA TERRANOVA DE CARVALHO

MODELAGEM DO RENDIMENTO DA PALMA FORRAGEIRA E A SUA
APLICABILIDADE NA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA PRODUTIVA E DO RISCO
CLIMÁTICO NO ESTADO DA BAHIA


Thieres George Freire da Silva, Prof. D.Sc.
UFRPE-UAST


Sergio Zolnier, Prof. D.Sc.
UFV


Marlon da Silva Garrido, Prof. D.Sc.
UNIVASF-CPGEA

Juazeiro, 24 de Fevereiro de 2014.

Aos meus pais, José Virgílio de Carvalho e Nilza Terranova de Carvalho (*in memoriam*), por me apoiarem incondicionalmente em minhas decisões.

A minha filha, Clarice Terranova Agostinho, por ter tolerado pacientemente minha ausência durante o decorrer do curso.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, o Grande Autor da vida! O Grande “Eu Sou”! Dono de todas as coisas e que dá no momento oportuno. Obrigada meu Senhor!

Aos meus pais, José Virgílio de Carvalho e Nilza Terranova de Carvalho (*in memoriam*) e irmãos, Vanessa Terranova e Ricardo Terranova por toda paciência, carinho, confiança, e amor a mim dedicados. Sem essa base familiar, jamais teria chegado onde estou.

A minha filhota Clarice, que durante alguns momentos suportou minha ausência com sabedoria e coragem. Você é que me fortalece todos os dias. A razão de minhas lutas e conquistas.

A Laete Valentim, por ter suportado com paciência meus momentos de estresse, pelo carinho e confiança depositados em mim sempre.

Aos demais familiares (tios, tias, primas e primos) que me apoiaram neste caminho árduo, mas com muitas alegrias.

Ao meu mestre Prof. DSc. Thieres G. F. da Silva pela orientação, amizade, voto de confiança, paciência e apoio. Será sempre um referencial em minha vida acadêmica.

A inesquecível Prof. DSc Silvia Helena N. Turco que desde a graduação, para mim, foi um exemplo de mestre.

Aos meus inesquecíveis amigos da UNIVASF: Alencar, Fábio/Adriana, Fátima, Francisco, Flávia e Marcos Alexandre pela grande amizade, pelo apoio, motivação e carinho, sem esquecer os poucos momentos de grande descontração. Vocês são os melhores!

A Carolina Oliveira, secretária do curso de mestrado, pela amizade e companheirismo sem igual. Ganhei uma grande amiga.

A UNIVASF, todos os professores do curso de mestrado que contribuíram para minha formação científica. São incontestavelmente os melhores.

A FAPESB pelo apoio financeiro e pela confiança do ingresso na pesquisa.

CARVALHO, A. V. T. Universidade Federal do Vale São Francisco, 2014. **Modelagem do rendimento da palma forrageira e a sua aplicabilidade na análise da eficiência produtiva e do risco climático no estado da Bahia.** Orientador: DSc. Thieres George Freire da Silva. Co-orientadora: Maria da Conceição Silva.

RESUMO

Dois artigos foram elaborados com a aplicação do modelo Zona Agroecológica (ZAE), publicado no boletim 33 da FAO, visando estimar a quebra da produtividade e a eficiência produtiva da palma forrageira no Estado da Bahia. No primeiro, objetivou-se propor a parametrização e a modificação do modelo original, a fim de se avaliar o seu desempenho na estimativa da produtividade da cultura. Para isso, foram usados dados experimentais obtidos em uma área irrigada e relatos da literatura sobre a fisiologia da planta. Foram propostas duas modificações no modelo original: 1ª Modificação (no parâmetro C_{IAC} – coeficiente de correção do índice de área do cladódio) e a 2ª Modificação (no parâmetro C_R – coeficiente de correção da respiração). Adicionalmente, avaliou-se o uso das funções matemáticas para plantas do tipo C3 – inverno, C3 – verão e C4 na estimativa da produtividade bruta da palma forrageira (uma planta com Metabolismo Ácido das Crassuláceas). Como resultados, o modelo original ZAE apresentou baixo desempenho na simulação da produtividade da palma forrageira, necessitando a modificação dos parâmetros de correção (índice de área do cladódio, C_{IAC} , e respiração, C_R), sobretudo do C_{IAC} , logo que proporcionou os menores erros relativos de estimativa do rendimento em base fresca e seca. Estes coeficientes estão diretamente ligados às respostas de captação atmosférica do dióxido de carbono e ao efeito da temperatura do ar. Além disso, é necessário incorporar equações do agrupamento do processo fotossintético C3 de inverno, de modo a se obter melhores estimativas. No segundo estudo, objetivou-se analisar a aplicabilidade do modelo ZAE, parametrizado e modificado, para a estimativa espacial da produtividade da palma forrageira, a quebra de produtividade em decorrência das condições climáticas e a eficiência produtiva no estado da Bahia. Para isso, usou-se um banco de dados climatológicos de 437 postos de observação distribuídos pelo Estado. Os dados mensais da temperatura efetiva do ar e da precipitação pluviométrica foram utilizados para a estimativa da evapotranspiração máxima e real da cultura. Foram calculados os valores da quebra da produtividade e da eficiência produtiva da palma forrageira para cada um dos postos de observação, e, em seguida, regionalizados por meio de um Sistema de Informações Geográficas. Verificou-se que a Bahia possui potencial produtivo variando entre 200 e 300 t MF ha⁻¹ 2anos⁻¹, a depender da região do Estado. A quebra da produtividade é baixa, atingindo valores inferiores a 16%, mesmo com a redução relativa da evapotranspiração alcançando valores estimados de 40%. Os municípios situados no Centro e Centro Sul do Estado são aqueles que favorecem para as maiores eficiências produtivas da cultura, em decorrência dos regimes térmicos e hídricos mais adequados. Todavia, 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.

Palavras-chave: cactáceas, parametrização, modelagem, eficiência do uso da água, SIG.

CARVALHO, A. V. T. Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2014. **Yield modelling of the forage cactus and its applicability in the analysis of productive efficiency and climate risk in the State of Bahia.** Advisor: DSc. Thieres George Freire da Silva. Co-Advisor: DSc. Maria da Conceição Silva.

ABSTRACT

Two papers were drawn up with the application of Agroecological Zone model (ZAE), published in the bulletin 33 of the FAO, with objective to estimate of the yield and production efficiency of cactus forage in the State of Bahia. At first paper, the objective was to propose the parameterization and the modification of the ZAE original model, in order to evaluate their performance in the estimation of crop yield. To do this, were used experimental data obtained in an irrigated area and reports from the literature on plant physiology. Two modifications were proposed in the original model: 1st modification (in the C_{IAC} parameter - correction coefficient of cladode area index) and the second modification (in the C_R – respiration correction coefficient). Additionally, it was evaluated the use of mathematical functions for plants of type C3-winter, C3-summer and C4-summer in the estimation of gross yield of cactus forage (a plant with Crassulacean Acid Metabolism). As result, the original model obtained underestimate of the cactus forage yield, necessitating the modification of the correction parameters (cladode area index, C_{IAC} , and breathing, C_R), especially of the C_{IAC} , which provided the lowest relative errors of estimation of income in fresh and dry base. These coefficients are directly linked to the responses of atmospheric carbon dioxide capture and the effect of air temperature. In addition, it is necessary to incorporate the equations of the C3-winter photosynthetic process, in order to obtain best estimates. In the second paper, the objective was to analyze the applicability of the model ZAE, parameterized and modified, to the spatial estimation of cactus forage yield, breaking productivity due to the climatic conditions and the productive efficiency in the State of Bahia. For this purpose, it used a database of 437 posts of the climatological observation throughout the State. The monthly data from the air effective temperature and rainfall have been used for the estimation of the crop maximum and actual evapotranspiration. Were calculated the values of the yield drop and production efficiency of the cactus forage for each one of the observation posts, and then regionally through a Geographic Information System. It was found that Bahia has productive potential varying between 200 and 300 t ha⁻¹ MF 2 years⁻¹, depending on the region of the State. The drop in yield is low, reaching values of less than 16%, even with the reduction on the estimated evapotranspiration values reaching 40%. The district situated in the Centre and South Centre of the State are those that favor for the largest crop productive efficiencies, as a result of thermal and water regimes best suited. However, a broad swath of the State, located north, West and transition areas with the coastline, there are full possibilities of cultivation of this species, with the achievement of great productive performances.

Keywords: Cactaceae, parameterization, modelling, water use efficiency, GIS.

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1 - Modificação e avaliação do modelo original da zona agroecológica da FAO para simulação da produtividade da palma forrageira.

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).....Pág.45

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 CR e as equações do três agrupamentos quanto ao tipo de processo fotossintético (C3 - inverno; C3 - verão; C4).....Pág.45

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1 - Modificação e avaliação do modelo original da zona agroecológica da FAO para simulação da produtividade da palma forrageira.

Figura 1 - Representação esquemática do Modelo da Zona Agroecológica da FAO adaptado para a simulação da produtividade potencial (PB_{PF}), real (PA_{PF}) e quebra de produtividade ($Q(\%)_{PF}$) para a palma forrageira.....Pág.40

Figura 2 - Relação entre a proporção da capacidade de assimilação de CO_2 pela palma em relação ao IAC da cultura, de acordo com a teoria de Nobel (1991).....Pág.41

Figura 3 - Relação do C_{IAC} com a capacidade de assimilação de CO_2 (f_{IAC}) e o índice de área do cladódio da palma forrageira.....Pag.42

Figura 4 - Relação da captação atmosférica diária de CO₂ por unidade de área de cladódio da palma forrageira com a temperatura do ar.....Pag.43

Figura 5 - Relação do C_R com a capacidade de assimilação de CO₂ (f_{IAC}) da palma forrageira e com a temperatura do ar.....Pag.44

ARTIGO 2 - Aplicabilidade do modelo ZAE/FAO-33 na estimativa espacial da produtividade e da eficiência da palma forrageira no estado da Bahia

Figura 1 - Distribuição espacial dos valores anuais da precipitação pluviométrica (A) e temperatura média do ar (B) para o estado da Bahia.....Pag.64

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.....Pag.65

Figura 3 - 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.....Pag.66

Figura 4 - Regionalização da quebra da produtividade da palma forrageira estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, parametrizado e modificado para a cultura.....Pag.67

Figura 5 - Regionalização da relação entre a evapotranspiração real (ET_r) e da cultura (ET_c) da palma forrageira, estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, parametrizado e modificado para a cultura.....Pag.68

Figura 6 - Regionalização da eficiência produtiva da palma forrageira (kg de matéria seca m⁻³), estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, parametrizado e modificado para a cultura.....Pag.69

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 14 |
| 2.1 A IMPORTÂNCIA DA PALMA FORRAGEIRA..... | 14 |
| 2.2 ASPECTOS FISIOLÓGICOS..... | 14 |
| 2.3 EFEITO DO AMBIENTE SOBRE O CRESCIMENTO..... | 15 |
| 2.4 EFICIÊNCIA PRODUTIVA E MODELAGEM..... | 15 |
| 2.5 ZONEAMENTO AGRÍCOLA..... | 17 |
| ARTIGO 1..... | 18 |
| ARTIGO 2..... | 46 |
| 3. CONCLUSÃO GERAL..... | 70 |
| 4. BIBLIOGRAFIA..... | 71 |

1. INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, a palma forrageira se tornou a mais importante alternativa no que se refere à alimentação forrageira no semiárido brasileiro. Cultivada em diversos estados do nordeste, apresenta grande relevância socioeconômica para o semiárido, servindo de alimentação para os rebanhos nos períodos de estiagem, principalmente as prolongadas, devido a sua enorme capacidade de armazenamento de água em seus cladódios. Entretanto, o agricultor adota um sistema de cultivo marcado pela utilização de pouquíssima tecnologia, seja por baixa capacidade gerencial ou de investimento financeiro, obtendo-se produtividades bem abaixo do seu potencial genético da palma forrageira. No nordeste, geralmente o plantio é realizado em solos menos férteis, porém, estima-se que esta região tenha o maior cultivo de palma do mundo.

A *opuntia ficus-indica* está entre as espécies indispensáveis para a produção no semiárido brasileiro, por possuir características que lhe conferem boa aceitação como alimento forrageiro, alto valor comercial e excelente conversão alimentar. Estes atributos proporcionam ao pecuarista custos de produção relativamente baixos, especialmente nos países em desenvolvimento, além de proporcionar a conservação do solo, sendo considerada uma consequência positiva para o meio ambiente. Dependendo do manejo aplicado, pode tornar-se uma alternativa sustentável e de preservação ambiental.

O semiárido brasileiro é caracterizado pela baixa pluviosidade e pela concentração da mesma em um único período (novembro a março). Sendo assim, a palma forrageira, por possuir requisitos para suportar as condições de zonas semiáridas, tem sido uma alternativa promissora de cultivo. Como para outras culturas de grande valor econômico, alguns estudos têm sido desenvolvidos para a palma forrageira visando estimar a produtividade, paralelamente, estudos de zoneamento agrícola foram realizados para determinação das melhores regiões de cultivo, já que os elementos do clima são de grande importância para potencializar a produtividade de qualquer espécie em campo. O zoneamento fornece informações que, se forem aplicadas em escala regional, servem para a identificação de áreas com potencial comercial para exploração agrícola, melhor época de plantio e permitem caracterizar o risco climático de uma região. Por sua vez, também é

imprescindível para o planejamento financeiro e concessão de crédito aos agricultores.

Nos dias de hoje, existe uma quantidade bem distinta de modelos matemáticos que são utilizados para a determinação da produtividade de diversos tipos de culturas. No entanto, como estudos referentes à palma forrageira ainda são incipientes, não existe um modelo elaborado especificamente para essa cultura, deixando apenas duas alternativas para estimar a produtividade potencial e quebra de produtividade da palma. Uma alternativa é a aplicação do método subjetivo (geralmente utilizado pelos órgãos estaduais) e outra é a aplicação do método elaborado pela FAO denominado de Zona Agroecológica – ZAE (método científico). Neste contexto, objetivou-se avaliar o desempenho de um modelo de simulação do rendimento da palma forrageira, visando a sua aplicabilidade na análise da eficiência produtiva e do risco climático do estado da Bahia para o cultivo dessa espécie através de dois estudos. Estudo I: Avaliar o desempenho do modelo original ZAE da FAO, além da proposição de sua modificação para a estimativa da produtividade da palma forrageira. Estudo II: Propor a regionalização e estimativa da quebra da produtividade da palma forrageira no estado da Bahia, onde o seu cultivo tem se tornado mais intenso, devido a sua grande capacidade como suporte forrageiro para os agricultores e pecuaristas nos períodos de estiagem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 IMPORTÂNCIA DA PALMA FORRAGEIRA

Existem diversas espécies adequadas para o cultivo no nordeste e entre essas está a Palma Forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill), uma cactácea que constitui uma importante alternativa (MOURA et al., 2011) e é amplamente utilizada para alimentação animal, que suporta longos períodos de falta d'água e altas temperaturas. Apesar de possuir baixos teores de proteína, a palma forrageira tem alta produção de matéria seca digestível, especialmente em ecossistemas semiáridos (VIEIRA, 2006).

Segundo Santos et al. (2006), no Brasil, onde se estima que há plantados 500.000 ha, a sua maior área de cultivo está concentrada entre os estados de Alagoas, Paraíba e Pernambuco, onde tem sido utilizada principalmente para a alimentação animal. Na Bahia, tem sido bastante utilizada nas áreas de sequeiro nos municípios situados no Semiárido, comumente adotando pouca tecnologia no sistema de produção (ALMEIDA, 2011). Essa forrageira que contém em média 90% de água representa, para o Semiárido, uma valiosa contribuição no suprimento desse líquido para os animais (SANTOS et al., 2006).

2.2 ASPECTOS FISIOLÓGICOS

A palma forrageira é uma espécie de metabolismo fotossintético CAM (Crassulacean Acid Metabolism), que captura a energia solar durante o dia e realiza a fixação do CO₂ à noite através da abertura dos estômatos, o que a diferencia da maioria das plantas (FALCÃO et al., 2011). Entretanto, além da capacidade da planta em captar a radiação fotossinteticamente ativa, a fotossíntese depende de adequada disponibilidade de água. Cada órgão das plantas de palma possui adaptações de extrema eficiência no aproveitamento de água, principalmente o sistema radicular e os cladódios, onde está localizado o aparelho fotossintético (SAMPAIO, 2005). A área total de cladódio é uma medida útil para estimar a capacidade fotossintética dessa cactácea, sendo uma das variáveis utilizadas para

mensurar o crescimento vegetativo. Entretanto, o conhecimento desses aspectos ecofisiológicos na cultura da palma é escasso, particularmente em cultivos com diferentes densidades populacionais.

2.3 EFEITO DO AMBIENTE SOBRE O CRESCIMENTO

Em condições de baixa umidade relativa do ar e temperaturas noturnas elevadas, essa cactácea pode apresentar baixa resposta produtiva. A temperatura ideal requerida pela cultura está em torno de 25°C durante o dia e 15°C durante a noite (NOBEL, 2001), sendo as regiões mais propícias para o seu desenvolvimento aquelas que apresentam noites frias, umidade relativa do ar elevada e com a presença de orvalhos. Temperaturas noturnas elevadas e umidade do ar baixa afetam seu desenvolvimento devido à alta perda de água (SAMPAIO, 2005). Ainda apresenta exigência nutricional, sobretudo de fósforo, requerendo, além disso, solos bem drenados e com um percentual de argila abaixo de 20%, por ser muito suscetível ao ataque de patógenos de raízes (DUBEUX JÚNIOR; SANTOS, 2005; DUBEUX JÚNIOR et al., 2006; OLIVEIRA, 2008). Entretanto, o fator que mais interfere no desenvolvimento da maioria das culturas é o déficit hídrico, logo que, sofre alterações morfológicas e fisiológicas (SANTOS; CARLESSO, 1998).

2.4 EFICIÊNCIA PRODUTIVA E MODELAGEM

A resposta das espécies às diferentes condições de cultivo tem sido avaliada por meio de modelos de simulação, que incorporam simplificações dos processos de crescimento das plantas e das suas interações com o ambiente, estes modelos com dados de campo e parametrizações, permitem aumentar o entendimento de processos específicos da cultura. Sua utilização é aceita mundialmente como uma ferramenta de fácil aplicação para propósitos de pesquisa e de práticas agronômicas, pois possibilita entender a resposta das plantas a diferentes condições ambientais e, posteriormente, predizer a produtividade das culturas. Contudo, o sucesso da aplicação de modelos matemáticos depende substancialmente das

calibrações realizadas localmente e, conseqüentemente, da qualidade dos dados usados em tais procedimentos de calibração (LISSON et al., 2005).

Os resultados obtidos a partir da geração dos modelos podem ser utilizados como ferramentas de planejamento agrícola e de tomada de decisão, pois permitem reduzir os custos e aumentar sustentabilidade do sistema por meio da maximização do uso dos recursos naturais e da diminuição dos impactos sobre o meio ambiente (KEATING et al., 1999). Quando bem elaborados, podem ser utilizados para a definição das melhores datas de plantios para culturas sob condições irrigadas e de sequeiro (SOLER; SENTELHAS; HOOGENBOOM, 2007); avaliação de estratégias de aplicação de água e nutrientes (RINALDI; VENTRELLA; GAGLIANO, 2007); previsão de safras (YUN, 2003); requerimento de água em escala regional (HEINEMANN; HOOGENBOOM; FARIA, 2002); e para a avaliação dos impactos dos cenários de mudanças climáticas sobre a produção agrícola, uso da terra e ações políticas (OLESEN; BINDI, 2002). Todas essas informações são imprescindíveis aos produtores e ao governo com o objetivo de auxiliar no planejamento das atividades agrícolas e reduzir os riscos nas plantações (HOOGENBOOM, 2000). A calibração e avaliação de modelos de simulação para a palma forrageira são incipientes.

Um modelo bastante utilizado para definir zonas de aptidão para as culturas é o da Zona Agroecológica (ZAE) da FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Inicialmente foi desenvolvido visando prever o rendimento das culturas em base continental. Porém, pode ser adotado um nível de detalhamento maior, de modo a ajustar os seus resultados para escala local e regional. O modelo ZAE permite estimar a produtividade de uma cultura 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). Contudo, faz-se necessário também incluir submódulos que permitam prever os efeitos das adversidades das áreas de produção, tais como estresse hídrico e térmico, a fim de se obter resultados mais próximos à realidade (PORTER; BRAGA; JONES, 1999).

A partir dos resultados dos modelos de simulação, é possível estabelecer diferentes cenários de disponibilidade de água e, conseqüentemente, de eficiência produtiva da cultura. Para isso, quantifica-se a eficiência do uso de água (EUA), que relaciona a produção de biomassa seca e, ou, produção comercial, com a quantidade de água aplicada ou evapotranspirada (LIU; STÜTZEL, 2004; PUPPALA

et al., 2005). A partir da EUA também é possível analisar a resposta produtiva ao suprimento de água da cultura (IGBADUN et al., 2006), podendo-se determinar as condições de disponibilidade de água favoráveis ou limites para o cultivo de uma determinada espécie (KO; PICCINNI, 2009). Quase que inexistentes são os registros sobre a eficiência do uso de água da palma (HAN; FELKER, 1997), especialmente no Nordeste brasileiro.

2.5 ZONEAMENTO AGRÍCOLA

Nos últimos anos, o zoneamento agrícola tem se tornado uma ferramenta de importância singular no planejamento da agricultura, a qual baseia-se no levantamento dos fatores e dados climáticos que definem as aptidões agrícolas encontradas em diferentes locais (MOURA et al., 2011). Estudos realizados por Silva (2007) mostram que o zoneamento agroclimático fornece subsídios à identificação de áreas com potencial ao desenvolvimento de uma cultura, além de ser uma ferramenta imprescindível para o seguro rural, uma vez que facilita a adoção de técnicas adequadas para diminuir riscos e aumentar a produtividade e a concessão de crédito ao agricultor. Por outro lado, um estudo agroclimático contribui para estabelecer o potencial de uma região utilizando mecanismos como o melhoramento genético para a obtenção de variedades mais adaptadas.

ARTIGO I

MODIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MODELO ORIGINAL DA ZONA
AGROECOLÓGICA DA FAO PARA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA PALMA
FORRAGEIRA

1 **Modificação e avaliação do modelo original da zona agroecológica da FAO para**
2 **simulação da produtividade da palma forrageira**

3
4 **RESUMO:** Um modelo bastante utilizado para definir zonas de aptidão para as culturas é o
5 Zona Agroecológica (ZAE) da FAO. Esse modelo foi elaborado para plantas tipo C3 e C4, e
6 até então não foi aplicado na simulação do rendimento de plantas MAC (Metabolismo Ácido
7 das Crassuláceas). Assim, objetivou-se realizar a modificação e avaliação do modelo ZAE
8 para a estimativa da produtividade da palma forrageira. Para a parametrização do modelo
9 foram utilizados dados experimentais de área irrigada, com diferentes condições de
10 disponibilidade de água, as quais foram usadas na definição de parâmetros hídricos da cultura,
11 além dos coeficientes de correção da colheita (C_{COL}) e da umidade residual (C_{UM}).
12 Combinado os dados experimentais e teorias da fisiologia da palma foram propostas duas
13 modificações no modelo: 1ª (no parâmetro C_{IAC} – coeficiente de correção do índice de área do
14 cladódio) e 2ª (no parâmetro C_R – coeficiente de correção da respiração). Avaliou-se o uso das
15 funções para as plantas C3 – inverno; C3 – verão; C4 na estimativa da produtividade bruta da
16 palma forrageira. Finalmente foi avaliado o desempenho do uso dos agrupamentos com e sem
17 a modificação dos parâmetros C_{IAC} e C_R , por meio do erro relativo. Conclui-se que, o modelo
18 original da Zona Agroecológica - ZAE da FAO apresenta baixo desempenho na simulação da
19 produtividade da cultura, necessitando a modificação dos parâmetros de correção do índice de
20 área foliar (C_{IAC}) e da respiração (C_R), que estão diretamente ligados às e a temperatura do
21 ar, e da adoção das equações de plantas C3 de inverno.

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

23

24

25 *Modification and evaluation of the FAO agroecological zone model for simulation of*
26 *yield of forage cactus*

27

28 **ABSTRACT:** A model used to define suitability zones for crops is the Agroecological zone
29 of FAO (ZAE). However, this model has been developed for plants with photosynthetic
30 process C3 and C4, and even then was not applied in the simulation of CAM plants
31 (Crassulacean Acid Metabolism). Thus, the objective of this work was performing the
32 parameterization and modification of the ZAE model for the estimation of productivity of
33 Cactus forage. On the parameterization of the model were used experimental data of an
34 irrigated area, with different water availability conditions, which were used in the definition
35 of crop water parameters, in addition to the correction harvest coefficients (C_{COL}) and the
36 residual moisture (C_{UM}). Combined experimental data and physiology theories of cactus were
37 proposed two modifications to model ZAE: 1st modification (in the C_{IAC} parameter –
38 correction coefficient of the cladode area index) and the second modification (C_R – correction
39 coefficient of the respiration). It was assessed the use of functions for the groupings on the
40 photosynthetic process type (C3-winter; C3-summer; C4) in estimating the gross productivity
41 of cactus forage. The end was rated the performance of the use of groups with and without
42 modifying the C_{IAC} and C_R parameters. As results, the use of the FAO Agroecological zone
43 model (ZAE) in the estimation of productivity of cactus forage is conditioned? to the use of
44 the functions of C3 plants of winter and the modification of the calculation of the correction
45 factors C_{IAC} and C_R in function not only the evolution of IAC and the values of air
46 temperature, but also the proportion of CO_2 assimilation capacity by crop.

47 **Key-words:** Cactaceae. Calibration. Modeling. *Opuntia sp.* Yield.

48

49

INTRODUÇÃO

50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74

A utilização de espécies mais adaptadas às condições edafoclimáticas do Semiárido brasileiro, como a palma forrageira, tem sido praticada pelos produtores, visando reduzir as perdas do sistema de produção agropecuário. Isso se deve à alta variabilidade temporal e espacial das chuvas e à alta demanda hídrica, que resultam em uma elevada deficiência de água no solo ao longo de vários períodos do ano. Como consequência, comumente verifica-se que as plantas sofrem estresse hídrico durante as suas fases fenológicas críticas, sobretudo no período de estiagem. O estresse hídrico compromete a produção e também pode afetar o valor nutritivo dos alimentos (LIMA *et al.*, 2004).

Dentre as espécies com potencial para utilização no Semiárido brasileiro, tem-se a palma (*Opuntia ficus indica* L.), que é amplamente cultivada, sobretudo nos estados de Pernambuco e Alagoas, onde é empregada na alimentação animal. É uma cultura que possui uma boa adaptação às condições edafoclimáticas do Nordeste brasileiro. Assim como qualquer outra cultura, essa planta tem uma necessidade hídrica específica, exigência nutricional e condições ambientais adequadas ao seu desenvolvimento. Estudos realizados por Oliveira *et. al.* (2010) demonstraram que, em condições de baixa umidade relativa do ar e temperaturas noturnas elevadas, as Opuntias apresentam baixa resposta produtiva. Conforme Nobel (2001), a temperatura ideal requerida pela cultura está em torno de 25°C durante o dia e 15°C durante a noite, sendo as regiões mais propícias para o seu desenvolvimento aquelas que apresentam noites frias, umidade relativa do ar elevada e com a deposição de orvalho. Temperaturas noturnas elevadas e umidade do ar baixa afetam seu desenvolvimento devido à alta perda de água (SAMPAIO, 2005). Entretanto, o fator que mais interfere no desenvolvimento das diferentes culturas é o déficit hídrico, logo que sobre alterações morfológicas e fisiológicas (SANTOS; CARLESSO, 1998).

75 A resposta das espécies às diferentes condições de cultivo tem sido avaliada por meio
76 de modelos de simulação, que incorporam simplificações dos processos de crescimento das
77 plantas e das suas interações com o ambiente. Estes modelos em conjunto com dados de
78 campo e parametrizações, permitem aumentar o entendimento de processos específicos da
79 cultura. Sua utilização é aceita mundialmente como uma ferramenta de fácil aplicação para
80 propósitos de pesquisa e de práticas agronômicas, pois possibilita entender a resposta das
81 plantas a diferentes condições ambientais e, posteriormente, predizer a produtividade das
82 culturas. Contudo, o sucesso da aplicação dos modelos depende substancialmente das
83 calibrações realizadas localmente e, conseqüentemente, da qualidade dos dados usados em
84 tais procedimentos de calibração (LISSON *et al.*, 2005).

85 Os resultados obtidos a partir da utilização dos modelos podem ser utilizados como
86 ferramentas de planejamento agrícola e de tomada de decisão, permitindo reduzir os custos e
87 aumentar sustentabilidade do sistema, por meio da otimização do uso dos recursos naturais e
88 minimizar os impactos sobre o meio ambiente, como afirmam Keating *et al.* (1999). Quando
89 bem elaborados, os modelos podem ser utilizados para as diversas aplicações, que incluem a
90 definição das melhores datas de plantios para culturas sob condições irrigadas e também de
91 sequeiro (SOLER; SENTELHAS, HOOGENBOOM, 2007); avaliação de estratégias de
92 aplicação de água e nutrientes (RINALDI *et al.*, 2007); previsão de safras (YUN, 2003);
93 requerimento de água em escala regional (HEINEMANN; HOOGENBOOM, FARIA., 2002);
94 e para a avaliação dos impactos dos cenários de mudanças climáticas sobre a produção
95 agrícola, uso da terra e ações políticas (OLESEN; BINDI, 2002). Todas essas informações são
96 de fundamental importância aos produtores e ao governo, com o objetivo de auxiliar no
97 planejamento das atividades agrícolas e reduzir os riscos climáticos (HOOGENBOOM,
98 2000). A calibração e avaliação de modelos de simulação para a palma forrageira ainda são
99 incipientes.

100 Um modelo bastante utilizado para definir zonas de aptidão para as culturas é conhecido
101 como Zona Agroecológica (ZAE) da FAO (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Este modelo
102 inicialmente foi desenvolvido visando prever o rendimento das culturas em base continental.
103 Porém, pode ser adotado um nível de detalhamento maior, de modo a ajustar os seus
104 resultados para escala local. O modelo ZAE permite estimar a produtividade de uma
105 determinada cultura padrão, altamente produtiva e adaptada ao ambiente de cultivo, utilizando
106 características genéticas da espécie, fatores ambientais e considerando a ausência de restrições
107 hídricas, nutricionais e fitossanitárias (DOORENBOS; KASSAM, 1994). Todavia, esse
108 modelo foi elaborado para espécies com processo fotossintético C3 e C4, e até então não foi
109 aplicado na simulação de plantas MAC (Metabolismo Ácido das Crassuláceas), conforme
110 proposto.

111 A partir dos resultados dos modelos de simulação, é possível estabelecer diferentes
112 cenários de disponibilidade de água e, conseqüentemente, de eficiência produtiva da cultura.
113 Para isso, quantifica-se a eficiência do uso de água (EUA), que relaciona a produção de
114 biomassa seca e, ou, produção comercial, com a quantidade de água aplicada ou
115 evapotranspirada (LIU; STÜTZEL, 2004; PUPPALA *et al.*, 2005). A partir da EUA também
116 é possível analisar a resposta produtiva ao suprimento hídrico (IGBADUN *et al.*, 2006), a fim
117 de se determinar as condições de disponibilidade de água favoráveis ou limites para o cultivo
118 de uma determinada espécie (KO; PICCINNI, 2009). Poucos são os registros sobre a
119 eficiência do uso de água da palma (HAN; FELKER, 1997), especialmente no Nordeste
120 brasileiro.

121 Essas informações, quando aplicadas em escala regional, fornecem subsídios para a
122 identificação de áreas com potencial climático e pedológico na expansão comercial de uma
123 cultura específica, logo que permitem caracterizar o risco climático de uma determinada

124 região. Por sua vez, também é imprescindível para a seguridade rural e concessão de crédito
125 aos produtores.

126 Diante do exposto, objetivou-se avaliar o desempenho do modelo original ZAE da
127 FAO, assim como a proposição de sua modificação para a estimativa da produtividade da
128 palma forrageira.

129

130

MATERIAL E MÉTODOS

131

132 *Descrição do modelo ZAE original*

133 O modelo da Zona Agroecológica (ZAE) possui três principais compartimentos de
134 simulação, que permitem estimar a produtividade potencial, atingível e a quebra de
135 rendimento da cultura, conforme descrito no documento FAO-33, por Doorenbos e Kassam
136 (1979). No presente estudo o modelo ZAE foi modificado, por meio da incorporação de
137 outros submodelos, com calibração de parâmetros específicos para a palma forrageira. Além
138 disso, foram consideradas as simplificações propostas por Barbieri & Tuon (1992), de modo
139 que, em seguida, seja estruturado no software Model Maker 3.0.

140 O módulo da produtividade potencial da cultura (PP) é calculado por meio da taxa de
141 produtividade bruta de uma cultura padrão corrigida por fatores adimensionais, sendo
142 representado por:

143

$$144 \quad PP = PB * C_{IAF} * C_R * C_C * C_{UM} * ND \quad (1)$$

145

146 em que, PB = produtividade bruta de matéria seca (kg MS ha⁻¹dia⁻¹); C_{IAF} = coeficiente de
147 correção do índice de área foliar (IAF); C_R = coeficiente de correção da respiração; C_C =

148 coeficiente de correção da fração colhida (índice de colheita); C_{UM} = coeficiente de correção
 149 da umidade da fração colhida; e, ND = número de dias do ciclo.

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

153

$$154 \quad PB = PB_n + PB_c \quad (2)$$

155

156 Os valores de PB_n e PB_c podem ser estimados por:

157

$$158 \quad PB_n = (a + b * Q_o) * cTn * [1 - (n/N)] \quad (3)$$

159

$$160 \quad PB_c = (c + d * Q_o) * cTc * [(n/N)] \quad (4)$$

161

162 sendo, Q_o = radiação solar extraterrestre, calculada utilizando as expressões citadas por Allen
 163 *et al.* (1998), cTn = correção relativa à temperatura do período nublado; N = fotoperíodo (em
 164 horas); e, cTc = correção relativa à temperatura do período de céu claro.

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

168

$$169 \quad cTn = \begin{cases} 15^\circ C < t < 20^\circ C; e + f * t_{méd.} + g * t_{méd.}^2 + h * t_{méd.}^3 \\ t < 15^\circ C \text{ ou } t > 20^\circ C; i + j * t_{méd.} + k * t_{méd.}^2 + l * t_{méd.}^3 \end{cases} \quad (5)$$

170

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

172

173 Os fatores adimensionais (C_{IAF} , C_R , C_C e C_{UM}) são determinados, nessa ordem,
 174 considerando dados relativos ao índice de área foliar máxima da cultura ($IAF_{\text{máx.}}$), a
 175 temperatura do ar no ambiente de cultivo (t , $^{\circ}C$), a capacidade de produção de matéria seca
 176 economicamente rentável (MSR) em relação à massa seca total produzida (MST), ou seja, do
 177 índice de colheita (adimensional), e em função da umidade residual retida na matéria seca da
 178 parte rentável (U%). Matematicamente, os coeficientes acima são obtidos pelas seguintes
 179 equações:

180

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

182

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

184

$$C_C = \frac{MSR}{MST} \quad (9)$$

186

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

188

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

192 resposta relativa da produtividade ao déficit de água no solo (K_y). No cálculo de PA é usada a
 193 seguinte expressão:

194

$$195 \quad PA = PP * \{1 - K_y * [1 - (ET_r / ET_m)]\} \quad (11)$$

196

197 em que, ET_r = evapotranspiração real da cultura; e, ET_m = evapotranspiração máxima da
 198 cultura.

199 A evapotranspiração máxima da palma forrageira (ET_m) é calculada por:

200

$$201 \quad ET_m = K_c * ET_o \quad (12)$$

202

203 em que, ET_o = evapotranspiração de referência; e, K_c = coeficiente de cultura.

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

207 O módulo da quebra de rendimento $Q(\%)$ é obtido a partir dos dados de PP e PA,
 208 utilizando a equação:

209

$$210 \quad Q(\%) = [1 - (PA / PP)] * 100 \quad (13)$$

211

212 ***Parametrização do Modelo ZAE para a palma forrageira***

213 A parametrização do modelo foi realizada por meio de dados coletados em um
 214 experimento conduzido em condições irrigadas na Estação Experimental do município de
 215 Serra Talhada, Pernambuco, pertencentes ao Instituto Agrônomo de Pernambuco
 216 (QUEIROZ, 2014 – dados não publicados). Nesse experimento, o clone Orelha de Elefante

217 Mexicana do gênero *Opuntia* sp., submetido a cinco condições de disponibilidade de água
218 (976, 1048, 1096, 1152 e 1202 mm), foi cultivado em espaçamento 1,6 x 0,2 m, sob curva de
219 nível, em um solo do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico franco arenoso. O
220 experimento foi constituído de parcelas experimentais com fileiras de dimensões de 6,0 x 4,8
221 m, com quinze plantas cada, totalizando sessenta por parcela, sendo arranjado em blocos
222 casualizados com quatro repetições. Antes do plantio, realizou-se aragem e gradagem do solo.
223 Em seguida, foi feita uma adubação de fundação, conforme análise de solo. Tratos culturais,
224 utilizando capinas e a aplicação de herbicida (glifosato, 0,5%) e de inseticida, foram
225 realizados ao longo do ciclo. No experimento, foi monitorado o conteúdo de água no solo, por
226 meio de um sensor capacitivo (Diviner 2000[®], Sentek Pty Ltda., Austrália), visando determinar
227 a evapotranspiração da cultura por meio do resíduo do balanço de água no solo, após a
228 quantificação dos demais componentes de entrada e saída do volume de controle. As
229 características físico-hídricas do solo foram obtidas para cada profundidade do perfil (a cada
230 0,10 m, até a profundidade de 0,90 m), usando o método do perfil instantâneo, conforme
231 metodologias citadas por Libardi (2005). Ao longo do tempo, também foram monitorados os
232 dados biométricos da cultura, em intervalos de 30 dias, após o início do período experimental,
233 e na ocasião da colheita foi quantificado o rendimento da cultura em base fresca e seca. Essa
234 última foi obtida por meio de plantas representativas da área útil, nas quais os cladódios foram
235 cortados e colocados em saco de papel identificado, secados em uma estufa de ventilação
236 forçada com temperatura regulada entre 65 e 70°C, até se obter peso constante. Os dados
237 meteorológicos ao longo do experimento foram adquiridos de uma estação automática do
238 Instituto Nacional de Meteorologia, situada a 1400 m da área experimental, que permitiu a
239 medição e o armazenamento de dados de radiação solar global, temperatura e umidade
240 relativa do ar, chuva, pressão atmosférica e velocidade do vento. Estes dados também foram
241 utilizados para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), por meio do método de

242 Penman Monteith, parametrizado conforme o boletim 56 da FAO (ALLEN *et al.*, 1998). Nos
 243 cálculos de PB_n e PB_c , que requerem dados da razão de insolação (n/N), devido à ausência do
 244 heliógrafo para medição do brilho solar (“ n ”), “ n ” foi estimado a partir dos valores de
 245 radiação solar global, do fotoperíodo (N) e dos coeficientes de absorção e difusão de radiação
 246 ($a = 0,29 \cdot \cos(\text{latitude local})$; $b = 0,52$). Assim, a equação invertida de Angstrom e Prescott
 247 (ALLEN *et al.*, 1998) pode ser escrita como:

$$248 \quad n = \left(\frac{R_g}{Q_o} - a \right) N / b \quad (14)$$

250

251 Por meio dos dados experimentais, foi obtido o coeficiente de cultura anual da palma
 252 forrageira (K_c) e o coeficiente de resposta relativa da produtividade ao déficit de água (K_y).
 253 Além disso, obteve-se os valores médios do coeficiente de colheita (C_C) e o coeficiente de
 254 correção da umidade da fração colhida (C_{UM}). Os demais parâmetros do Modelo ZAE foram
 255 estabelecidos por meio das suas modificações, conforme descrito em seguida. Na Figura 1 são
 256 demonstradas as etapas de simulação da produtividade da palma forrageira.

257

258 ***Modificação do modelo ZAE***

259 1ª Modificação (C_{IAF}): C_{IAF} é utilizado na caracterização do desenvolvimento da cultura,
 260 atingindo um valor máximo ao final do ciclo, logo que para a cultura padrão do modelo, o
 261 IAF é igual a 5 e constante ao longo do tempo. Acima desse valor, o C_{IAF} é igual a 0,5,
 262 conforme a Equação 5, representando que 50% o IAF é efetivamente responsável pela a
 263 produtividade bruta. Para a *Opuntia ficus-indica* Mill., Nobel (2001) cita que os cultivos
 264 muito adensados, ou seja, com magnitudes de IAC elevadas, ocorre uma rápida redução da
 265 assimilação de CO_2 pela planta, em decorrência do auto sombreamento dos cladódios. A

266 máxima assimilação de CO₂ por unidade de água, ou seja, a maior produtividade ocorre
267 quando o IAC é de 4 a 6 m² m⁻² (considerando os dois lados dos cladódios como área
268 fotossintetizante) (GARCÍA DE CORTÁZAR; NOBEL, 1991), havendo aumento da
269 capacidade máxima na proporção de 35%, 62% e 85% quando o IAC é 1,0, 2,0 e 3,0 m² m⁻²
270 (NOBEL, 1991). É de grande relevância o conhecimento da variação do IAC ao longo do
271 ciclo da cultura como variável de entrada nos modelos agronômicos (ABDEL-RAHMAN;
272 AHMED, 2008; DORAISWAMY *et al.*, 2004; GOEL, 1988; TERUEL; BARBIERI;
273 FERRARO, 1997; WIEGAND; RICHARDSON; NIXON, 1986).

274 2ª Modificação (C_R): C_R reflete a relação da respiração da planta com a temperatura do
275 ambiente. No modelo ZAE, o valor térmico de referencia é 20°C, podendo o valor de C_R ser
276 igual a 0,6 (temperatura menores) e 0,5 (temperaturas maiores), o que representa que 40% ou
277 50% dos fotoassimilados estão sendo utilizados no processo de respiração. Nobel e Hartsock
278 (1984) relatam essa relação para a palma, que possui máxima taxa de assimilação de CO₂ por
279 unidade de água em temperaturas diárias em torno de 20°C (25°C/15°C, diurna/noturna), e
280 mínimo gasto com o processo de respiração, de tal modo que, de maneira análoga abaixo ou
281 acima desse valor, a proporção de redução depende da temperatura. Por meio dos dados de
282 assimilação de CO₂ e temperatura, citados por Nobel e Hartsock (1984), foi elaborado um
283 modelo matemático para estimativa do C_R.

284

285 **Análises**

286 Na análise do modelo ZAE para a estimativa da produtividade da palma forrageira,
287 foram realizadas doze simulações, a partir dos cálculos da PB_n e PB_c, considerando os
288 coeficientes: a = 31,7; b = 0,219; c = 107,2; d = 0,36 nas Equações 3 e 4, e os valores de cT_n
289 e cT_c, com base no agrupamento e de acordo com o processo fotossintético (plantas C3
290 cultivadas no inverno, C3 cultivadas no verão e C4 cultivada em ambas as estações). Nas três

291 primeiras foram considerados os parâmetros originais (e, f, g, h, i, j, k, l, m, n, o, p) das
292 equações cT_n e cT_c (Equações 5 e 6) para culturas C3 de inverno (0,7; 0,035; -0,001; 0,0;
293 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; -
294 0,000037; -0,0425; 0,035; 0,00325; -0,0000925; -1,085; 0,07; 0,0065; -0,000185) e C4 (-
295 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
296 os polinômios elaborados por Barbieri & Tuon (1992), a partir dos dados definidos por
297 Doorenbos e Kassam (1994). Nas três próximas simulações, acrescentou-se a modificação da
298 estimativa dos valores de C_R , mantendo o cálculo original de C_{IAC} , para os três agrupamentos
299 de acordo com o tipo de processo fotossintético. Em seguida, o cálculo original de C_R foi
300 mantido e inseriu-se a modificação de C_{IAC} . Finalmente, as modificações de C_R e C_{IAC} foram
301 contempladas nas simulações. Para a análise estatística, foi considerado o erro relativo (%) a
302 partir da produtividade de um experimento em sequeiro conduzido entre fevereiro de 2010 e
303 março de 2012 (25 meses), na mesma área este experimento foi conduzido utilizado para
304 parametrização do modelo ZAE, onde foi cultivado o clone Orelha de Elefante Mexicana,
305 espaçado em 1,6 x 0,2 m, e adubado com 130 kg N ha⁻¹ antes do plantio. Mais detalhes
306 experimentais podem ser obtidos em Araújo Primo (2013). Os valores de IAC, obtido no
307 transcorrer no tempo de execução desse experimento, também foram utilizados para a
308 representação do desenvolvimento da cultura e no cálculo do C_{IAC} .

309

310

RESULTADOS E DISCUSSÃO

311

312 Para a parametrização do modelo ZAE, foram utilizados os valores de K_y e K_c , sendo
313 iguais a 0,31 e 0,50, nessa ordem, os quais representam no modelo a baixa sensibilidade ao
314 estresse hídrico e baixa demanda de água da cultura. Deve-se levar em conta as variações nas
315 características da cultura ao longo de todo seu ciclo, pois ocorrem determinadas mudanças no

316 Kc do plantio até a colheita conforme relatado por Doorenbos e Kassam (1979), Doorenbos e
317 Pruitt (1977), Pruitt (1986) e Snyder *et al.*, (1989), similarmente, as plantas de abacaxi, que
318 possuem metabolismo semelhante e fecham os estômatos durante o dia têm coeficientes de
319 cultura muito pequenos, como mostrado na FAO 56. Tal como a maioria das culturas, o Kc
320 para o sisal depende da densidade do plantio e manejo de água, embora também tenha
321 coeficientes muito baixos. Para a Palma foi obtida uma média do Kc. Conforme relatado na
322 FAO N°33, valores de Ky são específicos para cada cultura e podem variar em função do
323 crescimento. Geralmente, a diminuição na produtividade está mais associada aos períodos de
324 florescimento, em comparação ao déficit de água durante o período vegetativo e de maturação
325 é relativamente pequena (ALLEN *et. al.* 1998). De acordo com as tabelas publicadas no
326 boletim da FAO 56, para muitas culturas, o Ky sazonal é quase 1 a exemplo do milho que é
327 1,25 e da Alfafa que é 1,1. Outros dois dados de entrada considerados como parâmetros no
328 modelo ZAE, foram C_{COL} e C_{UM} . Esses valores são específicos do clone e do gênero de palma
329 forrageira, de tal modo que deve ser sempre ajustado na ocasião da simulação. O C_{COL} reflete
330 o índice de colheita, e é modificado a depender do tipo de sistema adotado, quando se deixa
331 os cladódios basais, primários ou secundários. Nessa primeira aproximação de
332 parametrização, foi considerada a colheita de todos os cladódios da planta, mantendo-se
333 apenas os basais. Assim, o dado de C_{COL} utilizado no modelo foi definido como sendo igual a
334 0,93, ou seja, na colheita, em base seca, é considerado que 93% na produtividade da cultura é
335 provenientes da parte aérea da planta. Por sua vez, C_{UM} que reflete a umidade residual foi
336 estimado a partir da umidade retida pelo cladódio da planta ($U = 90,4\%$), resultando em um
337 valor de 9,6%. Os outros dois parâmetros do modelo ZAE (C_{IAC} e C_R), que originalmente
338 eram dependentes apenas da evolução do IAC da cultura e dos valores de temperatura do ar,
339 passam a responder pela capacidade de assimilação de CO_2 por unidade de área do cladódio,
340 conforme Nobel (1991). Com base na teoria desse autor, como demonstrado na Figura 2, vê-

341 se que a capacidade de assimilação da cultura depende do seu IAC, sendo um parâmetro
342 chave na avaliação do crescimento da planta. Porém, quando o mesmo diminui, a proporção
343 de assimilação de CO₂ também será reduzida. Após o IAC alcançar valores superiores a 3,0
344 m² m⁻², a assimilação de CO₂ tende a reduzir. Todavia, com o incremento de IAC, uma lenta
345 evolução dessa proporção é verificada, apresentando um menor aumento após 2,0 m² m⁻².
346 Com relação ao aumento do número de estômatos, Almeida *et al.* (2004) relatam que plantas
347 adaptadas a climas áridos e semiáridos possuem folhas mais espessas, caracterizadas pela
348 resistência estomática, como visto por vários autores. O aumento no número de
349 estômatos/mm² nas folhas, geralmente, está associado à exposição das plantas ao sol, podendo
350 ser um indicativo de um mecanismo de adaptação das plantas às condições de baixa
351 disponibilidade hídrica no solo.

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

356 Além de sua inserção no cálculo do C_{IAC}, foi substituída a função de estimativa do IAC
357 no transcorrer do tempo, que passa a ser uma função sigmoideal em vez de uma equação
358 polinomial quadrática, conforme proposto originalmente por Barbieri & Tuon (1992). Na
359 Figura 3 é demonstrada a relação entre os parâmetros C_{IAC}, f_{IAC} e IAC, onde se verifica que os
360 maiores valores de C_{IAC}, ou seja, a fração do IAC que contribui efetivamente para o
361 incremento produtivo da cultura deixa de depender apenas do estágio de desenvolvimento,
362 mas também da sua capacidade de assimilação de CO₂. Baixos valores de IAC ou de f_{IAC}
363 resultam em reduções abruptas do rendimento. Matematicamente, essa relação foi
364 estabelecida por duas funções sigmoideais (uma na estimativa do IAC e outra para o cálculo de
365 f_{IAC}) e pelo valor máximo teórico de IAC da cultura (IAC_{máx.}), assumido igual 3,0 m² m⁻². O

366 IAC real é estimado a partir da idade da cultura, representada pelos dias após o corte ou
367 plantio (DAC), usando três parâmetros ($a = 1,7144$; $b = 77,7549$; $c = 426,9959$). A função de
368 estimativa do C_{IAC} pode ser vista na Equação 16.

369 Semelhante a essa variável, a estimativa do C_R também contempla a junção de duas
370 equações, porém uma sigmoïdal e a outra gaussiana. A primeira devido o C_R também
371 depender do f_{IAC} , logo que a magnitude da respiração da cultura é afetada pelo seu estágio de
372 desenvolvimento e, conseqüentemente, pela sua capacidade de assimilação de CO_2 . A
373 segunda função reflete a influência da temperatura nesse processo de respiração, que é
374 considerado fixo pelo método original do modelo ZAE, todavia propõem a sua variação. Na
375 Figura 4, percebe-se que, de acordo com Nobel e Hartsock (1984), a captação atmosférica
376 diária de CO_2 depende da temperatura do ar, de tal maneira que valores baixos ou elevados
377 reduzem a atividade fotossintética da planta. Por outro lado, quanto maior for a temperatura,
378 maior será a perda respiratória e, assim ocorrerá a diminuição da assimilação de CO_2 pela
379 cultura. Originalmente, no modelo ZAE, assume-se que o aumento da temperatura reduz os
380 valores de C_R , elevando a penalização no incremento de produtividade, em decorrência do
381 gasto de CO_2 na respiração; todavia, não considera que a redução da captação de CO_2 também
382 tende a diminuir a atividade da respiração. Com isso, pela Figura 5, é notável a variação dos
383 dados de C_R , apresentando menores magnitudes quando a capacidade de assimilação de CO_2 ,
384 ou seja, f_{IAC} , é maior, e as temperaturas são menores. Os valores de C_R podem ser obtidos por
385 meio da Equação 17.

386 Nas Tabelas 1 e 2 são demonstradas as análises do desempenho do modelo ZAE,
387 assumindo os três agrupamentos quanto ao tipo de processo fotossintético, e a modificação de
388 estimativa dos parâmetros C_{IAC} e C_R em relação ao modelo original. Com base nos resultados
389 obtidos, percebe-se que a estimativa da produtividade da palma forrageira, usando o modelo
390 ZAE original, promove erros relativos elevados, independente das funções dos agrupamentos.

391 Os maiores erros são verificados com as funções das plantas C4, mesmo com a modificação
392 dos parâmetros C_{IAC} e C_R . As melhores estimativas foram obtidas com as modificações desses
393 parâmetros, sendo encontrados erros relativos inferiores a 5%. Porém, a modificação apenas
394 do parâmetro C_{IAC} resultou em erros ainda menores.

395

396 CONCLUSÕES

397

398 O modelo original da Zona Agroecológica - ZAE da FAO apresenta baixo desempenho
399 na simulação da produtividade da palma forrageira, necessitando a modificação dos
400 parâmetros de correção (índice de área foliar, C_{IAC} , e respiração, C_R), sobretudo do C_{IAC} , logo
401 que proporcionou os menores erros relativos de estimativa da biomassa fresca e seca da
402 cultura. Estes coeficientes estão diretamente ligados às respostas de captação atmosférica do
403 dióxido de carbono e ao efeito da temperatura do ar. Além disso, é necessário incorporar
404 equações do agrupamento do processo fotossintético C3 de inverno, de modo a se obter
405 melhores estimativas de produtividade da cultura.

406

407 REFERÊNCIAS

408

409 ABDEL-RAHMAN, E. M.; AHMED, F. B. The application of remote sensing techniques to
410 sugarcane (*Saccharum spp. hybrid*) production: a review of the literature. *International*
411 *Journal of Remote Sensing*, v. 29, n. 13, p. 3753-3767, July 2008.

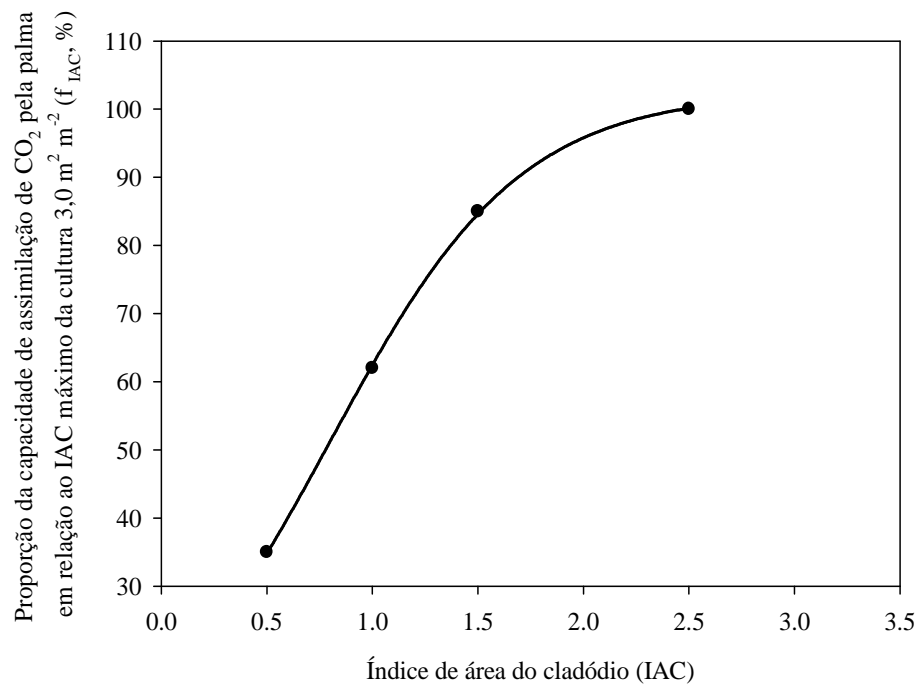
412 ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - guidelines
413 for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 326 p. (FAO. Irrigation and
414 Drainage Paper, 56).

- 415 ALMEIDA, L. P.; ALVARENGA, A. A.; CASTRO, E. M.; ZANELA, S. M.; VIEIRA, C. V.
416 Crescimento inicial de plantas de *Cryptocaria aschersoniana* Mez. submetidas a níveis de
417 radiação solar. *Ciência Rural*, Santa Maria, 34 (1): 83-88. 2004.
- 418 BARBIERI, V.; TUON, R. L. Metodologia para estimativa da produção potencial de algumas
419 culturas. Piracicaba: ESALq, Departamento de Física e Meteorologia, 1992. 17p.
- 420 DOORENBOS, J. AND KASSAM, A.H. Yield response to water. *FAO Irrig. and Drain.*
421 Paper No. 33, FAO, Rome, Italy. 1979, 193p.
- 422 DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas Estudos de
423 FAO: Irrigação e Drenagem, 33, Campina Grande: UFPB, 1994, 306p.
- 424 DOORENBOS, J. AND PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements,
425 *Irrigation and Drainage*. 1977.
- 426 DORAISWAMY, P.C.; HATFIELD, J.L.; JACKSON, B.; AKHMEDOV, B.; PRUEGER, J.;
427 STERN, A. Crop condition and yield simulations using Landsat and Modis. *Remote Sensing*
428 *of Environment*, v. 92, p. 548-559, Sept. 2004.
- 429 GARCÍA DE CORTÁZAR, V.; NOBEL, P. S. Prediction and measurement of high annual
430 productivity for *Opuntia ficus-indica*. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.56, p. 261-272,
431 1991.
- 432 GOEL, N.S. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of
433 biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews*, v. 4, n. 1, p. 1-212,
434 1988.
- 435 HAN, H.; FELKER, P. Field validation of water-use efficiency of the CAM plant *Opuntia*
436 *ellisiana* in south Texas. *Journal of Arid Environments*, v.36, p.133-148, 1997.
- 437 HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G.; FARIA, R. T. de. Determination of spatial
438 water requirements at country and regional levels using crop models and GIS. An example for
439 the state of Parana, Brazil. *Agricultural Water Management*, v.52, p.177-196, 2002.

- 440 HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production
441 and its applications. *Agricultural Forest Meteorology*, v.103, p.137-157, 2000.
- 442 IGBADUN, H. E.; MAHOO, H. F.; TARIMO, ANDREW K. P. R.; BAANDA A. S. Crop
443 water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha
444 River Basin, Tanzania. *Agricultural Water Management*, v. 85, p.141-150, 2006.
- 445 KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modelling
446 sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module.
447 *Field Crops Research*, v.61, p.253-271, 1999.
- 448 KO, J.; PICCINNI, G. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation
449 management. *Agricultural Water Management*, v.96, p.799-808, 2009.
- 450 LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo,
451 2005, p.41-277. (Acadêmica; 61)
- 452 LIMA, C. D. S.; GOMES, H. de S.; DETONI, C. E. Adição de ureia e da levedura
453 *Saccharomyces cerevisiae* no enriquecimento protéico da palma forrageira (*Opuntia ficus*
454 *indica* L.) cv. miúda. *Magistra*, v.16, n.1, p.01-08, 2004.
- 455 LISSON, S. N.; INMAN-BAMBER, N. G.; ROBERTSON, M. J.; KEATING, B.A. The
456 historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane
457 production systems. *Field Crops Research*, v.92, p.321-335, 2005.
- 458 LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of
459 vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae*,
460 v.102, p.15-27, 2004.
- 461 NOBEL, P. S. Environmental productivity indices and productivity for *O. ficus-indica* under
462 current and elevated atmospheric CO₂ levels. *Plant Cell Environmental*, v.14, p.637-646,
463 1991.

- 464 NOBEL, P. S. Biologia ambiental. *In*: Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira.
465 Traduzido por SEBRAE/PB. João Pessoa: SEBRAE/PB, p. 36-48. 2001.
- 466 NOBEL, P.S.; HARTSOCK, T. L. Physiological responses of *Opuntia ficus-indica* to growth
467 temperature. *Physiol. Plant.*, v.60, p.98-105, 1984.
- 468 OLESEN, J. E.; BINDI, M. Review: Consequences of climate change for European
469 agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, v.16, p.239-
470 262, 2002.
- 471 OLIVEIRA, F. T.; SOUTO, J. S.; SILVA, R. P.; ANDRADE FILHO, F. C.; PEREIRA
472 JÚNIOR, E. B. Cactus pear: adaptation and importance for ecosystem arid or semiarid.
473 *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v.5, p.27-37, 2010.
- 474 PRUITT, W.O. "Traditional methods 'Evapotranspiration research priorities for the next
475 decade'." ASAE Paper No. 86-2629. 1986, 23 p.
- 476 PUPPALA, N.; FOWLER, J. L.; JONES, T. L.; GUTSCHICK, V.; MURRAY, L.
477 Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of *Lesquerella fendleri* at
478 different growth stages. *Industrial Crops and Products*, v.21, p.33-47, 2005.
- 479 RINALDI, M.; VENTRELLA, D.; GAGLIANO, C. Comparison of nitrogen and irrigation
480 strategies in tomato using CROPGRO model. A case study from Southern Italy. *Agricultural*
481 *Water Management*, v.87, p.91-105, 2007.
- 482 SAMPAIO, E. V. S. B. Fisiologia da Palma. A palma do Nordeste do Brasil: Conhecimento
483 atual e novas perspectivas de uso. Editores: Rômulo S. Menezes, Diogo A. Simões, Everardo
484 V. S. B. Sampaio. – Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2005. 258 p.
- 485 SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a
486 déficit hídrico em diferentes solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*,
487 *Campina Grande*, v. 3, n. 1, p. 1-6, 1998.

- 488 SOLER, C. M. T; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. Application of the
489 CSMCERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown
490 off-season in a subtropical environment. *European Journal Agronomy*, v.27, p.165–177, 2007.
- 491 SNYDER, R.L., LANINI, B.J., SHAW, D.A., AND PRUITT, W.O. Using reference
492 evapotranspiration (ET_o) and crop coefficients to estimate crop evapotranspiration (ET_c) for
493 agronomic crops, grasses, and vegetable crops. Cooperative Extension, Univ. California,
494 Berkeley, CA, Leaflet No. 21427, 1989. 12 p.
- 495 TERUEL, D. A.; BARBIERI, V.; FERRARO JR., L. A. Sugarcane leaf area index modeling
496 under different soil water conditions. *Scientia Agricola*, v. 54, n. spe, p. 39-44, Jun. 1997.
- 497 THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. *Publications in Climatology*.
498 New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955.104 p.
- 499 WIEGAND, C. L.; RICHARDSON, A. J.; NIXON, P. R. Spectral components analysis: A
500 bridge between spectral observations and agrometeorological crop models. *IEEE Transactions*
501 *on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-24, n. 1, p. 83-89, Jan. 1986.
- 502 YUN, J. I. Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-
503 growth modeling. *Agricultural System*, v.77, p.23-38, 2003.



509

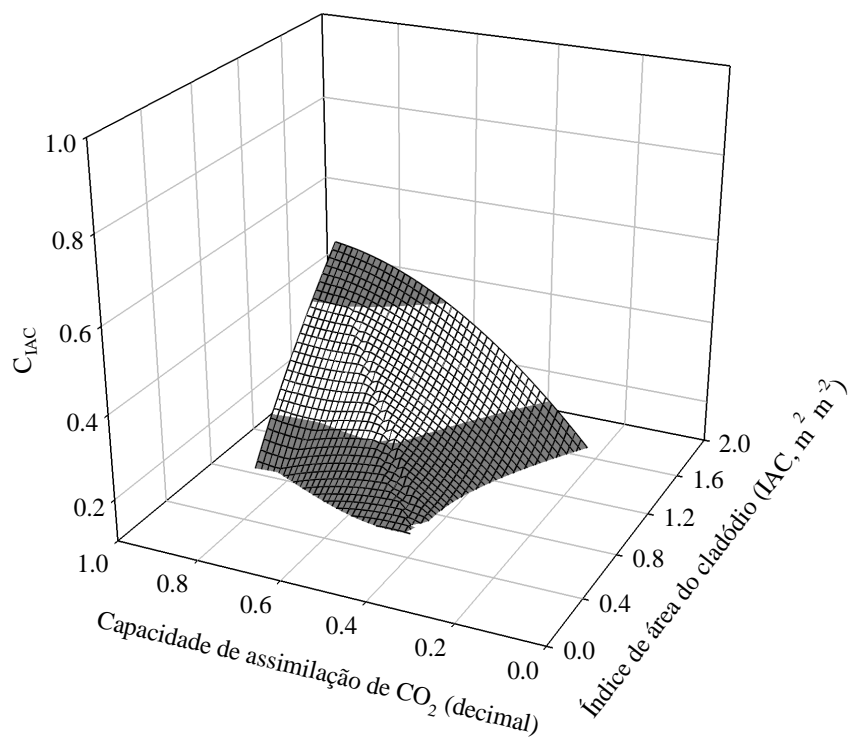
510 **Figura 2.** Relação entre a proporção da capacidade de assimilação de CO₂ pela palma em
 511 relação ao IAC da cultura, de acordo com a teoria de Nobel (1991).

512

$$f_{IAC} = \frac{\left[\frac{100,8355}{\left(1 + \exp\left(-\frac{(IAC_i - 0,7831)}{0,4379} \right) \right)} \right]}{100} \quad (15)$$

514

515



516

517 **Figura 3.** Relação do CIAC com a capacidade de assimilação de CO₂ (f_{IAC}) e o índice de área
 518 do cladódio da palma forrageira.

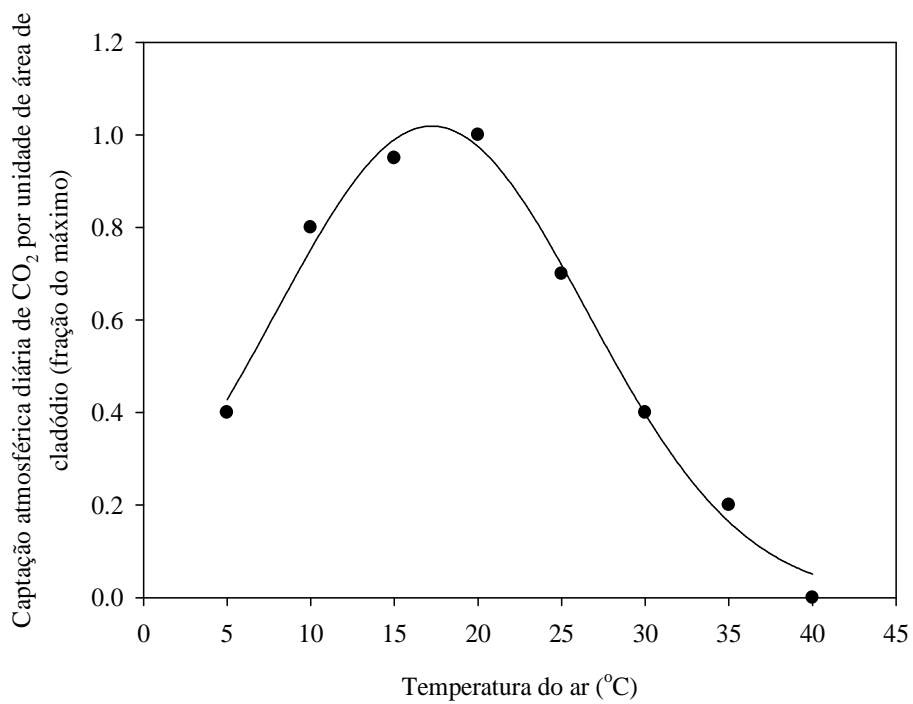
519

$$C_{IAC} = \frac{\left[\frac{a}{\left(1 + \exp\left(-\frac{(DAC - c)}{b} \right) \right)} \right]}{IAC_{m\acute{a}x.}} * f_{IAC}$$

520

(16)

521

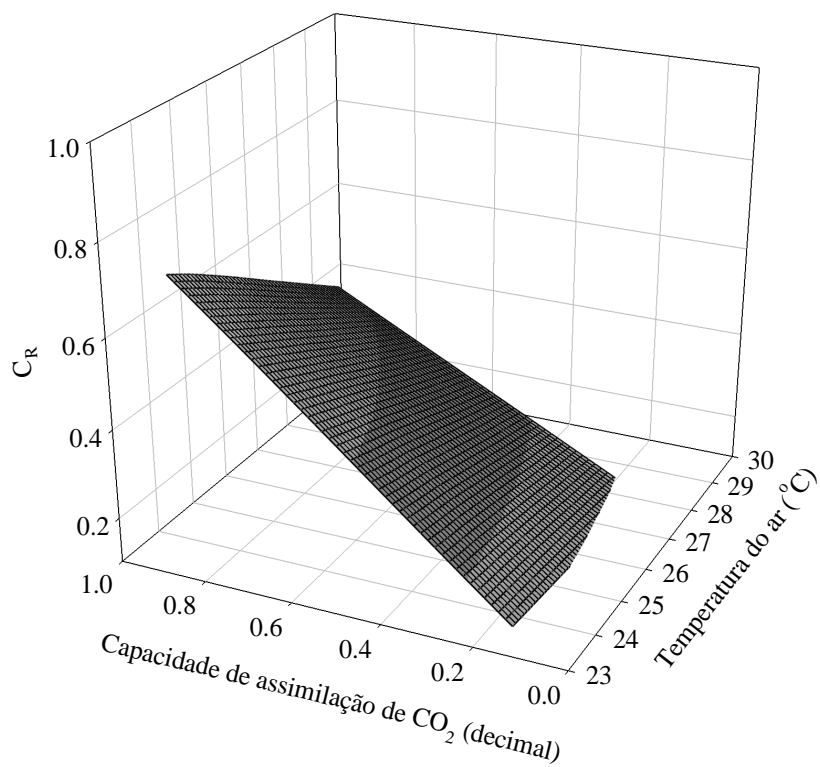


522

523 **Figura 4.** Relação da captura atmosférica diária de CO₂ por unidade de área de cladódio da
524 palma forrageira com a temperatura do ar, de acordo com Nobel e Hartsock (1984).

525

526



527

528 **Figura 5.** Relação do parâmetro C_R com a capacidade de assimilação de CO_2 (f_{IAC}) pela
 529 palma forrageira e com a temperatura do ar.

530

$$531 \quad C_R = \left(1,019 * \exp\left(\frac{-0,5 * (tméd. - 17,2385)}{9,2916}\right)^2 \right) * f_{IAC} \quad (17)$$

532

533

534

535

536

537

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 | ZAE C3 | ZAE | ZAE C3 | ZAE C3 | ZAE C4 |
| | | | Inverno | Verão | C4 | Inverno | Verão | |
| 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% |

538

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 | ZAE C3 | ZAE | ZAE C3 | ZAE C3 | ZAE C4 |
| | | | Inverno | Verão | C4 | Inverno | Verão | |
| 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.

539

ARTIGO II

**APLICABILIDADE DO MODELO ZAE/FAO-33 NA ESTIMATIVA ESPACIAL DA
PRODUTIVIDADE E DA EFICIÊNCIA DA PALMA FORRAGEIRA NO ESTADO DA
BAHIA**

1 **Aplicabilidade do modelo ZAE/FAO-33 na estimativa espacial da produtividade e** 2 **da eficiência da palma forrageira no estado da Bahia**

3
4 **Resumo:** Embora adaptada a ambientes áridos e semiáridos, a palma forrageira pode ser
5 explorada em diferentes condições de cultivo. Todavia, a avaliação da aptidão de uma região
6 para a sua exploração comercial deve ser feita mediante diagnóstico. Nesse caso, a estimativa
7 da produtividade por meio de modelos matemáticos e o uso de Sistemas de Informações
8 Geográficas são ferramentas importantes. Assim, o objetivo desse trabalho foi analisar a
9 distribuição espacial da produtividade da palma forrageira, a quebra de produtividade em
10 decorrência das condições climáticas e a eficiência da cultura no estado da Bahia. O Modelo
11 da Zona Agroecológica publicado no boletim 33 da Organização das Nações Unidas para
12 Agricultura e Alimentação (ZAE FAO-33), parametrizado e modificado previamente, foi
13 utilizado na estimativa da produtividade potencial e atingível da palma forrageira. Para isso,
14 usou-se um banco de dados climatológicos de 437 postos de observação distribuídos pelo
15 Estado. Os dados mensais da temperatura efetiva do ar e da precipitação, assim como dados
16 da cultura (duração do ciclo de dois anos e coeficiente de cultura), foram utilizados para a
17 estimativa da evapotranspiração real. Foram calculados os valores da quebra da produtividade
18 e da eficiência produtiva da palma forrageira para cada um dos postos de observação e, em
19 seguida, regionalizados por meio de um Sistema de Informações Geográficas. Com base nos
20 resultados obtidos, verificou-se que a Bahia possui potencial produtivo variando entre 200 e
21 300 t MF ha⁻¹ 2anos⁻¹, a depender da região do Estado. A quebra da produtividade é baixa,
22 atingindo valores inferiores a 16%, mesmo com a redução relativa da evapotranspiração
23 alcançando valores estimados de 40%. Os municípios situados no Centro e Centro Sul do
24 Estado são aqueles que favorecem às maiores eficiências produtivas da cultura (> 6 kg MS m⁻²
25 ³), em decorrência dos regimes térmicos e hídricos mais adequados às exigências da cultura.

26 Todavia, em uma ampla faixa do Estado, localizada ao Norte, Oeste e áreas de transição com
27 o litoral, há plenas possibilidades de cultivo dessa espécie, com a obtenção de ótimos
28 desempenhos produtivos.

29

30 **Palavras-chave:** eficiência do uso da água, modelagem, regionalização, SIG

31

32 **Applicability of the ZAE/FAO-33 model on spatial estimation of yield and forage**
33 **cactus efficiency in the State of Bahia**

34

35 **Abstract:** Although adapted to arid and semi-arid environments, the forage cactus can be
36 exploited in different cultivation conditions. However, the assessment of the suitability of an
37 area for its commercial exploitation should be made previously. In this case, the estimate of
38 the yield by means of mathematical models and the use of geographic information systems are
39 important tools. Thus, the objective of this work was to analyze the spatial distribution of the
40 forage cactus yield, reduction of the yield due to the climatic conditions and the crop
41 efficiency in the State of Bahia. The Agroecological Zone Model published in bulletin 33 of
42 the Organization Nations United for Food and Agriculture (FAO ZAE-33), calibrated and
43 modified previously, was used in the estimate of potential yield and attainable of the forage
44 cactus. For this, it used a database of 437 climatological observation posts. The monthly data
45 of air effective temperature and rainfall, and crop data (duration of the two-year cycle and
46 crop coefficient) were used for the estimation of crop actual evapotranspiration. Were
47 calculated the values of the reduction of the yield, and the productive efficiency of forage
48 cactus in the State. With results it was found that Bahia has productive potential varying
49 between 200 and 300 t green matter ha⁻¹ 2years⁻¹, depending on the region of the State. The
50 reduction of the yield was low, reaching values of less than 16%, even the estimative of the

51 relative reduction of the evapotranspiration reaching 40% values. The districts situated in the
52 Centre and Centre South of the State are those who favor the largest productive crop
53 efficiencies ($> 6 \text{ kg DM m}^{-3}$), because the best thermal and water regimes. However, a wide
54 area the State located North, West and transition areas there are full possibilities of cultivation
55 for this species, favoring great performances.

56

57 **Key-words:** water efficiency use, modelling, regionalization, SIG

58

59

INTRODUÇÃO

60

61 A Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação - FAO reconhece o
62 potencial da palma e sua importância para contribuir com o desenvolvimento das regiões
63 áridas e semiáridas. Este potencial é especialmente nos países em desenvolvimento, a partir
64 da exploração econômica de várias espécies, com atributos excelentes para o meio ambiente e
65 para segurança alimentar. No Brasil, várias espécies de palma já foram introduzidas, sendo as
66 mais comuns a gigante (*Opuntia* sp.), miúda (*Nopalea cochenillifera*, Salm-Dyck) e a redonda
67 (*Opuntia* sp.) (CHIACCHIO *et al.*, 2006; SOBREIRA FILHO, 1992).

68

69 A palma forrageira é uma espécie de metabolismo fotossintético CAM (Crassulacean
70 Acid Metabolism), originária do México. No Brasil, a sua maior área de cultivo está
71 concentrada entre os estados de Pernambuco e Alagoas, onde tem sido utilizada especialmente
72 para a alimentação animal. É uma cultura que possui uma boa adaptação às condições
73 edafoclimáticas do Nordeste brasileiro. Na Bahia, tem sido bastante utilizada em sequeiro nos
74 municípios situados no Semiárido, comumente adotando pouca tecnologia no sistema de
produção (ALMEIDA, 2011).

75 Embora adaptada às condições semiáridas, maiores produtividades da palma forrageira
76 estão diretamente relacionadas com a pluviosidade local, requerendo uma lâmina anual de 400
77 a 800 mm e umidade relativa do ar acima de 40%. Estudos têm demonstrado que em
78 condições de baixa umidade relativa do ar e temperaturas noturnas elevadas, essa espécie
79 apresenta baixa resposta produtiva (OLIVEIRA *et al.*, 2010). A temperatura ideal requerida
80 pela cultura em torno de 25°C durante o dia e de 15°C durante a noite (NOBEL, 2001), sendo
81 as regiões mais propícias para o seu desenvolvimento aquelas que apresentam noites frias,
82 umidade relativa do ar elevada e com a presença de orvalho. Temperaturas noturnas elevadas
83 e umidade do ar baixa afetam seu desenvolvimento devido a alta perda de água (SAMPAIO,
84 2005). Apresenta grande exigência nutricional, sobretudo no elemento fósforo, sendo os solos
85 mais indicados para a cultura aqueles com profundidade entre 60 e 70 cm, bem drenados e
86 com um percentual de argila abaixo 20%, devido ao favorecimento do ataque de patógenos
87 das raízes (DUBEUX JÚNIOR & SANTOS, 2005; DUBEUX JÚNIOR *et al.*, 2006;
88 OLIVEIRA, 2008). Entretanto, o fator que mais interfere no desenvolvimento das diferentes
89 culturas é o déficit hídrico, logo que a planta sofre alterações morfológicas e fisiológicas
90 (SANTOS & CARLESSO, 1998).

91 De acordo com Pereira *et al.* (2007), o ambiente controla o crescimento e o
92 desenvolvimento das plantas, de tal modo que as condições de cultivo devem ser
93 adequadamente avaliadas antes de se implantar uma atividade agrícola. Esse conhecimento
94 permite escolher as culturas mais apropriadas, as melhores épocas de plantio e os sistemas de
95 cultivos mais adequados (CAMARGO *et al.*, 1974; PEREIRA *et al.*, 2002; FEITOSA *et al.*,
96 1979).

97 A avaliação espacial do efeito das diferentes condições ambientais sobre a
98 produtividade das culturas pode ser obtida mediante modelos matemáticos e o uso de
99 Sistemas de Informações Geográficas - SIG. Segundo Sugawara (2010), os modelos

100 agrônômicos para a estimativa da produtividade de culturas agrícolas representam, de forma
101 simplificada, os principais processos envolvidos no crescimento. Oliveira *et al.* (2012) citam
102 que, dentre os modelos de simulação de produtividade disponíveis, o Método da Zona
103 Agroecológica (ZAE), desenvolvido por Kassam, pode ser utilizado de maneira precisa para a
104 estimativa da produtividade potencial e atingível das culturas em função do clima. Esse
105 modelo é de fácil entendimento e aplicação em razão da baixa exigência de dados de entrada
106 (dados meteorológicos e da cultura), apresentando resultados bastante consistentes, que se
107 aproximam da realidade, além de serem rápidos e de baixo custo. Porém, o modelo apresenta
108 limitações, devido não contemplar a ocorrência de pragas e doenças e os efeitos da fertilidade
109 do solo. A simplicidade e bom desempenho são as justificativas para o seu amplo uso na
110 simulação regional da produtividade de culturas agrícolas (MONTEIRO, 2012; SANTOS e
111 SENTELHAS, 2013).

112 A partir dos resultados dos modelos de simulação, é possível estabelecer diferentes
113 cenários de eficiência produtiva da cultura. Para isso, quantifica-se a eficiência do uso de água
114 (EUA), que relaciona a produção de biomassa seca e, ou, produção comercial, pela quantidade
115 de água aplicada ou evapotranspirada (LIU e STÜTZEL, 2004; PUPPALA *et al.*, 2005). A
116 partir da EUA também é possível analisar a resposta produtiva ao suprimento de água da
117 cultura (IGBADUN *et al.*, 2006), a fim de se determinar as condições de disponibilidade de
118 água favoráveis ou os limites para o cultivo de uma determinada espécie (KO & PICCINNI,
119 2009).

120 Com base no exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar a aplicabilidade do modelo
121 ZAE FAO-33 modificado para a estimativa da produtividade potencial e atingível da palma
122 forrageira, a quebra de produtividade em decorrência das condições climáticas e a eficiência
123 da cultura no estado da Bahia.

124

MATERIAL E MÉTODOS

125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149

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 em decorrência das condições climáticas e a eficiência produtiva da cultura nas diferentes regiões do estado da Bahia.

As informações regionalizadas foram previamente processadas em uma planilha em ambiente do Software Excel, 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 de entrada, referentes ao clima do estado da Bahia.

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 a equação de Bristow & 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).

150 Por meio da temperatura máxima e mínima do ar, foram estimados os valores da
151 temperatura efetiva para a correção do cálculo da evapotranspiração potencial mensal pelo
152 método de Thornthwaite (1948), conforme sugerido por Pereira *et al.* (2002). Esse método
153 requer o cálculo da evapotranspiração padrão por meio de equações lineares e não lineares, e
154 o ajuste por um fator de correção dependente do número de dias do mês e do fotoperíodo. A
155 evapotranspiração potencial foi usada no cálculo da evapotranspiração da palma forrageira
156 (ET_c), a partir de seu produto com o coeficiente de cultura, que segundo Queiroz (2014 –
157 dados não publicados) é de 0,53 durante o primeiro ano de produção. Em conjunto com os
158 dados de precipitação, a ET_c foi usada na quantificação do balanço hídrico climatológico,
159 assumindo uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm. A partir desses dados,
160 foram estimados os valores da evapotranspiração real da palma forrageira (ET_r).

161 As produtividades potencial e atingível da palma forrageira foram estimadas por meio
162 do modelo da Zona Agroecológica, publicado no boletim 33 da Organização das Nações
163 Unidas para Agricultura e Alimentação - FAO. Esse modelo foi previamente parametrizado e
164 modificado para a estimativa da produtividade da palma forrageira. A produtividade potencial
165 da cultura, em base seca (PP_{BS} , toneladas por hectare), foi estimada em função da
166 produtividade bruta de matéria seca, adotando-se as equações do agrupamento do processo
167 fotossintético C3 de inverno. Além disso, foram incorporados os fatores de correção para o
168 índice de área do cladódio, respiração e índice de colheita (93,7%), e integração dos valores
169 diários estimados para a duração total do ciclo da cultura, que nesse estudo foi considerado de
170 dois anos. A produtividade potencial da cultura, em base fresca (PP_{BF} , toneladas por hectare)
171 foi estimada usando os valores do fator de correção da umidade da fração colhida (90,4%). Os
172 fatores de correção do índice de área do cladódio e da respiração foram calculados em função
173 de novos modelos propostos, que estão diretamente ligados às respostas da captação
174 atmosférica de dióxido de carbono e temperatura do ar. Detalhes da calibração do modelo são

175 destacados no Artigo 1. A produtividade atingível (PA, em toneladas por hectare) pela cultura
176 foi estimada pela expressão:

177

$$178 \quad PA = PP * \{1 - Ky * [1 - (ETr/ETm)]\} \quad (1)$$

179

180 em que, PP = PP_{BS} ou PP_{BF}, em toneladas por hectare; Ky = coeficiente de resposta da
181 produtividade ao déficit de água, adotado-se o valor 0,31; ETr = evapotranspiração real da
182 cultura (mm); e, ETm = evapotranspiração máxima da cultura (mm).

183 A quebra de produtividade Q(%) da palma forrageira em decorrência das condições
184 meteorológicas é obtida a partir dos dados de PP e PR, utilizando a equação:

185

$$186 \quad Q(\%) = [1 - (PA/PP)] * 100 \quad (2)$$

187

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

191

$$192 \quad EP_{PF} = [PA/ETr] * 100 \quad (3)$$

193

194 Com os resultados do modelo e com os dados de clima do estado da Bahia, foram
195 realizadas simulações da produtividade potencial e atingível para os municípios dos 437
196 postos de observação. Os resultados foram regionalizados por meio do software ArcGIS 9.3,
197 utilizando modelos ajustados através do semivariograma, bem como o método de interpolação
198 denominado “krigagem ordinária”.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223

Na Figura 1 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 (2014 – dados não publicados), 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 2A). As maiores produtividades podem ser obtidas, sobretudo nas regiões Centrais e Oeste-Sul do Estado, onde

224 as temperaturas são mais amenas. Os menores valores são constatados no Litoral, em que há
225 menor disponibilidade de radiação, em relação às demais regiões do Estado, devido o efeito
226 da nebulosidade. Em termos de matéria seca, essa produtividade é estimada na ordem de 20 a
227 36 t MS ha⁻¹ 2anos⁻¹ (Figura 2B).

228 Com base no efeito da disponibilidade de água, a produtividade atingível da palma
229 forrageira foi estimada variando entre 200 e 300 t MF ha⁻¹ 2anos⁻¹ (Figura 3A) e 30 e 36 t MS
230 ha⁻¹ 2anos⁻¹ (Figura 3B). As maiores produtividades (> 250 t MF ha⁻¹ 2anos⁻¹) são obtidas em
231 áreas do Semiárido, nas transições com o litoral e no Oeste da Bahia. No Norte do Estado, os
232 menores desempenhos produtivos (< 225 t MF ha⁻¹ 2anos⁻¹) estão associados aos altos valores
233 de temperatura do ar. Por sua vez, no Litoral, como o modelo ZAE FAO-33 não contempla as
234 penalizações referente ao excesso de água, as menores produtividades estão associadas ao
235 efeito da nebulosidade, que reduz a disponibilidade de radiação para a cultura.

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

240 Donato (2011), conduzindo experimento com palma forrageira, sob diferentes níveis de
241 esterco e espaçamentos, durante 600 dias, entre outubro de 2009 e maio de 2011, encontrou
242 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
243 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
244 em fileira dupla, com espaçamento de 3,0 x 1,0 x 0,25 m (13.333 plantas ha⁻¹). O experimento
245 foi conduzido sob condições climáticas de Guanambi, BA, onde a normal climatológica da
246 precipitação é de 671,8 mm e da temperatura do ar de 26°C.

247 O modelo ZAE FAO-33 não considera os efeitos da adubação, e do espaçamento, sendo
248 refletido indiretamente nos valores do índice de área do cladódio, que na sua calibração foi

249 considerado 1,6 x 0,2 m (31.250 plantas ha⁻¹). Apesar das peculiaridades das informações
250 citadas acima e das diferenças de produtividade em relação aos valores estimados pelo
251 modelo ZAE FAO-33, percebe-se a sua capacidade em detectar a variação espacial dentro do
252 estado da Bahia. Estes resultados mostram que o modelo apresenta eficiência para auxiliar no
253 planejamento agrícola. Diversos autores, como Alfonsi (2008), Monteiro (2012) e Oliveira *et*
254 *al.* (2012), também obtiveram bons resultados no uso do modelo para a cana-de-açúcar em
255 macroescala.

256 Na estimativa da produtividade atingível da cultura, em que se considera a penalização
257 pelo estresse hídrico, percebe-se que a quebra de rendimento da palma forrageira na Bahia
258 não é elevada, atingindo valores até 16% (Figura 4), mesmo com reduções de até 40% nos
259 valores de evapotranspiração real (Figura 5). A resposta produtiva da cultura ao suprimento
260 de água no solo no modelo ZAE FAO-33 é expressa pelo fator K_y , que relaciona a redução
261 relativa do rendimento ao déficit relativo da evapotranspiração (SHRESTHA *et al.*, 2010),
262 que pode ser classificada como baixa ($K_y < 0,85$); baixa/média ($0,85 < K_y < 1,00$); média/alta
263 ($1,00 < K_y < 1,15$) e alta ($K_y > 1,15$), ou seja, quando o valor de K_y de uma cultura é superior
264 a 1, a mesma é considerada sensível ao déficit hídrico e pelo contrário, quando o valor é
265 inferior a 1, a cultura é resistente ao estresse hídrico (POSSE *et al.*, 2009). No modelo ZAE
266 FAO-33, esse valor é igual a 0,31 para a palma forrageira, demonstrando a sua alta resistência
267 à escassez de água, o que justifica a baixa quebra da produtividade. Essa resistência também
268 está associada à baixa demanda de água pela cultura, representada pelo valor K_c inserido no
269 modelo, o qual é igual a 0,53. Observa-se ainda na Figura 4, que a redução na produtividade
270 da palma é maior (12-16%) no litoral em direção à região de transição para o interior do
271 Estado. Em contraste, ao norte a redução é menor, com valores variando entre 0 e 8%. Vale
272 ressaltar que, devido o modelo ZAE FAO-33 não contemplar diretamente as perdas de
273 produtividade pelo excesso de água, os decréscimos no rendimento nas regiões mais chuvosas

274 podem suspostamente ser apenas reflexos da redução da disponibilidade de radiação solar,
275 como antes abordado. A redução relativa da evapotranspiração da palma forrageira (ET_r/ET_c)
276 foi superior nas áreas ao Norte, avançando para o Oeste e Centro Sul do Estado, sendo reflexo
277 dos baixos níveis pluviométricos, apesar da redução da exigência hídrica da cultura sendo
278 reduzida.

279 Esses resultados, associados ao potencial produtivo atingível pela cultura, identificaram
280 as áreas Centrais e Centro Sul do Estado como aquelas em que a palma forrageira possui a
281 maior eficiência de conversão de água em biomassa, ou seja, com maior eficiência produtiva
282 ($> 6 \text{ kg MS m}^{-3}$) (Figura 6). Todavia, uma ampla área situada entre o Norte, Oeste e regiões
283 de transição com o litoral do Estado, apresentou altos valores de eficiência produtiva (4 - 6 kg
284 MS m^{-3}). O litoral caracterizou-se como uma região em que as condições do ambiente podem
285 limitar a eficiência da cultura. HAN & FELKER (1997) encontraram, nas condições
286 semiáridas de kingsville, Texas - USA, para a palma *Opuntia ellisiana* L., com produção de
287 biomassa seca na ordem de $14,3 \text{ t ha}^{-1}$, eficiência do uso de água igual a $2,54 \text{ Kg MS m}^{-3}$. Por
288 sua vez, no quarto ano produtivo, quando a produção foi de $17,6 \text{ t ha}^{-1}$, a eficiência atingiu
289 $3,51 \text{ kg MS m}^{-3}$. Nas condições climáticas de Sicily, Itália, região Mediterrânea, Console *et*
290 *al.* (2013) avaliaram a *Opuntia ficus-indica* L. (Mill.), com plantas de três metros de altura e
291 dez anos de idade, cultivada para fins de produção de fruto, e os autores verificaram
292 eficiência do uso da água de $4,6 \text{ kg m}^{-3}$ e $4,4 \text{ kg m}^{-3}$, nos respectivos anos avaliados. No
293 Semiárido pernambucano, que possui condições climáticas semelhantes às observadas no
294 Semiárido da Bahia, Araújo Filho (2013) encontrou valor igual a $0,91 \text{ kg MS m}^{-3}$.

295

296

297

298

CONCLUSÕES

299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321

Aplicando-se o modelo ZAE FAO-33, na estimativa da produtividade da palma forrageira, foi possível verificar as variações espaciais do potencial produtivo das diferentes regiões da Bahia, identificando a baixa quebra do rendimento da cultura no Estado. Foi constatado também que os municípios situados no Centro e Centro Sul do Estado proporcionam as maiores eficiências produtivas em decorrência da melhor disponibilidade hídrica e condição térmica mais apropriada. 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

ALFONSI, E. L. Uso de índices fenológicos em modelos de previsão de produtividade do cafeeiro. Tese (Doutorado – Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2008. 104 p.

ALMEIDA, J. de. A palma forrageira na região semiárida do estado da Bahia: diagnóstico, crescimento e produtividade. 95p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, 2011.

ARAÚJO PRIMO, J. T. Dinâmica de água no solo e eficiência do uso de água em clones de palma forrageira no semiárido pernambucano. 2013. 108 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada.

- 322 BRISTOW, K., CAMPBELL, G. On the relationship between incoming solar radiation and
323 daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, n.31, p.159-
324 166, 1984.
- 325 CAMARGO, A. P.; PINTO, H. S.; PEDRO JUNIOR, M. J. Aptidão climática de culturas
326 agrícolas. São Paulo: Secretaria de Agricultura. Zoneamento Agrícola do Estado de São
327 Paulo, São Paulo, CATI, Campinas, v. 1, p 109-149, 1974.
- 328 CHIACCHIO, F. P. B.; MESQUITA, A. S.; SANTOS, J. R. dos. Palma forrageira: uma
329 oportunidade econômica ainda desperdiçada para o Semiárido baiano. *Bahia Agrícola*, v.7,
330 n.3, 2006.
- 331 CONSOLI, S.; INGLESE, G.; INGLESE, P. Determination of evapotranspiration and annual
332 biomass productivity of a cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) orchard in a Semi-arid
333 Environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Submitted September 18, 2012;
334 January 31, 2013; posted ahead of print February 2, 2013. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-
335 4774.0000589
- 336 DONATO, P. E. R. Avaliação bromatológica, morfológica, nutri-cional e de rendimento em
337 palma forrageira sob diferentes espaçamentos e doses de esterco bovino. 2011. 134p. Tese
338 (Doutorado em Zootecnia). UESB, Itapetinga-BA, 2011.
- 339 DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas Estudos de
340 FAO: Irrigação e Drenagem, 33, Campina Grande: UFPB, 1994, 306p.
- 341 DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SANTOS, M.V.F. dos. Exigências nutricionais da palma
342 forrageira. In: MENEZES, R. S. C. et al. (eds). *A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento*
343 *atual e novas perspectivas de uso*. Recife: Editora Universitária da UFPE, p. 105-127. 2005.
- 344 DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SANTOS, M.V.F. dos; LIRA, M. de A.; SANTOS, D.C. dos;
345 FARIAS, I.; LIMA, L.E.; FERREIRA, R.L.C.; Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L) Miller

- 346 under different N and P fertilization and plant population in north- east Brasil. *Journal of Arid*
347 *Environments*, v. 67, n. 3, p. 357-372, 2006.
- 348 FEITOZA, L. R.; SCÁRDUA, J. A.; SEDIYAMA, C. G.; OLIVEIRA, L. M.; VALE, S. S.
349 Estimativas das temperaturas médias mensal e anual do Estado do Espírito Santo. *Revista do*
350 *Centro de Ciências Rurais*, Santa Maria, v.9, p. 279-291, 1979.
- 351 HAN, H.; FELKER, P. Field validation of water-use efficiency of the CAM plant *Opuntia*
352 *ellisiana* in south Texas. *Journal of Arid Environments*, v.36, p.133-148, 1997.
- 353 IGBADUN, H.E., MAHOO, H.F.; TARIMO, ANDREW K.P.R.; BAANDA A. S. Crop water
354 productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River
355 Basin, Tanzania. *Agricultural Water Management*, v. 85, p.141-150, 2006.
- 356 KO, J.; PICCINNI, G. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation
357 management. *Agricultural Water Management*, v.96, p.799-808, 2009.
- 358 LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of
359 vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae*,
360 v.102, p.15-27, 2004.
- 361 MONTEIRO, L. A. Modelagem agrometeorológica como base para definição de ambientes de
362 produção para a cultura da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Piracicaba-SP,
363 ESALQ/USP, 2012.
- 364 MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F.; SILVA SÁ, I. I. Zoneamento
365 Agroclimático da Palma Forrageira para o Estado de Pernambuco. Petrolina: Embrapa
366 Semiárido, 2011. Documentos 242. 28p.
- 367 NOBEL S. P.; HARTSOCK T. L. Physiological response of *Opuntia ficus-indica* to growth
368 temperature. *Physiologia Plantarum*, Copenhagen, v. 60, p. 98-105, 1984.
- 369 NOBEL, P.S. *Biologia ambiental*. In: *Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira*.
370 Traduzido por SEBRAE/PB. João Pessoa: SEBRAE/PB, p. 36-48. 2001.

- 371 OLIVEIRA, F. T. de; SOUTO, J. S.; SILVA, R. P. da; FILHO, F. C. de ANDRADE;
372 JÚNIOR, E. B. PEREIRA. Palma forrageira: Adaptação e importância para os ecossistemas
373 áridos e semiáridos. Revista Verde, v.5, n.4, 2010.
- 374 OLIVEIRA, F.T. de. Crescimento do sistema radicular da Opuntia fícus -indica (L.) Mill
375 (palma forrageira) em função de arranjos populacionais e adubação fosfatada. 76f.
376 Dissertação (Pós-Graduação em Zootecnia – Sistemas Agrosilvipastoris no Semiárido).
377 Universidade Federal de Campina Grande, Patos – PB, 2008.
- 378 OLIVEIRA, R. A. et al. Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar para as principais
379 regiões produtoras de Minas Gerais usando-se o método ZAE I. Revista Brasileira de
380 Engenharia Agrícola e Ambiental, v.16, n.5, p. 549-557, 2012.
- 381 PEREIRA, A. R.; ANGELLOCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia:
382 Fundamentos e Aplicações. Guaíba: Agropecuária, 478 p. 2002.
- 383 PEREIRA, A. R.; ANGELLOCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Meteorologia Agrícola. ESALQ,
384 Piracicaba, 2007.
- 385 POSSE, R.P.; BERNARDO, S.; SOUSA, E.F.; PEREIRA, M.G.; MONNERAT, P.H.;
386 GOTTARDO, R.D. Relação entre a produtividade do mamoeiro e o déficit hídrico (Ky) na
387 região Norte Fluminense. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, n.2,
388 p.158–164, 2009.
- 389 PUPPALA, N.; FOWLER, J. L.; JONES, T. L.; GUTSCHICK, V.; MURRAY, L.
390 Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of Lesquerella fendleri at
391 different growth stages. Industrial Crops and Products, v.21, p.33-47, 2005.
- 392 SAMPAIO, E. V. S. B. Fisiologia da Palma. A palma do Nordeste do Brasil: Conhecimento
393 atual e novas perspectivas de uso. Editores: Rômulo S. Menezes, Diogo A. Simões, Everardo
394 V. S. B. Sampaio. – Recife: Ed. Universitária da UFPE, 258 p. 2005.

395 SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a
396 déficit hídrico em diferentes solos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,
397 Campina Grande, v.3, n.1, p.1-6, 1998.

398 SHRESTHA, N.; GEERTS, S.; RAES, D.; HOREMANS, S.; SOENTJENS, S.; MAUPAS,
399 F.; CLOUET, P. Yield response of sugar beets to water stress under Western European
400 conditions, Agricultural Water Management, v.97, p.346-350, 2010.

401 SOBREIRA FILHO, M.G. Estudos sobre o aproveitamento da palma no Brasil, especialmente
402 no Nordeste. Recife-PE, 1992. p.37.

403 SUGAWARA, L. M.; Um Modelo Agronômico. Tese de Doutorado do Curso de Pós-
404 Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José
405 dos Campos, 116 p. 2010.

406 THORNTHWAITTE, C.W. Na approach toward a rational classification of climate.
407 Geographical Review, v.38, p.55-94, 1948.

408

409

410

411

412

413

414

415

416

417

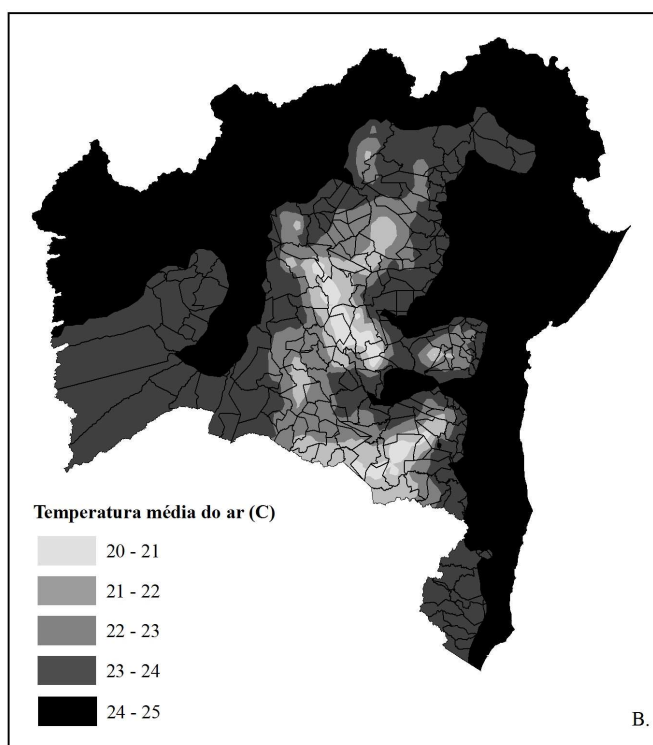
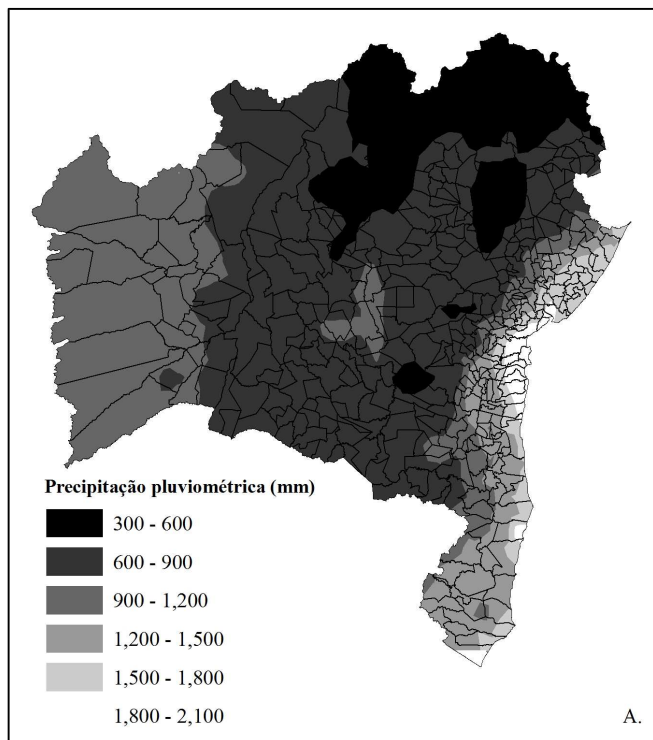
418

419

420

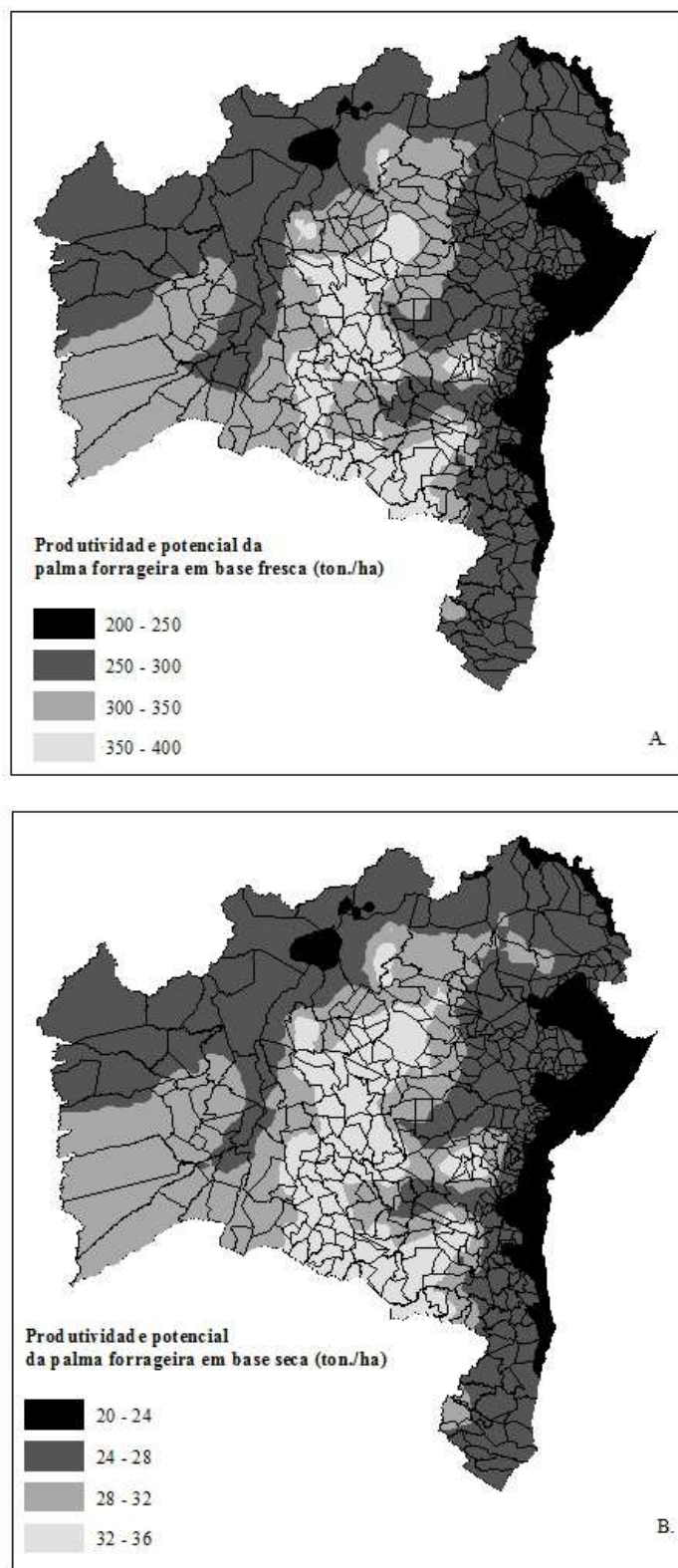
421

422

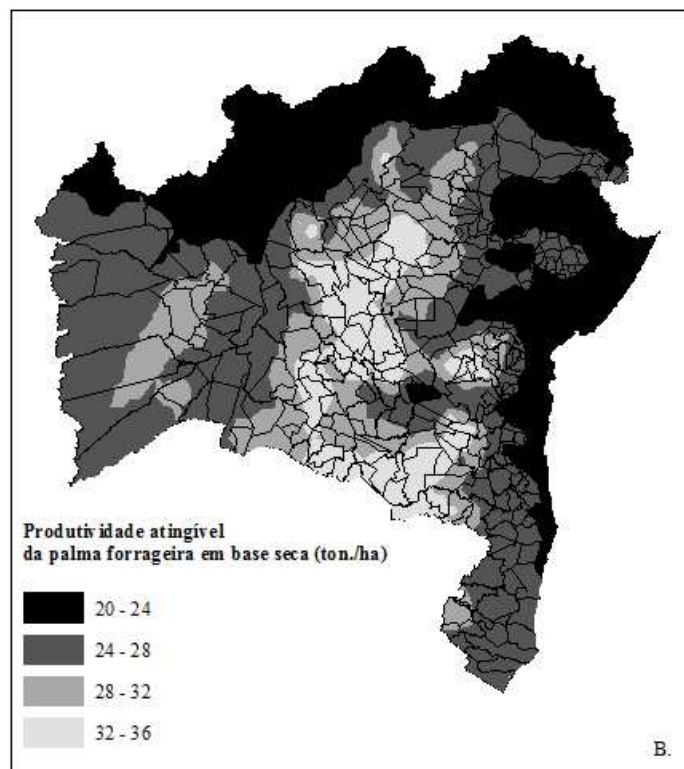
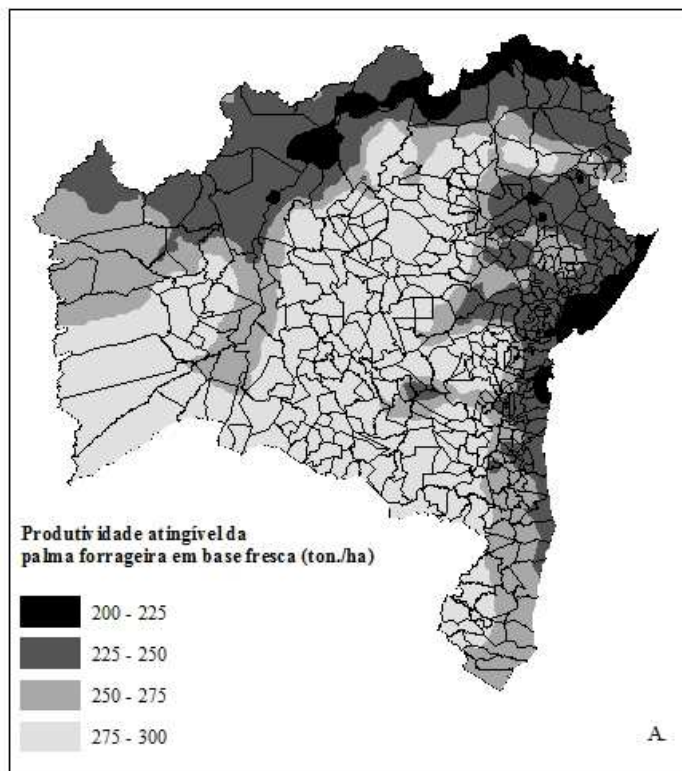


423

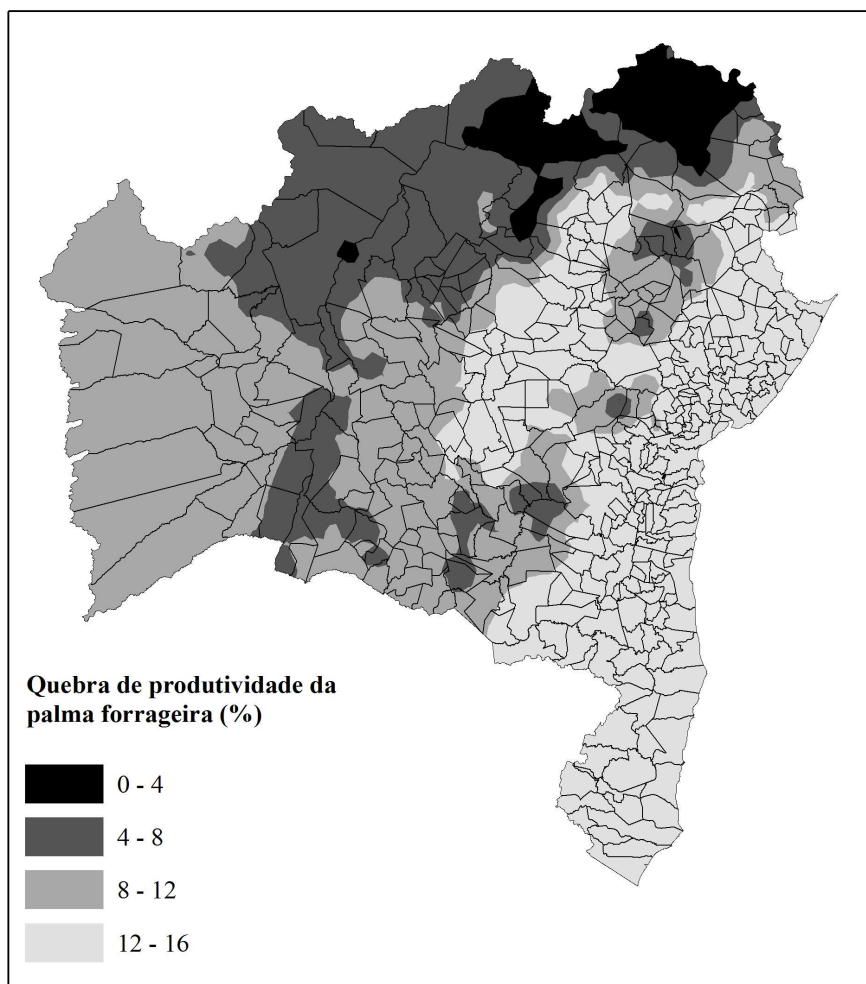
424 **Figura 1.** Distribuição espacial dos valores anuais da precipitação pluviométrica (A) e
425 temperatura média do ar (B) para o estado da Bahia.



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



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



434
435 **Figura 4.** Regionalização da quebra da produtividade da palma forrageira estimada para o
436 estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, parametrizado e modificado para a
437 cultura.

438

439

440

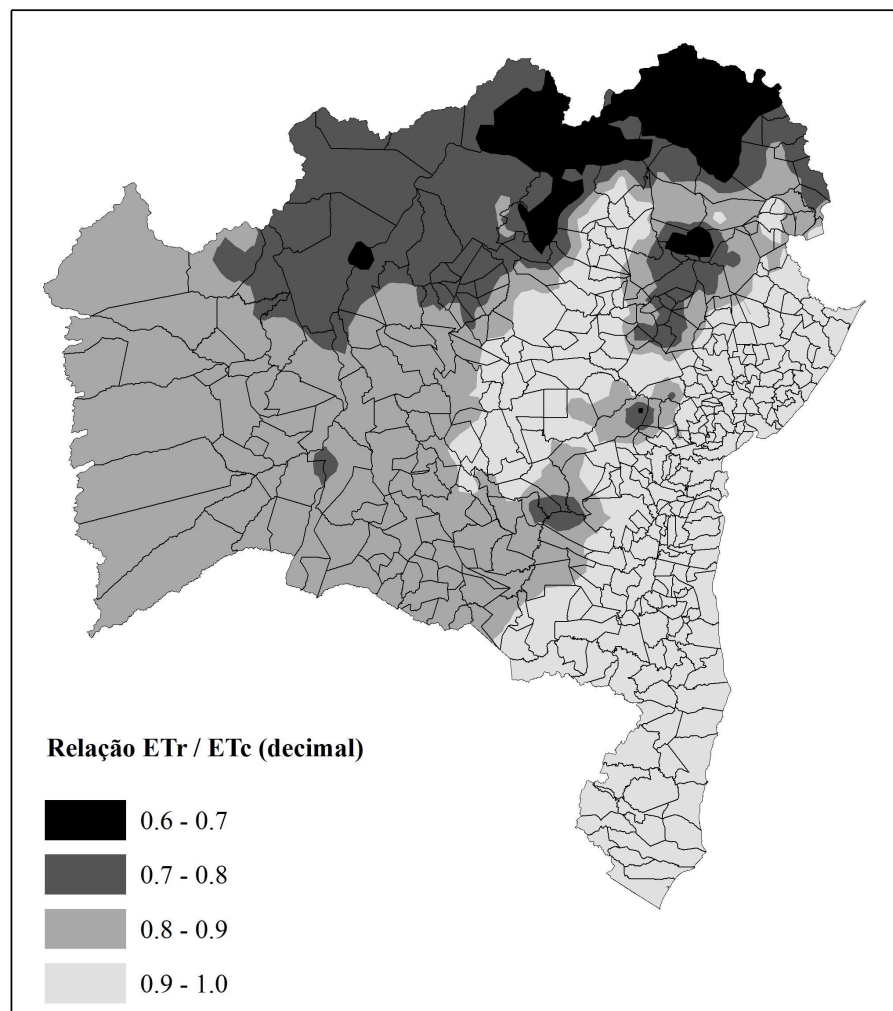
441

442

443

444

445



446

447 **Figura 5.** Regionalização da relação entre a evapotranspiração real (ET_r) e da cultura (ET_c)
448 da palma forrageira, estimadas para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33,
449 parametrizado e modificado para a cultura.

450

451

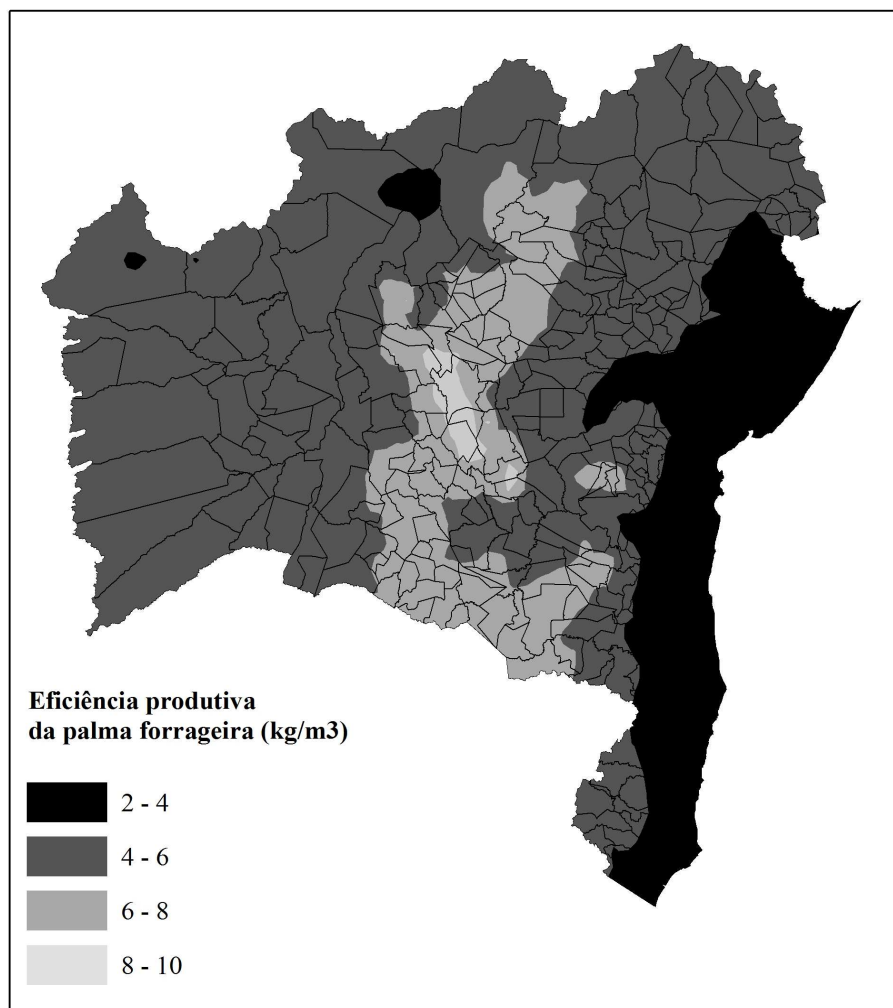
452

453

454

455

456



457

458 **Figura 6.** Regionalização da eficiência produtiva da palma forrageira (kg de matéria seca m⁻³), estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, parametrizado e
459 ³), estimada para o estado da Bahia por meio do Modelo ZAE/FAO-33, parametrizado e
460 modificado para a cultura.

461

462

463

464

465

466

467

3. CONCLUSÃO GERAL

O modelo da Zona Agroecológica – ZAE pode auxiliar o agricultor na tomada de decisão, uma vez que possibilita estimar a produtividade potencial e a quebra do rendimento das diversas culturas. Para o caso específico da palma forrageira, o modelo ZAE original da FAO apresentou baixo desempenho na simulação da produtividade, necessitando a modificação dos parâmetros de correção (índice de área do cladódio - C_{IAC} e da respiração - C_R), sobretudo do C_{IAC} , que proporcionou menores erros relativos de estimativa da produtividade em base fresca e seca. Estes parâmetros estão diretamente ligados às respostas de captação atmosférica de dióxido de carbono e da temperatura do ar. Além disso, é necessário adotar as equações do agrupamento do processo fotossintético C3 de inverno, de modo a se obter melhores estimativas de produtividade da cultura.

Após a aplicação das modificações dos parâmetros no modelo ZAE FAO-33, com a estimativa da produtividade da palma forrageira foi possível verificar as variações espaciais do potencial produtivo das diferentes regiões da Bahia, identificando a baixa quebra do rendimento no Estado. Foi constatado também que os municípios situados no Centro e Centro Sul do Estado são àqueles que favorecem as maiores eficiências produtivas, em decorrência dos regimes térmicos e hídricos mais adequados para a cultura. 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 ótimos desempenhos produtivos.

4. BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, J. de. A palma forrageira na região semiárida do estado da Bahia: diagnóstico, crescimento e produtividade. 2011. 95p. Tese (Doutorado) – UFRB, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Estudos de FAO: Irrigação e Drenagem, 33, Campina Grande: UFPB, 1994. 306p.

DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SANTOS, M.V.F. dos. Exigências nutricionais da palma forrageira. In: MENEZES, R. S. C. et al. (eds). A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005, p.105-127.

DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; SANTOS, M.V.F.; LIRA, M. de A.; SANTOS, D.C.; FARIAS, I.; LIMA, L.E.; FERREIRA, R.L.C. Productivity of *Opuntia ficus-indica* (L) Miller under different N and P fertilization and plant population in north-east Brasil. *Journal of Arid Environments*, v. 67, n. 3, p. 357-372, 2006.

FALCÃO, H. M.; OLIVEIRA, M. T.; MERGULHÃO, A. C.; SILVA, M. V.; SANTOS, M. G. Atividade de PEP carboxilase e acúmulo de acidez noturna em genótipos de *Opuntia ficus-indica*. 2º Congresso brasileiro de palma e outras cactáceas. Resumos... Garanhuns-PE, Out, 2011.

HAN, H.; FELKER, P. Field validation of water-use efficiency of the CAM plant *Opuntia ellisiana* in south Texas. *Journal of Arid Environments*, v.36, p.133-148, 1997.

HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G.; FARIA, R. T. de. Determination of spatial water requirements at country and regional levels using crop models and GIS. An example for the state of Parana, Brazil. *Agricultural Water Management*, v.52, p.177-196, 2002.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. *Agricultural Forest Meteorology*, v.103, p.137–157, 2000.

IGBADUN, H.E.; MAHOO, H.F.; TARIMO, ANDREW K.P.R.; BAANDA A. S. Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub-catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania. *Agricultural Water Management*, v. 85, p.141-150, 2006.

KEATING, B.A.; ROBERTSON, M.J.; MUCHOW, R.C.; HUTH, N.I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Research*, v.61, p.253-271, 1999.

KO, J.; PICCINNI, G. Corn yield responses under crop evapotranspiration-based irrigation management. *Agricultural Water Management*, v.96, p.799-808, 2009.

LIU, F.; STÜTZEL, H. Biomass partitioning, specific leaf area, and water use efficiency of vegetable amaranth (*Amaranthus* spp.) in response to drought stress. *Scientia Horticulturae*, v.102, p.15-27, 2004.

LISSON, S. N.; INMAN-BAMBER, N. G.; ROBERTSON, M. J.; KEATING, B.A. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. *Field Crops Research*, v.92, p.321–335, 2005.

NOBEL, P.S. *Biologia ambiental*. In: *Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira*. Traduzido por SEBRAE/PB. João Pessoa: SEBRAE/PB, 2001. p. 36-48.

OLESEN, J. E.; BINDI, M. Review: Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, v.16, p.239–262, 2002.

OLIVEIRA, F.T. de. Crescimento do sistema radicular da *Opuntia fícus -indica* (L.) Mill (palma forrageira) em função de arranjos populacionais e adubação fosfatada. 76f. Dissertação (Pós-Graduação em Zootecnia – Sistemas Agrosilvipastoris no Semiárido). Universidade Federal de Campina Grande, Patos – PB, 2008.

MOURA, M. S. B.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F.; SILVA SÁ, I. I. Zoneamento Agroclimático da Palma Forrageira para o Estado de Pernambuco. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. Documentos 242. 28p.

PORTER, C.H.; BRAGA, R.; JONES, J.W. An approach for modular crop model development. Gainesville, Florida: Agricultural and Biological Engineering Department, University of Florida. 1999. 15p.

PUPPALA, N. FOWLER, J. L.; JONES, T. L.; GUTSCHICK, V.; MURRAY, L. Evapotranspiration, yield, and water-use efficiency responses of *Lesquerella fendleri* at different growth stages. *Industrial Crops and Products*, v.21, p.33-47, 2005.

RINALDI, M.; VENTRELLA, D.; GAGLIANO, C. Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using CROPGRO model. A case study from Southern Italy. *Agricultural Water Management*, v.87, p.91-105, 2007.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Enrolamento e expansão das folhas de milho submetidas a déficit hídrico em diferentes solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 1-6, 1998.

SANTOS, D. C.; FARIAS, I.; LIRA, M. A.; SANTOS, M. V. F.; ARRUDA, G. P.; COELHO, R. S. B.; DIAS, F. M.; MELO, J. N. Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em Pernambuco. Recife: IPA, 2006. 48p. (IPA. Documentos, 30).

SAMPAIO, E. V. S. B. Fisiologia da Palma. A palma do Nordeste do Brasil: Conhecimento atual e novas perspectivas de uso. Editores: Rômulo S. Menezes,

Diogo A. Simões, Everardo V. S. B. Sampaio. – Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2005, 258p.

SILVA, T. G. F.; ZOLNIER, S.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C. Estimativa e espacialização da umidade relativa do ar para os estados de Alagoas, Bahia e Sergipe. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 15, p.14-28, 2007.

SOLER, C. M. T; SENTELHAS, P. C.; HOOGENBOOM, G. 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*, v.27, p.165–177, 2007.

VIEIRA, E. D. Adição de fibra em dietas contendo palma; forrageira (*Opuntia fícus* índica Mill) para caprinos. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2006. Tese (Doutorado em Zootecnia) Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2006.

YUN, J. I. Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. *Agricultural System*, v.77, p.23-38, 2003.